

**SKRIPSI**

**PENGARUH TINGGI DASAR GANDA TERHADAP KEKUATAN KAPAL  
*DOUBLE HULL TANKER***

Disusun dan diajukan oleh

**INDAH MELATI SUCI**

**D081 17 1009**



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2021

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**  
**PENGARUH TINGGI DASAR GANDA TERHADAP KEKUATAN KAPAL**  
**DOUBLE HULL TANKER**

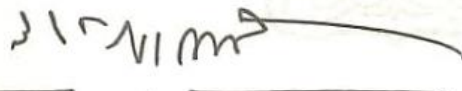
Disusun dan diajukan oleh  
**INDAH MELATI SUCI**  
**D081 17 1009**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas  
Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 23 Februari 2021 dan  
dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

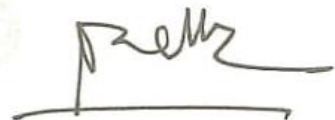
Menyetujui,

Pembimbing utama,

Pembimbing Pendamping,



**Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D.**  
**NIP.197606062005011003**



**Ir. Juswan, ST., MT.**  
**NIP. 196212311989031031**

Ketua Program Studi



**Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.**  
**NIP.196908021997021001**

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Indah Melati Suci  
NIM : D081171009  
Program Studi : Teknik Kelautan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul  
"Pengaruh Tinggi Dasar Ganda Terhadap Kekuatan Kapal *Double Hull*  
*Tanker*"

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

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

Gowa, 26 Februari 2021

Yang menyatakan,



Indah Melati Suci

## ABSTRAK

**INDAH MELATI SUCI.** *Pengaruh Tinggi Dasar Ganda Terhadap Kekuatan Kapal Double Hull Tanker* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Juswan**).

Kekuatan kapal *double hull tanker T4* merupakan salah satu aspek penting yang harus dianalisis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tinggi dasar ganda terhadap kekuatan kapal *double hull tanker T4*, dalam bentuk tegangan pada bagian *deck* dan *bottom* saat kondisi *sagging* maupun *hogging* menurut aturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *International Association of Classification Societies (IACS)*. Analisa perbandingan kekuatan batas dilakukan dengan menggunakan metode *Non Linear Finite Element Analysis (NLFEA)*. Dalam hal ini objek penelitian adalah daerah *midship* kapal *double hull tanker T4* dalam satu jarak gading. Pengaruh perbedaan tinggi dasar ganda menyebabkan posisi sumbu netral pada kapal *double hull tanker T4* berbeda. Posisi sumbu netral menurut aturan IACS lebih dibawah dibandingkan kondisi normal dan menurut aturan BKI. Perbedaan posisi sumbu netral mempengaruhi tegangan yang bekerja pada bagian *deck* dan *bottom*. Tegangan kerja pada kapal *double hull tanker T4* pada kondisi *sagging* di *bottom* sebesar  $400,917 \text{ N/mm}^2$  dan di *deck* sebesar  $-284,819 \text{ N/mm}^2$ , pada kondisi *hogging* di *bottom* sebesar  $-400,706 \text{ N/mm}^2$ , di *deck* sebesar  $304,942 \text{ N/mm}^2$ . Tegangan kerja menurut aturan BKI pada kondisi *sagging* di *bottom* sebesar  $427,578 \text{ N/mm}^2$  dan di *deck* sebesar  $-390,757 \text{ N/mm}^2$ , pada kondisi *hogging* di *bottom* sebesar  $-387,226 \text{ N/mm}^2$ , di *deck* sebesar  $296,871 \text{ N/mm}^2$ . Tegangan kerja menurut aturan IACS pada kondisi *sagging* di *bottom* sebesar  $220,860 \text{ N/mm}^2$  dan di *deck* sebesar  $-339,294 \text{ N/mm}^2$ , pada kondisi *hogging* di *bottom* sebesar  $-397,541 \text{ N/mm}^2$ , di *deck* sebesar  $294,704 \text{ N/mm}^2$ .

Kata kunci: *double hull tanker*, tinggi dasar ganda, *sagging*, *hogging*, NLFEA, kekuatan batas.

## **ABSTRACT**

**INDAH MELATI SUCI.** *The Effect of Double Bottom Height on the Strength of Double Hull Tanker Ships (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Juswan**)*

*The strength of the double hull tanker T4 is an important aspect that must be analyzed. This study aims to analyze the effect of double bottom height on the strength of the double hull T4 tanker, in the form of stress on the deck and bottom during sagging and hogging conditions according to the rules of the Indonesian Classification Bureau (BKI) and the International Association of Classification Societies (IACS). Comparative analysis of limit strength was carried out using the NonLinear Finite Element Analysis (NLFEA) method. In this case the object of research is the midship area of the double hull tanker T4 in one ivory distance. The effect of double bottom height difference causes the neutral axis position on the double hull tanker T4 to be different. The position of the vertical axis according to the IACS rules is below normal conditions and according to the BKI rules. The difference in the position of the neutral axis affects the stress acting on the deck and bottom. The working voltage on the double hull tanker T4 at sagging conditions at the bottom is 400,917 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is -284,819 N/mm<sup>2</sup>, in hogging conditions at the bottom of -400,706 N/mm<sup>2</sup>, on the deck at 304,942 N/mm<sup>2</sup>. Working voltage according to BKI rules at sagging conditions at the bottom is 427,578 N/mm<sup>2</sup> and on decks of -390,757 N/mm<sup>2</sup>, in hogging conditions at the bottom of -387,226 N/mm<sup>2</sup>, on decks of 296,871 N/mm<sup>2</sup>. The working voltage according to IACS rules on sagging conditions at the bottom is 220,860 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is -339,294 N/mm<sup>2</sup>, in the hogging condition at the bottom is -397,541 N/mm<sup>2</sup>, on the deck is 294,704 N/mm<sup>2</sup>.*

*Keywords: double hull tanker, double bottom height, sagging, hogging, NLFEA, ultimate strength*

## PRAKATA

*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 TINGGI DASAR GANDA TERHADAP KEKUATAN KAPAL  
*DOUBLE HULL TANKER*"

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Andika. S** dan Ibu **Mardia** 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 utama 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 pendamping 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. Taufiqur Rachman, ST., MT.** selaku Ketua Program Studi Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.

4. Bapak **Ashury, ST., MT.** selaku penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga saya dapat menyelesaikan studi.
5. **Dosen–Dosen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
6. **Tenaga Kependidikan Program Studi Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
7. **Teman-teman Mahasiswa khususnya Teknik Kelautan 2017** 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 dan dinda-dinda Junior atas motivasi dan dukungannya.
8. Teman-teman **KKN UNHAS GEL 105** Posko Bontoala, Gunung Sari, Makassar, Mamajang yang telah memberikan pengalaman yang berharga dalam masa pengabdian kami ber-KKN di masa pandemi Covid-19.

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, 22 Februari 2021

Indah Melati Suci

## DAFTAR ISI

PRAKATA .....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR NOTASI .....	xiii
DAFTAR ISTILAH.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	3
1.6. Sistematika Penulisan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1. Kapal Tanker .....	6
2.1.1 <i>Oil Tanker</i> .....	6
2.1.2 <i>Chemical Tanker</i> .....	6
2.1.3 <i>Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker</i> .....	7
2.2. Konstruksi Kapal Tanker .....	8
2.2.1. Konstruksi <i>Single Hull (SH)</i> .....	9
2.2.2. Konstruksi <i>Double Hull</i> .....	11
2.2.3. Tinggi Dasar Ganda ( <i>Double Bottom</i> ) .....	14
2.3. Momen Lentur dan Gaya Geser.....	17
2.4. Deformasi Material.....	21
2.5. Hubungan Tegangan dan Regangan .....	22
2.6. Kekuatan Batas Kapal Tanker ( <i>Ultimate Strength</i> ).....	30
2.7. Metode <i>NonLinear Finite Element Analysis (NLFEA)</i> .....	32
2.8. Pembebanan <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	36
BAB III METODE PENELITIAN .....	39



3.1. Jenis Penelitian.....	39
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian .....	39
3.3. Penyajian Data .....	39
3.4. Analisa Data .....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1. Perhitungan Momen Lentur – Batas Vertikal .....	45
4.2. Tegangan Izin .....	46
4.3. Deformasi .....	50
4.4. Perbandingan Kekuatan Kapal <i>Double Hull Tanker</i> .....	59
BAB V PENUTUP .....	62
5.1. Kesimpulan .....	62
5.2. Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA .....	63
LAMPIRAN .....	66

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kapal <i>Oil Tanker</i> .....	6
Gambar 2.2. Kapal <i>Chemical Tanker</i> .....	7
Gambar 2.3. Kapal <i>LNG Tanker</i> .....	7
Gambar 2.4. Konstruksi Kapal Tanker .....	9
Gambar 2.5. <i>Single Hull Tanker</i> .....	10
Gambar 2.6. Kapal <i>double hull tanker</i> dengan dua sekat memanjang .....	12
Gambar 2.7. Kapal <i>double hull tanker</i> dengan satu sekat memanjang.....	12
Gambar 2.8. <i>Double Hull</i> (Bachman, 1998) .....	125
Gambar 2.9. Dasar Berganda Kerangka Melintang .....	47
Gambar 2.10. Dasar Berganda Kerangka Membujur.....	48
Gambar 2.11. Distribusi beban ( <i>load diagram</i> ), gaya geser ( <i>shear force</i> ) terhadap momen lentur ( <i>bending moment</i> ) .....	49
Gambar 2.12. Perubahan momen lentur pada tongkang persegi panjang kondisi air tenang .....	20
Gambar 2.13. Momen lentur gelombang pada gelombang reguler .....	21
Gambar 2.14. Momen lentur ketika air tenang dan bergelombang .....	22
Gambar 2.15. Jenis-jenis tegangan.....	26
Gambar 2.16. Diagram tegangan-regangan baja .....	27
Gambar 2.17. Tegangan Tarik.....	30
Gambar 2.18. Tegangan Tekan .....	32
Gambar 2.19. Grafik Kekuatan momen lentur dan kelengkungan.....	34
Gambar 2.20. Kondisi syarat batas untuk kontrol kelengkungan .....	37
Gambar 2.21. Model material <i>bilinear isotropic hardening</i> .....	39
Gambar 2.22. Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal (Shama, 2013) .....	40
Gambar 2.24. Faktor distribusi .....	41
Gambar 2.25. Momen lentur vertikal akibat gelombang.....	41
Gambar 3.1. Konfigurasi penampang kapal tanker tipe T4.....	44
Gambar 4.1. Grafik Momen kelengkungan hull girder tanker T4.....	50

Gambar 4.2. Deformasi kekuatan-batas <i>hull girder</i> kondisi utuh <i>hogging</i>	51
Gambar 4.3. Deformasi kekuatan-batas <i>hull girder</i> kondisi utuh <i>sagging</i>	52
Gambar 4.4. Grafik Momen kelengkungan hull girder tanker T4 BKI	.....53
Gambar 4.5. Deformasi kekuatan-batas <i>hull girder</i> T4 BKI <i>hogging</i>	.....54
Gambar 4.6. Deformasi kekuatan-batas <i>hull girder</i> T4 BKI <i>sagging</i>	.....55
Gambar 4.7. Grafik Momen kelengkungan hull girder tanker T4 IACS	.....56
Gambar 4.8. Deformasi kekuatan-batas <i>hull girder</i> T4 IACS <i>hogging</i>	.....57
Gambar 4.9. Deformasi kekuatan-batas <i>hull girder</i> T4 IACS <i>sagging</i>	.....58
Gambar 4.10. Grafik momen-kelengkungan T4, T4 BKI dan T4 IACS	.....60

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. <i>Modulus Young</i> pada material.....	29
Tabel 2.2. Spesifikasi material .....	38
Tabel 3.1. Konfigurasi material <i>stiffenner</i> .....	44
Tabel 4.1. Formula Perhitungan momen lentur batas vertikal .....	49
Tabel 4.2. Momen lentur batas vertikal <i>sagging</i> dan <i>hogging</i> tanker T4 ..	49
Tabel 4.3. Tegangan izin material.....	50
Tabel 4.4. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal tanker T4 .....	51
Tabel 4.5. <i>Deck</i> pada kondisi <i>sagging</i> .....	52
Tabel 4.6. <i>Bottom</i> pada kondisi <i>sagging</i> .....	52
Tabel 4.7. <i>Deck</i> pada kondisi <i>hogging</i> .....	53
Tabel 4.8. <i>Bottom</i> pada kondisi <i>hogging</i> .....	54
Tabel 4.9. Kekuatan batas kapal <i>Double Hull Tanker</i> T4.....	55
Tabel 4.10. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal tanker .....	57
Tabel 4.11. Kekuatan batas <i>kapal double hull</i> tanker T4 BKI .....	58
Tabel 4.12. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal tanker .....	60
Tabel 4.13. Kekuatan batas kapal <i>double hull tanker</i> T4 IACS .....	61
Tabel 4.14. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal tanker .....	63
Tabel 4.15. Kekuatan batas momen lentur kapal tanker T4, T4 BKI, T4 IACS .....	64

## DAFTAR NOTASI

B	= Lebar kapal	(mm)
b	= lebar kerusakan akibat kandas	(mm)
$b_x$	= gaya apung	(N)
C	= koefisien momen lentur	
$C_b$	= koefisien blok kapal	
D	= tinggi kapal	(mm)
E	= modulus elastisitas	(N/mm <sup>2</sup> )
$F_x$	= gaya geser arah sumbu x	N
h	= tinggi kerusakan akibat tubrukan	(mm)
I	= inersia penampang	(mm <sup>4</sup> )
$I_{min}$	= inersia Ijin	(mm <sup>4</sup> )
$K_M$	= faktor distribusi	
l	= panjang kerusakan akibat tubrukan / kandas	(mm)
L	= panjang kapal	(mm)
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	(mm <sup>3</sup> )
$S_b$	= modulus penampang bagian <i>bottom</i>	(mm <sup>3</sup> )
$S_d$	= modulus penampang bagian <i>deck</i>	(mm <sup>3</sup> )
$S_p$	= modulus penampang ijin	(mm <sup>3</sup> )
Z	= jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur	(mm)
$Z_b$	= jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur <i>bottom</i>	(mm)
$Z_d$	= jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur <i>deck</i>	(mm)
$\sigma$	= tegangan lentur	(N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_p$	= tegangan lentur ijin	(N/mm <sup>2</sup> )

## DAFTAR ISTILAH

- ANSYS* : *Software* yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
- BKI* : Biro Klasifikasi Indonesia
- IACS* : International Association of Classification Societies
- Defleksi : Perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertical yang diberikan pada balok atau batang
- Deformasi : Perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah objek karena pengaruh gaya
- Mesh* : Membagi Struktur menjadi bagian-bagian kecil
- Modulus Elastisitas : Sebuah ukuran yang digunakan untuk merepresentasikan kekakuan suatu bahan.
- Modulus Geser : Satu dari beberapa kuantitas untuk pengukuran kekakuan suatu bahan
- Momen : Sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi.
- Run* : Menjalankan program untuk menghitung hasil analisis
- Tanker T4* : Type kapal tanker Aframax dengan konfigurasi material penampang hull girder terlampir pada lampiran 2.
- Software* : Istilah khusus untuk data yang diformat dan disimpan secara digital, termasuk program komputer, dokumentasinya dan berbagai informasi yang bisa dibaca dan bisa ditulis oleh komputer.
- Tensile Strength* : Tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah bahan ketika diregangkan atau ditarik, sebelum bahan tersebut patah

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Jalur laut yang semakin padat dan kecepatan kapal menjadi lebih tinggi, maka ada kemungkinan potensi kecelakaan kapal yang disebabkan oleh kandas atau tubrukan dapat terjadi selama kapal beroperasi. Saat kapal mengalami tubrukan atau kandas, penetrasi pada bagian sisi dan bawah kapal dapat mengalami kerugian ekonomi dan potensi kerusakan lingkungan yang parah. Selama dua dekade terakhir, struktur lambung dan dasar ganda telah menjadi standar yang disepakati secara internasional untuk kapal *double hull tanker* dimana dapat mengurangi tumpahan minyak akibat kecelakaan tubrukan atau kandas. Hasil empiris menunjukkan bahwa kapal *double hull tanker* dikaitkan dengan jumlah tumpahan minyak yang lebih sedikit dari yang lambung tunggal.

Struktur *double hull* telah banyak diterapkan dalam desain sisi dan bawah kapal. Dalam peristiwa tubrukan, struktur lambung ganda dari kapal bertabrakan dapat mengalami deformasi plastik besar dan fraktur. Secara khusus, kapal tanker yang terlibat dalam rilis kecelakaan minyak mentah atau produk minyak bumi ke laut, mengakibatkan kerugian ekonomi yang parah dan potensi kerusakan lingkungan. Dalam urutan untuk mencegah tumpahan minyak dari tangki yang pecah, pecahnya bagian dalam lambung harus dihindari. Dengan demikian, perlu untuk dapat mengevaluasi akurat dampak resistensi lambung ganda kapal di pra-desain awal strukturnya, tidak hanya melibatkan kasus terburuk, tetapi juga peristiwa tabrakan kecil lainnya yang mungkin dialami kapal selama layanan.

Struktur lambung ganda mencakup tiga bingkai jarak di sepanjang arah longitudinal dan dua *stringer* jarak di sepanjang arah vertikal. Dalam simulasi, nonlinear perilaku material untuk ukuran mesh yang dipilih, terutama kurva tegangan-regangan utuh dan regangan fraktur, ditentukan

secara analitik. Komponen struktur paling penting dalam lambung ganda adalah struktur panel yang kaku dan gading utama.

Saat ini beberapa kemajuan telah dibuat untuk meningkatkan persyaratan *scantling* saat ini dan mendefinisikan prosedur analisis keandalan yang lebih baik dalam kondisi kerusakan, seperti yang ditunjukkan oleh Aturan dan Pedoman baru yang disediakan oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *International Association of Classification Societies* (IACS).

Para ahli di bidang perkapalan dan bangunan lepas pantai sudah banyak melakukan penelitian tentang *double hull* dan *double bottom* (dasar ganda) kapal tanker dengan menggunakan metode *NonLinear Finite Element Analysis* (NLFEA). Metode analitik untuk menilai struktur lambung ganda pada kapal dengan benturan oleh Bin Liu (2017). Penilaian kekuatan struktur sisi lambung ganda pada kapal tanker tabrakan kapal kecil oleh Bin Liu (2016). Kendala bersyarat dari pengangkut curah yang rusak karena tabrakan kapal oleh Campanile (2018). Pengembangan prosedur berorientasi desain sederhana untuk memprediksi kerusakan tabrakan struktur perlindungan tanker oleh Cho & Paul (2017). Penilaian keandalan lambung girder untuk kapal tanker oleh Chen (2016). Analisa kekuatan batas *hull girder* berdasarkan hasil eksperimen dan teori dimensional oleh Garbatov (2015). Investigasi kekuatan penumpu lambung kapal dengan alasan kerusakan oleh Muis-Alie (2018). Pengaruh konfigurasi simetris dan asimetris bentuk analisa kekuatan *buckling* dan kekuatan *fatigue* tetap pada *platform offshore* oleh Muis-Alie (2017). Analisa kekuatan sisa dari *hull girder* yang rusak secara asimetris dengan metode elemen hingga oleh Muis-Alie (2016). Analisa progresif dari unsur lokal dan kekuatan ultimasi kapal Ro-Ro oleh Muis-Alie & Latumahina (2019). Menganalisis kekuatan gider hull kapal pada kerusakan *grounding* oleh Muis-Alie (2018). Sisa analisis kekuatan akhir tanker minyak pada lambung ganda setelah tabrakan oleh Parunov & Rudan (2017). Tinjau eksperimen dan prosedur



perhitungan untuk tabrakan kapal dan kerusakan landasan oleh Bin Liu (2018). Analisis kekuatan kapal *container* yang utuh dan rusak yang dikenakan beban lentur asimetris oleh Tekgoz (2018).

Berdasarkan latar belakang di atas, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan *double hull tanker* dan analisa kekuatan menjadi latar belakang dalam pengerjaan tugas akhir ini dengan penelitian tentang Pengaruh tinggi dasar ganda terhadap kekuatan kapal *double hull tanker*.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh tinggi dasar ganda terhadap kekuatan kapal *double hull tanker* dengan membandingkan aturan menurut Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *International Association of Classification Societies* (IACS).

## **1.3. Batasan Masalah**

Agar penelitian dapat terarah sesuai dengan kerangka yang direncanakan, maka penelitian dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut:

1. Beban yang bekerja yaitu momen lentur *vertikal longitudinal* (*hogging* dan *sagging*)
2. Tidak meneliti kekuatan melintang

## **1.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh tinggi *double hull bottom* (dasar ganda) terhadap kekuatan kapal *double hull tanker* menurut aturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *International Association of Classification Societies* (IACS) dalam bentuk tegangan yang bekerja di *deck* dan *bottom* pada kondisi *hogging* dan *sagging*.

## **1.5. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian pengaruh tinggi *double hull bottom* (dasar ganda) terhadap kekuatan kapal *double hull tanker* menurut aturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *International Association of*

*Classification Societies* (IACS) ini adalah:

1. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya mengetahui pengaruh tinggi dasar ganda pada kapal *double hull tanker*.
2. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kepada perusahaan-perusahaan.
3. Sebagai informasi dalam hal menentukan kebijakan dalam hal regulasi/peraturan pada Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *Internasional Assocoaton of Classification Society* (IACS).

### **1.6. Sistematika Penulisan**

Untuk mendapatkan alur penulisan yang jelas dan sistematis sekaligus memungkinkan pembaca dapat menginterpretasikan hasil tulisan secara tepat, maka tugas akhir ini disusun menjadi beberapa bagian, yaitu:  
BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang permasalahan atau alasan yang mendasari penulis dalam melakukan penelitian mengenai analisis perbandingan kekuatan batas *double hull tanker* menurut regulasi Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *International Association of Classification Societies* (IACS). Selain itu berisi juga mengenai perumusan masalah yang akan dianalisis, batasan masalah penelitian yang tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini karena keterbatasan alat bantu dan juga membatasi agar penelitian lebih spesifik juga dalam bab ini terdapat tujuan dari penelitian dan manfaat penelitian yang dapat diambil dari penelitian ini serta sistematika penulisan skripsi.

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi kajian pustaka yang mendukung permasalahan yang dihadapi berupa teori-teori dasar mengenai gambaran umum kapal tanker dan jenis-jenisnya, mengenai konstruksi kapal tanker, teori tentang cara menganalisis kekuatan batas kapal tanker dan metode *Finite Element Analysis* kekuatan di *Ansys* serta cara perhitungan beban yang diterima

struktur kapal tanker ketika mengalami kondisi *hogging* ataupun *sagging*.

### BAB III Metode Penelitian

Bab ini berisi jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, objek penelitian yaitu penampang midship pada kapal *double hull tanker*, jenis dan sumber data dimana penelitian ini bersifat kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta penampilan dari hasilnya dengan melakukan investigasi untuk mendapatkan nilai kekuatan batas kapal *double hull tanker* dan mengetahui perbandingan anantara metode smith dan FEM pada struktur kapal *double hull tanker* dan data yang digunakan adalah data dari rancangan muis-alie *et al*, 2012 dan kerangka alur pemikiran.

### BAB IV Pembahasan

Bab ini berisi pembahasan tentang investigasi kekuatan batas kapal *double hull tanker*, mulai dari dimensi kapal yang digunakan, material, gambar penampang kapal *double hull tanker* yang diteliti dan juga berupa hasil investigasi kekuatan batas menggunakan *software ANSYS* berupa nilai momen yang bekerja pada kondisi *hogging* dan *sagging*, nilai tegangan kerja pada penampang kapal dan perbandingan kekuatan batas kapal *double hull tanker* menggunakan metode FEM.

### KESIMPULAN

Bab ini merupakan penutup dari keseluruhan dari isi penelitian yang mencakup kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dibahas pada bab-bab sebelumnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Kapal Tanker

Kapal tanker merupakan alat transportasi yang dispesifikasikan untuk mengangkut muatan minyak, tidak hanya dari tempat pengeboran menuju darat, namun tanker juga digunakan untuk sarana angkut perdagangan minyak antar pelabuhan atau antar negara. Kapal tanker memiliki karakteristik khusus yang berbeda dengan kapal lainnya. Kapal Tanker adalah kapal yang menetapkan standar keselamatan yang sangat tinggi mengingat muatan yang dibawanya sangat berbahaya.

##### 2.1.1. Oil Tanker

*Oil Tanker* adalah jenis kapal tanker yang dibangun atau disesuaikan untuk mengangkut minyak curah. Ada 2 jenis *oil tanker*, yaitu *Crude Tanker* dan *Product Tanker*. *Crude Tanker* adalah tanker 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*. Adapun contoh kapal *oil tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.1 sebagai berikut.



Gambar 2.1. Kapal *Oil Tanker* ([liquefiedgascARRIER.com](http://liquefiedgascARRIER.com), 2015)

##### 2.1.2. Chemical Tanker

*Chemical Tanker* adalah jenis kapal tanker yang dirancang untuk

mengangkut bahan kimia. *Chemical Tanker* juga digunakan untuk mengangkut jenis bahan sensitif dengan standar kebersihan tanki yang tinggi seperti minyak nabati, lemak, minyak sawit, soda kaustik, dan metanol. Adapun contoh kapal *Chemical Tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.2 sebagai berikut.



Gambar 2.2. *Chemical Tanker* ([liquefiedgascARRIER.com](http://liquefiedgascARRIER.com), 2015)

### 2.1.3. Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker

*Liquefied Natural Gas* (LNG) Tanker adalah jenis kapal tanker yang dirancang untuk mengangkut muatan gas alam cair. Adapun contoh kapal *Liquefied Natural Gas Tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.3 sebagai berikut.



Gambar 2.3. Kapal LNG *Tanker* ([liquefiedgascARRIER.com](http://liquefiedgascARRIER.com), 2015)

Sedangkan berdasarkan ukurannya, kapal tanker dibagi menjadi 5 yaitu:

1. *Coastal Tanker* dengan ukuran sebagai berikut:

LOA : 205 m

Beam : 29 m  
Draft : 16 m  
Bobot mati : < 50.000 DWT

2. *Aframax* dengan ukuran sebagai berikut:

LOA : 245 m  
Beam : 34 m  
Draft : 20 m  
Bobot mati : 50.001 - 80.000 DWT

3. *Suez-Max* dengan ukuran sebagai berikut:

LOA : 285 m  
Beam : 45 m  
Draft : 23 m  
Bobot mati : 80.001 - 160.000 DWT

4. *VLCC (Very Large Crude Carrier)* dengan ukuran sebagai berikut:

LOA : 350 m  
Beam : 55 m  
Draft : 28 m  
Bobot mati : 160.001 - 300.000 DWT

5. *ULCC (Ultra Large Crude Carrier)* dengan ukuran sebagai berikut:

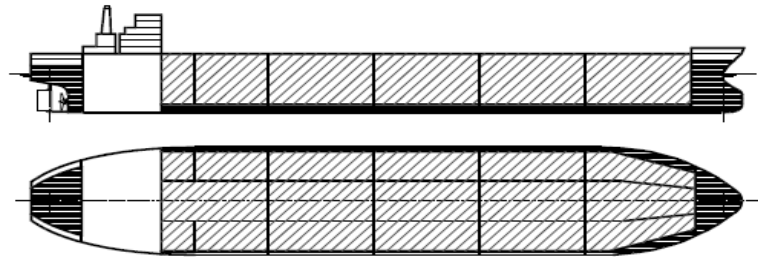
LOA : 415 m  
Beam : 63 m  
Draft : 35 m  
Bobot mati : > 300.000 DWT

## 2.2. Konstruksi Kapal Tanker

Kapal tanker dibuat untuk mengangkut minyak mentah melalui laut atau perairan dari pelabuhan muat atau pelabuhan produksi ke pelabuhan

bongkar/pengolahan dan minyak produk dari pelabuhan pengolahan menuju pelabuhan bongkar / distribusi (Anish, 2017).

Ukuran dari kapal pengangkut minyak mentah biasanya lebih besar dari pengangkut minyak produksi, tetapi dalam pengaturan jaringan pipa-pipanya lebih kompleks (Anish, 2017). Adapun contoh konstruksi kapal tanker dapat dilihat pada Gambar 2.4 sebagai berikut.



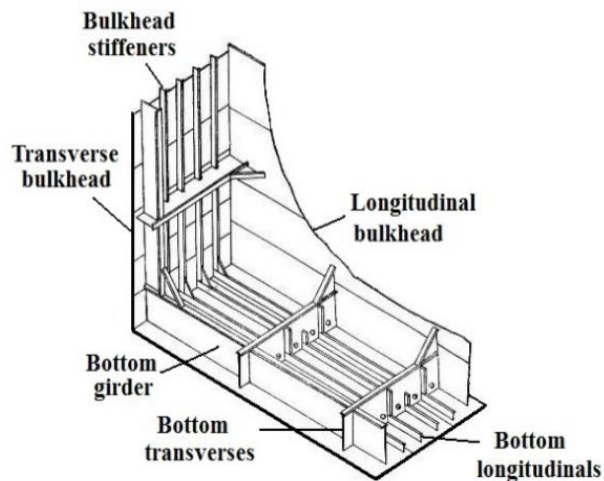
Gambar 2.4. Konstruksi Kapal Tanker (Bachman, 1998)

Faktor-faktor yang mempengaruhi disain dan konstruksi kapal tanker adalah:

1. Safety : Sebagai pengangkut muatan berbahaya.
2. Stabilitas : Muatan cair dalam tanki dapat bergerak bebas.
3. Pencemaran : Dapat terjadi tumpahan minyak di laut.

### 2.2.1. 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*

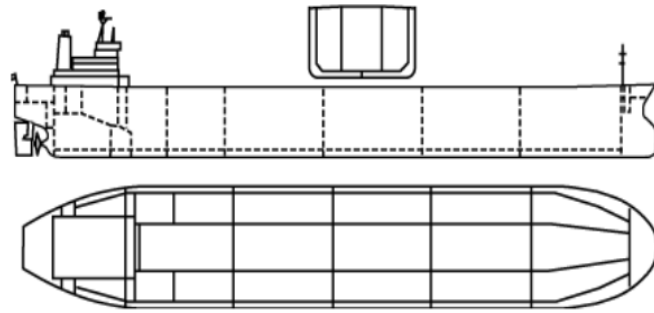
### 3. *Oil Tanker* kategori 3

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).

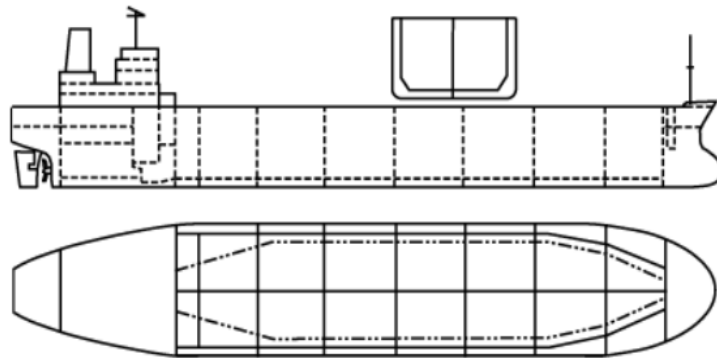
#### **2.2.2. Konstruksi *Double Hull***

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.

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.

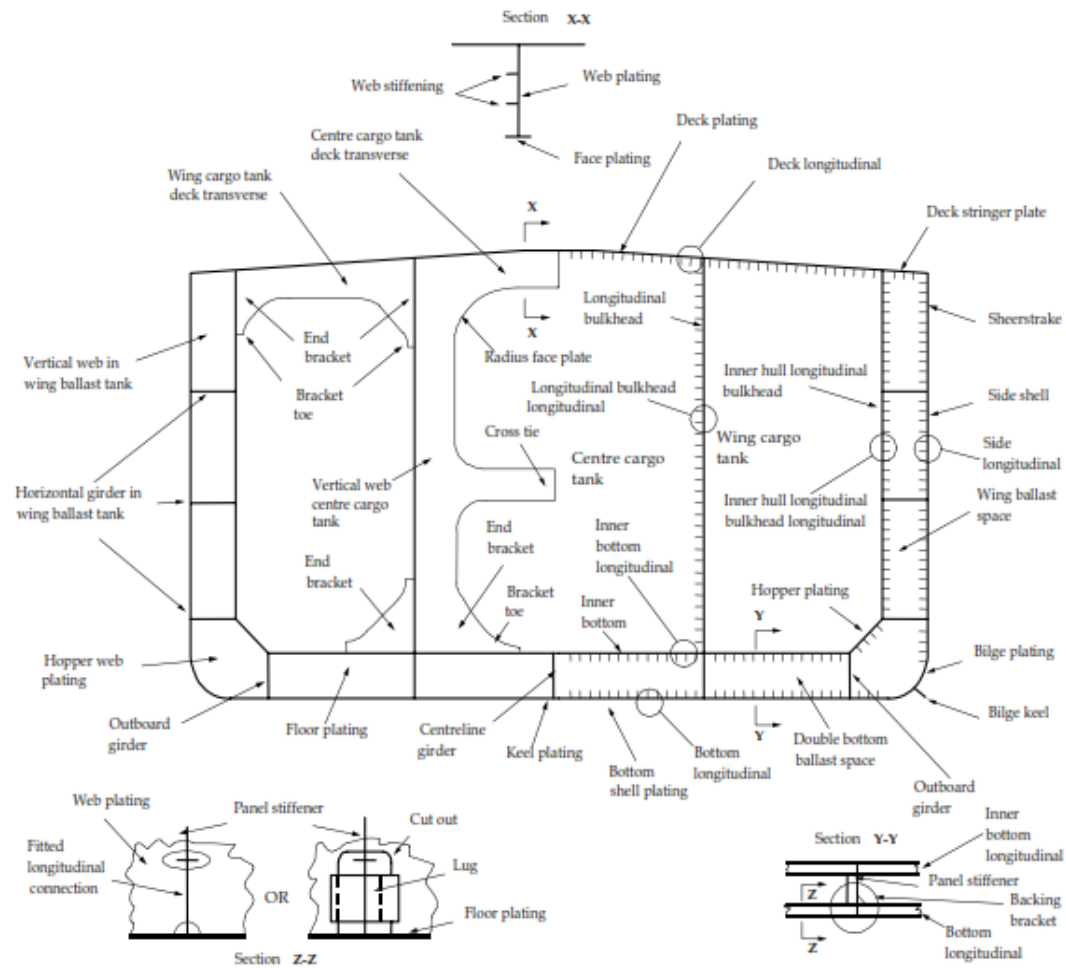


Gambar 2. 6. Kapal *double hull tanker* dengan dua sekat memanjang (IACS, 2007)



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 carreier 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)

### **2.2.3. Tinggi Dasar Ganda (*Doubel Bottom*)**

Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) menentukan aturan bahwa kapal dengan Panjang (L) lebih dari 50 m diharuskan menggunakan alas ganda.

#### **1. Pengertian Dasar Ganda**

Dasar Ganda ialah bagian dari konstruksi kapal yang dibatas,

Bagian bawah	Oleh kulit kapal bagian bawah ( <i>bottom shell plating</i> )
Bagian atas	Oleh plat dasar dalam ( <i>inner bottom plating</i> )
Bagian samping	Oleh lempeng samping ( <i>Margin Plate</i> )
Bagian depan	Oleh sekat kedap air terdepan / sekat pelanggaran ( <i>collision bulkhead</i> )
Bagian belakang	Sekat kedap air paling belakang atau sering disebut sekat ceruk belakang ( <i>after peak bulkhead</i> )

#### **2. Fungsi Dasar Ganda**

- a. Bila kapal kandas dan mengalami kebocoran, masih ada dasar yang kedap air.
- b. Sebagai ruangan muatan cair, air tawar, bahan bakar, ballas.
- c. Membantu stabilitas kapal
- d. Menambah kekuatan melintang kapal

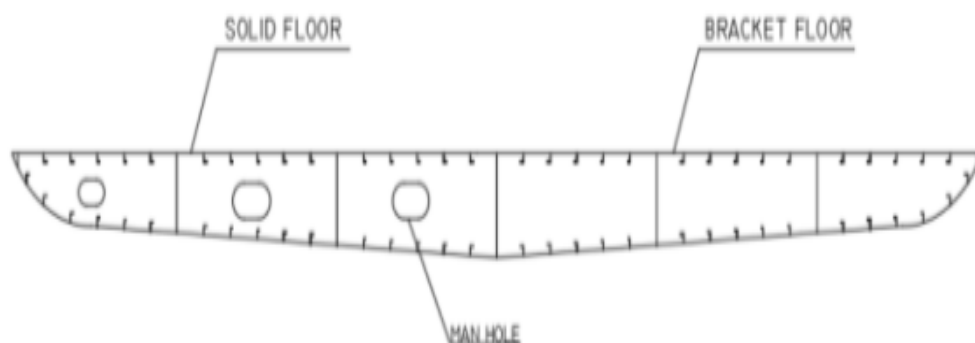
### 3. Konstruksi Dasar Ganda

- a. System konstruksi kerangka melintang dengan *wrang-wrang* penuh dan *wrang-wrang* terbuka.
- b. System konstruksi kerangka membujur dengan *wrang-wrang* penuh dan *wrang-wrang* terbuka.

### 4. Dasar Ganda Kerangka Melintang

- a. Dilengkapi dengan *wrang-wrang* penuh pada setiap gading dibawah kamar mesin.
- b. Jarak antara *wrang* penuh tidak lebih dari 3.05 m diselingi *wrang* terbuka
- c. *Wrang* penuh yang terbentang melintang dari penyanggah tengah sampai lempeng samping pada setiap sisinya diberi lobang peringan.
- d. Pada system kerangka melintang, penyanggah tengah dan lempeng samping tidak terputus.

Dari ciri-ciri di atas lihat Gambar 2.9 berikut ini.

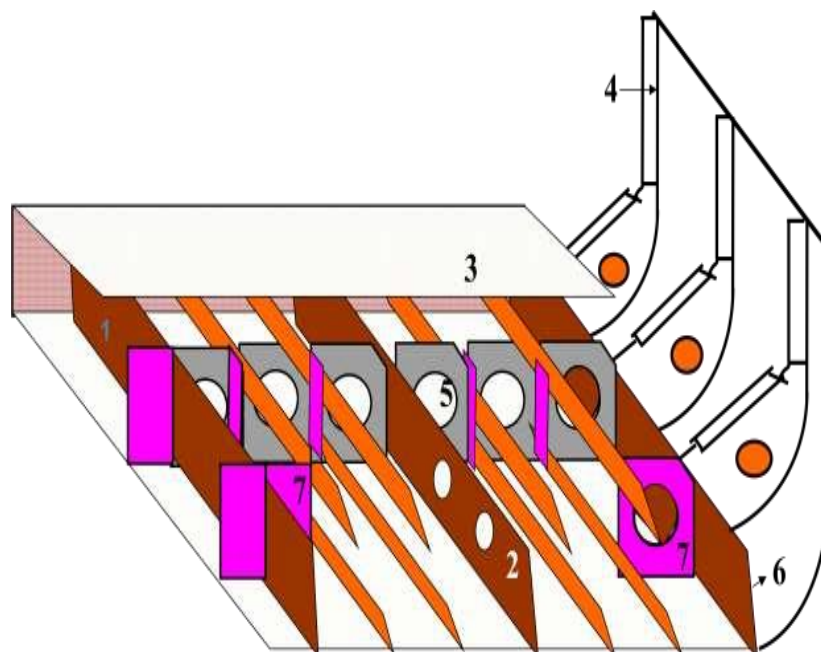


Gambar 2.9. Dasar Berganda Kerangka Melintang

## 5. Sistem Kerangka Membujur

- a. Wrang penuh dipasang dibawah gading-gading kamar mesin, kursi ketel, dinding kedap air dan pada ujung bracket deep tank.
- b. Penyanggah tenah diberi bracket dengan jarak 1.25 meter.
- c. Bila jarak antara sebuah wrang dengan wrang lainnya sampai 12 atau lebih jarak gading, dipasang penguat tegak paling sedikit 100 mm untuk memperkuat longitudinal.
- d. Kapal-kapal yang lebarnya sampai 14–21 m, longitudinals terputus pada wrang kedap air dan sebagai gantinya diberi bracket.
- e. Jarak antara wrang yang satu dengan lainnya tidak lebih 3.7 m, kecuali kapal tersebut diperuntukkan bagi pengangkutan barang-barang berat atau biji-bijian tambang.

Dari ciri-ciri di atas lihat Gambar 2.10 berikut ini.



Gambar 2.10. Dasar Berganda Kerangka Membujur

## 6. Aturan Mengenai Tinggi Dasar Ganda (*Double Bottom*)

a. Menurut BKI

Apabila diperlukan dasar ganda untuk dipasang, dasar bagian dalam harus dilanjurkan ke sisi kapal sedemikian rupa untuk melindungi bagian bawah terhadap pergantian lambung kapal, perlindungan semacam itu akan dianggap memuaskan jika dasar bagian dalam tidak lebih rendah pada bagian manapun selain bidang yang sejajar dengan garis lunas dan yang terletak tidak kurang dari jarak vertical  $h$  diukur dari garis lunas, sebagaimana dihitung berdasarkan Persamaan 2.1:

$$h_{ab} = \frac{B}{20} \quad (2.1)$$

b. Menurut IACS

Untuk pengangkut curah, dasar ganda harus dipasang memanjang dari sekat tabrakan ke sekat puncak buritan, sejauh hal ini dapat dilakukan dan kompatibel dengan desain dan pengerjaan kapal yang tepat. Untuk kapal tanker minyak, *double bottom* harus dipasang untuk melindungi wilayah kargo dan ruang pompa.

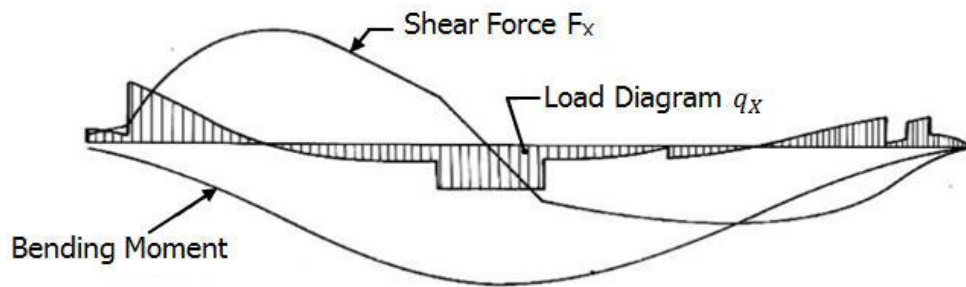
Jika *double bottom* perlu dipasang, *inner bottom* harus dilanjutkan ke sisi kapal sedemikian rupa untuk melindungi *bottom* dari pergantian bilga di area dimana ruang *hopper* atau *double side* yang tidak disediakan.

Jika tidak ditentukan, ketinggian *double bottom* tidak boleh kurang dari yang lebih rendah sesuai Persamaan 2.2 untuk oil tanker:

$$h_{ab} = \frac{B}{15} \quad (2.2)$$

### 2.3. Momen Lentur dan Gaya Geser

Kekuatan longitudinal lambung kapal dievaluasi berdasarkan momen lentur dan gaya geser yang bekerja pada kapal. Adapun momen lentur dan gaya geser pada kapal dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut ini.



(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.11 Distribusi beban (*load diagram*), gaya geser (*shear force*), terhadap momen lentur (*bending moment*).

Adapun distribusi beban kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.3 berikut.

$$q_x = b_x - w_x \quad (2.3)$$

Dimana: berat dan gaya apung diasumsikan sebagai  $b_x$  dan  $w_x$

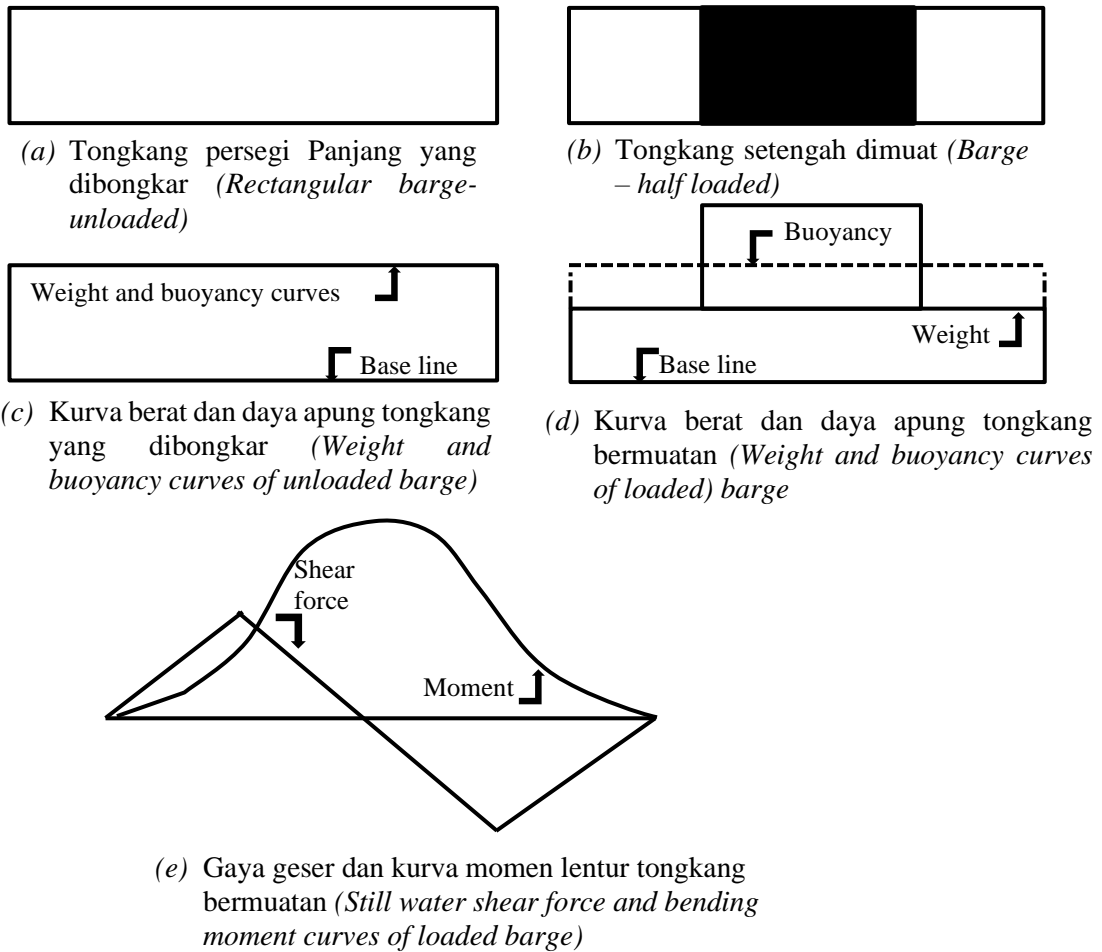
Adapun rumus distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.4 dan 2.5 berikut ini:

$$F_x = \int_x^0 (b_x - w_x) dx \quad (2.4)$$

$$M_x = \int_x^0 F_x dx \quad (2.5)$$

Hal ini selanjutnya diilustrasikan pada Gambar 2.10 untuk sebuah kapal yang berada pada kondisi air tenang (misalnya di pelabuhan). Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.11(a), tongkang yang diturunkan dari penampang konstan dan kerapatan, yang mengapung di air akan memiliki berat dan daya apung yang merata sepanjang tongkang. Hal ini ditunjukkan oleh kurva berat dan daya apung, terlihat pada Gambar 2.11(b). Jika tongkang dimuat di tengah (Gambar 2.11(c)), distribusi berat akan berubah dan kurva yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.11(d). Perbedaan antara kurva berat dan daya apung menghasilkan distribusi momen lentur sepanjang kapal. Momen lentur ini dikenal sebagai momen lentur air tenang,  $M_s$ , seperti yang terlihat pada tongkang yang dimuat pada Gambar 2.14(e) (Bai, 2003).





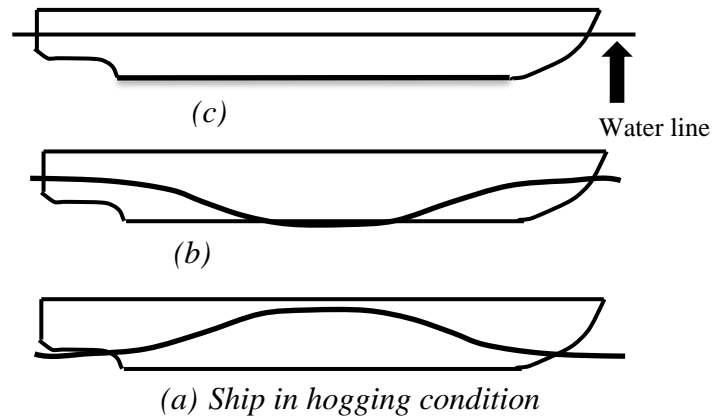
(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.12 Perubahan Momen Lentur pada Tongkang Persegi Panjang Kondisi Air Tenang

Untuk kapal pada kondisi bergelombang, momen lentur dipisahkan menjadi dua istilah, yaitu: momen lentur air tenang ( $M_{sw}$ ), dan momen lentur akibat gelombang ( $M_w$ ).

Kombinasi beban statis dan beban dinamis untuk menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur-batas vertikal kapal dapat dihitung dengan penjumlahan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 2.6

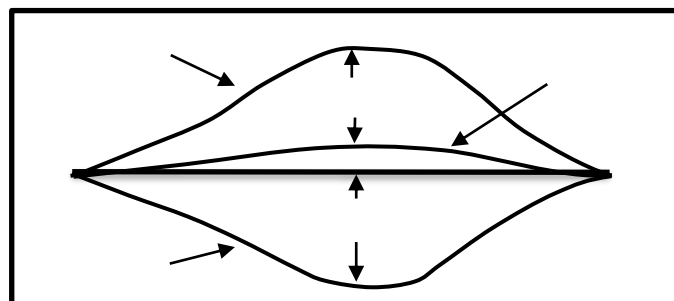
$$m = m_{sw} + 1,2m_w \quad (2.6)$$



(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.13 Momen Lentur Gelombang pada Gelombang Reguler

Gambar 2.13 mengilustrasikan kapal pada gelombang sama dengan panjangnya. Gambar 2.13(a) menunjukkan kondisi air tenang dimana hanya momen lentur yang bekerja pada kapal adalah momen lentur kondisi air tenang itu sendiri. Gambar 2.13(b) menunjukkan kondisi dimana gelombang berongga berada di tengah kapal. Hal ini menghasilkan distribusi daya apung di dekat ujung kapal dan dengan demikian kapal mengalami kondisi *sagging*. Pada kondisi *sagging*, dek pada kapal mengalami tekan sedangkan bagian bawahnya mengalami tarik (*tension*). Gambar 2.13(c) menunjukkan puncak gelombang berada di tengah kapal. Hal ini menunjukkan gaya apung lebih besar pada bagian tengah kapal dibandingkan diujung kapal sehingga menghasilkan kondisi *hogging*. *Hogging* berarti kapal melengkung pada bagian tengah seperti pada Gambar 2.14 (Bai, 2003).



(Sumber: Tupper, 2004)

Gambar 2.14 Momen Lentur Ketika Air Tenang dan Bergelombang

Adapun besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang ( $M_s$ ) untuk panjang kapal lebih dari 90 meter, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 2.7 untuk kondisi *sagging*, dan 2.8, untuk kondisi *hogging*.

$$M_s = -0,05168 K_m CL^2 B (C_b + 0,7) \quad (2.7)$$

$$M_s = -0,01 K_m CL^2 B (11,97 - 1,96 C_b) \quad (2.8)$$

Adapun besaran momen lentur-batas vertikal akibat gelombang ( $M_w$ ) untuk panjang kapal lebih dari 90 meter, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 2.9, untuk kondisi *sagging*, dan 2.10, untuk kondisi *hogging*.

$$M_w = -0,11 K_m CL^2 B (C_b + 0,7) \quad (2.9)$$

$$M_w = -0,19 K_m CL^2 B C_b \quad (2.10)$$

Dimana:

$K_M$  = Faktor distribusi

$B$  = Lebar kapal (mm)

$L$  = Panjang Kapal (mm)

$C_b$  = Koefisien blok ( $\geq 0,6$ )

$C$  =  $10,75 - ((300 - L) / 100)1,5$  untuk  $90.000 \leq L \leq 300.000$  mm

=  $10,75$  untuk  $300.000 \leq L \leq 350.000$  m

=  $10,75 - ((L - 350) / 150)1,5$  untuk  $350 \leq L \leq 500.000$ mm

#### 2.4. 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 2.11 berikut:

$$\delta l = \varepsilon \cdot l = \frac{\sigma \cdot l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.11)$$

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)

## **2.5. Hubungan Tegangan dan Regangan**

Hubungan tegangan dan regangan yang terjadi pada analisis struktur dapat dijelaskan sebagai berikut:

### **2.5.1. 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 tampang. Sehingga besar tegangan yang dialami batang prismatic tersebut masing - masing sebesar  $\sigma = \frac{F}{A}$  dan  $\tau = \frac{F_v}{A}$ . 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 2.12:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.12)$$

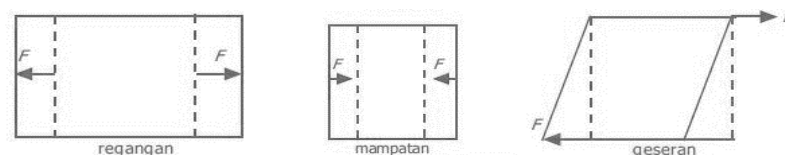
Dengan:

$\sigma$  = 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:



Gambar 2.15 Tegangan-Regangan

### 2.5.2. 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 ( $\sigma_{ta}$ ) terjadi akibat bekerjanya gaya Tarik ( $F_{ta}$ ) 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 2.16 dan dapat dilihat pada Gambar 2.17:

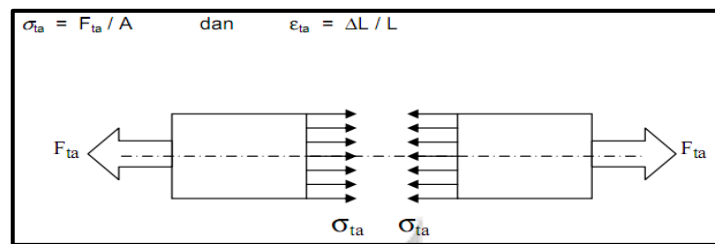
Rumus:

$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A}. \quad (2.16)$$

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

F = gaya tarik (N)

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

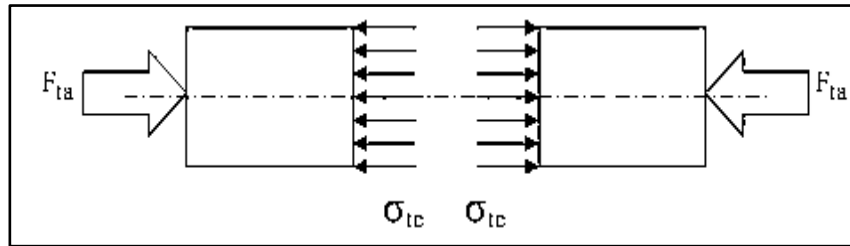


Gambar 2.17. Tegangan Tarik

### 2.5.3. 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 ( $A$ ) stuktur material, sehinggabendanya 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 2.18:



Gambar 2.18. Tegangan Tekan

selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.17:

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A}. \quad (2.17)$$

#### 2.5.4. 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<sup>2</sup>). Tegangan geser terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser di distribusikan 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. Persamaan 2.18:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.18)$$

Keterangan:

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

P = gaya geser atau gaya lintang (N)

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

#### **2.5.5. 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.

#### **2.5.6. Tegangan Luluh (*Crushing/Bearing Stress*)**

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.

#### **2.5.7. Tegangan Izin Dasar**

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut bersumber pada AISC [AISC, 2014] dan API [API, RP-2A, 1989]. 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.

### 2.5.8. Regangan

Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada Persamaan 2.13:

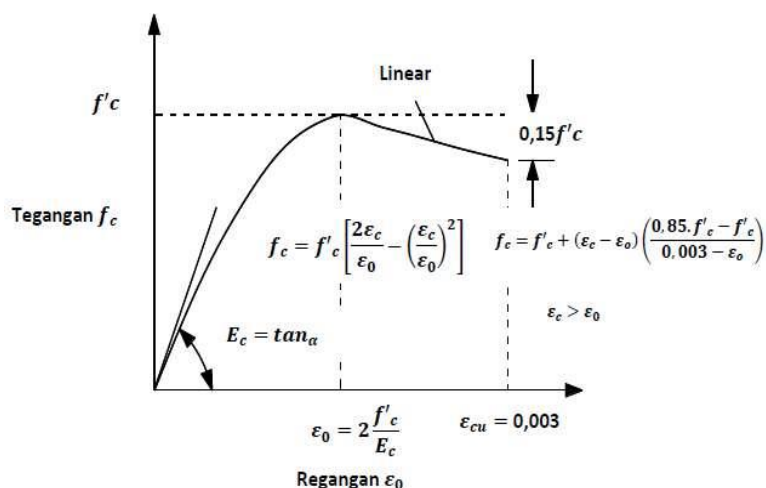
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.13)$$

dengan:

$\varepsilon$  = regangan

$\Delta L$  = pertambahan panjang (mm)

$L$  = panjang mula-mula (mm)



Gambar 2.16. Diagram Tegangan-Regangan Baja

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.16, 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 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, 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 Hook 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 2.14 dan 2.15:

$$E = \frac{F.L}{A.\Delta L} \quad (2.14)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

dengan:

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

$F$  = gaya (N)

$L$  = 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

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

Sumber: *Safety Regulation Group CAP 437 Edition 2012*

## 2.6. Kekuatan Batas Kapal Tanker (*Ultimate Strength*)

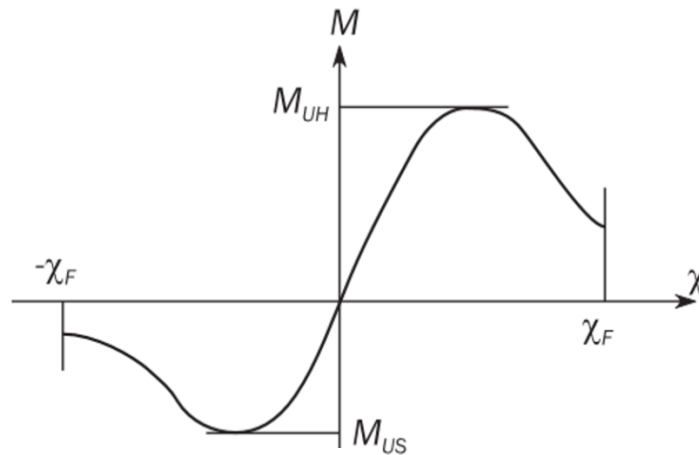
Kekuatan-batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total (Huges & Paik, 2010). Perhitungan kekuatan-batas kapal tanker berdasarkan keakuratan dan kompleksitas hingga saat ini terdiri dari 5 metode yaitu: teori balok, metode *Presumed Stress 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 2.19 dibawah ini (DNV GL, 2017b).

$$M_t \leq \frac{M_u}{\gamma_R} \quad (2.19)$$

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*). Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan (DNV GL, 2017b)

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.19. 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 Persamaan 2.20:

$$\sigma = \frac{M \times Z}{I} \quad (2.20)$$

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 2.21 sebagai berikut:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad (2.21)$$

Modulus penampang (S) seperti pada Persamaan 2.22, untuk penampang

kapal dibagi menjadi dua, yaitu Persamaan 2.22 dan 2.23:

$$S_d = \frac{I}{Z_d} \quad , \text{ untuk bagian } \textit{deck} \quad (2.22)$$

$$S_b = \frac{I}{Z_b} \quad , \text{ untuk bagian } \textit{bottom} \quad (2.23)$$

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 2.24 dan 2.25 sebagai berikut:

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud} \quad , \text{ untuk } \textit{deck} \quad (2.24)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub} \quad , \text{ untuk } \textit{bottom} \quad (2.25)$$

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.

## **2.7. Metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (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 *quasiNewton-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.

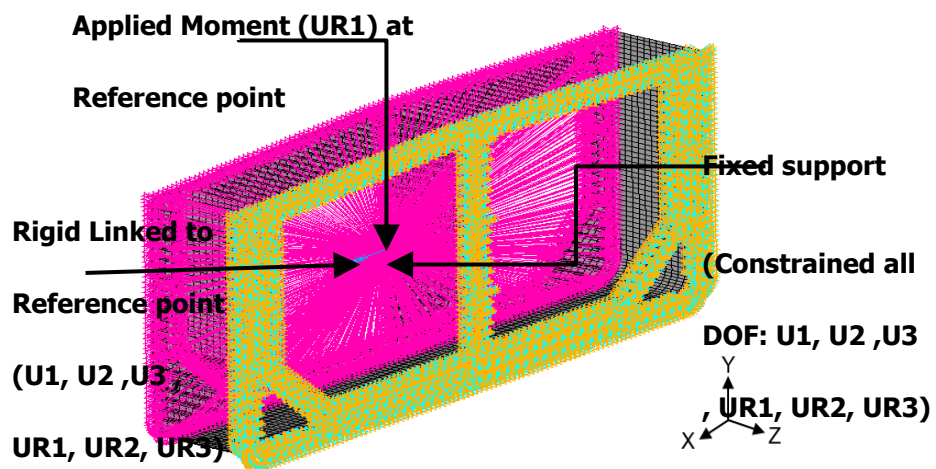
Kontrol kelengkungan dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada kedua ujung model elemen hingga. *Rigid link* dihubungkan ke titik acuan pada sumbu netral. Peningkatan nilai kelengkungan diperoleh dengan menggunakan kecepatan akselerasi dan *damping factor*. Kedua ujung pada titik acuan diberikan 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 2.20.



Gambar 2.20. 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



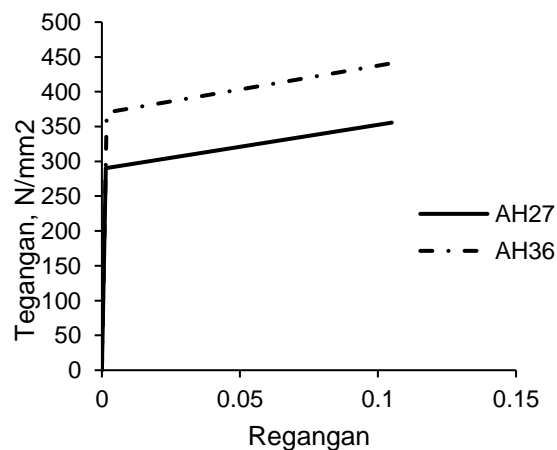
menentukan nilai kekuatan-batas dari struktur kapal. Penelitian ini menggunakan spesifikasi material pada Tabel 2.2, serta kurva tegangan regangan seperti pada Gambar 2.21.

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> (N/mm <sup>2</sup> )	290	370
<i>Tangent Modulus</i> (N/mm <sup>2</sup> )	625	675

(Sumber: *Ship Structure Committee, 2015*)

Berdasarkan Tabel di atas Material AH27 dan AH37 merupakan material khusus untuk *marine*. Modulus elastisitas sebesar 210000 N/mm<sup>2</sup>, rasio poisson 0,3 dan tegangan luluh AH27 sebesar 290 N/mm<sup>2</sup>, AH36 sebesar 370 N/mm<sup>2</sup> serta *tangent modulus* AH27 sebesar 625 N/mm<sup>2</sup> dan AH36 sebesar 675 N/mm<sup>2</sup>. Model material *bilinear isotropic hardening* dapat dilihat pada Gambar 2.21 berikut.



Gambar 2.21. 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*.

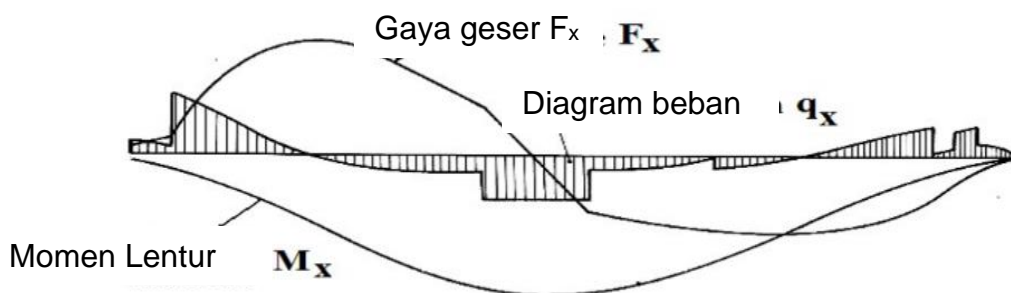
Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar sebaiknya di-*meshing* dengan ukuran yang lebih kecil untuk dapat memperlihatkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin kecil nilai *meshing* maka perangkat komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi yang tinggi. Dalam penelitian ini, ukuran *meshing* yang digunakan sebesar 350 mm dengan bentuk *quadmapped*.

#### 8. Tipe Elemen

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

#### 2.8. 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 2.22. (Shama, 2013).



Gambar 2.22. 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

$$q_x = b_x - w_x \quad (2.26)$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal adalah

$$F_x = \int_x^0 (b_x - w_x) dx \quad (2.27)$$

$$M_x = \int_x^0 F_x d_x \quad (2.28)$$

DNVGL (2017a), memberikan formula besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang ( $M_{SW}$ ) untuk panjang kapal lebih dari 90 m, pada Persamaan 2.29 dan 2.30:

$$M_{SW} = -0,05168K_M CL^2 B(C_b + 0,1)kn.m \quad \text{kondisi } sagging \quad (2.29)$$

$$M_{SW} = +0,01K_M CL^2 B(11,97 - 1,9C_b)kn.m \quad \text{kondisi } hogging \quad (2.30)$$

dimana,

$K_M$  = Faktor distribusi seperti pada Gambar 2.24.

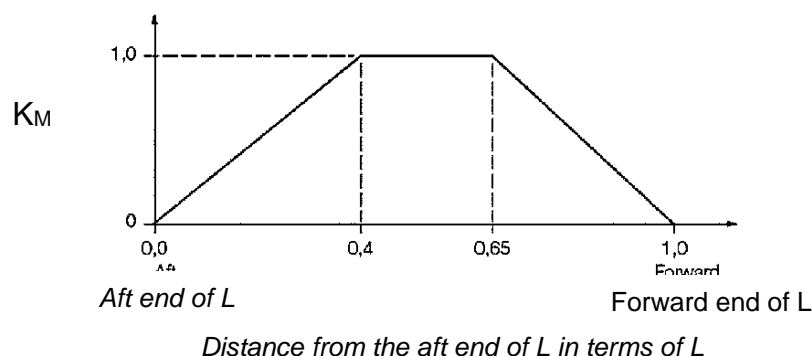
$L, B$  = lebar dan panjang kapal dalam satuan meter

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

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

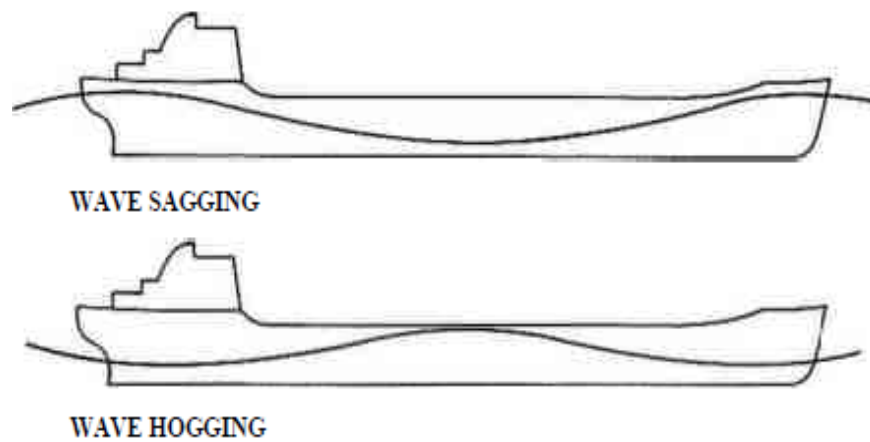
= 10,75 untuk  $300 \leq L \leq 350$  m

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



Gambar 2.24. 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 2.25.



Gambar 2.25. 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, pada Persamaan 2.31 dan 2.32:

$$M_w = -0,11K_M CL^2 B(C_b + 0,7)kn.m \quad \text{kondisi } sagging \quad (2.31)$$

$$M_w = +0,19K_M CL^2 BC_b kn.m \quad \text{kondisi } hogging \quad (2.32)$$

dimana, C dan  $K_M$  seperti pada Persamaan 2.29 dan 2.30.

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).

$$M_t = M_{sw} + M_w \quad (3.32)$$