

**SKRIPSI**

**ANALISIS KEKUATAN KAPAL *VLCC* (*VERY LARGE CRUDE CARRIER*) DENGAN PERTIMBANGAN KERUSAKAN MEMBUJUR**

Disusun dan diajukan oleh

**YULINDAR PUTRI KOESDARYANTA**

**D081 18 1312**



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

**SKRIPSI**

**ANALISIS KEKUATAN KAPAL *VLCC* (*VERY LARGE CRUDE CARRIER*) DENGAN PERTIMBANGAN KERUSAKAN MEMBUJUR**

Disusun dan diajukan oleh

**YULINDAR PUTRI KOESDARYANTA**

**D081 18 1312**



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**  
**ANALISIS KEKUATAN KAPAL VLCC (*VERY LARGE CRUDE***  
***CARRIER*) DENGAN PERTIMBANGAN KERUSAKAN MEMBUJUR**

Disusun dan diajukan oleh  
**YULINDAR PUTRI KOESDARYANTA**  
**D081 18 1312**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 27 Juni 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing utama,

Pembimbing pendamping,



**Muh. Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.**

**NIP.197606062005011003**



**Habibi, S.T., M.T.**

**NIP. 198704252019031012**

Ketua Departemen Teknik Kelautan



**Dr. Ir. Chairul Paotonan, S.T., M.T.**

**NIP. 197506052002121003**

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yulindar Putri Koesdaryanta  
Nomor Mahasiswa : D081181312  
Program Studi : Teknik Kelautan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

"Analisis Kekuatan Kapal *VLCC (Very Large Crude Carrier)* Dengan  
Pertimbangan Kerusakan Membujur"

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, 30 Juni 2022

Yang menyatakan,



Yulindar Putri Koesdaryanta

## ABSTRAK

**YULINDAR PUTRI KOESDARYANTA.** *Analisis Kekuatan Kapal VLCC (Very Large Crude Carrier) dengan Pertimbangan Kerusakan Membujur (dibimbing oleh Muhammad Zubair Muis Alie dan Habibi)*

*Tabrakan merupakan salah satu kecelakaan yang paling berbahaya yang dapat dialami sebuah kapal. Pada studi kali ini, analisis kekuatan kapal VLCC dilakukan dengan mempertimbangkan perluasan kerusakan membujur dengan tujuan mengetahui perbandingan kekuatan kapal sebelum dan sesudah terjadi tabrakan. Kerusakan disimulasikan pada sisi samping kapal pada bagian geladak. Jarak longitudinal yang diambil satu jarak gading. Lebar kapal 42 m dan tinggi kapal 20,3 m dengan satu jarak gading sebesar 4,67 m. Panjang kerusakan membujur diambil sebesar 50% dan 80% dikarenakan kekuatan sisa ingin diketahui jika kerusakan terjadi pada setengah satu jarak gading dan mendekati satu jarak gading kapal. MPC (Multi-Point Constraint) dipakai pada penampang berdasarkan arah netral axis. Ukuran mesh yang digunakan sebesar 300 mm dan arc-length method diterapkan. Tipe elemen SHELL 181 digunakan pada model ini. Analisis dilakukan dalam kondisi hogging dan sagging baik pada kondisi intact maupun kerusakan. Hasilnya diplot dari kurva momen-kelengkungan termasuk deformasinya. Tegangan maksimum untuk kerusakan 50% sebesar 448,242 N/mm<sup>2</sup> terjadi pada kondisi hogging dan -441,994 N/mm<sup>2</sup> pada kondisi sagging. Tegangan maksimum untuk kerusakan 80% sebesar 455,993 N/mm<sup>2</sup> pada kondisi hogging dan -445,953 N/mm<sup>2</sup> pada kondisi sagging.*

*Kata kunci: VLCC, penampang, NLFEA, kerusakan, kekuatan batas*

## ABSTRACT

**YULINDAR PUTRI KOESDARYANTA.** *Ultimate Strength Analysis of VLCC (Very Large Crude Carrier) with Longitudinal Damage (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Habibi**)*

*Collisions are one of the most dangerous accidents a ship can experience. In this study, the analysis of the ultimate strength of the VLCC is conducted by considering the extended of the longitudinal damage extent to know the comparison of the ultimate strength before and after collision damage. Damage is simulated on the side of the ship deck. The length of the model is taken for one-frame space. The breadth and depth of ship are 42 m and 20,3 m, respectively. While the one-frame space is taken as 4,67 m. The longitudinal damage extent are taken to be 50% and 80% due to know the residual strength for half and one-frame space. The MPC (Multi-Point Constraint) is adopted to use on the cross section of the ship model. Based on the neutral axis as reference point. The mesh size size is 300 mm and the arc-length method is applied. The element type is SHELL 181 and it is applied to whole model. The analysis is considered under hogging and sagging by taking into account the intact and damage. The results are plotted by the moment-curvature relationship including their deformations. The maximum stress for damage case 50% is 448,242 N/mm<sup>2</sup> in hogging and -441,994 N/mm<sup>2</sup> in sagging, respectively. For the case of 80%, the maximum stress occur on hogging and sagging conditions are 455,993 N/mm<sup>2</sup> and -445,953 N/mm<sup>2</sup>, respectively.*

*Keywords: VLCC, cross-section, NLFEA, damage, ultimate strength*

## PRAKATA

*Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.*

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dan atas kehendak-Nya lah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat di atasi. Sholawat 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:

“ANALISIS KEKUATAN KAPAL *VLCC (VERY LARGE CRUDE CARRIER)*  
DENGAN PERTIMBANGAN KERUSAKAN MEMBUJUR”

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Kusdaryanta** dan Ibu **Suzianty** 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 di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.
2. Bapak **Habibi, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing kedua yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.

3. Bapak **Dr. Chairul Paotonan, S.T., M.T.**, selaku Ketua Program Studi Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. Ibu **Dr. Hasdinar Umar, S.T., M.T.**, selaku dosen penasehat akademik saya yang membantu saya selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga dapat menyelesaikan studi.
5. Bapak **Ir. Juswan, S.T., M.T.**, selaku dosen penguji yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikirannya.
6. Bapak **Dr. Taufiqur Rachman, S.T., M.T.**, selaku dosen penguji yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikirannya.
7. **Dosen Dosen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama proses perkuliahan.
8. **Tenaga Kependidikan Program Studi Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
9. Kakak **Indah Melati Suci, S.T.**, yang telah membantu dan meluangkan waktunya untuk saya dalam mengerjakan skripsi.
10. **Teman-teman Mahasiswa khususnya di Labo OSAREL**, yakni **Kofi, Saf, Indri, Bipa, Andri, dan Dirham**, yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka.
11. **Yurisa Putri Sari**, teman saya yang selalu memberi motivasi saya dalam pengerjaan skripsi dan selama saya kuliah.

**12. Teman-teman Mahasiswa Teknik Kelautan 2018** atas segala dukungannya. Tak lupa pula penulis sampaikan banyak terimakasih kepada kanda-kanda Senior dan dinda-dinda Junior atas motivasi dan dukungannya.

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.

*Wassalammu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.*

Gowa, Juni 2022

Yulindar Putri Koesdaryanta

## DAFTAR ISI

PRAKATA .....	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR NOTASI .....	xiv
DAFTAR ISTILAH.....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	4
1.3. Batasan Masalah .....	4
1.4. Tujuan Penelitian .....	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1. Kapal Tanker .....	7
2.2. Product Tanker .....	8
2.3. Kapal <i>Crude Carrier</i> .....	9
2.4. Kapal <i>Gas Carrier</i> .....	9
2.5. Desain Struktur <i>VLCC</i> .....	11
2.6. Beban Geladak Cuaca.....	15
2.7. Beban Luar Sisi Kapal .....	15
2.8. Beban Luar Alas Kapal .....	16
2.9. Model Kerusakan Tubrukan Arah Membujur .....	17
2.10. Metode Elemen Hingga.....	19
2.11. Hubungan tegangan dan Regangan.....	21
2.12. Perhitungan Kekuatan Batas .....	23
BAB III METODE PENELITIAN .....	30
3.1. Jenis Penelitian .....	30
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian .....	30
3.3. Penyajian Data .....	30
3.4. Analisa Data .....	30

3.5.Diagram Alir .....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1.Kekuatan Kapal <i>VLCC</i> terhadap Momen Lentur-Batas Kondisi <i>Intact</i> saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> .....	41
4.2.Kekuatan Kapal <i>VLCC</i> terhadap Momen Lentur-Batas Kondisi Kerusakan 50% saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> .....	43
4.3.Kekuatan Kapal <i>VLCC</i> terhadap Momen Lentur-Batas Kondisi Kerusakan 80% saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> .....	45
4.4.Kekuatan Kapal <i>VLCC</i> terhadap Momen Lentur-Batas Kondisi <i>Intact</i> saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> .....	46
4.5.Kekuatan Kapal <i>VLCC</i> terhadap Momen Lentur-Batas Kondisi Kerusakan 50% saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> .....	49
4.6.Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>VLCC</i> Kondisi Kerusakan 80% saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> .....	51
4.7.Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah z dan Perbandingan Kekuatan-Batas Kapal <i>VLCC</i> Menggunakan Metode <i>NLFEA</i> .....	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	57
5.1.Kesimpulan .....	57
5.2.Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA .....	58
LAMPIRAN .....	61

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Kapal <i>product</i> tanker.....	8
Gambar 2.2.	Kapal pengangkut minyak mentah .....	9
Gambar 2.3.	Kapal <i>LPG</i> .....	10
Gambar 2.4.	Konstruksi <i>single hull</i> tanker .....	11
Gambar 2.5.	Struktur utama batang kapal tanker <i>single hull</i> .....	12
Gambar 2.6.	Struktur utama batang pada struktur dan sekat melintang pada kapal tanker <i>single hull</i> .....	12
Gambar 2.7.	Struktur anggota pada bagian tengah tanker dari <i>single hull</i> tanker.....	13
Gambar 2.8.	Struktur utama batang pada bagian sayap tanker pada <i>single hull</i> tanker .....	13
Gambar 2.9.	Struktur <i>web-frame</i> kapal <i>VLCC</i> .....	14
Gambar 2.10.	Kondisi <i>intact</i> .....	17
Gambar 2.11.	Kerusakan tubrukan 50% .....	18
Gambar 2.12.	Kerusakan tubrukan 80% .....	18
Gambar 2.13.	<i>Three-cargo-hold single bulk carrier</i> .....	20
Gambar 2.14.	Hubungan tegangan dan regangan.....	22
Gambar 2.15.	Momen lentur gelombang pada gelombang regular .....	26
Gambar 2.16.	Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan .....	26
Gambar 2.17.	Kondisi batas untuk kontrol kelengkungan .....	28
Gambar 3.1.	Konfigurasi penampang kapal <i>midship VLCC</i> .....	31
Gambar 3.2.	Diagram alir.....	40
Gambar 4.1.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>VLCC</i> kondisi <i>intact</i> pada saat <i>sagging</i> .....	41
Gambar 4.2.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>VLCC</i> kondisi <i>intact</i> pada saat <i>hogging</i> .....	42
Gambar 4.3.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>VLCC</i> kondisi kerusakan 50% pada saat <i>sagging</i> .....	43
Gambar 4.4.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>VLCC</i> kondisi kerusakan 50% pada saat <i>hogging</i> .....	44

Gambar 4.5.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal VLCC kondisi kerusakan 80% pada saat <i>sagging</i> .....	45
Gambar 4.6.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal VLCC kondisi kerusakan 80% pada saat <i>hogging</i> .....	46
Gambar 4.7.	Grafik momen-kelengkungan kapal VLCC kondisi <i>intact</i> ....	47
Gambar 4.8.	Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi <i>intact</i> saat <i>sagging</i> .....	48
Gambar 4.9.	Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi <i>intact</i> saat <i>hogging</i> .....	48
Gambar 4.10.	Grafik momen-kelengkungan kapal VLCC kondisi kerusakan 50% .....	49
Gambar 4.11.	Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi kerusakan 50% saat <i>sagging</i> .....	50
Gambar 4.12.	Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi kerusakan 50% saat <i>hogging</i> .....	50
Gambar 4.13.	Grafik momen-kelengkungan kapal VLCC kondisi kerusakan 80% .....	52
Gambar 4.14.	Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi kerusakan 80% saat <i>sagging</i> .....	52
Gambar 4.15.	Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi kerusakan 80% saat <i>hogging</i> .....	53
Gambar 4.16.	Grafik momen-kelengkungan kapal VLCC kondisi <i>intact</i> , kondisi kerusakan 50%, dan kondisi kerusakan 80%.....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Properti material pada kapal <i>VLCC</i> .....	17
Tabel 3.1.	Dimensi <i>stiffener</i> kapal <i>VLCC</i> .....	32
Tabel 4.1.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>VLCC</i> pada kondisi <i>intact</i> .....	47
Tabel 4.2.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>VLCC</i> pada kondisi kerusakan 50% .....	49
Tabel 4.3.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>VLCC</i> pada kondisi kerusakan 80% .....	51
Tabel 4.4.	Rekapitulasi tegangan kerja arah z .....	54
Tabel 4.5.	Perbandingan kekuatan-batas momen lentur kapal <i>VLCC</i> saat <i>intact</i> , kerusakan 50%, dan kerusakan 80%.....	55

## DAFTAR NOTASI

B	= Lebar kapal	(mm)
$b_x$	= gaya apung	(N)
$C_D$	= koefisien <i>drag</i>	
$C_f$	= faktor distribusi	
E	= modulus elastisitas	(N/mm <sup>2</sup> )
H	= tinggi kapal	(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)
$P_0$	= <i>basic external dynamic load</i>	(N/mm <sup>2</sup> )
$P_b$	= beban luar alas kapal	(N/mm <sup>2</sup> )
$P_d$	= beban geladak cuaca	(N/mm <sup>2</sup> )
$P_{s1}$	= beban luar sisi kapal di bawah garis muat air	(N/mm <sup>2</sup> )
$P_{s2}$	= beban luar sisi kapal di atas garis muat air	(N/mm <sup>2</sup> )
T	= sarat Kapal	(mm)
Z	= jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah	(mm)
$y_R$	= faktor keamanan untuk kekuatan batas-lentur vertikal	

## DAFTAR ISTILAH

- ANSYS* : *Software* yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
- 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
- VLCC* : *Very Large Crude Carrier*
- 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 atau ditekan, sebelum bahan tersebut patah atau putus.

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Salah satu kecelakaan paling berbahaya yang dapat dialami sebuah kapal adalah tubrukan. Kerusakan yang disebabkan oleh tubrukan kapal dapat terjadi pada lambung kapal dan mengancam keselamatan kapal serta lingkungan sekitarnya. Fenomena ini harus diselidiki sebagai salah satu kebutuhan fungsional untuk desain struktural kapal [1]. Kapal merupakan moda transportasi laut yang paling sering digunakan, baik sebagai angkutan manusia maupun angkutan barang. Selain sebagai sarana angkutan laut, kapal juga digunakan sebagai sarana rekreasi atau pariwisata [2].

Tanker adalah kategori kapal yang didesain dengan lambung dek tunggal termasuk penyusunan tanki-tanki secara integral maupun *independent*, khususnya untuk angkutan kargo curah dalam bentuk cairan [3]. Banyak kapal tanker yang dioperasikan menggunakan *single hull* pada tahun 1960-1990. Pada tahun itu, banyak terjadi kecelakaan kapal yang mengakibatkan pencemaran dan dampak kerusakan lingkungan laut. Sehubungan dengan itu, karena adanya degradasi struktural kapal, kapal kemudian kehilangan kekakuannya dan terjadi keruntuhan kapal [4].

Dalam kasus yang paling ekstrim dimana retakan dibiarkan tanpa inspeksi atau perbaikan dapat menyebabkan kebocoran minyak atau cairan berbahaya ke laut yang berakibat terjadinya masalah lingkungan. Masalah lingkungan akibat kebocoran atau tumpahan minyak ini juga berpotensi menimbulkan kerugian terhadap ekologi ekonomi sumber daya perikanan [2].

Pada kasus kecelakaan *oil* tanker *Exxon Valdez* tahun 1989 di *Prince William Sound, Alaska, Amerika Serikat (AS)* menunjukkan tidak efektifnya *Undang-Undang Polusi Minyak Tahun 1990 (OPA 90)* berstandar internasional mengenai pencegahan polusi lingkungan yang disebabkan oleh kapal. Untuk itu, diberlakukan persyaratan penggunaan lambung ganda (*double hull*) pada tanker baru dan tanker lama. Karena itu,

*International Maritime Organization* (IMO) mengambil tindakan dan menetapkan standar lambung ganda pada tahun 1992 dalam *International Convention for the Prevention of the Pollution from Ships (MARPOL)* [2]. Meskipun demikian, kapal VLCC tipe *single hull* masih digunakan hingga sekarang dikarenakan besarnya ruang muat yang ada, sehingga jumlah muatan (minyak) yang diangkut lebih besar dibandingkan tanker *double hull*. Berdasarkan data *World Ships on Order by Main Vessel Type 2006*, hingga saat ini jumlah tanker merupakan jumlah jenis kapal terbanyak yang dibangun dan dikirim yaitu dengan jumlah 2.240 unit. Sedangkan menurut Direktorat Perkapalan dan Kepelabuhan Kementerian Perhubungan Indonesia, saat ini jumlah tanker di Indonesia sebanyak 120 unit dan dari jumlah tersebut sekitar 70% masih menggunakan *single hull* [5].

Telah diketahui dengan baik bahwa *ultimate strength* merupakan hal yang penting pada desain kapal. Kekuatan ini harus diperhitungkan untuk melindungi kapal dari kerusakan. Dalam studi ini, ada tiga jenis kekuatan yang akan dinilai: longitudinal, transversal, dan lokal. Kekuatan longitudinal adalah yang paling signifikan dan parameternya selalu dinilai untuk menetapkan kapasitas momen lentur kapal terhadap beban saat di laut [6].

Ada beberapa pendekatan untuk melakukan analisis kekuatan lambung kapal setelah terjadi kerusakan. *Finite Element Method* atau metode elemen hingga dapat menjadi metode yang ampuh untuk melakukan analisis kerusakan ini. Banyak peneliti telah melakukan penelitian tentang perhitungan kekuatan longitudinal residu atau kekuatan longitudinal kapal dalam kondisi *intact* atau rusak dengan menggunakan analisis FEM *nonlinear* [7].

Banyak penelitian yang telah dilakukan mengenai analisis kekuatan *hull girder* setelah terjadi kerusakan tubrukan. Model matematika untuk memperkirakan tekanan *contact* antara kapal yang kandas dan dasar lautan disajikan oleh Pedersen [8]. Prosedur yang cepat untuk mengidentifikasi kemungkinan kegagalan *hull girder* setelah terjadi tubrukan dan kandas berdasarkan formula dari kekuatan batas *hull girder* dan *section modulus* setelah kerusakan disajikan oleh Paik [9]. Penelitian mengenai kemampuan

dari metode analisis struktural sederhana berdasarkan formula *Smith* untuk memprediksikan kekuatan batas dari kerusakan lambung kapal disajikan oleh Guedes Soares [10]. Muis Alie et al [11] menyelidiki pengaruh suprastruktur pada kekuatan batas kapal *Ro-Ro* di bawah momen lentur vertikal dimana penampang melintang dianalisis. Hasilnya diperoleh berdasarkan *beam theory* dengan atau tanpa suprastruktur yang berhubungan satu sama lain. Ohtsubo et al [12] menunjukkan eksperimen dan pekerjaan numerik pada kerusakan struktur kapal akibat tubrukan dan kandas. Eksperimen ini adalah salah satu upaya pertama untuk mengaplikasikan kode metode elemen hingga secara eksplisit, seperti *LS-DYNA* dan *MSC Dytran*, untuk tubrukan dan masalah kandas kapal.

Ozguç et al [13] menyelidiki ketahanan tubrukan dan sisa kekuatan dari *single-skin* dan *double-skin bulk carriers* yang mengalami kerusakan. Notaro et al [14] melakukan penelitian dengan menggunakan metode *Nonlinear Finite Element* dari kapasitas *hull girder* dalam kondisi *intact* dan kondisi tubrukan. Efek dari beberapa faktor yang berpengaruh seperti model perluasan dan kompleksitas, representasi kerusakan, dan ketidaksempurnaan model diteliti pada kapal-kapal yang berbeda. Ditemukan bahwa tingkat efek kerusakan dalam arah vertikal lebih kritis daripada arah membujur.

Andrić et al [4] membandingkan nilai momen lentur *hull girder* kapal menggunakan 14 metode yang berbeda dengan jenis kapal yang berbeda, salah satunya adalah kapal tanker *VLCC single hull*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, nilai kekuatan batas momen lentur pada kondisi *hogging* lebih besar dari kondisi *sagging*.

Van Vu [7], melakukan analisis elemen hingga pada kapal untuk memprediksi kekuatan membujur pada kondisi *intact* dengan metode *RISK* yang dimodifikasi dalam *software ABAQUS*.

Berdasarkan latar belakang di atas, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan analisa kekuatan kapal *VLCC*, maka dalam pengerjaan tugas akhir ini akan dilakukan penelitian tentang analisis kekuatan kapal *VLCC* setelah terjadi tubrukan.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah kekuatan kapal *VLCC* (*Very Large Crude Carrier*) dengan pertimbangan kerusakan membujur.

## **1.3. Batasan Masalah**

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

1. Kerusakan tubrukan pada lambung kapal *VLCC* dipertimbangkan sebanyak 50% dan 80%.
2. *Transversal damage extend* dan *vertical damage extend* sebesar 1 m.
3. Kerusakan tubrukan pada satu jarak gading kapal.
4. Kerusakan dianggap searah membujur.

## **1.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan lambung kapal *VLCC* sebelum terjadi kerusakan dan setelah terjadi kerusakan membujur sebesar 50% dan 80%. Pertimbangan kerusakan 50% dan 80% digunakan untuk mengetahui kekuatan kapal jika kerusakan sebesar setengah satu jarak gading kapal dan dibandingkan dengan kekuatan kapal yang memiliki kerusakan hampir mencapai satu jarak gading kapal.

## **1.5. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian analisis kekuatan kapal *VLCC* dengan pertimbangan kerusakan membujur 50% dan 80% menggunakan metode elemen hingga ini adalah:

1. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya mengetahui analisis struktur baja.
2. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kepada perusahaan-perusahaan.
3. Sebagai informasi dalam hal menentukan kebijakan dalam hal

regulasi/peraturan pada galangan kapal untuk membuat perencanaan struktur kapal *VLCC*.

## **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 kekuatan kapal *VLCC* dengan pertimbangan kerusakan membujur sebesar 50% dan 80% dengan menggunakan metode elemen hingga (MEH). Selain itu berisi juga mengenai perumusan masalah yang dianalisis, batasan masalah penelitian yang tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini karena keterbatasan alat bantu dan 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 proposal skripsi.

### **BAB II Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisi kajian pustaka yang mendukung permasalahan yang dihadapi berupa teori-teori dasar mengenai Gambaran umum kapal tanker, jenis-jenis kapal tanker, desain struktur *single hull* tanker, beban yang bekerja pada kapal, model atau bentuk kerusakan tubrukan arah membujur, teori tentang metode elemen hingga, hubungan tegangan dan regangan, serta perhitungan kekuatan bebas.

### **BAB III Metode Penelitian**

Bab ini berisi jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, objek penelitian yaitu lambung kapal *VLCC*, 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 kapal *VLCC* setelah terjadi kerusakan dengan menggunakan metode elemen hingga.

#### BAB IV Pembahasan

Bab ini berisi pembahasan tentang investigasi kekuatan batas kapal *VLCC* menggunakan *software* ANSYS berupa nilai momen yang bekerja pada kondisi *sagging* dan *hogging* saat *intact* maupun setelah kerusakan.

#### BAB V Kesimpulan

Bab ini merupakan penutup dari keseluruhan isi penelitian yang mencakup kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dibahas dan saran untuk penulis.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Kapal Tanker**

Minyak mentah atau minyak bumi dapat ditemukan di seluruh dunia. minyak bumi dalam bentuk cair dikenal dengan minyak mentah, dalam bentuk gas dikenal dengan gas alam, dan dalam bentuk padat dikenal sebagai bitumen, aspal, atau lilin. Minyak mentah dan gas alam merupakan bahan baku industri perminyakan [15].

Selama abad ini industri minyak bumi telah bangkit dari yang relatif kecil menjadi salah satu industri dimana ekonomi di seluruh dunia sangat berpengaruh akan kebutuhan minyak bumi. Pada berbagai kedalaman di daratan maupun perairan, banyak akumulasi dari hidrokarbon yang telah lama terbentuk dari dekomposisi hewan dan tumbuhan. Hidrokarbon adalah senyawa hidrogen dan karbon yang mempunyai suhu dan tekanan normal, dapat berupa gas, cair, atau padat tergantung dari kompleksitas molekulnya [16].

Kapal tanker adalah kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak atau produk turunannya, seperti minyak mentah, minyak yang telah diolah, bahan kimia, minyak nabati, minyak sawit, methanol, gas alam cair, dan sebagainya. Tanker adalah konsep yang relatif baru, berasal dari akhir abad ke-19. Sebelumnya, teknologi sama sekali tidak mendukung pengangkutan curah cair. Pasar juga tidak siap untuk menghadapi penjualan kargo dalam jumlah besar, oleh karena itu sebagian besar kapal mengangkut berbagai produk yang berbeda dalam ruang yang berbeda pula untuk diperdagangkan [17].

Periode antara tahun 1950 dan 1973 merupakan masa pertumbuhan ekonomi dunia, pertumbuhan ini memungkinkan galangan kapal di Jepang dan Eropa menghasilkan ukuran kapal tanker yang besar, sehingga pada akhir 1960-an dan awal 1970-an, kapal *VLCC (Very Large Crude Carrier)* dan *ULLC (Ultra Large Crude Carrier)* menjadi kenyataan. Selama periode ini, ekonomi transportasi minyak sangat mendukung penggunaan kapal

tanker yang jauh lebih besar daripada kapal pengangkut seperempat atau setengah juta DWT minyak mentah [15].

Pada Desember 1996, dalam kurun waktu tiga minggu, tiga *VLCC* yang masih baru telah mengalami ledakan. Tiga kasus ini terjadi Ketika proses pembersihan tangka kargo yang kosong. Seluruh awak kapal yang bertugas meninggal dunia.

Tanker pertama kali digunakan oleh industri minyak untuk mengirim bahan bakar dalam jumlah besar dari kilang ke pelanggan. Penggunaan kapal tanker menjadi populer karena cairan lain juga lebih murah untuk diangkut dalam jumlah besar.

Tanker adalah kategori kapal yang didesain dengan lambung *deck* tunggal termasuk penyusunan tanki-tanki secara integral maupun *independent*, khususnya untuk angkutan kargo curah dalam bentuk cairan. Tipe-tipe tanker antara lain tanker minyak, tanker kimia, tanker gas cair, dan tanker-tanker lainnya seperti tanker aspal dan tanker cairan [3].

## 2.2. Product Tanker

*Oil product* tanker merupakan jenis kapal tanker yang mengangkut hasil pengolahan minyak mentah di kilang pengolahan dimana bisa dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Kapal *product tanker* [26]

*Oil product* tanker dibedakan berdasarkan jenis minyak (*clean and*

*dirty*). *Clean product* merupakan produk minyak yang ringan seperti avtur, bensin, minyak tanah, dan solar. Sedangkan minyak yang lebih berat seperti minyak bakar (*oil fuel*) dan residu merupakan *dirty product*. Tanki pada clean product tanker dilapisi bahan khusus untuk mencegah korosi dan harus selalu dibersihkan sebelum pemuatan. Sedangkan tanki pada *dirty product* tanker tidak dilapisi bahan khusus dan tidak memiliki sistem pemisah, namun dilengkapi koil pemanas untuk mencegah pembekuan saat mengangkut produk minyak yang memiliki densitas besar.

### **2.3. Kapal Crude Carrier**

*Crude Carrier* adalah kapal tanker pengangkut minyak mentah atau *crude oil* yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Kargo jenis ini umumnya homogen. Perbedaan spesifikasi mentah tidak berpengaruh karena pada akhirnya akan diolah di tahap berikutnya. Ukuran *crude carrier* mulai dari 50.000 MT DWT hingga sekitar 500.000 MT DWT



Gambar 2.2. Kapal pengangkut minyak mentah [15]

### **2.4. Kapal Gas Carrier**

Sebuah kapal pembawa gas atau tanker gas adalah kapal yang

dirancang untuk mengangkut *LPG*, *LNG*, maupun *CNG*. Kapal jenis ini dibedakan berdasarkan tekanannya.

Kapal gas bertekanan penuh ada ketika sebuah perusahaan internasional besar memasukkan dua tanker minyak. *LPG* gabungan ke dalam operasi. Kapal-kapal tersebut pada dasarnya adalah kapal tanker minyak yang telah dikonversi dengan memasang kapal-kapal kecil yang bertekanan untuk mengangkut *LPG* ke ruang-ruang tanki kargo. Hal ini memungkinkan transportasi jarak jauh dalam volume yang besar. *LPG* tidak hanya tidak berbau dan tidak beracun, namun juga memiliki nilai kalor yang tinggi dan kandungan sulfur rendah, sehingga sangat bersih dan efisien saat dibakar yang dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Kapal LPG [32]

Kapal gas semi-bertekanan yaitu kapal yang membawa gas dalam keadaan semi-bertekanan atau setengah dingin. Kapal *ethylene* and gas atau kapal tanker kimia merupakan kapal kargo yang dibangun atau disesuaikan dan digunakan untuk mengangkut bahan kimia cair dalam bentuk curah. Kapal tanker kimia diharuskan mematuhi berbagai aspek keselamatan yang diuraikan dalam *Bagian B dari SOLAS Bab VIII dan*

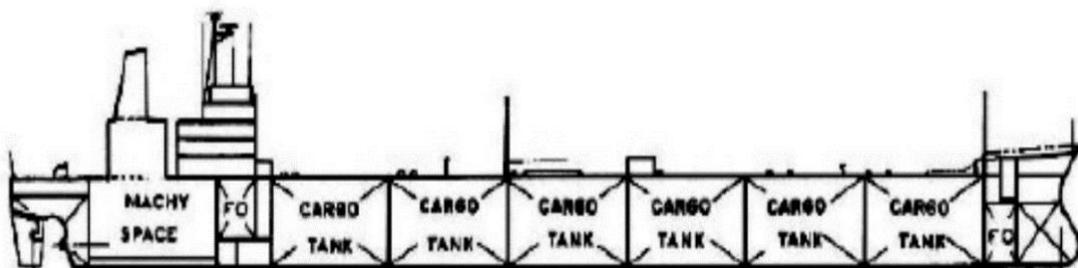
*International Bulk Chemical Code (IBC Code)*. Kargo dengan muatan kimia termasuk jenis muatan yang berbahaya.

Kapal berdingin penuh membawa gas-gas cair pada suhu rendah dan bertekanan atmosfer antara terminal. Tekanan tanki maksimum yang diizinkan pada kapal ini dalam ruang uap untuk sistem adalah 0.7 bar.

## 2.5. Desain Struktur VLCC

Setelah pencemaran lingkungan laut yang parah disebabkan oleh kecelakaan landasan *Exxon Valdes*, the *Marine Environmental Protection Committee of the International Maritime Organization (IMO)* mengatur peraturan baru untuk memperkuat struktur kapal tanker. Menurut peraturan tersebut, sebuah kewajiban untuk membuat kapal tanker dengan lambung ganda. Jadi, tidak ada kapal tanker lambung tunggal yang akan dibangun kedepannya. Namun, kapal tanker lambung tunggal akan tetap ada untuk sementara waktu meskipun mereka akan memudar [18].

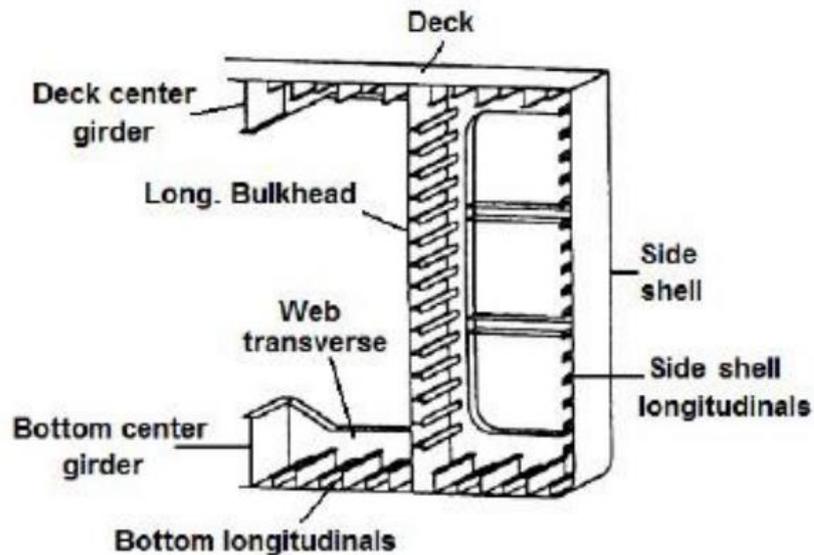
Ruang akomodasi dan permesinan selalu berada di belakang, sesuai dengan Gambar 2.4. Kargo terpasang dengan pompa muatan yang dipasang pada satu atau lebih kamar pompa balik di ujung atau di tengah bagian tanki muatan. Panjang kargo tanker yang membawa minyak dibagi-bagi menjadi tank oleh sekat *transversal*. Bagian kapal ini juga dibagi oleh sekat *longitudinal*.



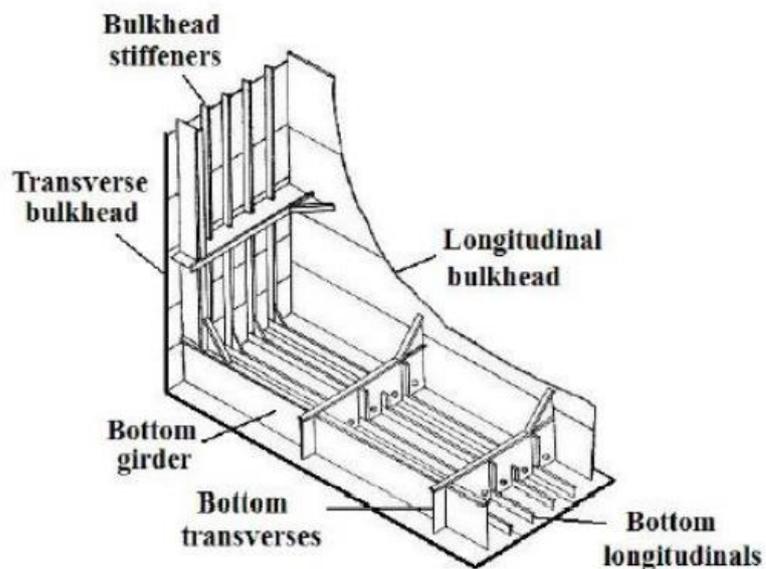
Gambar 2.4 Konstruksi *single hull* tanker [19]

Pada Gambar 2.5 tidak ada *double bottom* yang terpasang pada *cargo-carrying* dari kapal tanker konvensional. Struktural utama pada

struktur bagian bawah dan sekat melintang pada *single hull oil tanker* ditunjukkan pada Gambar 2.6.



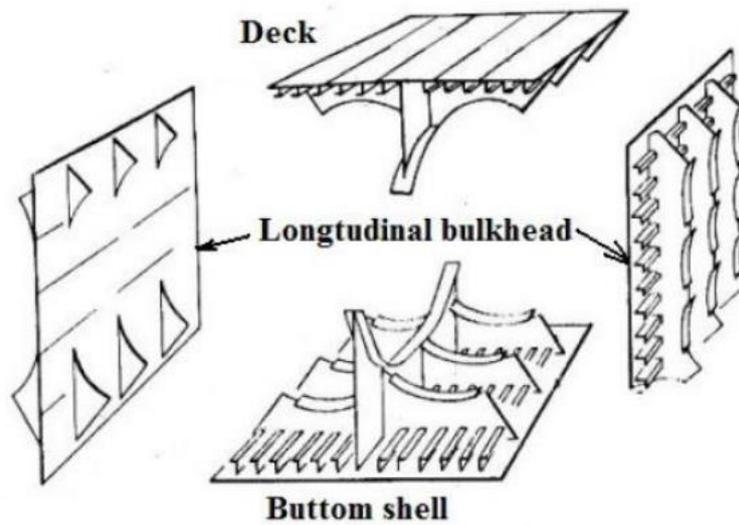
Gambar 2.5. Struktur utama batang kapal tanker *single hull* [19]



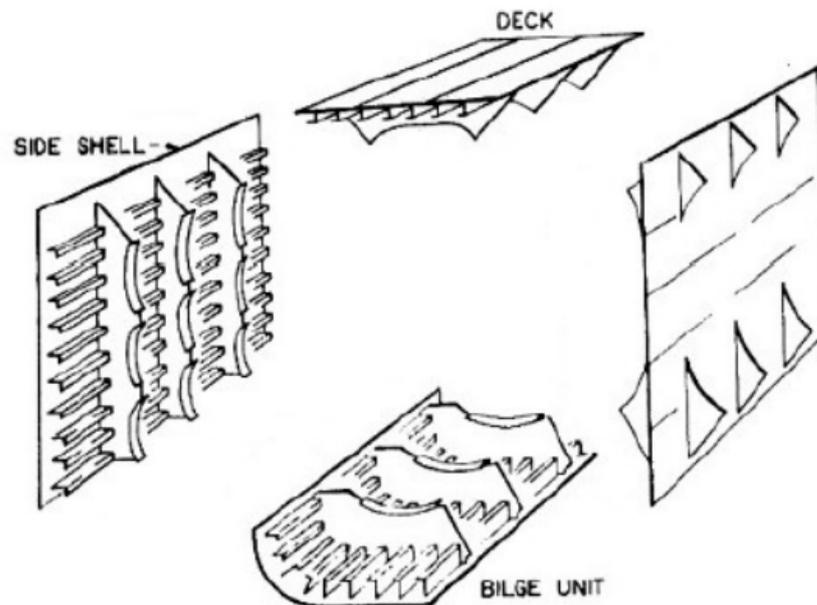
Gambar 2.6 Struktur utama batang pada struktur bottom dan sekat melintang pada kapal tanker *single hull* [19]

Struktur utama anggota pada bagian tengah kapal tanker pada *single*

*hull oil* tanker ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan untuk sayap kapal ditunjukkan pada Gambar 2.8 [19].



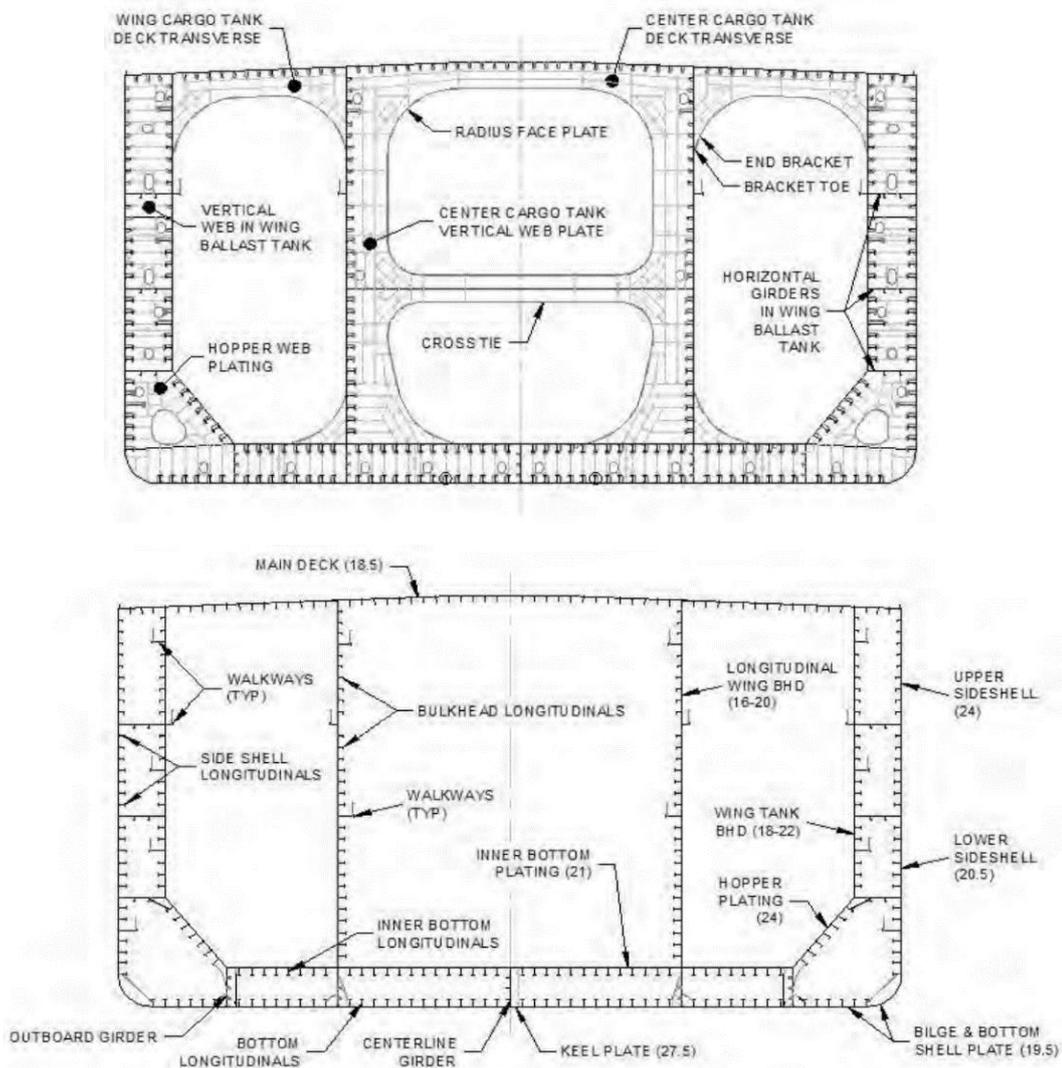
Gambar 2.7 Struktur anggota pada bagian tengah tanker dari *single hull* tanker [19]



Gambar 2.8 Struktur utama batang pada bagian sayap tanker pada *single hull* tanker [19]

Susunan struktural dari *web frame* kapal *Very Large Crude Carrier* ditunjukkan pada Gambar 2.9. Pelat horizontal (*Girder* atau *Stringer*

*Horizontal*) disusun di *wing tanks* dan *walkways* diatur di bagian atas ruang kargo untuk memungkinkan pemeriksaan semua struktur. Struktur *sloping hopper* di bagian bawah tanki berfungsi untuk memberikan kekuatan dan kekakuan pada antarmuka *double bottom* atau *wing tank*. Bagian pelat bawah dalam kapal harus bersih untuk memungkinkan drainase. *Web frames* biasanya sebesar 3.5 meter sampai 5 meter tergantung dari ukuran kapal itu sendiri [20].



Gambar 2.9. Struktur Web-frame kapal VLCC [20]

Kapal tanker *single hull* memiliki satu lambung dan secara langsung mengangkut minyak di dalam struktur lambung kapal. Beberapa tanker *single hull* mengangkut minyak dan air *ballast* dalam tanki yang sama;

terdapat juga *single hull* tanker yang memiliki tanki *ballast* yang terpisah dengan lambung kapal (minyak dibawa langsung ke dalam lambung kapal dan tanki *ballast* terpisah dari muatan). Sehingga jika terjadi kebocoran atau tumpahan minyak, hanya satu lambung yang akan diterobos [21].

Aspek penting dari desain kapal adalah kekuatan kapal. Ini merupakan kemampuan struktur kapal untuk menahan beban yang diberikan pada kapal itu sendiri. Sekat longitudinal sangat penting untuk memperkuat kekuatan membujur lambung kapal di bawah momen lentur kapal. Sekat longitudinal juga membagi kapal menjadi beberapa bagian [22]. 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 [23].

## 2.6. Beban Geladak Cuaca (*Load on Weather Decks*)

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak di belakang 0.15 dari garis tegak haluan (FP) [24]. Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.1.

$$P_D = P_0 \frac{20.T}{(10+z-T)H} C_D \quad (2.1)$$

Dimana:

- $P_D$  = Beban geladak cuaca (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_0$  = *Basic external dynamic load* (N/mm<sup>2</sup>)
- $T$  = Sarat kapal (m)
- $z$  = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)
- $H$  = Tinggi kapal (m)
- $C_D$  = Koefisien Drag

## 2.7. Beban Luar Sisi Kapal (*Load on the Ship's Side*)

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul

karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal [24].  
Beban luar sisi kapal dibagi atas dua beban, yaitu:

Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air ( $P_{S1}$ ) yang dapat dilihat pada Persamaan 2.2

$$P_{S1} = 10.(T - z) + P_0.C_F(1 + \frac{z}{T}) \quad (2.2)$$

Beban luar sisi kapal di atas garis muat air ( $P_{S2}$ ) yang dapat ditinjau pada Persamaan 2.3

$$P_{S2} = P_0.C_F \cdot \frac{20}{10 + z - T} \quad (2.3)$$

Dimana:

- $P_D$  = Beban geladak cuaca (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_0$  = *Basic external dynamic load* (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_{S1}$  = Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_{S2}$  = Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (N/mm<sup>2</sup>)
- $T$  = Sarat kapal (m)
- $z$  = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)
- $H$  = Tinggi kapal (m)
- $C_F$  = Faktor distribusi

## 2.8. Beban Luar Alas Kapal (*External Load on the Ship's Bottom*)

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal [24].  
Persamaan 2.4 ialah persamaan beban luar alas kapal

$$P_B = 10.T + P_0.C_F \quad (2.4)$$

Dimana:

- $P_B$  = Beban luar alas kapal (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_0$  = *Basic external dynamic load* (N/mm<sup>2</sup>)
- $T$  = Sarat kapal (m)
- $C_F$  = Faktor distribusi

## 2.9. Model Kerusakan Tubrukan Arah Membujur

Kekuatan batas dari kapal *VLCC* dianalisis dengan menggunakan solusi numerik. Oleh karena itu, dimensi kapal *VLCC* disajikan. Lebar dari kapal *VLCC* ialah 42 m dan tingginya sebesar 20,3 m. Analisis kekuatan dilakukan dengan pertimbangan kerusakan 50% dan kerusakan 80% akibat tubrukan searah membujur.

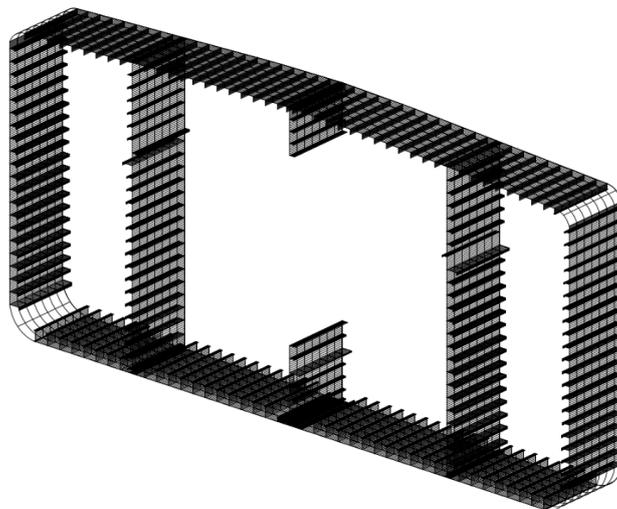
Material dari kapal *VLCC* dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah. Untuk kondisi kerusakan tubrukan, penampang *midship* dari kapal *VLCC* dimodelkan dengan menghilangkan elemen-elemen yang ada di area.

Tabel 2.1. Properti Material pada Kapal *VLCC*

Properti Material	Nilai
Densitas ( $\text{kg/m}^3$ )	7850
Modulus Young ( $\text{N/mm}^2$ )	210000
Rasio Poisson	0,3
Tegangan Luluh ( $\text{N/mm}^2$ )	290
Modulus Tan ( $\text{N/mm}^2$ )	625

(Sumber: Hasil Olahan, 2018) [4]

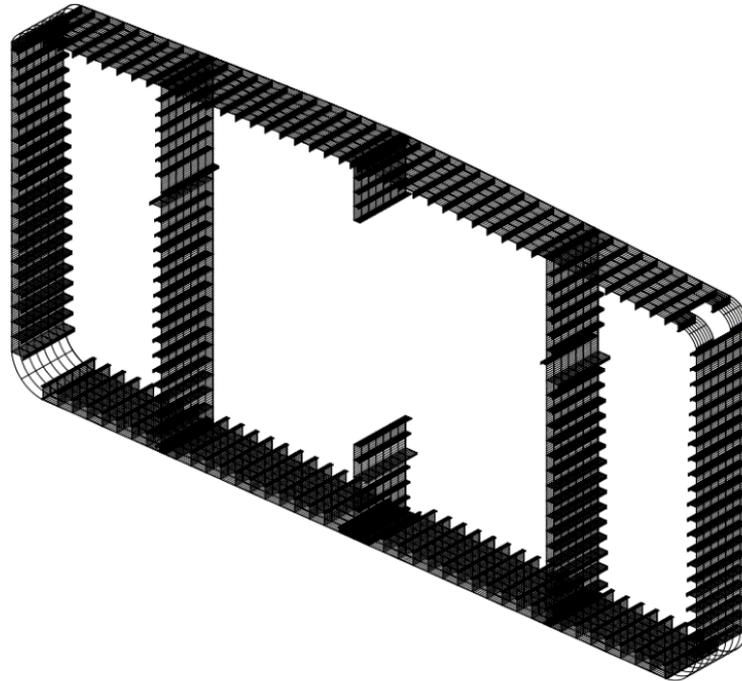
Dalam penelitian ini, kerusakan tubrukan minimum dan maksimum dianggap sebagai 50% dan 80%.



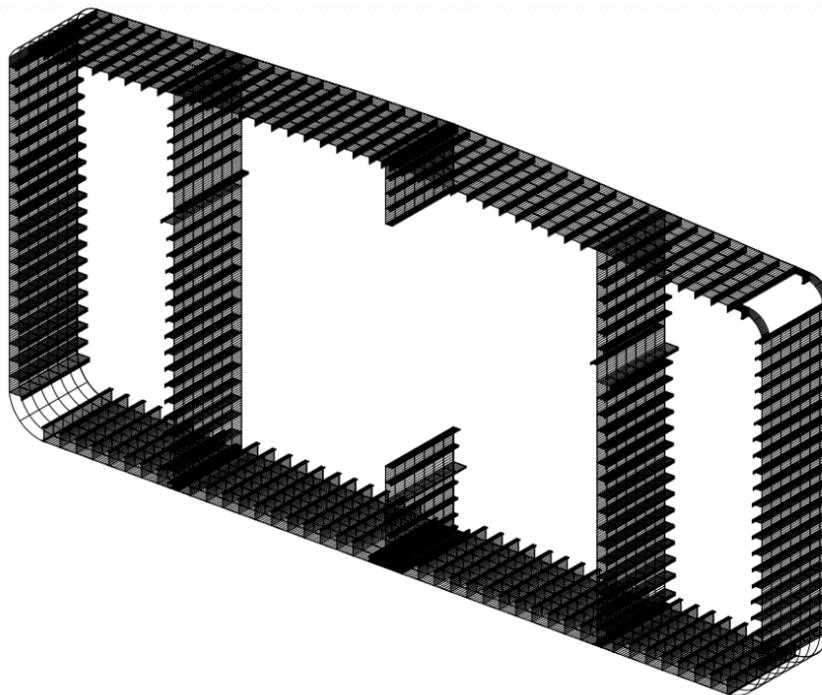
Gambar 2.10. Kondisi *Intact*

Gambar 2.10 menunjukkan model 3D dari kondisi *intact* dengan

satu jarak gading sebesar 4,67 m. Gambar 2.11 menunjukkan model 3D dari kerusakan tubrukan 50% dimana kerusakan dimodelkan di sisi samping kapal bagian geladak dengan jarak satu gading sebesar 4,67 m.



Gambar 2.11. Kerusakan Tubrukan 50%



Gambar 2.12. Kerusakan Tubrukan 80%

Gambar 2.12 menunjukkan model 3D dari kerusakan tubrukan 80%

dimana kerusakan juga dimodelkan di sisi samping kapal bagian geladak dengan jarak satu gading sebesar 4,67 m.

## **2.10. Metode Elemen Hingga**

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation*). Pada awalnya, metode elemen hingga dikembangkan untuk memecahkan masalah dibidang mekanika benda padat (*solid mechanic*), tetapi kini metode ini sudah merambah hampir ke semua masalah seperti mekanika fluida, perpindahan panas, elektromagnetik, getaran, serta analisis modal [25].

Dalam totalitasnya, metode elemen hingga sangat luas dan kuat; mencakup banyak fitur khusus dan teknik, serta memiliki banyak variasi aplikasi baik struktural maupun nonstruktural. Aplikasi struktural tidak hanya mencakup analisis defleksi kecil dua atau tiga dimensi, namun juga stabilitas struktural (*buckling*) dan struktural dinamis.

Metode elemen hingga diimplementasikan oleh Turner et al [26]. Namun, disebutkan di beberapa sumber bahwa metode elemen hingga telah jauh ada sebelumnya.

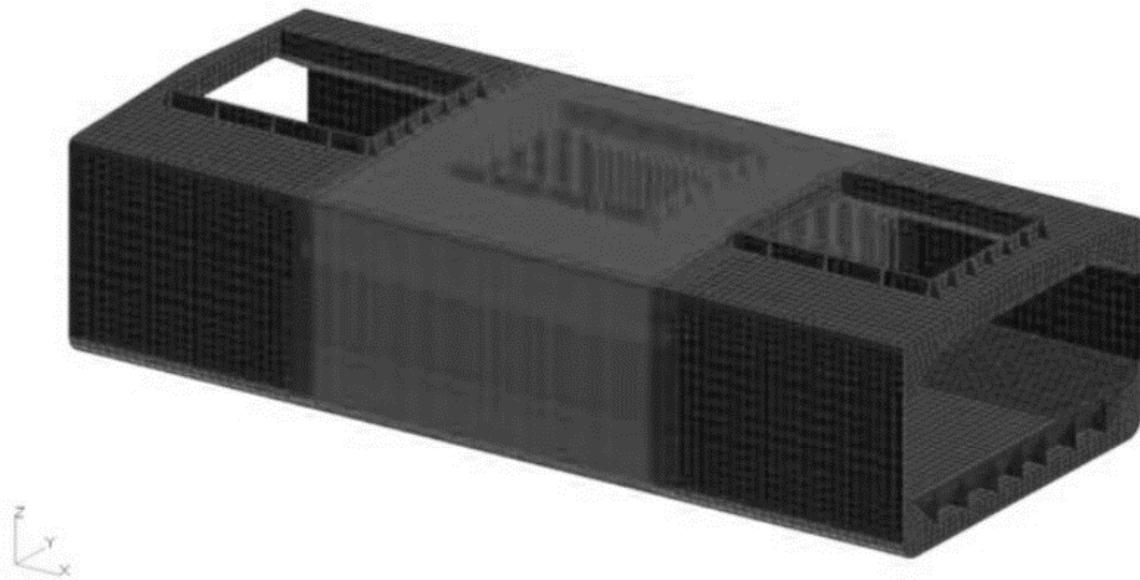
Konsep dasar metode elemen hingga sama seperti dalam analisis kerangka matriks yaitu bahwa struktur dapat direpresentasikan sebagai kumpulan elemen struktural individu yang saling berhubungan pada sejumlah node [26].

Bila suatu kontinu dibagi-bagi menjadi beberapa bagian yang lebih kecil (*subregion*) maka bagian-bagian kecil ini disebut dengan elemen hingga. Elemen hingga merupakan pendekatan bagian-bagian dengan menggunakan polinomial yang mana masing-masing terdefinisi pada daerah (elemen) yang kecil dan dinyatakan dalam harga-harga titik simpul dari fungsi tersebut [27].

Muis Alie [28], memodelkan elemen hingga *single hull* tanker ukuran Panamax dengan struktur satu sisi pada Gambar 2.13. Model ini

mencakup tiga ruang kargo dan dua sekat melintang dalam arah membujur. Kerusakan diasumsikan berada di tengah.

Metode Elemen Hingga berkembang pesat dalam analisis struktur mulai dari yang sederhana sampai yang lebih kompleks. Analisis kekuatan kapal dengan Metode Elemen Hingga memberi kontribusi yang sangat besar karena dapat memberi informasi yang lebih detail perihal perilaku struktur kapal sebelum dan sesudah mengalami pembebanan.



Gambar 2.13. *Three-cargo-hold single bulk carrier* [28]

Metode Elemen Hingga menggunakan formulasi integral untuk membentuk sebuah sistem dari persamaan aljabar. Lebih lanjut, sebuah pendekatan fungsi menerus diasumsikan untuk menggambarkan solusi untuk setiap elemen. Solusi lengkap ini kemudian di turunkan untuk menghubungkan atau membentuk solusi individu, kemudian di teruskan untuk menghasilkan kontinuitas dengan syarat inkremental. Adapun langkah-langkah dasar dalam metode elemen hingga yakni fase *preprocessing*, fase solusi, dan fase *postprocessing*.

Pada fase *preprocessing*, dibuat terlebih dahulu dan diskritasi domain solusi ke dalam elemen hingga. Sebuah fungsi bentuk diasumsikan untuk mempresentasikan perilaku fisik dari sebuah elemen. Pada fase ini,

matriks kekakuan global dibentuk kemudian kondisi syarat batas, kondisi awal, dan pembebanan diterapkan.

Pada fase solusi, sebuah persamaan aljabar linear atau nonlinear secara simultan diselesaikan untuk memperoleh hasil nodal titik.

Pada fase *postprocessing*, diperoleh informasi penting lainnya. Nilai-nilai tegangan utama ataupun nilai lainnya lebih ditekankan.

### **2.11. Hubungan Tegangan dan Regangan**

Sebuah gaya dan momen yang bekerja pada sebuah titik potongan penampang menghasilkan distribusi yang bekerja pada penampang tersebut. Secara umum, tegangan terbagi dalam dua macam yaitu tegangan normal dan tegangan geser.

Tegangan normal adalah intensitas gaya normal per unit luasan dan dinyatakan dalam unit gaya per unit luasan, misalnya  $\frac{lb}{in^2}$  atau  $\frac{N}{m^2}$ . Apabila gaya-gaya dikenakan pada ujung-ujung batang sedemikian hingga batang dalam kondisi tertarik, maka terjadi suatu tegangan tarik pada ujung batang. Jika batang dalam kondisi tertekan maka terjadi tegangan tekan. Gaya aksi dari gaya yang bekerja adalah melalui pusat setiap bagian penampang melintang batang.

Regangan ialah Ketika sebuah gaya yang bekerja pada sebuah benda, gaya tersebut cenderung mengubah bentuk dan ukuran dari benda tersebut. Akan tetapi, perubahan yang terjadi tidak pada volume benda tersebut. Pada gaya tarik, benda akan memanjang dan luas penampang akan mengecil sedangkan pada gaya tekan, benda akan memendek dan penampang akan membesar sehingga total volume benda tersebut akan tetap sama.

Perhitungan regangan dapat dituliskan pada Persamaan 2.5

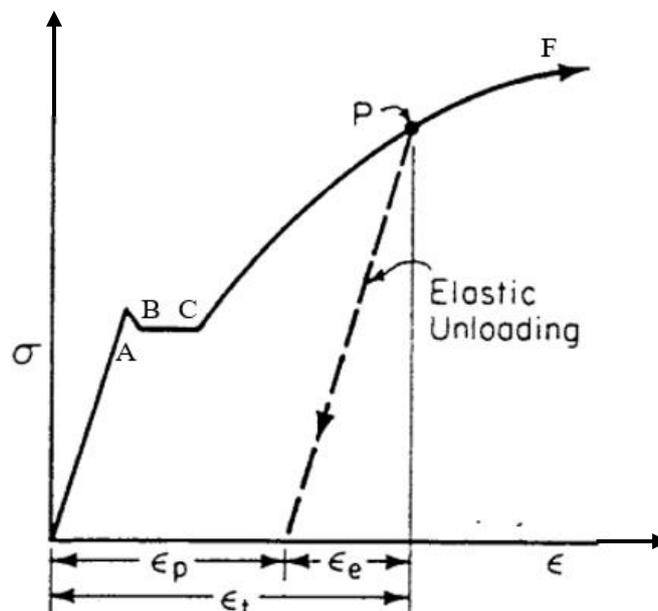
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.5)$$

Perpanjangan per unit panjang biasa disebut regangan normal ( $\varepsilon$ ), dapat diperoleh dengan membagi total pertambahan panjang  $\Delta L$  dan  $L$

regangan tidak berdimensi [29].

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.14, atas elastis (*elastic limit*) bahan tercapai di titik B. Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan, sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Bahan secara tiba-tiba mulur pada titik C yang disebut titik luluh (*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 dengan tegangan batas (*ultimate stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. Di luar titik F, pemanjangan akan berlanjut, tetapi secara perlahan tegangan berkurang, sampai akhirnya batang patah.

Hubungan tegangan dan regangan dapat dipisahkan menjadi komponen plastik dan komponen elastis dimana bentuk kurvanya ada pada Gambar 2.14. Regangan linear elastis ialah bagian dari regangan yang diperoleh kembali saat dibongkar. Regangan plastik (*nonlinear*) merupakan bagian regangan yang tidak dapat kembali lagi pada bentuk semula [30].



Gambar 2.14. Hubungan Tegangan dan Regangan [30]

Perbandingan antara tegangan dan regangan benda disebut modulus elastisitas atau *Modulus Young* yang secara matematis dirumuskan

pada Persamaan 2.6 dan Persamaan 2.7

$$E = \frac{F.L}{A.\Delta L} \quad (2.6)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

Dimana:

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

$F$  = gaya (N)

$L$  = panjang mula-mula (mm)

$\Delta L$  = pertambahan panjang atau pendek (mm)

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

Nilai *modulus Young* hanya bergantung pada jenis benda (komposisi benda), tidak bergantung pada ukuran atau bentuk benda.

## 2.12. Perhitungan Kekuatan Batas

Diakui dengan baik bahwa pendekatan berbasis *limit state* adalah metodologi yang jauh lebih baik untuk desain struktural dan untuk perhitungan kekuatan. Sebuah hal yang tidak mungkin untuk menentukan keamanan struktural tanpa diketahui kekuatan batasnya.

Kekuatan batas didefinisikan sebagai suatu kondisi dimana komponen struktural tertentu atau seluruh sistem struktural gagal untuk melakukan fungsi yang telah ditentukan. Ada empat jenis kekuatan batas, yaitu *serviceability limit states* (SLS), *ultimate limit states* (ULS), *fatigue limit states* (FLS), dan *accidental limit states* (ALS).

Kemampuan untuk memprediksi secara akurat kekuatan *ultimate hull girder* ketika mengalami pembengkokan longitudinal adalah salah satu aspek yang penting dari desain struktur kapal. Kekuatan batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total [26].

Untuk memvalidasi *finite element method* sebagai alat yang cocok

untuk menghitung *ultimate strength* dari struktur dan juga karakteristiknya, serangkaian metode elemen hingga *nonlinier* dilakukan dengan berbagai variasi parameter.

Kekuatan batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total [26].

Perhitungan kekuatan batas kapal tanker harus dihitung dengan metode *NLFEA* atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria persamaan 2.8 [31].

$$M_t = \frac{M_u}{\gamma_R} \quad (2.8)$$

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*).

Berdasarkan teori balok, tegangan lentur pada penampang yang mengalami momen lentur dapat dihitung dengan Persamaan 2.9

$$\sigma = \frac{M \cdot z}{I} \quad (2.9)$$

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 dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.10

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{S} \quad (2.10)$$

Dimana  $S$  adalah modulus penampang. Persamaan penampang pada kapal dibagi menjadi dua yang bisa dilihat pada Persamaan 2.11 dan Persamaan 2.12

$$S_d = \frac{1}{z_d}, \text{ untuk bagian } \textit{deck} \quad (2.11)$$

$$S_b = \frac{1}{z_b}, \text{ untuk bagian } \textit{bottom} \quad (2.12)$$

Dimana  $S_d$  dan  $S_b$  merupakan 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 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 2.13 dan Persamaan 2.14 di bawah ini

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud}, \text{ untuk } \textit{deck} \quad (2.13)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub}, \text{ untuk } \textit{bottom} \quad (2.14)$$

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.

Untuk kapal pada kondisi bergelombang, momen lentur dipisahkan menjadi dua istilah dan dapat dilihat pada Persamaan 2.15

$$M = M_{sw} + M_w \quad (2.15)$$

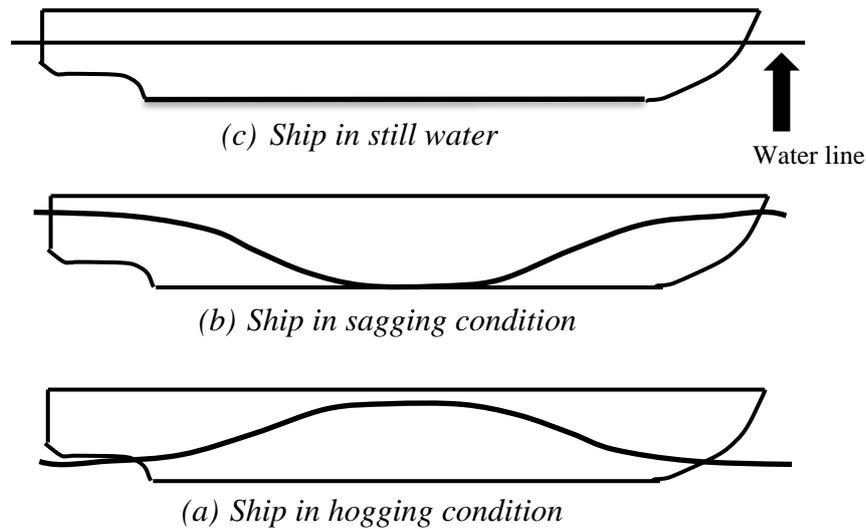
Dimana  $M_{sw}$  dan  $M_w$  menunjukkan momen lentur air tenang dan momen lentur akibat gelombang [18].

Gambar 2.15 mengilustrasikan kapal pada gelombang sama dengan panjangnya. Gambar 2.10 (a) menunjukkan kondisi air tenang dimana hanya momen lentur yang bekerja pada adalah momen lentur kondisi air tenang itu sendiri.

Gambar 2.15 (b) menunjukkan kondisi dimana gelombang berongga berada di tengah kapal. Hal ini menghasilkan distribusi gaya apung di dekat ujung kapal dan dengan demikian kapal mengalami kondisi *sagging*. Pada kondisi *sagging*, *deck* pada kapal mengalami tekan sedangkan bagian bawahnya mengalami tarik (tension).

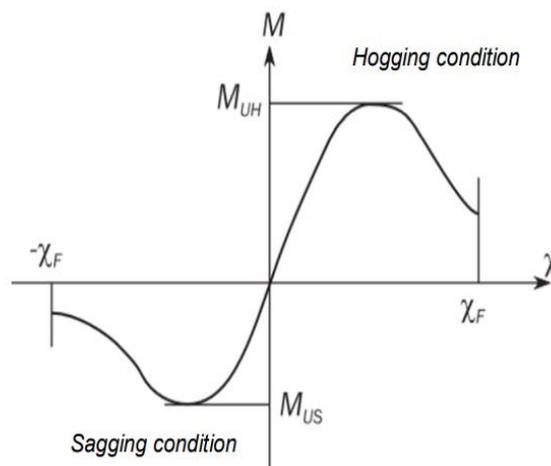
Gambar 2.15 (c) menunjukkan puncak gelombang berada di tengah kapal. Hal ini menunjukkan gaya apung lebih besar pada bagian tengah kapal dibandingkan di ujung kapal sehingga menghasilkan kondisi *hogging*,

*hogging* berarti kapal melengkung pada bagian tengah.



Gambar 2.15. Momen Lentur Gelombang pada Gelombang regular [19]

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.16. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.



Gambar 2.16. Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan [24]

Perhitungan kekuatan-batas struktur dengan metode *NLFEA* perlu memperhatikan hal-hal seperti tipe metode *NLFEA*, *algoritma iterative solution*, metode *arc-length*, proses peningkatan beban, pembebanan dan kondisi syarat batas, ketidaksempurnaan geometrik, spesifikasi material,

*meshing*, dan elemen material.

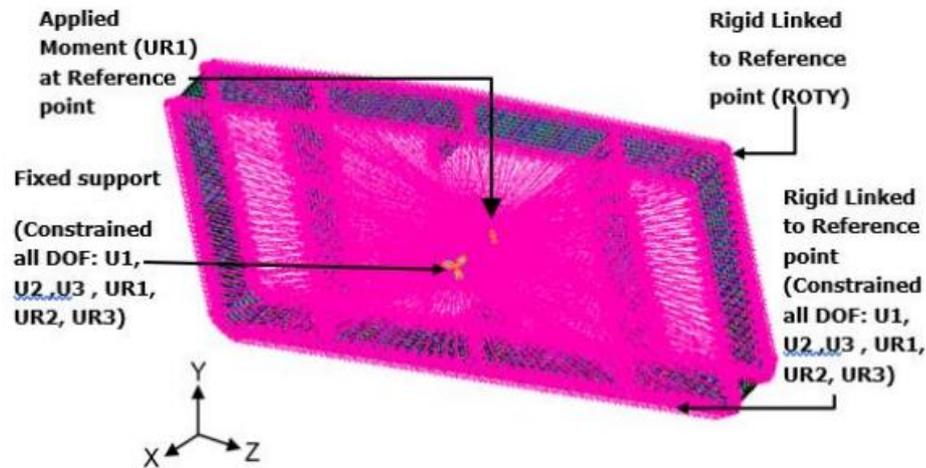
Kekuatan-batas momen lentur kapal pada kondisi *intact* dan kondisi kerusakan dapat dianalisa dengan menggunakan tipe analisa statis, analisa quasi-statis, dan analisa dinamis. Analisa statis dan analisa quasi statis banyak digunakan oleh para peneliti untuk menghitung kekuatan-batas struktur kapal.

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*.

Metode *arc-length* cocok untuk solusi kesetimbangan statis *non-linear*. Metode ini menggunakan metode *Crisfield* untuk mencegah fluktuasi ukuran langkah selama iterasi ekuilibrium. Diasumsikan bahwa semua besaran beban dapat dikontrol oleh parameter skalar tunggal (*total load factor*).

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 lainnya di *full constrain*. Ujung model menggunakan *rigid link*, diberikan momen lentur, reaksi pada ujung model yang di *constrain* akan mencapai titik batas kekuatan dari struktur.



Gambar 2.17. Kondisi batas untuk kontrol kelengkungan [4]

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. Kondisi syarat batas untuk kontrol kelengkungan dapat dilihat pada gambar 2.17.

Selama fabrikasi struktur kapal (*cutting, rolling, bending, welding*) terjadi ketidaksempurnaan geometri dan tegangan sisa yang dapat memengaruhi kekuatan batas struktur. Metode *NLFEA* dapat mengatasi ketidaksempurnaan geometrik tersebut.

Kurva tegangan tegangan dari material yang digunakan pada model elemen hingga harus tersedia. Kurva tegangan regangan sangat menentukan nilai kekuatan-batas dari struktur kapal.

Ukuran dan kualitas meshing sangat penting untuk membandingkan hasil perhitungan antara metode *NLFEA* dan metode *linear FEA*. 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.

*SHELL* 181 adalah elemen material yang tepat untuk menganalisis struktur *shell* yang tipis hingga sedang. *SHELL* 181 sangat cocok untuk *linear*, rotasi besar, dan/atau aplikasi *nonlinear strain* besar. Perubahan ketebalan *shell* dicatat pada *nonlinear* analisis. Terdapat efek beban kekakuan dari tekanan terdistribusi.

*SHELL* 181 dapat digunakan untuk aplikasi berlapis untuk pemodelan *shell* komposit atau konstruksi berlapis. Akurasi dalam pemodelan *shell* komposit diatur oleh teori *shear-deformation* orde pertama (biasanya disebut sebagai teori shell *Mindlin-Reissner*).