

**SKRIPSI**

**SIMULASI KERUSAKAN TUBRUKAN PADA KAPAL VLCC (*VERY  
LARGE CRUDE CARRIER*) TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR**

Disusun dan diajukan oleh

**BIPA RAHMADYAN SETIA**

**D081 18 1315**



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

## LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

### SIMULASI KERUSAKAN TUBRUKAN PADA KAPAL VLCC (VERY LARGE CRUDE CARRIER) TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR

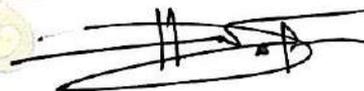
Disusun dan diajukan oleh  
**BIPA RAHMADYAN SETIA**  
**D081181315**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas  
Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 6 Juli 2022 dan dinyatakan  
telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing utama,

Pembimbing Pendamping,



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

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

**NIP.197606062005011003**

**NIP. 198704252019031012**

Ketua Program Studi



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

**NIP. 197506052002121003**

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bipa Rahmadyan Setia  
Nomor Mahasiswa : D081181315  
Program Studi : Teknik Kelautan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

“Simulasi Kerusakan Tubrukan Pada Kapal VLCC (*Very Large Crude Carrier*)  
Terhadap Kekuatan 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, Juli 2022

Yang menyatakan,



Bipa Rahmadyan Setia

## ABSTRAK

**BIPA RAHMADYAN SETIA.** *Simulasi Kerusakan Tubrukan kapal VLCC (Very Large Crude Carrier) Terhadap kekuatan Membujur (dibimbing oleh Muhammad Zubair Muis Alie dan Habibi).*

Kerusakan yang disebabkan oleh tubrukan dapat terjadi pada lambung kapal dan mengancam keselamatan kapal serta lingkungan sekitarnya. Dalam penelitian ini dilakukan analisa perbandingan kekuatan batas kapal VLCC pada kondisi utuh dan setelah terjadi tubrukan. Analisa perbandingan kekuatan batas dilakukan dengan menggunakan metode *Non Linear Finite Element Analysis* (NLFEA). Analisa kekuatan batas dibagi atas dua kondisi yaitu kondisi kapal VLCC saat mengalami *hogging* dan kondisi kapal VLCC saat mengalami *sagging*. Hasil analisis dikeluarkan dalam bentuk grafik hubungan antara momen lentur dan kelengkungan. Hasil penelitian menunjukkan kekuatan batas kapal pada kondisi utuh saat *hogging* sebesar  $1,936 \times 10^{13}$  Nmm dan *sagging* sebesar  $-1,935 \times 10^{13}$  Nmm. Pada kondisi kerusakan tipe 1 kekuatan batas saat *hogging* sebesar  $1,772 \times 10^{13}$  Nmm dan *sagging* sebesar  $-1,776 \times 10^{13}$  Nmm. Pada kondisi kerusakan tipe 2 kekuatan batas saat *hogging* sebesar  $1,697 \times 10^{13}$  Nmm dan *sagging*  $-1,697 \times 10^{13}$  Nmm.

*Kata kunci: VLCC, tubrukan, metode numerik, kerusakan, kekuatan batas*

## ABSTRACT

**BIPA RAHMADYAN SETIA.** *Simulation of VLCC (Very Large Crude Carrier) Collision Damage against to the longitudinal strength* (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Habibi**)

Damage caused by a collision can occur in the hull of the ship and threaten the safety of the ship and the surrounding environment. In this study, a comparative analysis of the strength of the VLCC vessel was carried out in the intact condition and collision damage. The strength comparison analysis was carried out using the Non Linear Finite Element Analysis (NLFEA) method. The longitudinal strength analysis is divided into two conditions, namely under hogging and sagging condition. The results of obtain by numerical method is plotted interms of moment curvature curve relationship. The result shows that ultimate strength under intact in hogging condition is  $1,936 \times 10^{13}$  Nmm and sagging condition is  $-1,935 \times 10^{13}$  Nmm. For first damage condition, type 1 the ultimate strength under hogging condition is  $1,772 \times 10^{13}$  Nmm and sagging condition is  $-1,776 \times 10^{13}$  Nmm. In case of second damage, the ultimate strength under hogging is  $1,697 \times 10^{13}$  Nmm and sagging is  $-1,697 \times 10^{13}$  Nmm.

*Keywords: VLCC, collision, numerical method, damage, 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:

“SIMULASI KERUSAKAN TUBRUKAN PADA KAPAL VLCC (*VERY LARGE CRUDE CARRIER*) TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR”

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Ibu **Yanti** dan Bapak **Rahmat Setia** 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, ST., MT., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama sekaligus Penasehat Akademik (PA) yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk nasehat, bimbingan dan pengarahan selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan hingga pengerjaan skripsi mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
2. Bapak **Habibi, ST., MT.** selaku dosen pembimbing kedua 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. Chairul Paotonan, ST., MT** selaku Ketua Program Studi Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. Bapak **Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.** dan Bapak **Ir. Juswan, ST., MT.** selaku dosen penguji yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran dalam setiap seminar.
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. Kakak **Indah Melati Suci., S.T.,** yang telah membantu dan meluangkan waktunya untuk saya dalam mengerjakan skripsi.
8. **Teman-teman Labo OSAREL** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka.
9. **Teman-teman Mahasiswa Teknik Kelautan 2018** terkhusus **kelas A** atas segala dukungannya. Tak lupa pula penulis sampaikan banyak terimakasih kepada kanda-kanda Senior dan dinda-dinda Junior atas motivasi dan dukungannya.
10. **Teman-teman lama di Kampung** terkhusus grup WA **Jayamahe,** yang selalu mendukung dari jarak jauh. Selalu komunikasi saling memberikan semangat dan motivasi sehingga dapat memacu saya mempercepat penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan

sebagai bahan untuk menutupi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.  
*Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.*

Gowa, 6 Juli 2022



Bipa Rahmadyan Setia

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iv
PRAKATA .....	vi
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR ISTILAH.....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah .....	2
1.4. Tujuan Penelitian .....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	3
1.6. Sistematika Penulisan .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1. Sejarah Kapal Tanker .....	5
2.2. Jenis Kapal Tanker .....	6
2.3. Desain Struktur VLCC .....	9
2.4. Beban-beban pada kapal .....	11
2.5. Deformasi Material .....	13
2.6. Hubungan Tegangan Regangan .....	14
2.7. Regangan.....	18
2.8. Perhitungan Kekuatan Batas .....	20
2.9. Metode Elemen Hingga .....	23
BAB III METODE PENELITIAN .....	28
3.1. Jenis Penelitian .....	28
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian .....	28
3.3. Penyajian Data .....	28
3.4. Analisa Data .....	32
3.6. Diagram Alir .....	34

BAB IV PEMBAHASAN .....	36
4.1. Objek Penelitian.....	36
4.2. Kekuatan Kapal VLCC terhadap Momen Lentur-Batas Kondisi Utuh Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	38
4.3. Kekuatan Kapal VLCC terhadap Momen Lentur-Batas Kondisi Kerusakan Tipe 1 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	40
4.4. Kekuatan Kapal VLCC terhadap Momen Lentur-Batas Kondisi Kerusakan Tipe 2 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	41
4.5. Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal VLCC Kondisi Utuh Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	43
4.6. Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal VLCC Kondisi Tipe 1 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	45
4.7. Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal VLCC Kondisi Kerusakan Tipe 2 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	47
4.8. Perbandingan kekuatan batas kapal VLCC menggunakan metode elemen hingga.....	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	51
5.1. Kesimpulan.....	51
5.1. Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA .....	52

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Kapal Crude Carrier Oil Tanker.....	6
Gambar 2.2.	Kapal Product Tanker .....	7
Gambar 2.3.	Kapal <i>Chemical Tanker</i> .....	8
Gambar 2.4.	Konstruksi Single Hull Tanker .....	10
Gambar 2.5.	Struktur Web-frame kapal VLCC.....	10
Gambar 2.6.	Tegangan normal.....	15
Gambar 2.7.	Tegangan tarik .....	15
Gambar 2.8.	Tegangan tekan.....	16
Gambar 2.9.	Diagram tegangan–regangan baja .....	18
Gambar 2.10.	Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan .....	21
Gambar 2.11.	<i>Three-cargo-hold single bulk carrier</i> .....	27
Gambar 3.1.	Konfigurasi penampang midship VLCC .....	38
Gambar 3.2.	<i>Meshing</i> .....	38
Gambar 3.3.	Diagram Alir .....	42
Gambar 4.1.	Model Kapal VLCC Kondisi Utuh .....	43
Gambar 4.2.	Model Kapal VLCC Kerusakan Tipe 1 .....	44
Gambar 4.3.	Model Kapal VLCC Kerusakan Tipe 2 .....	43
Gambar 4.4.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal VLCC pada kondisi utuh akibat <i>hogging</i> .....	44
Gambar 4.5.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal VLCC pada kondisi utuh akibat <i>sagging</i> .....	43
Gambar 4.6.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal VLCC pada kondisi kerusakan tipe 1 akibat <i>hogging</i> .....	44
Gambar 4.7.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal VLCC pada kondisi kerusakan tipe 1 akibat <i>sagging</i> .....	43
Gambar 4.8.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal VLCC pada kerusakan tipe 2 akibat <i>hogging</i> .....	44
Gambar 4.9.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal VLCC pada kerusakan tipe 2 akibat <i>sagging</i> .....	43

Gambar 4.10. Grafik momen-kelengkungan kapal VLCC kondisi utuh.....	44
Gambar 4.11. Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi utuh akibat <i>hogging</i> .....	43
Gambar 4.12. Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi utuh akibat <i>sagging</i> .....	44
Gambar 4.13. Grafik momen-kelengkungan kapal VLCC kondisi kerusakan tipe 1 .....	44
Gambar 4.14. Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi kerusakan tipe 1 akibat <i>hogging</i> .....	43
Gambar 4.15. Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi kerusakan tipe 1 akibat <i>sagging</i> .....	44
Gambar 4.16. Grafik momen-kelengkungan kapal VLCC kondisi kerusakan tipe 2 .....	44
Gambar 4.17. Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi kerusakan tipe 2 akibat <i>hogging</i> .....	44
Gambar 4.18. Deformasi kekuatan-batas kapal VLCC kondisi kerusakan tipe 2 akibat <i>sagging</i> .....	44
Gambar 4.19. Grafik momen-kelengkungan kapal VLCC kondisi utuh dan kerusakan tipe 1 serta kerusakan tipe 2 .....	43

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Konfigurasi Material Stiffener kapal VLCC .....	51
Tabel 4.1.	Kekuatan-batas momen lentur kapal VLCC kondisi utuh .....	52
Tabel 4.2.	Kekuatan-batas momen lentur kapal VLCC kondisi kerusakan tipe 1 .....	56
Tabel 4.3.	Kekuatan-batas momen lentur kapal VLCC kondisi kerusakan tipe 2 .....	52
Tabel 4.4.	Kekuatan-batas momen lentur kapal VLCC kondisi utuh dan kerusakan tipe 1 serta kerusakan tipe 2 .....	56

## DAFTAR NOTASI

B	= Lebar kapal	(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	(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> )

## 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
- 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

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.

Tubrukan kapal dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok, tubrukan samping dan tubrukan depan. Tubrukan dari samping mewakili situasi tubrukan antar kapal. Dengan kata lain, kapal yang menyerang bertabrakan dengan struktur samping kapal yang menabrak. Tabrakan langsung yang khas mewakili situasi ketika haluan kapal bertabrakan dengan tanggul tetap seperti dermaga atau jembatan melintasi rute pelayaran internasional atau instalasi lepas pantai yang didukung gravitasi [1].

Salah satu aspek teknis yang mempengaruhi tingkat keamanan kapal disaat beroperasi baik pada kondisi laut tenang maupun kondisi laut bergelombang adalah kekuatan dari struktur konstruksi kapal tersebut. Struktur kapal dapat menahan berbagai beban-beban, antara lain beban internal yang disebabkan oleh pembebanan yang ada di kapal dan beban eksternal seperti beban gelombang laut dan angin, serta posisi dari kapal tersebut terhadap beban gelombang laut dan beban angin yang datang/terjadi. Tanker adalah kategori kapal yang didesain dengan lambung dek tunggal termaksud penyusunan tanki-tanki secara integral maupun *independent*, khususnya untuk angkutan cargo curah dalam bentuk cairan [2].

Banyak kapal tanker yang dioperasikan menggunakan single hull pada tahun 1960-1990. Pada tahun tersebut, banyak terjadi kecelakaan kapal yang mengakibatkan pencemaran dan dampak kerusakan lingkungan

laut. Masalah lingkungan akibat kebocoran atau tumpahan minyak ini juga berpotensi menimbulkan kerugian terhadap ekologi ekonomi sumber daya perikanan. Berdasarkan data tersebut, karena adanya degradasi struktural kapal, kapal kemudian kehilangan kekakuannya dan terjadi keruntuhan kapal [3]. 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 [4].

Ada beberapa pendekatan untuk melakukan analisis kekuatan lambung kapal setelah terjadi kerusakan. Salah satunya *Finite Element Method* atau metode elemen hingga. Banyak peneliti telah melakukan penelitian tentang perhitungan kekuatan longitudinal kapal dalam kondisi utuh atau rusak dengan menggunakan analisis FEM *nonlinear* [5].

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dalam pengerjaan tugas akhir ini dilakukan penelitian tentang simulasi kerusakan kapal VLCC setelah terjadi tubrukan.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana kekuatan membujur VLCC (*Very Large Crude Carrier*) saat *hogging* dan *sagging* setelah terjadinya tubrukan.

## **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 dengan kerusakan sebesar 1 jarak gading dengan menggunakan metode elemen hingga.
2. Menganalisa kekuatan membujur menggunakan software ANSYS.
3. Kapal dianalisa dalam 3 kondisi yaitu kondisi utuh, kondisi kerusakan tipe 1, dan kondisi kerusakan tipe 2

#### **1.4. Tujuan Penelitian**

Beberapa hal yang diharapkan dapat tercapai dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan membujur VLCC (Very Large Crude Carrier) saat hogging dan sagging setelah terjadinya tubrukan.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian simulasi tubrukan pada kapal VLCC terhadap kekuatan membujur 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 simulasi tubrukan kapal VLCC terhadap kekuatan membujur menggunakan metode elemen hingga. Selain itu berisi juga mengenai perumusan masalah yang dianalisis, batasan masalah penelitian yang tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini 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 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 II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Sejarah Kapal Tanker

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 [6].

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 [7].

Pada Desember 1966, dalam kurun waktu tiga minggu, tiga VLCC yang masih baru mengalami ledakan. Tiga kasus ini terjadi ketika proses pembersihan tangki kargo yang kosong. Seluruh awak kapal bertugas meninggal dunia. Ada banyak kebakaran yang terjadi di masa lalu, yang terakhir Seven Skies yang menewaskan empat awak kapal. Akan tetapi tiga kasus ini terjadi dalam waktu yang singkat, dua diantaranya VLCC milik Shell [8]. 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 [9]

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.

## 2.2. Jenis Kapal Tanker

Kapal Tanker terdiri atas tiga jenis yaitu *crude carrier*, *product Tanker* dan yang lebih khusus seperti *chemical Tanker*, *gas carrier* dan *asphalt / bitumen carrier*. Sampai tahun 2016, terdapat 7.065 buah Oil Tanker di dunia.

### 1. Kapal *Crude Carrier*

Cargo curah cair yang dibawa oleh *Crude Carrier* umumnya homogen. Perbedaan kualitas minyak mentah tidak berpengaruh karena pada akhirnya akan diolah di tahap berikutnya. Kapal *Crude Carrier* dapat terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kapal *Crude Carrier* Oil Tanker [10]

### 2. Kapal *Product Tanker*

Minyak mentah diolah menjadi berbagai produk minyak. Produk minyak yang ringan seperti bensin, minyak tanah, dan gasoil, disebut *clean*

*product*. Sedangkan yang lebih berat seperti minyak bakar (*oil fuel*) dan residu disebut *dirty product*. *Product Tanker* terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan ukuran dan muatannya (*clean atau dirty product*). *Clean Product Tanker* dapat mengangkut sebagian *dirty product* (kecuali jenis minyak yang paling berat), sedangkan *Dirty Product Tanker* tidak dapat memuat *clean product*. Tangki pada *Clean Product Tanker* dilapisi bahan khusus (*coating*) untuk mencegah korosi dan harus selalu dibersihkan terlebih dahulu sebelum pemuatan. *Clean Product Tanker* memiliki sistem pemisah sehingga dapat memuat cargo yang berbeda tanpa resiko bercampur. Tangki pada *Dirty Product Tanker* tidak dilapisi bahan khusus dan tidak memiliki sistem pemisahan, kapal *product tanker* dapat terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kapal Product Tanker [11]

### 3. Kapal *Chemical Tanker*

Kapal *Tanker* kimia adalah 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 kimia curah cair termasuk jenis muatan yang berbahaya, sebagian besar mudah terbakar dan/atau beracun. IBC Code membagi kapal *Tanker* kimia dalam tiga jenis

berdasarkan kapabilitasnya mengangkut bahan kimia, yaitu ST1, ST2, dan ST3. *Chemical Tanker* disebut juga *parcel Tanker*, terlihat pada Gambar 2.3. Biasanya berukuran kecil, dari sekitar 5.000 ton dwt hingga 25.000 dwt. Beberapa kapal *Tanker* pengangkut bahan kimia ini ada yang berukuran hingga 50.000 ton dwt. Pada tahun 2016, populasi kapal *Tanker* jenis di dunia adalah 5.204 unit.



Gambar 2.3 Kapal *Chemical Tanker* [12]

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:

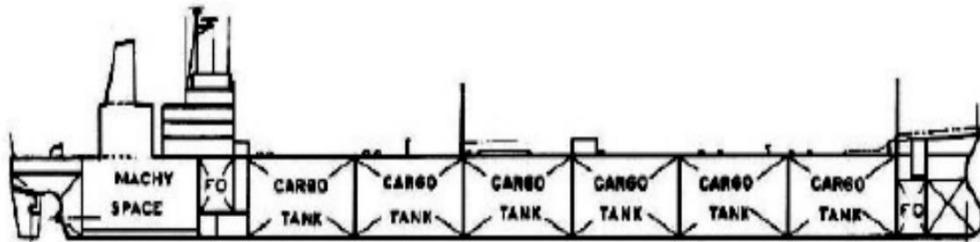
LOA	: 350 m
Beam	: 55 m
Draft	: 28 m
Bobot mati	: 160.001 - 300.000 DWT

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

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

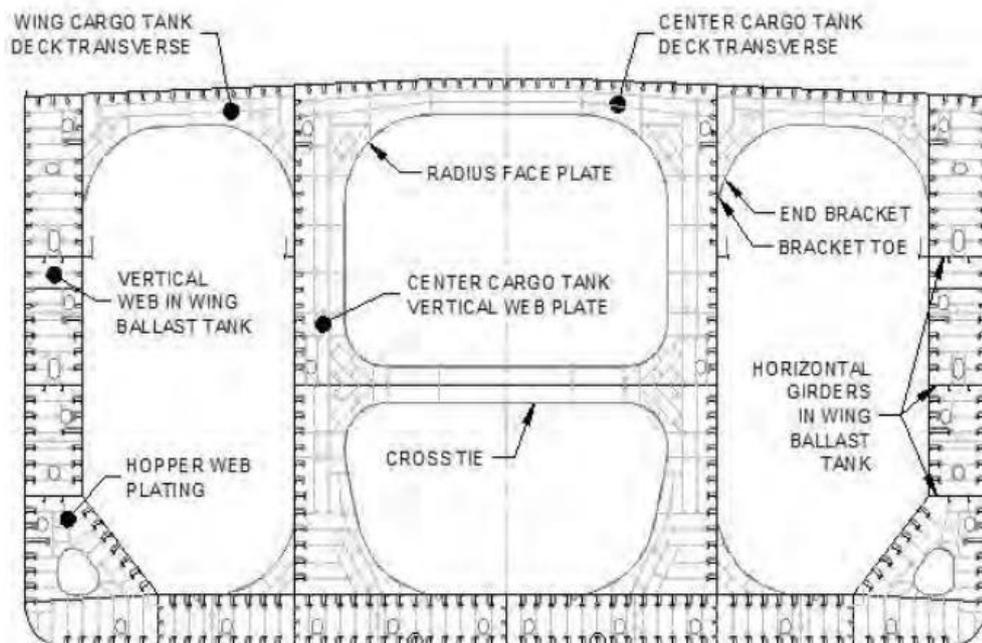
### 2.3. Desain Struktur VLCC

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 [13]. Ruang akomodasi dan permesinan selalu berada di belakang, sesuai dengan Gambar 2.4. Kargo terpasang dengan pompa muatan yang dipasang disatu 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 [14]

Susunan struktural dari *web frame* kapal *Very Large Crude Carrier* ditunjukkan pada Gambar 2.5. Pelat horizontal (*Girder* atau *Stringer Horizontal*) disusun di *wing tanks* dan *walkways* diatur dibagian atas ruang kargo untuk memungkinkan pemeriksaan semua struktur. Struktur *sloping hopper* dibagian 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 m sampai 5 meter tergantung dari ukuran kapal itu sendiri [15].



Gambar 2.5. Struktur Web-frame kapal VLCC [16]

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 [17].

#### **2.4. Beban-beban pada kapal**

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 [18]. 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 [19]. Adapun beban-beban yang bekerja pada kapal:

##### **1. 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) [20]. Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.1

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

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 engan garis bawah (m)

$H$  = Tinggi Kapal (m)

$C_D$  = Koefisien Drag

## 2. 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 [20].

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

$$P_{s_1} = 10(T - z) + P_0 \cdot C_f \left( 1 + \frac{z}{T} \right) a \quad (2.2)$$

Beban luar sisi kapal di atas garis muat air ( $P_{s2}$ ) yang dapat ditinjau pada Persamaan 2.3

$$P_{s_2} = P_0 \cdot C_f \quad (2.3)$$

Dimana:

$P_0$  = *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 engan garis bawah (m)

$H$  = Tinggi Kapal (m)

$C_f$  = Faktor distribusi

## 3. 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 [20].

Persamaan 2.4 ialah persamaan beban luar alas kapal

$$P_B = 10.T + P_o.C_f \quad (2.4)$$

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

#### 4. Beban Geladak Muatan Kapal

Beban geladak muatan merupakan beban yang ditimbulkan karena adanya muatan pada geladak [20]. Beban geladak muatan ini dapat dihitung dengan Persamaan 2.5.

$$P_L = P_C \cdot (1 + a_v) \quad (2.5)$$

Dimana:

$P_L$  = Beban Geladak Muatan (kN/m<sup>2</sup>)

$P_C$  = Beban statik kapal (kN/m<sup>2</sup>)

$a_v$  = Faktor distribusi

$T$  = Sarat kapal (m)

#### 5. Beban Alas Dalam Kapal

Beban alas dalam kapal merupakan beban yang terjadi karena adanya tekanan beban dari dalam kapal [20]. Beban alas dalam kapal ini dapat dihitung dengan Persamaan 2.6.

$$P_i = 9,81 \cdot \left( \frac{G}{V} \right) \cdot h \cdot (1 + a_v) \quad (2.6)$$

Dimana:

$P_i$  = Beban alas dalam kapal (kN/m<sup>2</sup>)

$G$  = Massa kapal (ton)

$V$  = Volume kapal m<sup>3</sup>

$a_v$  = Faktor distribusi

### 2.5. 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 2.7 berikut:

$$\delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.7)$$

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)

## 2.6. Hubungan Tegangan Regangan

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

### 1. Tegangan Normal

Pengetahuan dan pengertian tentang bahan dan perilakunya jika mendapat gaya atau beban sangat dibutuhkan di bidang teknik bangunan. Jika suatu batang prismatik, 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. 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 2.8 dan Gambar 2.6:

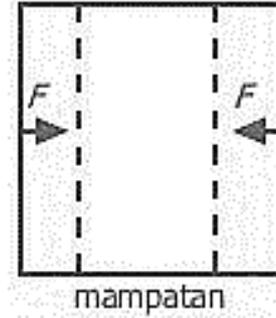
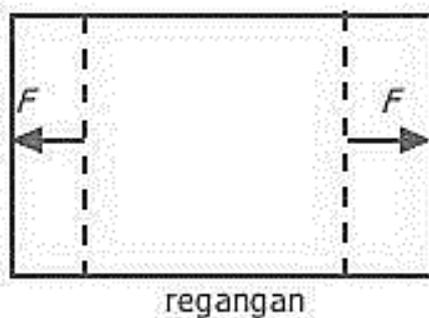
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

Dimana:

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

F = gaya (N)

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



Gambar 2.6. Tegangan normal [21]

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.

## 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. Secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 2.9 dan dapat dilihat pada Gambar 2.7:

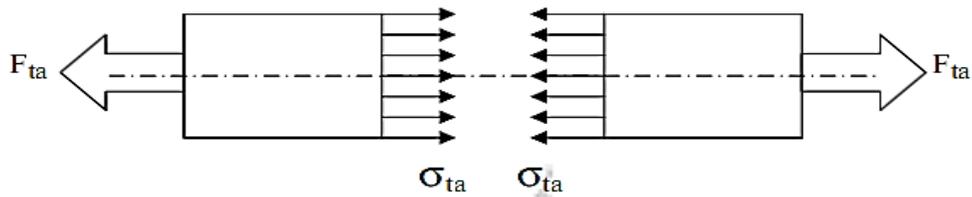
$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (2.9)$$

Dimana:

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

F = gaya tarik (N)

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

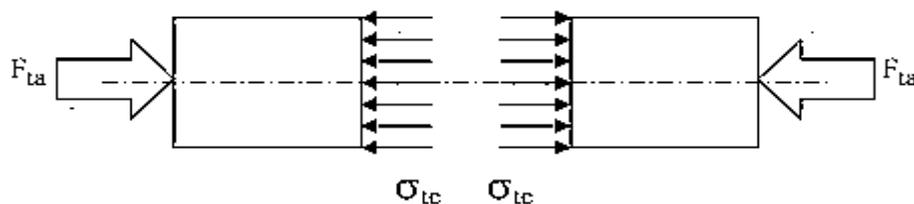


Gambar 2.7. Tegangan tarik [22]

Tegangan tarik ( $\sigma_{tr}$ ) terjadi akibat bekerjanya gaya tarik ( $F_{tr}$ ) pada satuan luas penampang ( $A$ ) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio antara perpanjangan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tarik  $\epsilon_{tr}$ .

### 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 ( $A$ ) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan. Perbandingan antara perpendekan ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tekan  $\epsilon_{ta}$  secara matematik dapat dilihat pada Gambar 2.8:



Gambar 2.8. Tegangan tekan [22]

Selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.10:

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (2.10)$$

### 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 2.11:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.11)$$

Dimana:

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

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

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

#### 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. 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.

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

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

## 7. Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut bersumber pada *American Institute of Steel Construction* (AISC, 2014) dan *American Petroleum Institute Recommended Practice 2A* (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.

### 2.7. Regangan

Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada Persamaan 2.12 dan Gambar 2.9:

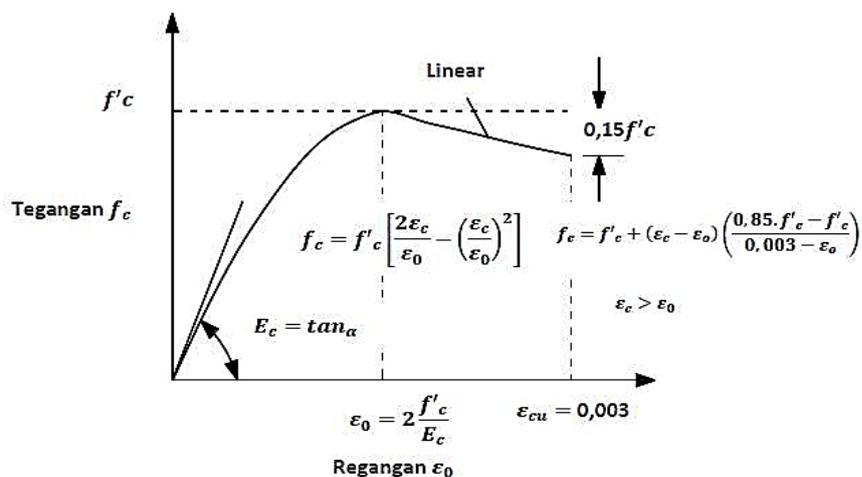
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.12)$$

Dimana:

$\varepsilon$  = regangan

$\Delta L$  = pertambahan panjang (mm)

$L$  = panjang mula-mula (mm)



Gambar 2.9. Diagram tegangan-regangan baja [23]

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.18, 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 prakter, 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 strenght* (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 2.13 dan 2.14:

$$E = \frac{FL}{A\Delta L} \quad (2.13)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.14)$$

Dimana:

$E$  = *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.

## 2.8. 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).

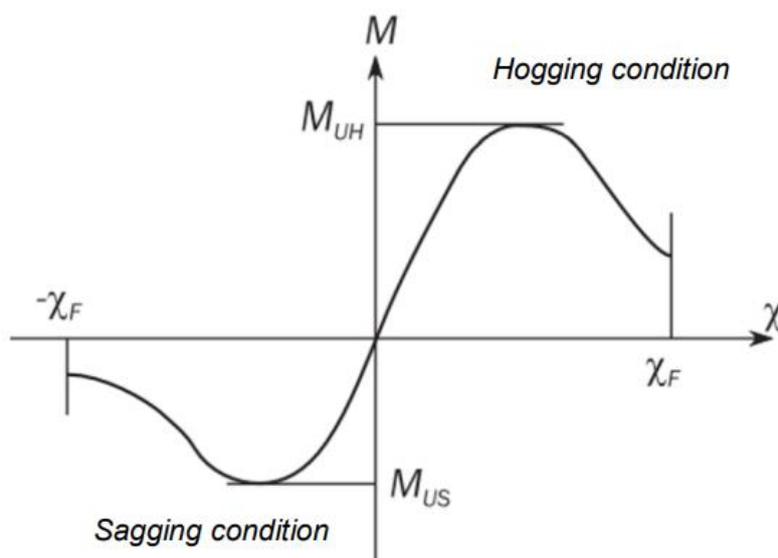
Kemampuan untuk memprediksi secara akurat kekuatan ultimate *hull girder* ketika mengalami pembengkokan longitudinal adalah salah satu aspek yang penting dari desain struktur kapal. Kekuatan batas adalah batas

kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami collapse total [24].

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.

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

Kekuatan batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total [24]. Perhitungan kekuatan batas kapal tanker harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria Persamaan 2.15 [25]. 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*). Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.10. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*



Gambar 2.10. Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan [25]

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

Berdasarkan teori balok, tegangan lentur ( $\sigma$ ) pada penampang balok yang mengalami momen lentur dapat dihitung dengan Persamaan 2.16:

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

Dimana M adalah momen lentur, I adalah momen inersia dan z adalah jarak dari sumbu netral dari penampang balok ke lokasi tegangan lentur pada arah tinggi dari balok. Tegangan lentur maksimum ( $\sigma_{max}$ ) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.17 sebagai berikut:

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

Modulus penampang ( $S$ ) seperti pada persamaan 2.17, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu Persamaan 2.18 dan 2.19:

$$S_d = \frac{1}{Z_d}, \text{ untuk bagian } deck \quad (2.18)$$

$$S_b = \frac{1}{Z_b}, \text{ untuk bagian } bottom \quad (2.19)$$

Dimana ( $S_d$ ) dan ( $S_b$ ) adalah potongan penampang vertikal pada bagian *deck* dan *bottom* kapal, ( $Z_d$ ) dan ( $Z_b$ ) adalah jarak dari sumbu netral dari potongan penampang kapal ke *deck* atau *bottom*.

Pada teori balok, lambung kapal 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 2.20 dan 2.21 sebagai berikut:

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud} \quad (2.21)$$

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud} \quad (2.21)$$

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

## 2.9. Metode Elemen Hingga

Persoalan perancangan dapat diselesaikan dengan cara matematis dan numeris. Untuk benda-benda yang mempunyai bentuk yang tidak teratur (elemen isoparametrik), penyelesaiannya akan sulit menggunakan cara matematis. Sehingga perlu digunakan cara numerik, yang dalam perkembangannya disebut sebagai metode elemen hingga (*Finite Elements Method*). *Finite element method* (FEM) atau biasanya disebut *Finite Element Analysis* (FEA), adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*), seperti menghitung kekuatan struktur kapal, disamping metode lainnya seperti teori balok, metode *presumed stress distribution*, ISUM (*Idealized Structural Unit Method*) dan ISFEM (*Intelligent Supersize Finite Element Method*).

Dinamakan elemen hingga karena ukuran elemen kecil ini berhingga dan umumnya mempunyai bentuk geometri yang lebih sederhana dibandingkan kontinunya. Secara potensial, hasil yang paling akurat mengenai penilaian *ultimate strength* dapat diperoleh dengan menggunakan analisis NLFEM (*Non-linear Finite Element Method*) dari keseluruhan model struktural yang didiskritkan, yang memungkinkan simulasi dan evaluasi respon struktural *non-linier* untuk berbagai tingkat pembebanan. Namun, kualitas hasil yang diperoleh sangat bergantung pada kepatutan teknik idealisasi struktural yang digunakan (geometri, sifat material, ketidaksempurnaan struktural awal), kesetiaan diskritisasi (digunakan jenis elemen hingga, kepadatan *mesh*), dan sejauh mana model yang dianalisis (model struktural lengkap atau parsial). Secara umum, dapat disimpulkan bahwa sejumlah besar waktu, pengetahuan dan

pengalaman masih diperlukan untuk menyelesaikan seluruh prosedur analisis secara sukses (terutama untuk pra/pasca pemrosesan). Oleh karena itu, pemanfaatan NLFEM (*Non-linear Finite Element Method*) dalam praktik analisis kekuatan *ultimate girder* lambung saat ini sebagian besar dikurangi menjadi analisis model parsial untuk tujuan verifikasi metode analisis alternatif, atau untuk analisis langka dari model lengkap dan terperinci untuk merekonstruksi keadaan dan mengidentifikasi sebab-sebab keruntuhan struktural yang nyata terjadi selama eksploitasi struktur - struktur tertentu. Di sisi lain, analisis NLFEM (*Non-linear Finite Element Method*) sering digunakan untuk derivasi dan verifikasi berbagai formulasi sederhana dari respon elasto-plastik dari komponen struktural yang dikenakan dengan berbagai jenis muatan murni atau gabungan.

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 [26].

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.

Perhitungan kekuatan-batas struktur dengan metode NLFEA (*Non-linear Finite Element Analysis*) perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

a. Tipe Metode NLFEA (*Non-linear Finite Element Analysis*)

Kekuatan-batas momen lentur kapal pada kondisi utuh dan rusak dapat dianalisa dengan menggunakan 3 tipe metode NLFEA (*Non-linear*

*Finite Element Analysis*) yaitu:

- 1) Analisa statis
- 2) Analisa quasi-statis
- 3) Analisa dinamis

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

b. Algoritma *Iterative Solution*

Tiga jenis algoritma *iterative solution* yang dapat digunakan pada metode NLFEA adalah algoritma *newton-raphson*, algoritma *quasi Newton-Raphson* dan algoritma risiko. 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*.

c. Proses Peningkatan Beban

Pembebanan yang diaplikasikan pada metode NLFEA (*Non-linear Finite Element Analysis*) 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.

d. 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*.

e. 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 (*Non-linear Finite Element Analysis*) dapat mengondisikan ketidaktepatan geometrik tersebut.

f. 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.

g. *Meshing*

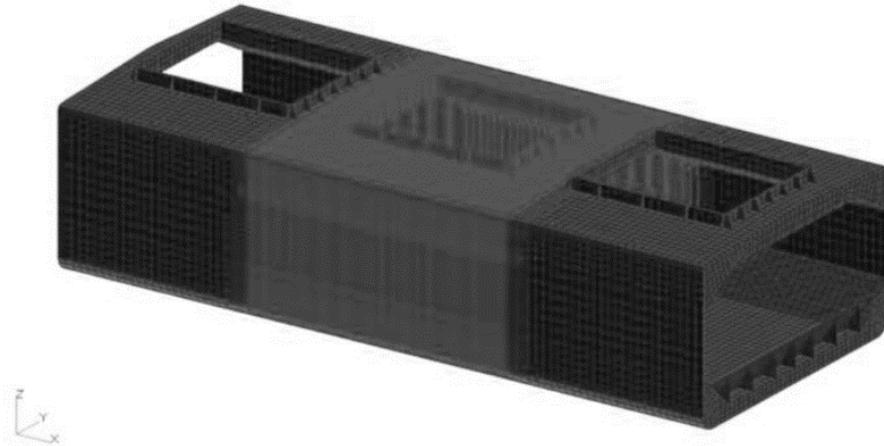
Ukuran dan kualitas *meshing* sangat penting untuk membandingkan hasil perhitungan antara metode NLFEA (*Non-linear Finite Element Analysis*) dan metode linear FEA (*Finite Element Analysis*). Sebelum melakukan analisa dengan metode NLFEA dalam skala besar perlu untuk melakukan studi *mesh convergence*. Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar sebaiknya di-*meshing* dengan ukuran yang lebih kecil untuk dapat memperlihatkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin kecil nilai *meshing* maka perangkat komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi yang tinggi. Dalam penelitian ini, ukuran *meshing* yang digunakan sebesar 300 mm dengan bentuk *quadmapped*.

h. Tipe elemen

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

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 [24]. 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].



Gambar 2.11. *Three-cargo-hold single bulk carrier* [28]

Muis Alie [28], memodelkan elemen hingga *single hull tanker* ukuran Panamax dengan struktur satu sisi pada gambar 2.11. Model ini mencakup tiga ruang kargo dan dua sekat melintang dalam arah membujur. Kerusakan diasumsikan berada ditengah.