

**SKRIPSI**

**ANALISIS KEKUATAN KAPAL *DOUBLE HULL TANKER* DENGAN  
PERTIMBANGAN KERUSAKAN MEMJUJUR**

Disusun dan diajukan oleh

**SAFITRI ANWAR**

**D081181002**



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA

2022

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**  
**ANALISIS KEKUATAN KAPAL *DOUBLE HULL TANKER* DENGAN**  
**PERTIMBANGAN KERUSAKAN MEMJUJUR**

Disusun dan diajukan oleh

**SAFITRI ANWAR**

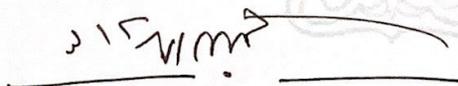
**D081181002**

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

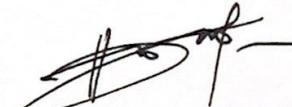
Menyetujui,

Pembimbing utama,

Pembimbing Pendamping,

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

**NIP.197606062005011003**

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

**NIP. 198704252019031012**

Ketua Program Studi

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

**NIP. 197506052002121003**

## PERNYATAAN KEASLIAN SKIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Safitri Anwar  
Nomor Mahasiswa : D081181002  
Program Studi : Teknik Kelautan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

"Analisis Kekuatan Kapal *Double Hull Tanker* 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, Mei 2022

Yang menyatakan,



Safitri Anwar

## ABSTRAK

**SAFITRI ANWAR.** Analisis Kekuatan Kapal Double Hull Tanker Dengan Pertimbangan Kerusakan Membujur (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Habibi**).

Beberapa insiden kapal terjadi karena beban yang bekerja pada struktur kapal melebihi kekuatan batas kapal. Pada studi kali ini, analisis kapal double hull tanker yaitu T3 dan T4 dilakukan dengan mempertimbangkan perluasan kerusakan memanjang. Kerusakan disimulasikan pada sisi samping kapal pada bagian geladak. Lebar dan panjang kedua kapal serupa. Sedangkan jarak longitudinal yang diambil satu jarak gading. Panjang kerusakan memanjang diambil sebesar 20% dan 80%. Pada satu jarak gading kerusakan 20% dimana luas kerusakan sebesar 1000 mm, begitupun dengan kerusakan 80% dimana luas kerusakan sebesar 4000 mm. Penampang kedua kapal diatur untuk tetap datar selama keruntuhan progresif. MPC (Multi-Point Constraint) dipakai untuk menganalisis kedua dua kapal double hull tanker. Satu sisi penampang dihubungkan ke MPC sebagai titik acuan. Sisi lain ditempatkan untuk gaya rotasi. Analisis dilakukan dalam kondisi hogging dan sagging baik pada kondisi utuh maupun rusak. Hasilnya diplot dari kurva momen-kelengkungan termasuk deformasinya. Tegangan kerja pada kapal double hull tanker T3 untuk kondisi utuh pada kondisi sagging di bottom sebesar  $144,893 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $-216,918 \text{ N/mm}^2$ , pada kondisi hogging di bottom sebesar  $-152,625 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $229,898 \text{ N/mm}^2$ . Tegangan kerja pada kapal double hull tanker T3 untuk kondisi kerusakan 20% pada kondisi sagging di bottom sebesar  $289,884 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $-379,381 \text{ N/mm}^2$ , pada kondisi hogging di bottom sebesar  $-211,482 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $220,033 \text{ N/mm}^2$ . Tegangan kerja pada kapal double hull tanker T3 untuk kondisi kerusakan 80% pada kondisi sagging di bottom sebesar  $276,645 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $-281,304 \text{ N/mm}^2$ , pada kondisi hogging di bottom sebesar  $-176,925 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $178,497 \text{ N/mm}^2$ . Tegangan kerja pada kapal double hull tanker T4 untuk kondisi utuh pada kondisi sagging di bottom sebesar  $141,141 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $-221,149 \text{ N/mm}^2$ , pada kondisi hogging di bottom sebesar  $-147,587 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $229,813 \text{ N/mm}^2$ . Tegangan kerja pada kapal double hull tanker T4 untuk kondisi kerusakan 20% pada kondisi sagging di bottom sebesar  $323,935 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $-398,044 \text{ N/mm}^2$ , pada kondisi hogging di bottom sebesar  $-192,499 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $197,965 \text{ N/mm}^2$ . Tegangan kerja pada kapal double hull tanker T4 untuk kondisi kerusakan 80% pada kondisi sagging di bottom sebesar  $181,558 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $-181,742 \text{ N/mm}^2$ , pada kondisi hogging di bottom sebesar  $-172,144 \text{ N/mm}^2$  dan di deck sebesar  $171,043 \text{ N/mm}^2$ .

*Kata kunci:* double hull tanker, penampang, metode numerik, kerusakan, kekuatan batas

## **ABSTRACT**

**SAFITRI ANWAR.** *Analysis of the Strength of Double Hull Tanker Ships With Longitudinal Damage Consideration (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Habibi**)*

*Some incidents of the ship take place due to the load acting on the ship structure more than the ability of the ships ultimate strength. In the present study, the analysis of double-hull tankers namely Type-3 and Type-4 is conducted by considering the longitudinal damage extend. The damage is simulated on the ship side shell pada deck part. The breadth and depth of the two ships are similar. While the longitudinal distance is taken one-frame space. The longitudinal damages extend are considered 20% dan 80%. Longitudinal damage length is taken by 20% and 80%. At one tusk distance the damage is 20% where the damage area is 1000 mm, as well as 80% damage where the damage area is 4000 mm. The cross-section of the two ships is set to remain plane during the progressive collapse. The MPC (Multi-Point Constraint) method is adopted to analyse both two double-hull tankers. One side of the cross-section is rigid linked to the MPC as the reference point. The other side is placed for rotational force. The analysis is performed under hogging and sagging conditions both intact and damaged. The result is plotted interms of the moment-curvature curve including their deformations. The working voltage on the double hull tanker T3 for intact conditions at sagging condition at the bottom is 144,893 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is -216,918 N/mm<sup>2</sup>, in hogging condition at the bottom is -152,625 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is 229,898 N/mm<sup>2</sup>. The working voltage on the double hull tanker T3 for 20% damage conditions at sagging condition at the bottom is 289.884 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is -379.381 N/mm<sup>2</sup>, in hogging condition at the bottom is -211.482 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is 220.033 N/mm<sup>2</sup>. The working voltage on the double hull tanker T3 for 80% damage conditions at sagging condition at the bottom is 276.645 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is -281.304 N/mm<sup>2</sup>, in hogging condition at the bottom is -176.925 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is 178.497 N/mm<sup>2</sup>. The working voltage on the double hull tanker T4 for intact condition at sagging condition at the bottom is 141.141 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is -221,149 N/mm<sup>2</sup>, in hogging condition at the bottom is -147.587 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is 229.813 N/mm<sup>2</sup>. The working voltage on the double hull tanker T4 for 20% damage at sagging condition at the bottom is 323,935 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is -398,044 N/mm<sup>2</sup>, in hogging condition at the bottom is -192,499 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is 197,965 N/mm<sup>2</sup>. The working voltage on the double hull tanker T4 for 80% damage conditions at sagging condition at the bottom is 181.558 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is -181.742 N/mm<sup>2</sup>, in hogging condition at the bottom is -172.144 N/mm<sup>2</sup> and on the deck is 171.043 N/mm<sup>2</sup>.*

*Keywords: double hull tanker, cross-section, 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:

### "ANALISIS KEKUATAN KAPAL *DOUBLE HULL TANKER* DENGAN PERTIMBANGAN KERUSAKAN MEMBUJUR"

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

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

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
2. Bapak **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, S.T., M.T** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. Bapak **Ir. Juswan, ST. MT.** selaku penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga saya dapat menyelesaikan studi.
5. Bapak **Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.** selaku dosen penguji yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk dapat menjadi dosen penguji di setiap seminar.
6. **Dosen–Dosen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
7. **Tenaga Kependidikan Program Studi Teknik Kelautan,** yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
8. Kakak **Indah Melati Suci., S.T.,** yang telah membantu dan meluangkan waktunya untuk saya dalam mengerjakan skripsi.
9. **Nur Indri Novianti H.** selaku *partner* skripsi yang sama-sama berproses dari awal dalam penelitian ini.
10. **Teman-teman Mahasiswa khususnya di Labo OSAREL : Andri, Yulin, Indri, Kofifah, Bipa, dan Dirham,** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka.
11. **Herni, Rieke, dan Fika** yang selalu memberi motivasi dan dukungan selama kuliah yang telah kita lalui bersama.
12. **Teman-teman Mahasiswa Teknik Kelautan 2018 kelas B** 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.

*Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.*

Gowa, Mei 2022

Safitri Anwar

## DAFTAR ISI

PRAKATA .....	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR NOTASI .....	xvi
DAFTAR ISTILAH.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	3
1.6. Sistematika Penulisan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1. Kapal <i>Tanker</i> .....	6
2.2. <i>Product Tanker</i> .....	6
2.3. <i>Crude Carrier</i> .....	7
2.4. Kapal <i>Gas Carrier</i> .....	8
2.5. Ukuran Kapal <i>Tanker</i> .....	11
2.6. Konstruksi Kapal <i>Tanker</i> .....	12
2.7. Konstruksi <i>Single Hull Tanker</i> .....	13
2.8. Konstruksi <i>Double Hull Tanker</i> .....	13
2.9. Beban-Beban Pada Konstruksi Kapal .....	16
2.10. Beban Geladak Cuaca.....	16
2.11. Beban Luar Sisi Kapal .....	17
2.12. Beban Luar Alas Kapal .....	17
2.13. Momen Lentur dan Gaya Geser .....	18
2.14. Deformasi Material .....	22
2.15. Tegangan Normal .....	23
2.16. Tegangan Tarik ( <i>Tensile Stress</i> ).....	24

2.17. Tegangan Tekan ( <i>Compressive Stress</i> ).....	24
2.18. Tegangan Geser ( <i>Shear</i> ).....	25
2.19. Tegangan Lentur ( <i>Bending Stress</i> ) .....	26
2.20. Tegangan Luluh ( <i>Crushing/Bearing Stress</i> ) .....	26
2.21. Tegangan Izin Dasar .....	26
2.22. Regangan .....	27
2.23. Kekuatan Batas Kapal Tanker ( <i>Ultimate Strength</i> ) .....	29
2.24. Metode NLFEA ( <i>Non-linear Finite Element Analysis</i> ).....	32
BAB III METODE PENELITIAN .....	36
3.1. Jenis Penelitian.....	36
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian .....	36
3.3. Penyajian Data .....	36
3.4. Analisa Data .....	40
3.5. Diagram Alir .....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
4.1. Kekuatan Kapal <i>Tanker</i> terhadap Momen Lentur- Batas Kondisi Utuh Kapal Tanker T3 Saat Hogging dan Sagging.....	42
4.2. Kekuatan Kapal <i>Tanker</i> terhadap Momen Lentur- Batas Kondisi Utuh Kapal Tanker T4 Saat Hogging dan Sagging.....	43
4.3. Kekuatan Kapal <i>Tanker</i> terhadap Momen Lentur- Batas Kondisi Kerusakan 20% Kapal <i>Tanker</i> T3 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	44
4.4. Kekuatan Kapal <i>Tanker</i> terhadap Momen Lentur- Batas Kondisi Kerusakan 80% Kapal <i>Tanker</i> T3 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	46
4.5. Kekuatan Kapal <i>Tanker</i> terhadap Momen Lentur- Batas Kondisi Kerusakan 20% Kapal <i>Tanker</i> T4 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	47
4.6. Kekuatan Kapal <i>Tanker</i> terhadap Momen Lentur- Batas Kondisi Kerusakan 80% Kapal <i>Tanker</i> T4 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	49

4.7.Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>Tanker</i> Kondisi Utuh Kapal Tanker T3 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	51
4.8.Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>Tanker</i> Kondisi Utuh Kapal Tanker T3 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	54
4.9.Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>Tanker</i> Kondisi Kerusakan 20% Kapal <i>Tanker</i> T3 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> ...	56
4.10.Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>Tanker</i> Kondisi Kerusakan 80% Kapal <i>Tanker</i> T3 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> ...	58
4.11.Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>Tanker</i> Kondisi Kerusakan 20% Kapal <i>Tanker</i> T4 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> ...	60
4.12.Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>Tanker</i> Kondisi Kerusakan 80% Kapal <i>Tanker</i> T4 Saat <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> ...	62
4.13.Perbandingan Kekuatan Batas Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3 dan T4 Menggunakan Metode NLFEA .....	64
BAB V PENUTUP .....	67
5.1.Kesimpulan .....	67
5.2.Saran .....	67
DAFTAR PUSTAKA .....	68
LAMPIRAN .....	71

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Kapal <i>product tanker</i> .....	7
Gambar 2.2.	Kapal <i>crude carrier</i> .....	7
Gambar 2.3.	Kapal <i>gas carrier</i> .....	8
Gambar 2.4.	Kapal gas semi-bertekan .....	9
Gambar 2.5.	Kapal <i>ethylene</i> dan <i>gas / chemical carries</i> .....	9
Gambar 2.6.	Kapal berpendingin penuh .....	10
Gambar 2.7.	Kategori ukuran kapal <i>tanker</i> .....	11
Gambar 2.8.	Konstruksi <i>single hull tanker</i> .....	13
Gambar 2.9.	Konstruksi <i>double hull tanker</i> .....	14
Gambar 2.10.	Perbedaan <i>single hull tanker</i> dan <i>double hull tanker</i> .....	15
Gambar 2.11.	Distribusi beban ( <i>load diagram</i> ), gaya geser ( <i>shear force</i> ) terhadap momen lentur ( <i>bending moment</i> ) .....	18
Gambar 2.12.	Perubahan momen lentur pada tongkang persegi panjang kondisi air tenang .....	19
Gambar 2.13.	Momen lentur gelombang pada gelombang reguler .....	20
Gambar 2.14.	Momen lentur ketika air tenang dan bergelombang .....	21
Gambar 2.15.	Tegangan normal .....	23
Gambar 2.16.	Tegangan tarik.....	24
Gambar 2.17.	Tegangan tekan .....	25
Gambar 2.18.	Diagram tegangan-regangan baja .....	27
Gambar 2.19.	Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan .....	30
Gambar 3.1.	Konfigurasi penampang kapal tanker tipe T3 .....	37
Gambar 3.2.	Konfigurasi penampang kapal tanker tipe T4 .....	37
Gambar 3.3.	Diagram alir ( <i>Flow Chart</i> ) penelitian .....	41
Gambar 4.1.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T3 pada kondisi utuh akibat <i>hogging</i> .....	42
Gambar 4.2.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T3 pada kondisi utuh akibat <i>sagging</i> .....	43

Gambar 4.3.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T4 pada kondisi utuh akibat <i>hogging</i> .....	43
Gambar 4.4.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T4 pada kondisi utuh akibat <i>sagging</i> .....	44
Gambar 4.5.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T3 pada kondisi tubrukan 20% akibat <i>hogging</i> .....	45
Gambar 4.6.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T3 pada kondisi tubrukan 20% akibat <i>sagging</i> .....	45
Gambar 4.7.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T3 pada kondisi tubrukan 80% akibat <i>hogging</i> .....	46
Gambar 4.8.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T3 pada kondisi tubrukan 80% akibat <i>sagging</i> .....	47
Gambar 4.9.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T4 pada kondisi tubrukan 20% akibat <i>hogging</i> .....	48
Gambar 4.10.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T4 pada kondisi tubrukan 20% akibat <i>sagging</i> .....	48
Gambar 4.11.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T4 pada kondisi tubrukan 80% akibat <i>hogging</i> .....	49
Gambar 4.12.	Perilaku dan distribusi tegangan kerja untuk kapal <i>tanker</i> T4 pada kondisi tubrukan 80% akibat <i>sagging</i> .....	50
Gambar 4.13.	Grafik momen-kelengkungan kapal <i>tanker</i> T3 kondisi utuh.....	52
Gambar 4.14.	Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T3 kondisi utuh akibat <i>hogging</i> .....	53
Gambar 4.15.	Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T3 kondisi utuh akibat <i>sagging</i> .....	53
Gambar 4.16.	Grafik momen-kelengkungan kapal <i>tanker</i> t4 kondisi utuh.....	54
Gambar 4.17.	Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T4 kondisi utuh akibat <i>hogging</i> .....	55

Gambar 4.18. Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T4 kondisi utuh akibat <i>sagging</i> .....	55
Gambar 4.19. Grafik momen-kelengkungan kapal <i>tanker</i> T3 kondisi kerusakan 20% .....	56
Gambar 4.20. Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T3 kondisi kerusakan 20% akibat <i>hogging</i> .....	57
Gambar 4.21. Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T3 kondisi kerusakan 20% akibat <i>sagging</i> .....	57
Gambar 4.22. Grafik momen-kelengkungan kapal <i>tanker</i> T3 kondisi kerusakan 20% .....	58
Gambar 4.23. Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T3 kondisi kerusakan 80% akibat <i>hogging</i> .....	59
Gambar 4.24. Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T3 kondisi kerusakan 80% akibat <i>sagging</i> .....	59
Gambar 4.25. Grafik momen-kelengkungan kapal <i>tanker</i> T4 kondisi kerusakan 20% .....	60
Gambar 4.26. Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T4 kondisi kerusakan 20% akibat <i>hogging</i> .....	61
Gambar 4.27. Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T4 kondisi kerusakan 20% akibat <i>sagging</i> .....	61
Gambar 4.28. Grafik momen-kelengkungan kapal <i>tanker</i> T4 kondisi kerusakan 80% .....	62
Gambar 4.29. Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T4 kondisi kerusakan 80% akibat <i>hogging</i> .....	63
Gambar 4.30. Deformasi kekuatan-batas kapal <i>tanker</i> T4 kondisi kerusakan 80% akibat <i>sagging</i> .....	63
Gambar 4.31. Grafik momen-kelengkungan kapal <i>tanker</i> T3 kondisi utuh dan kondisi kerusakan 20% serta 80%.....	65
Gambar 4.32. Grafik momen-kelengkungan kapal <i>tanker</i> T4 kondisi utuh dan kondisi kerusakan 20% serta 80%.....	66

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Spesifikasi material .....	35
Tabel 3.1.	Konfigurasi material stiffener kapal <i>double hull tanker</i> T3....	38
Tabel 3.2.	Konfigurasi material stiffener kapal <i>double hull tanker</i> T4....	39
Tabel 4.1.	Tegangan kerja arah z akibat tubrukan .....	51
Tabel 4.2.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>tanker</i> T3 kondisi utuh.....	51
Tabel 4.3.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>tanker</i> T4 kondisi utuh.....	54
Tabel 4.4.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>tanker</i> T3 kondisi kerusakan 20% .....	56
Tabel 4.5.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>tanker</i> T3 kondisi kerusakan 80% .....	58
Tabel 4.6.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>tanker</i> T4 kondisi kerusakan 20% .....	60
Tabel 4.7.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>tanker</i> T4 kondisi kerusakan 80% .....	62
Tabel 4.8.	Kekuatan-batas momen lentur kapal <i>tanker</i> T3 dan T4 kondisi utuh dan kondisi kerusakan.....	64

## DAFTAR NOTASI

B	= Lebar kapal	(mm)
b	= Lebar kerusakan akibat kandas	(mm)
$b_x$	= gaya apung	(N)
C	= koefisien momen lentur	
$C_b$	= koefisien blok kapal	
T	= sarat kapal	(m)
H	= tinggi kapal	(mm)
E	= modulus elastisitas	(N/mm <sup>2</sup> )
$F_x$	= gaya geser arah sumbu x	(N)
h	= tinggi kerusakan akibat tubrukan	(mm)
I	= inersia penampang	(mm <sup>4</sup> )
$I_{min}$	= inersia Ijin	(mm <sup>4</sup> )
$K_M$	= faktor distribusi	
l	= panjang kerusakan akibat tubrukan / kandas	(mm)
L	= panjang kapal	(mm)
M	= momen lentur	(Nmm)
$M_{US}$	= kekuatan batas momen lentur sagging	(Nmm)
$M_{UH}$	= kekuatan batas momen lentur hogging	(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 bottom	(mm <sup>3</sup> )
$S_d$	= modulus penampang bagian deck	(mm <sup>3</sup> )
$S_p$	= modulus penampang Ijin	(mm <sup>3</sup> )
Z	= jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur	(mm)
$Z_b$	= jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur bottom	(mm)

$Z_d$	= jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur deck	(mm)
$\sigma$	= tegangan lentur	(N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_p$	= tegangan lentur izin	(N/mm <sup>2</sup> )
$P_D$	= beban geladak cuaca	(kN/m <sup>2</sup> )
$P_0$	= <i>basic eksternal dynamic load</i>	(kN/m <sup>2</sup> )
$z$	= jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah	(m)
$C_D$	= faktor distribusi	
$Ps_1$	= beban luar sisi kapal dibawah garis air muat	(kN/m <sup>2</sup> )
$Ps_2$	= beban luar sisi kapal diatas garis air muat	(kN/m <sup>2</sup> )
$C_f$	= faktor distribusi	
$P_b$	= beban luar alas kapal	(kN/m <sup>2</sup> )
$P_L$	= beban Geladak Muatan	(kN/m <sup>2</sup> )
$P_C$	= beban statik kapal	(kN/m <sup>2</sup> )
$a_v$	= faktor distribusi	
$P_i$	= beban alas dalam kapal	(kN/m <sup>2</sup> )
$G$	= massa kapal	(ton)
$V$	= volume kapal	(m <sup>3</sup> )
$\delta l$	= deformasi material	(mm)

## 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
- Tanker T4* : Type kapal tanker Aframax dengan konfigurasi material penampang kapal.
- 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 Masalah

Seiring dengan pertumbuhan ekonomi, alur pelayaran semakin padat sehingga berpotensi mengalami kecelakaan seperti tubrukan. Pada saat kapal mengalami tubrukan, sisi *side* dan *bottom* pada kapal dapat menimbulkan kerugian yang bisa menambah biaya perbaikan dan operasi. Berdasarkan aturan IMO (*International Maritime Organization*), struktur kapal *double hull tanker* menjadi standar internasional untuk mengurangi tumpahan minyak pada saat kapal mengalami tubrukan [1].

Parameter kerusakan struktur seperti dimensi, geometri dan lokasi kerusakan harus dipertimbangkan. Parameter tersebut disusun untuk mengevaluasi kekuatan batas struktur kapal yang mengalami kerusakan akibat tubrukan. Tubrukan berdampak langsung pada kekuatan struktur kapal sehingga apabila tubrukan terjadi pada kapal pembawa zat berbahaya seperti *oil tanker* atau LNG/LPG maka akan menyebabkan kerusakan lingkungan yang cukup serius. Standar untuk desain terhadap kecelakaan harus dikembangkan untuk mengevaluasi kekuatan struktur kapal *double hull tanker* pada saat mengalami tubrukan. Struktur *double hull* telah banyak diterapkan dalam desain *side* dan *bottom* kapal. Dalam peristiwa tubrukan, struktur kapal *double hull tanker* yang bertabrakan dapat mengalami deformasi [2].

Untuk mengurangi resiko kerusakan kapal dan polusi lingkungan, sangat penting untuk meminimalisir kemungkinan terjadinya tubrukan konsekuensi yang disebabkan. Oleh karena itu, perlu adanya pengawasan yang lebih khususnya terhadap bagian-bagian yang berpotensi mengalami kerusakan yang diakibatkan oleh beban kapal itu sendiri atau beban yang datang dari luar [3].

Analisa kekuatan lambung kapal saat ini banyak menggunakan metode elemen hingga (FEM) dan diyakini menjadi satu-satunya alat yang

tersedia dan cocok untuk menilai kekuatan struktur kapal. Penggunaan aplikasi FEM memungkinkan untuk mengetahui informasi penting terkait analisa struktur yang kompleks terutama dalam industri maritim [4].

Banyak penelitian yang telah dilakukan terkait analisa kekuatan lambung kapal akibat tubrukan diantaranya, melakukan analisa elemen hingga untuk menyelidiki kekuatan sisa lambung kapal akibat tubrukan dan kandas, dengan membandingkan dua model kerusakan yaitu pertama bentuk lubang dengan deformasi plastis yang berdekatan dan kedua menghilangkan bagian *frame* yang rusak [5]. Menggunakan metode *smith* untuk menganalisa kekuatan sisa struktur kapal *bulk carrier* dan kapal *tanker* yang mengalami kerusakan akibat tubrukan [6]. Mengembangkan prosedur untuk mengidentifikasi kemungkinan kegagalan *hull girder* setelah mengalami kerusakan akibat tubrukan dan kandas berdasarkan rumus *closed-form formula* dari kekuatan-batas *hull girder* dan modulus penampang setelah kerusakan [7]. Mengevaluasi kemampuan analisis struktural metode sederhana berdasarkan formulasi *smith* untuk memprediksi kekuatan batas dari lambung kapal yang mengalami kerusakan [8]. Kekuatan kapal dengan mempertimbangkan modulus penampang dalam pengaruh lentur membujur dianalisis [9]. Penggunaan aplikasi FEM memungkinkan untuk mengetahui informasi penting terkait analisa struktur yang kompleks terutama dalam industri maritime [10].

Berdasarkan latar belakang di atas, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan *double hull tanker* dan analisa kekuatan menjadi latar belakang dalam pengerjaan tugas akhir ini dengan penelitian tentang Analisis kekuatan kapal *double hull tanker* dengan pertimbangan kerusakan membujur.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana kekuatan kapal *double hull tanker* T3 dan T4 pada kondisi *hongging* dan *sagging* saat kondisi awal

(*intact*) dan setelah mengalami kerusakan membujur dengan kerusakan sebesar 20% dan kerusakan 80%.

### **1.3 Batasan Masalah**

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

1. Beban yang bekerja pada kapal yaitu momen arah membujur dan momen lentur vertikal longitudinal (*hogging* dan *sagging*) dengan kerusakan sebesar 20% dan kerusakan 80 %.
2. Permodelan dilakukan pada bagian penampang midship dengan arah memanjang sebesar satu jarak gading.
3. Kurva S-N digunakan untuk perhitungan kekuatan membujur.
4. Menghitung kekuatan membujur dengan menggunakan *software* Ansys dengan metode NLFEA (*Non-linear Finite Element Analysis*).
5. Tidak meneliti kekuatan melintang.
6. Ketidakkesempurnaan awal, tegangan sisa pengelasan, cacat pengelasan, korosi, dan retak material diabaikan.

### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui analisis kekuatan kapal *double hull tanker* T3 dan T4 di kondisi *hogging* dan *sagging* pada saat sebelum dan setelah mengalami kerusakan membujur dengan kerusakan sebesar 20% dan 80%. Pada satu jarak gading kerusakan 20% dimana luas kerusakan sebesar 1000 mm, begitupun dengan kerusakan 80% dimana luas kerusakan sebesar 4000 mm.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian mengetahui analisis kekuatan kapal *double hull tanker* dengan pertimbangan kerusakan membujur dengan kerusakan sebesar 20% dan 80%.

## 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 *double hull tanker* dengan pertimbangan kerusakan membujur. 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. 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 *double hull tanker*, mengenai konstruksi kapal *double hull tanker*, teori tentang cara menganalisis kekuatan kapal *double hull tanker* dan metode *finite element analysis* (FEM) kekuatan di *Ansys*, serta cara perhitungan beban yang diterima struktur kapal tanker ketika mengalami tubrukan sebesar 20% dan 80% kondisi *hogging* ataupun *sagging*.

### BAB III Metode Penelitian

Bab ini berisi jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, objek penelitian, 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 total kekuatan kapal *double hull tanker* dengan pertimbangan kerusakan membujur dengan menggunakan

metode FEM pada struktur kapal *double hull tanker*.

#### BAB IV Pembahasan

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

#### BAB V KESIMPULAN

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

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Kapal *Tanker*

Kapal *tanker* adalah kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak atau produk turunannya, seperti minyak mentah, minyak yang telah diolah dikilang, bahan kimia, minyak nabati, minyak sawit, metanol, gas alam cair, dsb. *Tanker* adalah konsep yang relatif baru, berasal dari tahun pada 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.

*Tanker* pertama kali digunakan oleh industri minyak untuk mengirim bahan bakar olahan dalam jumlah besar dari kilang ke pelanggan. Yang kemudian akan disimpan pada tangki yang besar di daratan, dan dibagi lagi untuk pengiriman ke lokasi yang berbeda. Penggunaan kapal *tanker* menjadi populer karena cairan lain juga lebih murah untuk diangkut dalam jumlah besar, disimpan di terminal khusus, kemudian dibagi.

Produk yang berbeda memerlukan penanganan dan transportasi yang berbeda, dengan varian khusus seperti *chemical tanker*, *oil tanker*, dan *LNG carrier* yang dikembangkan untuk menangani bahan kimia berbahaya, produk minyak dan turunannya, dan gas alam cair.

#### 2.2 *Product Tanker*

*Oil Product Tanker*, atau disebut *product tanker*, adalah jenis kapal *tanker* yang khusus mengangkut produk minyak, yaitu hasil pengolahan minyak mentah (*crude oil*) di kilang pengolahan (*oil refinery plant*). Adapun contoh kapal *oil product tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kapal *product tanker* [11]

*Oil product tanker* dibedakan berdasarkan jenis minyak (*clean* dan *dirty*) dan tankinya. *Clean product* adalah produk minyak yang ringan seperti avtur, bensin, minyak tanah, dan solar. Sedangkan yang lebih berat seperti minyak bakar (*oil fuel*) dan residu, disebut *dirty product*.

Tanki pada *clean product tanker* dilapisi bahan khusus (*coating*) untuk mencegah korosi dan harus selalu dibersihkan terlebih dahulu sebelum pemuatan. Jenis tanker ini umumnya memiliki sistem pemisah sehingga dapat memuat jenis minyak yang berbeda tanpa resiko bercampur. *Clean product tanker* dapat mengangkut *dirty product* (kecuali jenis yang paling berat), sedangkan *dirty product tanker* tidak dapat memuat *clean product*.

Tanki pada *dirty product tanker* tidak dilapisi bahan khusus dan tidak memiliki sistem pemisahan, namun dilengkapi koil pemanas untuk mencegah pembekuan saat mengangkut produk minyak yang memiliki densitas yang besar.

### **2.3 Crude Carrier**

*Crude carrier* adalah kapal *tanker* pengangkut *crude oil* atau minyak mentah. *Cargo* curah cair ini umumnya homogen. Adapun contoh kapal *crude carrier* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kapal *crude carrier* [12]

Perbedaan spesifikasi minyak 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.

## 2.4 Kapal *Gas Carrier*

*Gas carrier* adalah kapal yang dirancang untuk mengangkut LPG (*Liquid Petroleum Gas*), LNG (*Liquid Natural Gas*), ataupun CNG (*Compressed Natural Gas*).

Kapal jenis ini juga dibedakan berdasarkan tekanannya terdapat 4 jenis yaitu :

1. Kapal gas bertekanan penuh

Sebagian besar pembawa LPG bertekanan penuh dilengkapi dengan sejumlah silinder horizontal atau tangki kargo bulat dan memiliki kapasitas hingga 6.000 m<sup>3</sup>. Adapun contoh kapal *crude carrier* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

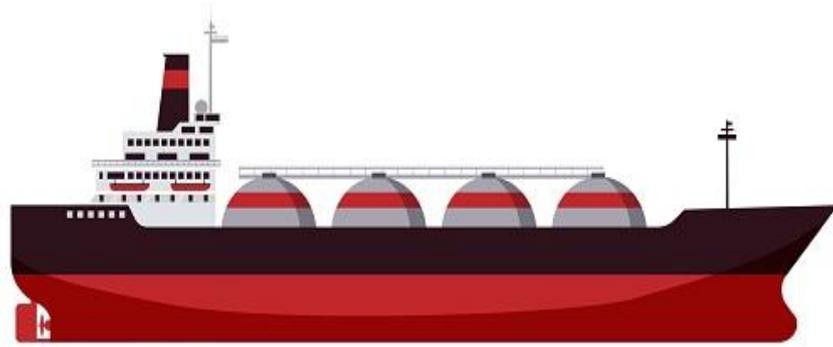


Gambar 2.3 Kapal *gas carrier* [13]

*Tanker* bertekanan penuh adalah masih dibangun dalam jumlah dan mewakili cara yang hemat biaya dan sederhana untuk memindahkan LPG ke dan dari terminal gas yang lebih kecil.

2. Kapal gas semi bertekan

Dengan pengembangan yang cocok untuk penahanan gas cair pada suhu rendah, kapal *tanker* semi-bertekanan dikembangkan untuk mengisolasi tangki kargo. Adapun contoh kapal gas semi bertekan dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Kapal gas semi-bertekan [14]

Dengan memanfaatkan baja khusus, ketebalan bejana tekan, dan karenanya beratnya, dapat dikurangi tangki baik berbentuk silinder, bola atau bi-lobe, mampu memuat atau mengeluarkan gas kargo di fasilitas penyimpanan berpendingin dan bertekanan.

3. Kapal *ethylene* dan *gas / chemical carries*

Kapal *tanker* bahan kimia adalah sejenis kapal tanker yang berfungsi untuk mengangkut bahan kimia. Populasi kapal jenis ini bisa dikatakan jarang. Adapun contoh kapal *ethylene* dan *gas / chemical carries* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kapal *ethylene* dan *gas / chemical carries* [15]

*Tanker* ini dirancang khusus untuk mengangkut bahan kimia secara *bulk*. Kapal *tanker* tipe ini umumnya memiliki bobot mati antara 5,000 DWT sampai 40,000 DWT. Kapal *tanker* kimia diharuskan

mematuhi berbagai aspek keselamatan yang diuraikan dalam Bagian B dari SOLAS (*Safety Of Life At Sea*) Bab VIII dan IBC Code (*International Bulk Chemical Code*). Kapal *tanker* kimia biasanya dilengkapi dengan tanki khusus yang dilapisi secara khusus seperti *cat phenolic epoxy* atau *cat zinc*, atau terbuat dari lapisan tanki yang dilapisi stainless steel diperlukan untuk menampung material yang sangat asam, seperti *sulfuric* dan *phosphoric acid*, sedangkan untuk bahan kimia yang ringan seperti *vegetable oil* saat disimpan dalam tanki yang dilapisi *epoxy*. Kapal jenis ini juga biasanya dilengkapi dengan sistem pemanas agar viskositas dapat dipertahankan.

4. Kapal berpendingin penuh

*Tanker* berpendingin penuh dibangun untuk membawa gas cair pada suhu rendah dan tekanan atmosfer yang dilengkapi dengan tangki penyimpanan berpendingin penuh. *Tanker* memiliki tangki kargo berbentuk prisma yang dibuat dari baja nikel 3,5%, memungkinkan pengangkutan kargo pada suhu serendah  $-48^{\circ}\text{C}$ , sedikit di bawah titik didih *propana* murni. Adapun contoh kapal berpendingin penuh dapat dilihat pada Gambar 2.6.

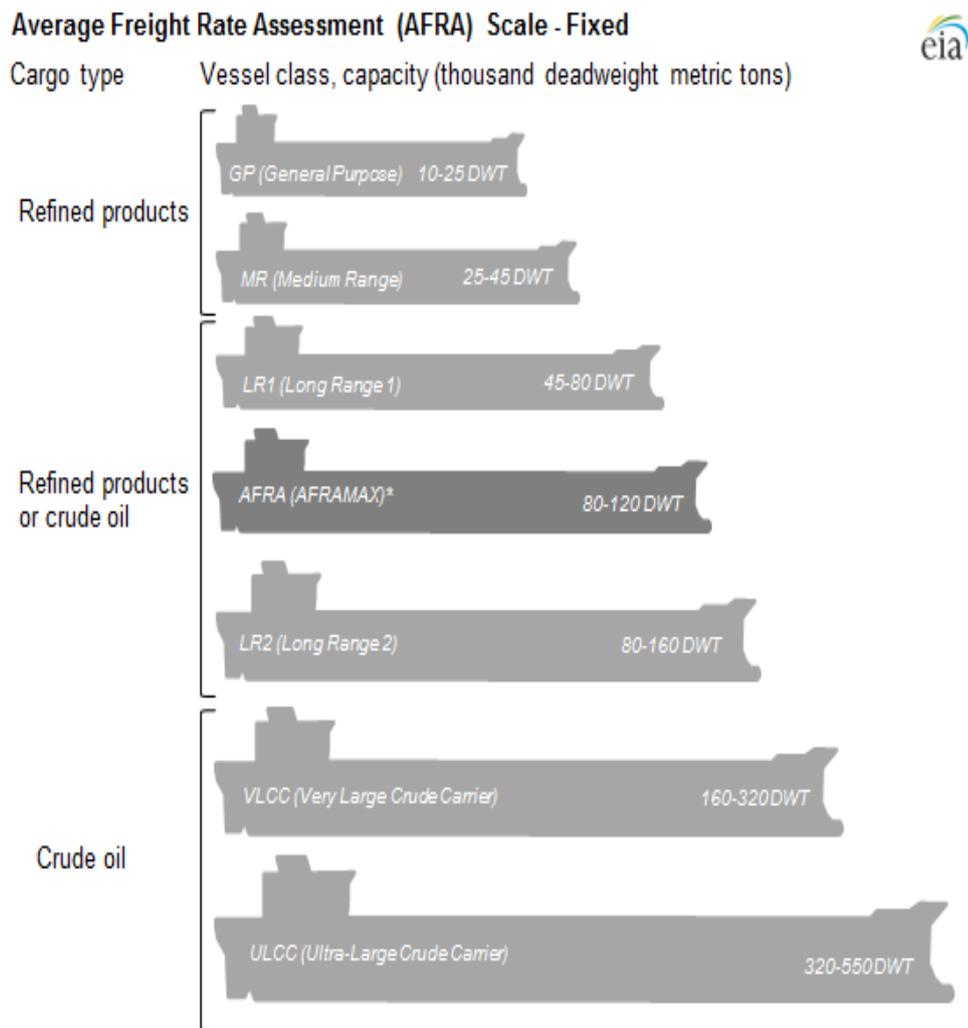


Gambar 2.6 Kapal berpendingin penuh [16]

Tangki prismatik memungkinkan kapasitas angkut kargo kapal *tanker* menjadi dimaksimalkan, sehingga membuat kapal *tanker* berpendingin penuh sangat cocok untuk membawa barang besar volume kargo seperti LPG, *amonia*, dan *vinil klorida* jarak jauh.

## 2.5 Ukuran Kapal Tanker

Berdasarkan ukurannya, baik *product/refined tanker* dan *crude carrier*, dikelompokkan dan dapat dilihat pada Gambar 2.7 sebagai berikut:



Gambar 2.7 Kategori ukuran kapal *tanker* [17]

1. GP (*General Purpose*) *Tanker* biasanya digunakan untuk mengangkut *refined product* dalam jarak yang relatif lebih pendek, *tanker* ini berukuran 10,000 MT hingga 25,000 MT DWT.

2. MR (*Medium Range*) Tanker sama seperti GP tanker, tanker ini digunakan untuk mengangkut *refined product* dalam jarak yang relatif lebih pendek, tanker ini berukuran 25,000 MT hingga 45,000 MT DWT.
3. LR1 (*Long Range*) Tanker digunakan untuk membawa *refined product* dan *crude oil*. Tanker jenis ini biasanya disebut *panamax tanker* yang mengangkut *dirty product*, tanker ini berukuran 45 MT hingga 80 MT DWT.
4. LR2 (*Long Range 2*) Tanker digunakan untuk membawa *refined product* dan *crude oil*. Ukurannya berkisar 80,000 MT DWT -160,000 MT DWT. Tanker pengangkut *crude oil* biasanya disebut *afamax tanker* (80,000 MT -120,000 MT DWT) dan *suezmax tanker* (120,000 MT – 160,000 MT DWT).
5. *Very Large Crude Carrier (VLCC) Tanker* hanya digunakan untuk mengangkut minyak mentah dan berukuran 320,000 MT. Sama halnya dengan VLCC, kapal *Ultra Large Crude Carrier (ULCC)* juga hanya mengangkut minyak mentah dan berukuran 550,000 MT DWT.

## 2.6 Kontruksi Kapal Tanker

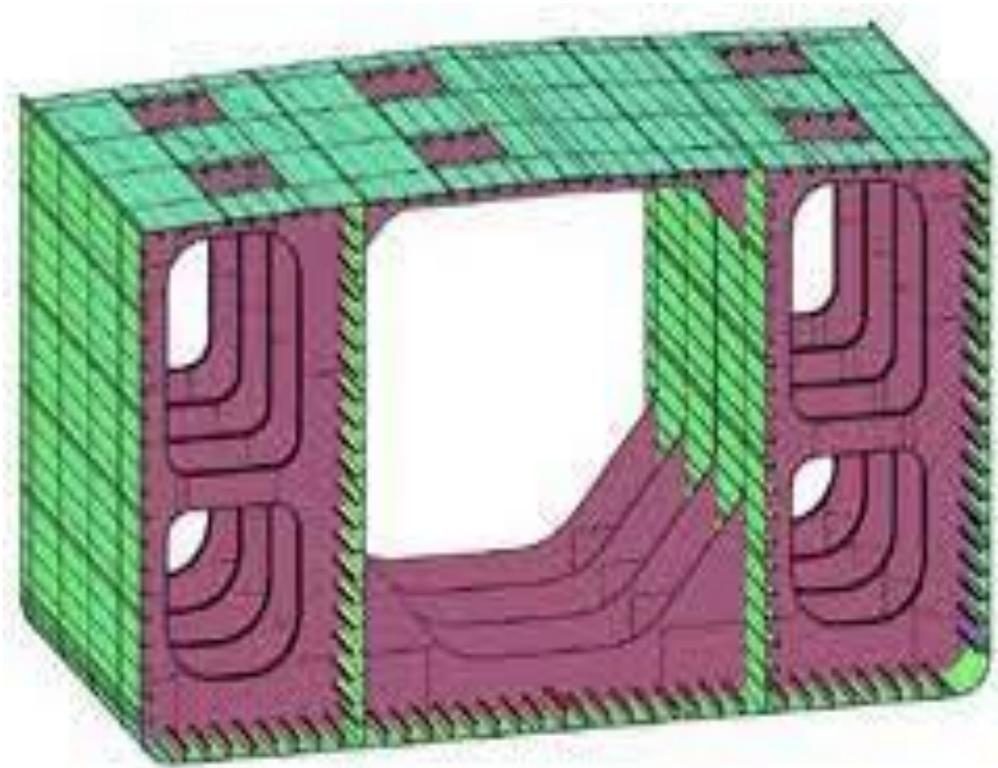
Konstruksi kapal *tanker* didesain dan dibuat secara khusus dengan ketentuan standar keselamatan yang sangat tinggi sesuai dengan spesifikasi yang diatur dalam IMO (*International Maritime Organization*) melalui peraturan MARPOL (*Marine Pollution*) 73/78-Annex 1, *Regulation 13G*, Amandemen 2001 serta SOLAS (*Safety Of Life At Sea*).

Faktor-faktor yang mempengaruhi desain dan konstruksi kapal *tanker* antara lain:

1. Faktor keamanan : sebagai pengangkut muatan berbahaya.
2. Faktor stabilitas : muatan cair dalam tanki dapat bergerak bebas.
3. Faktor pencemaran : dapat terjadi pencemaran berupa tumpahan minyak di laut.

## 2.7 Kontruksi *Single Hull Tanker*

*Tanker* lambung tunggal (*single hull tanker*), memiliki satu lambung dan membawa minyak langsung di dalam struktur lambung. Beberapa kapal *single hull tanker* membawa minyak dan *ballast* air dalam tangki yang sama; sedangkan, beberapa *single hull tanker* memiliki tangki pemberat terpisah di dalam lambung (yaitu minyak dibawa langsung di dalam lambung, tapi tangki *ballast* dipisahkan dari kargo). Adapun contoh konstruksi kapal *double hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.8 berikut ini :



Gambar 2.8 Konstruksi *single hull tanker* [18]

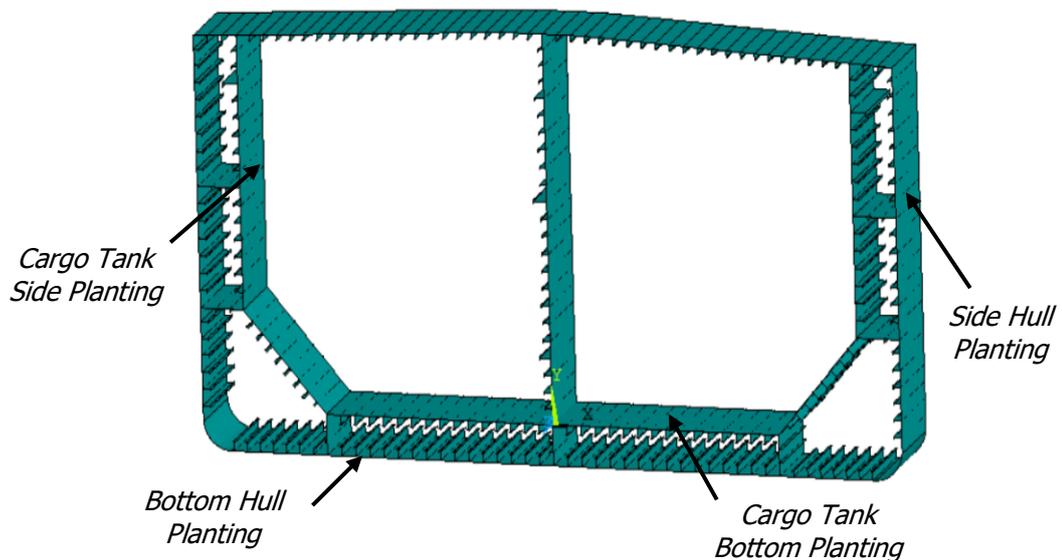
Tangki pemberat terpisah masih hanya dilindungi dari laut oleh satu lambung. Untuk tumpahan minyak ke terjadi dari kapal *single hull tanker*, hanya lambung tunggal yang harus dilanggar.

## 2.8 Konstruksi *Double Hull Tanker*

Kapal *tanker* lambung ganda memiliki bagian dalam dan lambung luar yang memisahkan kargo dari laut. Kargo diangkut dalam satu atau lebih

tangki muatan terpisah yang terletak di dalam lambung bagian dalam. Jarak antara lambung bagian dalam dan luar adalah umumnya lebarnya dua meter dan juga terpisah menjadi beberapa bagian yang mirip dengan tangki kargo. Ruang-ruang terpisah ini bertindak sebagai tangki pemberat untuk membawa air pada pelayaran tanpa muatan (yaitu ketika kapal *tanker* tidak mengangkut kargo). Untuk tumpahan minyak terjadi dari kapal *double hull tanker*, lambung luar dan dalam harus dilanggar. Tujuan utama dari lambung ganda adalah untuk mengurangi kemungkinan aliran keluar minyak berikut : tubrukan atau *grounding*.

Adapun contoh konstruksi kapal *double hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut ini :

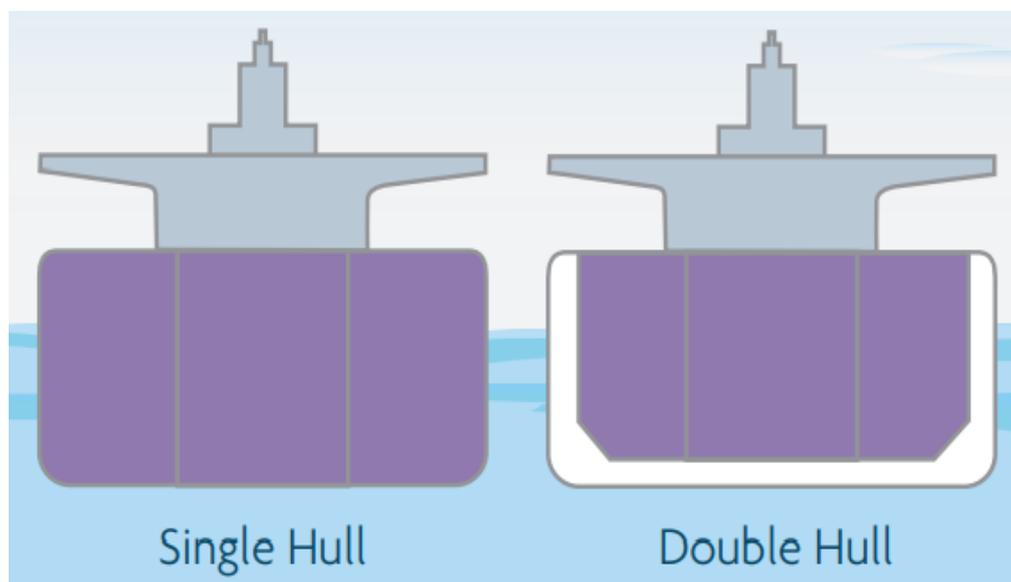


Gambar 2.9 Konstruksi *double hull tanker*

1. *Cargo Tank Side Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian sisi dalam kapal *double-hull tanker* yang berfungsi sebagai tangki penyimpanan muatan minyak.
2. *Side Hull Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian sisi luar kapal *double hull tanker* yang berfungsi sebagai pelindung (*back-up*) dan mencegah masuknya air laut ke dalam tangki penyimpanan muatan minyak. Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan tabrakan atau serupa.

3. *Cargo Tank Bottom Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian bawah dalam dari kapal *double hull tanker* yang berfungsi sebagai tangki penyimpanan muatan minyak. Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan atau tubrukan.
4. *Bottom Hull Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian bawah luar kapal *double hull tanker* yang berfungsi sebagai pelindung (*back-up*) dan mencegah masuknya air laut ke dalam tangki penyimpanan muatan minyak.

Dikarenakan terdapat ruang antara lapisan luar lambung dan lapisan dalam, air untuk pemberat (*ballast tank*) disimpan dalam ruang kosong pada kedua sisi, dan di bagian bawah kapal. Penggunaan lambung ganda dalam kapal *tanker* minyak yang direkomendasikan dalam MARPOL (*Marine Pollution*) atau Konvensi Internasional untuk pencegahan pencemaran dari kapal konvensi. Pada gambar 2.10 menunjukkan perbedaan *single hull tanker* dan *double hull tanker*.



Gambar 2.10 Perbedaan kapal *single hull tanker* dan *double hull tanker*

[19]

Meskipun lambung ganda cukup efisien, dalam kasus kecelakaan tabrakan besar dan bisa jadi akan sangat tidak efektif. Ini adalah salah satu kelemahan utama memiliki *tanker* lambung ganda.

## 2.9 Beban-Beban Pada Konstruksi Kapal

Untuk setiap Kasus Beban, beban yang diterapkan yang digunakan untuk analisis struktur kapal harus mencakup bagian statis dan dinamis dari setiap komponen beban. Pembuatan kapal harus menggunakan bahan material yang tepat agar kinerja kapal bagus dan aman dalam berlayar. Pemilihan bahan material ini mempunyai banyak pengaruh teknis dalam suatu kapal. Salah satunya ialah segi kekuatan kapal jika diberi beban [20].

Beban-beban pada konstruksi kapal dapat dikelompokkan sesuai dengan karakteristik beban-beban yang bekerja pada konstruksi kapal tersebut. Pengelompokan beban konstruksi kapal sesuai karakteristik bebannya dapat dilihat sebagai berikut:

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

## 2.10 Beban Geladak Cuaca

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak dibelakang 0,15 L dari garis tegak haluan (FP) [20]. Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.1.

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

dimana:

- $P_D$  = Beban geladak cuaca (kN/m<sup>2</sup>)  
 $P_0$  = *Basic eksternal dynamic load* (kN/m<sup>2</sup>)  
 $T$  = Sarat kapal (m)  
 $H$  = Tinggi kapal (m)  
 $z$  = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)  
 $C_D$  = Faktor distribusi

### 2.11 Beban Luar Sisi Kapal

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang timbul karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal [20]. Beban luar sisi kapal dibagi atas dua beban yaitu:

1. Beban luar sisi kapal dibawah garis muat ( $P_{S_1}$ )
2. Beban luar sisi kapal diatas garis air muat ( $P_{S_2}$ )

Adapun beban luar sisi kapal tersebut dihitung dengan Persamaan 2.2 dan 2.3.

$$P_{S_1} = 10(T - z) + P_0 \cdot C_{f_2} \left(1 + \frac{z}{T}\right) a \quad (2.2)$$

$$P_{S_2} = P_0 \cdot C_{f_2} \quad (2.3)$$

dimana:

- $P_{S_1}$  = Beban luar sisi kapal dibawah garis air muat (kN/m<sup>2</sup>)  
 $P_{S_2}$  = Beban luar sisi kapal diatas garis air muat (kN/m<sup>2</sup>)  
 $P_0$  = *Basic eksternal dynamic load* (kN/m<sup>2</sup>)  
 $C_f$  = Faktor distribusi  
 $z$  = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)  
 $T$  = Sarat kapal (m)  
 $H$  = Tinggi kapal (m)

### 2.12 Beban Luar Alas Kapal

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal [20]. Beban luar alas kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.4.

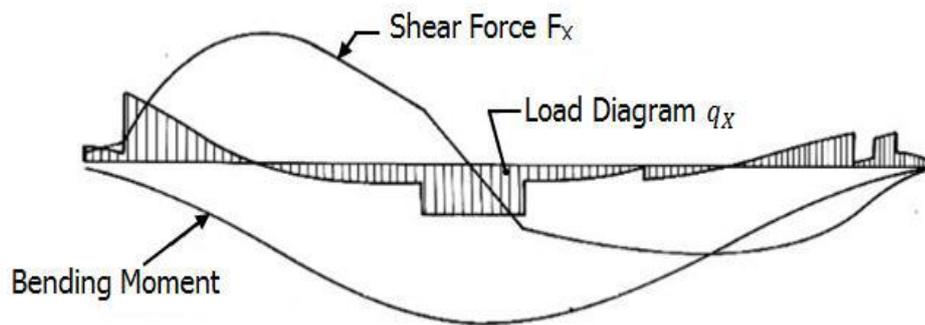
$$P_b = 10 \cdot T + P_0 \cdot C_f \quad (2.4)$$

dimana:

- $P_b$  = Beban luar alas kapal (kN/m<sup>2</sup>)
- $P_0$  = *Basic eksternal dynamic load* (kN/m<sup>2</sup>)
- $C_f$  = Faktor distribusi
- $T$  = Sarat kapal (m)

### 2.13 Momen Lentur dan Gaya Geser

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



Gambar 2.11 Distribusi beban (*load diagram*), gaya geser (*shear force*), terhadap momen lentur (*bending moment*) [21]

Adapun distribusi beban kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.1 berikut ini:

$$q_x = b_x - w_x \quad (2.1)$$

dimana:

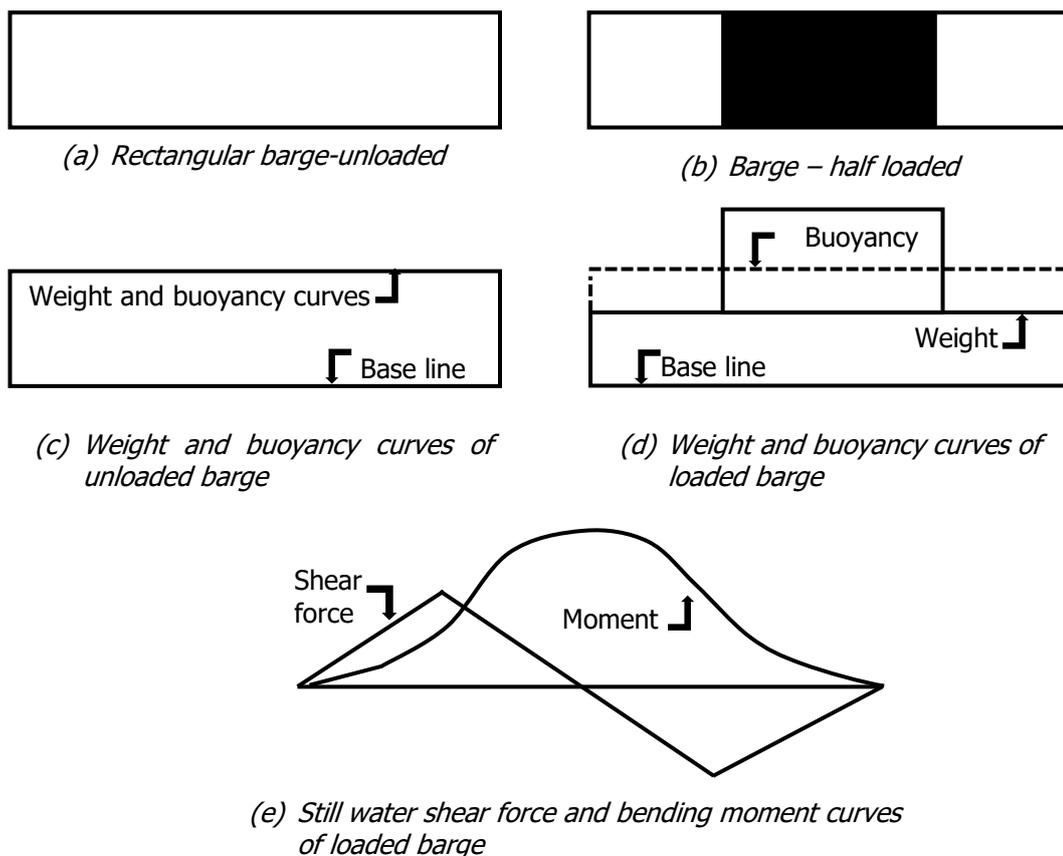
- $b_x$  = berat
- $w_x$  = gaya apung

Adapun rumus distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.2 dan Persamaan 2.3 berikut ini:

$$F_x = \int_0^x (b_x - w_x) dx \quad (2.2)$$

$$M_x = \int_x^0 F_x dx \quad (2.3)$$

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.12 (a), tongkang yang diturunkan dari penampang konstan dan kerapatan, yang mengapung di air akan memiliki berat dan daya apung yang merata sepanjang tongkang. Hal ini ditunjukkan oleh kurva berat dan daya apung, terlihat pada Gambar 2.12 (b). Jika tongkang dimuat di tengah Gambar 2.12 (c), distribusi berat akan berubah dan kurva yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.12 (d). Perbedaan antara kurva berat dan daya apung menghasilkan distribusi momen lentur sepanjang kapal. Momen lentur ini dikenal sebagai momen lentur air tenang  $M_s$ , seperti yang terlihat pada tongkang yang dimuat pada Gambar 2.12 (e).

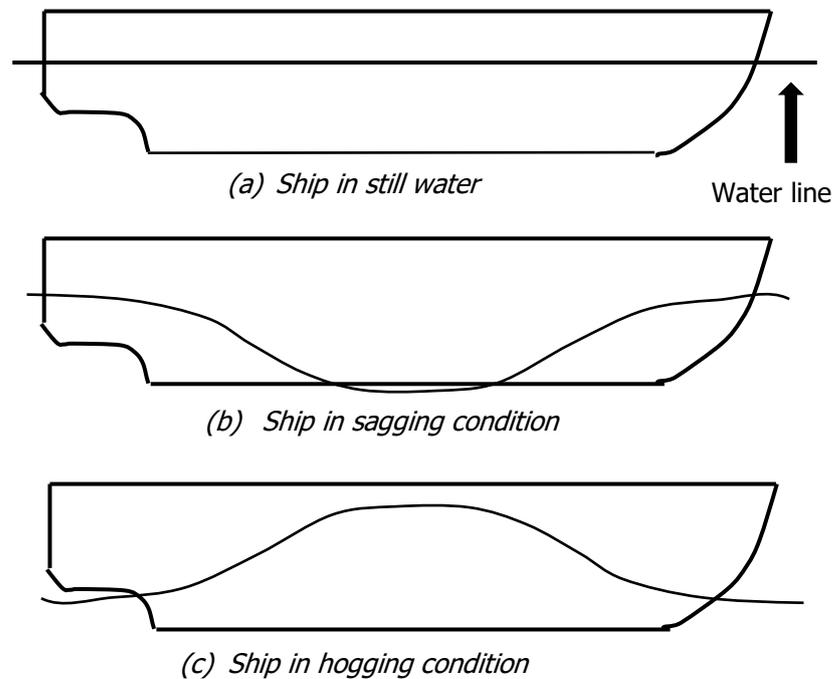


Gambar 2.12 Perubahan momen lentur pada tongkang persegi panjang kondisi air tenang [21]

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

Kombinasi beban statis dan beban dinamis untuk menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur-batas vertikal kapal dapat dihitung dengan penjumlahan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang, DNVGL (2017 a) memberikan Persamaan 2.4 dan Gambar 2.13 mengilustrasikan kapal pada gelombang sama dengan panjangnya.

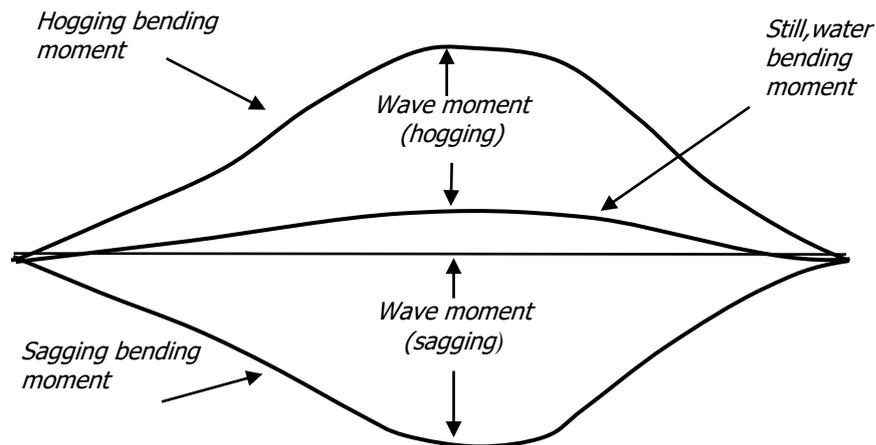
$$M = M_{sw} + 1,2M_w \quad (2.4)$$



Gambar 2.13 Momen lentur gelombang pada gelombang reguler [21]

Gambar 2.13 (a) menunjukkan kondisi air tenang dimana hanya momen lentur yang bekerja pada kapal adalah momen lentur kondisi air tenang itu sendiri. Gambar 2.13 (b) menunjukkan kondisi dimana gelombang berongga berada di tengah kapal. Hal ini menghasilkan distribusi daya apung di dekat ujung kapal dan dengan demikian kapal mengalami kondisi *sagging*. Pada kondisi *sagging*, *deck* pada kapal

mengalami tekan sedangkan bagian bawahnya mengalami tarik (*tension*). Gambar 2.13 (c) menunjukkan puncak gelombang berada di tengah kapal. Hal ini menunjukkan gaya apung lebih besar pada bagian tengah kapal dibandingkan diujung kapal sehingga menghasilkan kondisi *hogging*. *Hogging* berarti kapal melengkung pada bagian tengah seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Momen lentur ketika air tenang dan bergelombang [22]

Adapun besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang ( $M_{SW}$ ) untuk panjang kapal lebih dari 90 meter, DNVGL (2017 a) memberikan Persamaan 2.5 untuk kondisi *sagging*, dan Persamaan 2.6, untuk kondisi *hogging*.

$$M_{SW} = -0,05168K_M CL^2 B(C_b + 0,7) \quad (2.5)$$

$$M_{SW} = +0,01K_M CL^2 B(11,97 - 1,96C_b) \quad (2.6)$$

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

$$M_w = -0,11K_M CL^2 B(C_b + 0,7) \quad (2.7)$$

$$M_w = +0,19K_M CL^2 BC_b \quad (2.8)$$

Kombinasi beban statis dan dinamis ( $M_t$ ) untuk menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur-batas vertikal dihitung dengan

penjumlahan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang di Persamaan 2.9 berikut ini (DNV GL, 2017 b).

$$M_t = M_{sw} + M_w \quad (2.9)$$

dimana:

$K_M$  = Faktor distribusi

$B$  = Lebar kapal (mm)

$L$  = Panjang Kapal (mm)

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

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

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

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

## 2.14 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 2.10 berikut:

$$\delta l = \epsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.10)$$

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)

### 2.15 Tegangan Normal

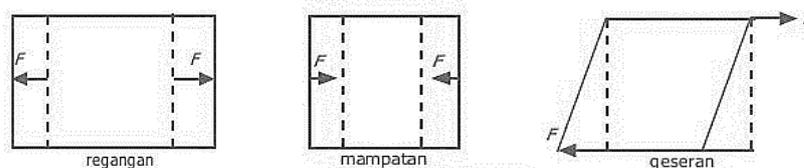
Pengetahuan dan pengertian tentang bahan dan perilakunya jika mendapat gaya atau beban sangat dibutuhkan di bidang teknik bangunan. Jika suatu batang prismatic, dengan luas penampang seragam di sepanjang batangnya menerima beban atau gaya searah dengan panjang batang, maka gaya tersebut akan menimbulkan 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 2.11 dan Gambar 2.15:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2.11}$$

dimana:

- $\sigma$  = tegangan (N/mm<sup>2</sup>)
- F = gaya (N)
- A = luas penampang (mm<sup>2</sup>)



Gambar 2.15. Tegangan normal [23]

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.

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

Tegangan tarik yaitu tegangan yang timbul akibat gaya tarik. Apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang, dan akibatnya batang ini cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbunya. Secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 2.12 dan dapat dilihat pada Gambar 2.13:

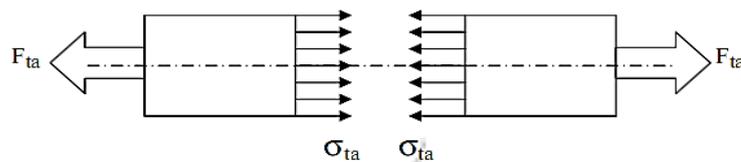
$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (2.12)$$

dimana:

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

F = gaya tarik (N)

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



Gambar 2.16. Tegangan tarik [23]

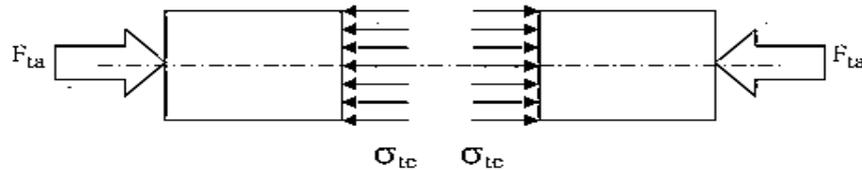
Tegangan tarik ( $\sigma_{tr}$ ) terjadi akibat bekerjanya gaya tarik ( $F_{tr}$ ) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio antara perpanjangan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang bendap semula (L) disebut sebagai regangan tarik  $\epsilon_{tr}$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

### 2.17 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, sehinggabendanya mengalami perpendekan.

Rasio/Perbandingan antara perpendekan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tekan  $\varepsilon_{ta}$  secara matematik dapat dilihat pada Gambar 2.17:



Gambar 2.17. Tegangan tekan [23]

Selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.13:

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (2.13)$$

dimana :

$\sigma_{te}$  = tegangan tarik ( $N/mm^2$ )

$F_{ta}$  = gaya tarik (N)

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

## 2.18 Tegangan Geser (*Shear*)

Jika gaya normal/*tangensial* merupakan gaya sejajar arah memanjang batang, gaya geser merupakan gaya yang berarah tegak lurus dengan panjang batang. Besaran tegangan geser dinyatakan dengan simbol ( $\tau$ ) dalam satuan ( $N/mm^2$ ). Tegangan geser terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser 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 2.14:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.14)$$

dimana:

- $\tau$  = tegangan geser (N/mm<sup>2</sup>)
- P = gaya geser atau gaya lintang (N)
- A = Luas penampang (mm<sup>2</sup>)

### **2.19 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.

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

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

### **2.21 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.

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

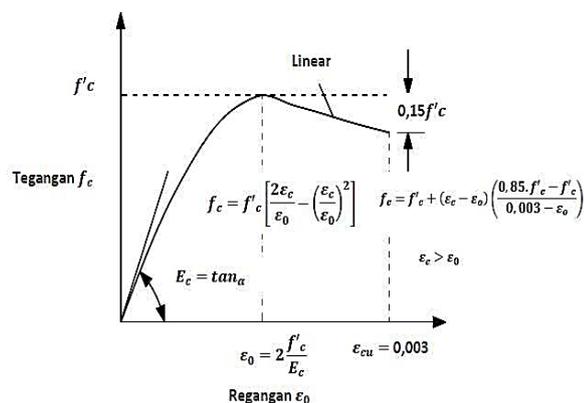
## 2.22 Regangan

Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada Persamaan 2.14 dan Gambar 2.18:

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

dimana:

- $\varepsilon$  = regangan
- $\Delta L$  = pertambahan panjang (mm)
- $L$  = panjang mula-mula (mm)



Gambar 2.18. 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 praktker, 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 2.14 dan 2.15:

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

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

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.

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

Kekuatan batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total. Perhitungan kekuatan-batas kapal tanker berdasarkan keakuratan dan kompleksitas hingga saat ini terdiri dari 5 metode yaitu: teori balok, metode *Presumed Ptress Distribution*, metode *Smith* dan *Idealized Structural Unit Method* (ISUM), *Intelligent Supersize Finite Element Method* (ISFEM), dan (*Non-linear Finite Element Analysis*) NLFEA . Kekuatan-batas kapal *tanker* ( $M_U$ ) harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria seperti Persamaan 2.16 dibawah ini (DNV GL, 2017b).

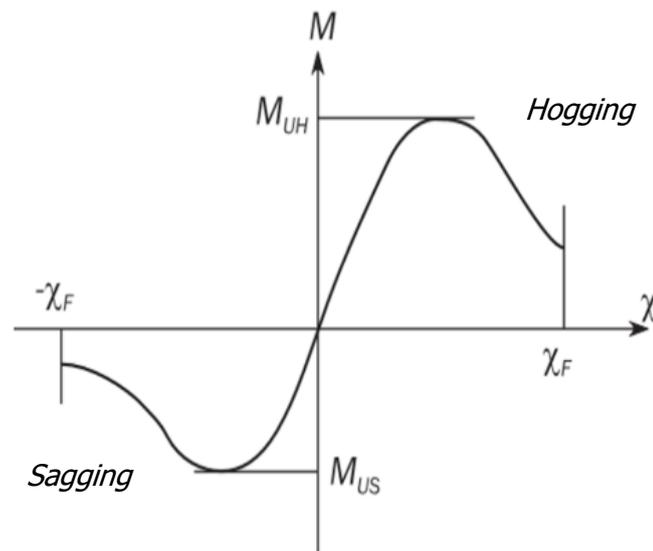
$$M_t \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (2.16)$$

diimana :

$M_t$  = momen lentur-batas total vertikal (Nmm)

$\gamma_R$  = faktor keamanan untuk kekuatan-batas lentur vertikal (1,1 untuk kondisi *sagging* dan 1,21 untuk kondisi *hogging*).

Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.19. Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan [24]

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.19. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.

Berdasarkan teori balok, tegangan lentur ( $\sigma$ ) pada penampang balok yang mengalami momen lentur dapat dihitung dengan Persamaan 2.17:

$$\sigma = \frac{M \times Z}{I} \quad (2.17)$$

dimana :

$M$  = adalah momen lentur (Nmm)

$I$  = adalah momen inersia ( $\text{mm}^4$ )

$z$  = jarak dari sumbu netral dari penampang balok ke lokasi tegangan lentur pada arah tinggi dari balok. (mm)

Tegangan lentur maksimum ( $\sigma_{max}$ ) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.18 sebagai berikut:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad (2.18)$$

dimana :

$\sigma_{max}$  = Tegangan lentur maksimum (N/mm<sup>2</sup>)

$M$  = Momen lentur (Nmm)

$S$  = Modulus penampang (mm<sup>3</sup>)

Pada Persamaan 2.19, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu persamaan 2.19 dan 2.20:

$$S_d = \frac{1}{Z_d}, \text{ untuk bagian } deck \quad (2.19)$$

$$S_b = \frac{1}{Z_b}, \text{ untuk bagian } bottom \quad (2.20)$$

dimana :

$S_d$  = potongan penampang vertikal pada bagian *deck* kapal (mm<sup>3</sup>)

$S_b$  = potongan penampang vertikal pada bagian *bottom* kapal (mm<sup>3</sup>)

$Z_d$  = jarak dari sumbu netral dari potongan penampang kapal ke *deck* (mm)

$Z_b$  = jarak dari sumbu netral dari potongan penampang kapal ke *bottom* (mm)

Pada teori balok, lambung kapal akan mengalami kekuatan-batas ketika tegangan lentur maksimum pada bagian yang tertekan mencapai kekuatan tekan batas, yaitu untuk *deck* pada saat *sagging* dan untuk *bottom* pada saat *hogging*. Kekuatan-batas akibat momen lentur untuk kapal dapat dihitung dengan persamaan 2.21 dan 2.22 sebagai berikut:

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

$$M_{UH} = S_d \sigma_{ub} \quad (2.22)$$

dimana :

$M_{US}$  = kekuatan-batas momen lentur untuk *sagging* (Nmm)

$M_{UH}$  = kekuatan-batas momen lentur untuk *hogging* (Nmm)

$\sigma_{ud}$  = tegangan tekan batas untuk *deck* kapal (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ub}$  = tegangan tekan batas untuk *bottom* kapal (N/mm<sup>2</sup>)

## 2.24 Metode NLFEA (*Non-linear Finite Element Analysis*)

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.

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. Ketidaksempurnaan Geometrik

Selama fabrikasi struktur kapal (pemotongan, *rolling*, pembentukan, pengelasan dan perlakuan panas) terjadi ketidaksempurnaan geometri dan tegangan sisa yang dapat mempengaruhi kekuatan batas struktur. Metode NLFEA (*Non-linear Finite Element Analysis*) dapat mengondisikan ketidaksempurnaan 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. Pada Tabel 2.1

menunjukkan spesifikasi material.

Tabel 2.1. Spesifikasi material [25]

Spesifikasi Material	Jenis Material	
	AH27	AH37
Densitas ( $\text{kg/m}^3$ )	7850	7850
<i>Modulus Young</i> ( $\text{N/mm}^2$ )	210000	210000
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3	0,3
Kekuatan Luluh	290	370
<i>Tangent Modulus</i>	625	675

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*.

h. Tipe elemen

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