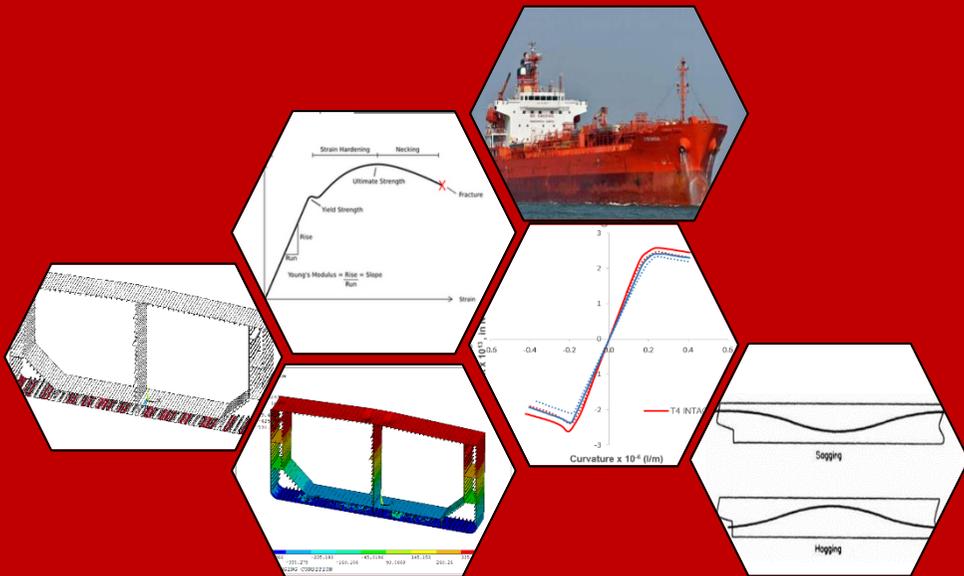


PENGARUH KOROSI TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL DOUBLE HULL TANKER TIPE T3 DAN T4



FUAD AFGANI GUNAWAN RUM

D081201054



PROGRAM STUDI TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

**PENGARUH KOROSI TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL
DOUBLE HULL TANKER TIPE T3 DAN T4**

FUAD AFGANI GUNAWAN RUM

D081201054



**DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**PENGARUH KOROSI TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR DOUBLE HULL
TANKER TIPE T3 DAN T4**

FUAD AFGANI GUNAWAN RUM

D081201054

Skripsi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana
Teknik Kelautan

pada

Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

Gowa

**DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

SKRIPSI
PENGARUH KOROSI TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL
DOUBLE HULL TANKER TIPE T3 DAN T4

FUAD AFGANI GUNAWAN RUM
D081201054

Skripsi,

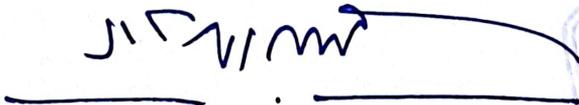
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Sarjana Pada Tanggal 02/08/2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA

Mengesahkan:

Pembimbing Utama



Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alie, ST., M.T., Ph. D-Eng
NIP. 19750608 200501 1 003

Mengetahui:

Ketua Departemen,



Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT
NIP. 19750605 200212 1 003

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul **“Pengaruh Korosi Terhadap Kekuatan Membujur Kapal Double Hull Tanker Tipe T3 dan T4”** adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Bapak Prof. Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D) Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 26 Juni 2024



FUAD AFGANI GUNAWAN RUM
D081201054

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Segala puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang selalu senantiasa memberikan Rahmat serta Nikmat-Nya atas segala kelancaran, keberanian, kekuatan, kesabaran dan segala ketenangan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini yang berjudul “Pengaruh Korosi Terhadap Kekuatan Membujur Kapal Double Hull Tanker Tipe T3 dan T4” ini dengan baik yang sekaligus menjadi syarat untuk menyelesaikan Studi di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Sholawat serta salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah SAW yang telah mengantarkan umatnya dari zaman kegelapan ke zaman yang terang-benderang.

Berbagai hambatan dan tantangan tentunya dihadapi dalam menyelesaikan skripsi ini, namun berkat ketabahan dan dukungan yang besar dari berbagai pihak akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan. Terima kasih yang tak terhingga penulis persembahkan untuk kedua orang tua Bapak Gunawan S.Pd.,M.Pd dan Ibu Najmiah S.Pd.,M.Pd dan juga saudara-saudara saya Fitra Angga Gunawan Rum S.T, Fadil Septian Gunawan Rum S.T dan Firas Aflah Gunawan Rum atas doa dan dukungannya selama ini.

Dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis juga ingin menyampaikan terima kasih yang tulus dan sebesar-besarnya kepada Bapak **Prof. Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D** selaku Dosen Pembimbing, atas bantuan dan bimbingannya kepada penulis sejak proses awal hingga akhir penyusunan skripsi ini. Demikian kepada bapak **Ir. Juswan M.T** dan Bapak **Fuad Mahfud Assidiq, ST., MT.**, selaku Dosen Penguji yang telah memberikan masukan untuk perbaikan skripsi ini, penulis ucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya.

Ucapan Terima kasih juga penulis sampaikan kepada:

1. **Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu pengetahuan yang sangat berharga kepada penulis selama masa pendidikan.
2. Segenap **Staff Administrasi Departemen Teknik Kelautan** yang banyak membantu penulis dalam berbagai urusan administrasi selama perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini.
3. Teman-teman **Labo OSAREL** yang selalu memberikan semangat kepada penulis. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih juga kepada **Alumni Labo OSAREL** yang selalu bersedia memberikan pengarahan.
4. Teman-teman **Naval20** terkhusus Teknik Kelautan 2020 (**Dredger**) yang selalu membersamai penulis selama masa perkuliahan dalam suka maupun duka. Turut juga penulis sampaikan rasa terima kasih kepada kanda-kanda senior yang tak bosan-bosannya memberikan pengarahan dan dinda-dinda junior yang tak henti-hentinya memberikan dukungan serta semangat.

5. Teman-teman **se-OKFT (Organisasi Kemahasiswaan Fakultas Teknik)** yang telah kebersamai selama masa proses kaderisasi dan masa perkuliahan dikampus
6. Teman-teman **KKN UNHAS GEL 111 Kaloling Sinjai Timur** yang telah memberikan pengalaman yang berharga dan berkesan selama masa pengabdian kami di desa kecil bernama **Kaloling** .
7. Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terimah kasih yang sebesar besarnya untuk segala sumbangsih selama proses penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang sifatnya membangun dibutuhkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya, hanya kepada Allah SWT diserahkan segala amal ibadah, dengan mengharap Ridha-Nya, semoga skripsi ini dapat memberikan nilai positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Fuad Afgani Gunawan Rum

ABSTRAK

Fuad Afgani Gunawan Rum. **Pengaruh Korosi Terhadap Kekuatan Membujur Kapal *Double Hull Tanker* Tipe T3 dan T4.** (dibimbing oleh Muhammad Zubair Muis Alie)

Kebutuhan untuk eksplorasi dan eksploitasi minyak semakin meningkat seiring dengan konsumsi bahan bakar minyak. Oleh karena itu, kapal tanker minyak dibutuhkan untuk platform lepas pantai. Salah satunya adalah kapal tanker minyak. Agar dapat bertahan selama operasi, struktur kapal dirancang untuk mengatasi beban yang bekerja padanya. Salah satu aspek terpenting dalam proses desain kapal adalah kekuatan struktural kapal. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui kekuatan maksimum dari *Double Hull Tanker* Tipe T3 & T4 dengan mempertimbangkan pengaruh korosi. Analisis dilakukan menggunakan NLFEA (*Non-Linear Finite Element Analysis*). Objek penelitian ini adalah Kapal *Double Hull Tanker* Tipe T3 dan T4 yang memiliki dimensi, bentuk, dan jenis pengaku yang berbeda. Hasil yang diperoleh berdasarkan kekuatan maksimum dari Kapal *Double Hull Tanker* T3 & T4 diplot dalam bentuk hubungan momen-kelengkungan. Menurut hasil, diperoleh kekuatan maksimum Kapal *Double Hull Tanker* T3 di bawah kondisi *Hogging* dan *Sagging* masing-masing adalah $2,412 \times 10^{13}$ Nmm dan $-2,369 \times 10^{13}$ Nmm. Sedangkan kekuatan maksimum untuk T4 masing-masing adalah $2,563 \times 10^{13}$ Nmm dan $-2,621 \times 10^{13}$ Nmm di bawah kondisi *Hogging* & *Sagging*. Untuk kasus korosi, kekuatan maksimum Kapal *Double Hull Tanker* Tipe T3 masing-masing adalah $2,325 \times 10^{13}$ Nmm dan $-2,096 \times 10^{13}$ Nmm di bawah kondisi *Hogging* dan *Sagging*. Sedangkan untuk T4, kekuatan maksimum masing-masing adalah $2,469 \times 10^{13}$ Nmm dan $-2,40 \times 10^{13}$ Nmm di bawah kondisi *Hogging* dan *Sagging*. Berdasarkan hasil ini, terbukti bahwa Kapal *Double Hull Tanker* Tipe T4 lebih kuat dibandingkan Tipe T3. Hasil deformasi di bawah kondisi *Hogging* dan *Sagging*, dalam setiap kasus yang dipertimbangkan, juga diplot dalam studi ini.

Kata Kunci: *double hull tanker*, penampang kapal, korosi, metode NLFEA, kekuatan batas

ABSTRACT

Fuad Afgani Gunawan Rum. Effect of Corrosion on the Longitudinal Strength of Double Hull Tanker Type T3 and T4. (Supervised by Muhammad Zubair Muis Alie)

The needs for oil exploration and exploitation are increasing along with the consumable of fuel oil. Therefore, the oil tankers are needed for offshore platform. One of them is oil tanker. In order to withstand during operation, the structure is designed to overcome the loads acting on it. One of the most important aspect in the design process of the ship is ship structural strength. The objective of the present study is to know the ultimate strength of Double Hull Tanker Type T3 & T4 by considering the effect of corrosion. The analysis is conducted using NLFEA (Non Linear Finite Element Analysis). The objects of this study are Double Hull Tanker Type T3 and T4 having dimension, shape and type of different stiffeners. The results obtained based on the ultimate strength of Double Hull Tanker T3 & T4 are plotted in term of moment-curvature relationship. According to the result, it is obtained the ultimate strength Double Hull Tanker T3 under withstand Hogging and Sagging conditions are 2.412×10^{13} and -2.369×10^{13} Nmm withstand respectively. While the ultimate strength for T4 are 2.563×10^{13} Nmm and -2.621×10^{13} Nmm under Hogging & Sagging conditions, respectively. For the corrosion case the Double Hull Tanker Type T3 having the ultimate strength are 2.325×10^{13} Nmm & -2.096×10^{13} Nmm under hogging and sagging condition. While, for T4 the ultimate strength are 2.469×10^{13} Nmm and -2.40×10^{13} Nmm under Hogging and Sagging conditions, respectively. Based on this result, it is evidenced that the Double Hull Tanker Type T4 is more stronger than Type T3. The deformation result under Hogging and Sagging conditions, in every cases considered are also plotted in this study.

Keywords: double hull tanker, cross section, corrosion, NLFEA method, ultimate strength,

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL.....	xv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian/perancangan	2
1.4 Manfaat Penelitian/perancangan	2
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan.....	2
BAB II. METODOLOGI PENELITIAN	3
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	3
2.2 Jenis Penelitian.....	3
2.3 Metode Penentuan Sampel	3
2.3.1 Tipe Metode NLFEA.....	4
2.3.2 Algoritma <i>Iterative Solution</i>	4
2.3.3 Proses Peningkatan Beban.....	4
2.3.4 Pembebanan dan Kondisi Syarat Batas.....	4
2.3.5 Ketidaktepatan Geometrik	5
2.3.6 Spesifikasi Material	5
2.3.7 <i>Meshing</i>	5
2.3.8 Tipe Elemen	6
2.4 Teknik Pengumpulan Data	6
2.5 Sumber Data	7
2.6 Data Struktur	7
2.7 Konstruksi Kapal Tanker.....	11
2.8 Tegangan yang Bekerja.....	17
2.9 Tegangan Normal	18
2.10 Tegangan Tarik (<i>Tensile Stress</i>)	18
2.11 Tegangan Tekan (<i>Compressive Stress</i>).....	19
2.12 Tegangan Geser (<i>Shear</i>).....	20
2.13 Tegangan Lentur (<i>Bending Stress</i>)	20
2.14 Tegangan Izin Dasar	20
2.15 Regangan	21
2.15.1 Daerah Linear (<i>Elastic Limit</i>).....	22
2.15.2 Titik Luluh (Batas Proporsional)	22
2.15.3 Deformasi Plastis (<i>Plastis Deformation</i>).....	22
2.15.4 Titik Putus	22
2.16 Deformasi Material.....	23

2.17 Kekuatan Batas (<i>Ultimate Strength</i>)	23
2.18 <i>Nodal Constrained</i>	25
2.19 Beban-beban yang Bekerja	25
2.20 Pembebanan <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	26
2.21 Model Estimasi Tingkat Korosi pada Kapal Tanker	29
2.22 Metode Elemen Hingga	30
2.23 Analisis Data	31
2.23.1 Tahapan Pertama	31
2.23.2 Tahapan Kedua	31
2.23.3 Tahapan Ketiga	31
2.23.4 Hasil Penelitian	33
2.24 Kesimpulan	33
2.25 Diagram Alir	33
BAB III. HASIL.....	36
3.1 Objek Penelitian.....	35
3.2 Perhitungan Momen Lentur-Batas Vertikal	35
3.3 Tegangan Izin.....	37
3.4 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T3 Terhadap Momen Lentur-batas Vertikal	37
3.4.1 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T3 Kondisi Utuh Pada Kondisi <i>Sagging</i>	37
3.4.2 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T3 Kondisi Utuh Pada Kondisi <i>Hogging</i>	38
3.4.3 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T3 Kondisi Kerusakan Pada Kondisi <i>Sagging</i> 38	
3.4.4 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T3 Kondisi Kerusakan Pada Kondisi <i>Hogging</i> 39	
3.5 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T4 Terhadap Momen Lentur-batas Vertikal	40
3.5.1 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T4 Kondisi Utuh Pada saat <i>Sagging</i>	40
3.5.2 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T4 Kondisi Utuh Pada saat <i>Hogging</i>	41
3.5.3 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T4 Kondisi Kerusakan Pada saat <i>Sagging</i> ..	41
3.5.4 Tegangan Kerja <i>Double Hull Tanker</i> T4 Kondisi Kerusakan Pada saat <i>Hogging</i> ..	42
BAB IV PEMBAHASAN	44
4.1 Perhitungan Momen-lentur Batas Vertikal	44
4.2 Kekuatan Batas Momen Vertikal	45
4.2.1 Kekuatan Batas Momen Lentur Vertikal kapal <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T3 Kondisi Utuh Pada saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i>	45
4.2.2 Kekuatan Batas Momen Lentur Vertikal kapal <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T3 Kondisi Kerusakan Pada saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i>	47
4.2.3 Kekuatan Batas Momen Lentur Vertikal kapal <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T4 Kondisi Utuh Pada saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i>	50
4.2.4 Kekuatan Batas Momen Lentur Vertikal kapal <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T4 Kondisi Kerusakan Pada saat <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i>	53
4.2.5 Perbandingan Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>Double Hull Tanker</i> Tipe 3 (Kondisi Utuh) dan T3 (Kondisi Kerusakan) Menggunakan Metode NLFEA	56
4.2.6 Perbandingan Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>Double Hull Tanker</i> Tipe 4 (Kondisi Utuh) dan T4 (Kondisi Kerusakan) Menggunakan Metode NLFEA	58

4.2.7 Perbandingan Kekuatan-Batas Momen Lentur Vertikal Kapal <i>Double Hull Tanker</i> Tipe 3 kondisi utuh dan kerusakan dengan Double Hull Tanker Tipe T4 kondisi utuh dan kerusakan Menggunakan Metode NLFEA	60
BAB V. KESIMPULAN	62
5.1 Kesimpulan	62
5.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	66
Lampiran 1. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Kapal Tanker T3 Menggunakan Metode NLFEA Kondisi <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> Kondisi Utuh	65
Lampiran 2. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Kapal Tanker T3 Menggunakan Metode NLFEA Kondisi <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> Kondisi Kerusakan.....	66
Lampiran 3. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Kapal Tanker T4 Menggunakan Metode NLFEA Kondisi <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> Kondisi Utuh	67
Lampiran 4. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Kapal Tanker T4 Menggunakan Metode NLFEA Kondisi <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> Kondisi Kerusakan.....	68
Lampiran 5. Bukti Asistensi Skripsi	70

DAFTAR TABEL

Nomor Urut	Halaman
Tabel 1 Spesifikasi Material	5
Tabel 2 Konfigurasi Material <i>Stiffener</i> Kapal Tanker Tipe T3	7
Tabel 3 Konfigurasi Material <i>Stiffener</i> Kapal Tanker Tipe T4	9
Tabel 4 Data Kerusakan Penampang Akibat Korosi Pada Tanker T3 dan T4	33
Tabel 5 Formula Momen Lentur-batas Vertikal Pada Kapal Tanker T3 dan T4	35
Tabel 6 Momen Lentur-batas Vertikal <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> Tanker T3 dan T4	36
Tabel 7 Tegangan Izin Kerja Material Kapal Tanker T3 dan T4	37
Tabel 8 Hasil Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah Z Pada Kapal Tanker Tipe T3 dan Kapal Tanker T4	43
Tabel 9 Kekuatan Batas Kapal Tanker Tipe T3 Kondisi Utuh	45
Tabel 10 Kekuatan Batas Kapal Tanker Tipe T3 Kondisi Kerusakan.....	48
Tabel 11 Kekuatan Batas Kapal Tanker Tipe T4 Kondisi Utuh	50
Tabel 12 Kekuatan Batas Kapal Tanker Tipe T4 Kondisi Kerusakan.....	53
Tabel 13 Rekapitulasi Kekuatan Batas Kapal Tanker T3 Kondisi Utuh dan T3 Kondisi Kerusakan.....	56
Tabel 14 Rekapitulasi Kekuatan Batas Kapal Tanker T4 Kondisi Utuh dan T4 Kondisi Kerusakan.....	58
Tabel 15 Rekapitulasi Kekuatan Batas Kapal Tanker T3 Kondisi Utuh dan T3 Kondisi Kerusakan dan Kapal Tanker T4 Kondisi Utuh dan T4 Kondisi Kerusakan.....	60

DAFTAR GAMBAR

Nomor Urut	Halaman
Gambar 1 Kondisi Syarat Batas Untuk Kontrol Kelengkungan	5
Gambar 2 Tanker Tipe T3 Kondisi <i>Meshing</i>	6
Gambar 3 Konfigurasi Penampang Kapal Tanker Tipe T3 (Muis-Alie et al., 2012)	8
Gambar 4 Konfigurasi Penampang Kapal Tanker Tipe T4 (Muis-Alie et al., 2012)	10
Gambar 5 Konstruksi Kapal Tanker	11
Gambar 6 Struktur utama komponen pada bagian tengah dari <i>single hull tanker</i>	12
Gambar 7 Kapal <i>Double Hull Tanker</i> dengan dua sekat memanjang	13
Gambar 8 Kapal <i>Double Hull Tanker</i> dengan satu sekat memanjang.....	14
Gambar 9 Kapal <i>Double Hull Tanker</i> dengan satu sekat memanjang.....	15
Gambar 10 Struktur <i>Midship Double Hull Tanker</i>	16
Gambar 11 Perbedaan kapal <i>Single-Hull Tanker</i> dan <i>Double-Hull Tanker</i>	16
Gambar 12 Tegangan-Regangan.....	18
Gambar 13 Tegangan Tarik	19
Gambar 14 Tegangan Tekan	19
Gambar 15 Hubungan antara tegangan dan regangan (Timoshenko,1930).....	21
Gambar 16 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan (DNV GL, 2017b)	24
Gambar 17 Distribusi Beban, Gaya Geser dan Momen Lentur (Shama,2013)	26
Gambar 18 Faktor distribusi K_M (DNV GL, 2017a).....	27
Gambar 19 Momen Lentur Vertikal Akibat Gelombang (<i>Bachman</i> , 1991).....	27
Gambar 20 <i>Typical Cargo Tank Model of an Aframax Oil Tanker</i>	29
Gambar 21 Kapal Tanker T3 Kondisi Utuh	31
Gambar 22 Kapal Tanker T3 Kondisi Kerusakan Akibat Korosi	31
Gambar 23 Kapal Tanker T4 Kondisi Utuh	32
Gambar 24 Kapal Tanker T4 Kondisi Kerusakan Akibat Korosi	32
Gambar 25 Diagram Alir	34
Gambar 26 Deformasi Tegangan Kerja <i>Sagging</i> Kondisi Utuh	37
Gambar 27 Deformasi Tegangan Kerja <i>Hogging</i> Kondisi Utuh	38
Gambar 28 Deformasi Tegangan Kerja <i>Sagging</i> Kondisi Kerusakan.....	39
Gambar 29 Deformasi Tegangan Kerja <i>Hogging</i> Kondisi Kerusakan	40
Gambar 30 Deformasi Tegangan Kerja <i>Sagging</i> Kondisi Utuh	40
Gambar 31 Deformasi Tegangan Kerja <i>Hogging</i> Kondisi Utuh	41
Gambar 32 Deformasi Tegangan Kerja <i>Sagging</i> Kondisi Kerusakan	42
Gambar 33 Deformasi Tegangan Kerja <i>Hogging</i> Kondisi Kerusakan	43
Gambar 34 Grafik Momen Kelengkungan <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T3 Kondisi Utuh ..	46
Gambar 35 Detail Deformasi Kekuatan-batas Tanker T3 Kondisi Utuh saat <i>Sagging</i> ..	46
Gambar 36 Detail Deformasi Kekuatan-batas Tanker T3 Kondisi Utuh saat <i>Hogging</i> ..	47
Gambar 37 Grafik Momen Kelengkungan <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T3 Kondisi Kerusakan	48
Gambar 38 Detail Deformasi Kekuatan-batas Tanker T3 Kondisi Kerusakan saat <i>Sagging</i>	49

Gambar 39 Detail Deformasi Kekuatan-batas Tanker T3 Kondisi Kerusakan saat <i>Hogging</i>	50
Gambar 40 Grafik Momen Kelengkungan <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T3 Kondisi Kerusakan	51
Gambar 41 Detail Deformasi Kekuatan-batas Tanker T4 Kondisi Utuh saat <i>Sagging</i> ...	52
Gambar 42 Detail Deformasi Kekuatan-batas Tanker T4 Kondisi Utuh saat <i>Hogging</i> ..	52
Gambar 43 Grafik Momen Kelengkungan <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T4 Kondisi Kerusakan.....	53
Gambar 44 Detail Deformasi Kekuatan-batas Tanker T4 Kondisi Kerusakan saat <i>Sagging</i>	54
Gambar 45 Detail Deformasi Kekuatan-batas Tanker T4 Kondisi Kerusakan saat <i>Hogging</i>	55
Gambar 46 Grafik Perbandingan Momen Kelengkungan <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T3 Kondisi Utuh dan T3 Kondisi Kerusakan.....	57
Gambar 47 Grafik Perbandingan Momen Kelengkungan <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T4 Kondisi Utuh dan T4 Kondisi Kerusakan.....	59
Gambar 48 Grafik Perbandingan Momen Kelengkungan <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T3 kondisi utuh dan kerusakan dengan <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T4 kondisi utuh dan kerusakan	61

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
A	Luas penampang	mm ²
B	Lebar kapal	m
b	Lebar kerusakan akibat kandas	m
b_x	Gaya apung	N
C	Koefisien momen lentur	
C_b	Koefisien blok kapal	
D	Tinggi kapal	m
E	Modulus elastisitas	N/mm ²
F_{ta}	Gaya tekan	N
F_{tr}	Gaya tarik	N
F_x	Gaya geser arah sumbu x	N
h	Tinggi kerusakan akibat tubrukan	m
I	Inersia penampang	m ⁴
I_{min}	Inersia izin	m ⁴
K_M	Faktor distribusi	
L	Panjang kapal	m
M	Momen lentur	Nmm
M_{US}	Kekuatan batas momen lentur <i>sagging</i>	Nmm
M_{UH}	Kekuatan batas momen lentur <i>hogging</i>	Nmm
M_{sw}	Momen lentur pada air tenang	Nmm
M_w	Momen lentur akibat gelombang	Nmm
M_t	Momen lentur- batas total	Nmm
S	Modulus penampang	Nmm
S_b	Modulus penampang bagian <i>bottom</i>	m ³
S_d	Modulus penampang bagian <i>deck</i>	m ³
S_p	Modulus penampang izin	m ³
z	Jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur	m ³
z_b	Jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur <i>bottom</i>	m
σ	Tegangan lentur	m
σ_p	Tegangan lentur izin	N/mm ²
σ_{max}	Tegangan lentur maksimum	N/mm ²
σ_e	Tegangan rata-rata	N/mm ²
σ_{te}	Tegangan tekan	N/mm ²
σ_{tr}	Tegangan tarik	N/mm ²
τ	Tegangan geser	N/mm ²
ε	Regangan	N/mm ²
Δl	Deformasi material	m

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi eksplorasi dan eksploitasi minyak semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan minyak yang berdampak pada semakin pesatnya pencarian sumber minyak di laut dalam. Oleh karena itu dibutuhkan kapal – kapal pengangkut minyak baik mentah maupun produk dari drilling site atau extraction point ke tempat penyulingan atau daratan. Salah satunya, yakni dengan menggunakan oil tanker. Agar dapat bertahan selama masa operasinya, suatu struktur konstruksi didesain untuk mampu bertahan dari berbagai beban kerja yang dialaminya. Secara prinsip, selama beban kerja yang dialami tidak melewati batas maksimum yang ditentukan maka kegagalan struktur tidak akan terjadi. Namun apabila beban tersebut diberikan berulang-ulang secara terus-menerus, walaupun beban yang diberikan berada di bawah batas maksimum desain, maka perhatian khusus perlu diberikan (Rusdi,2018).

Korosi adalah masalah degradasi terkait usia yang penting yang berdampak besar pada masa pakai struktur laut. Sejak tahun 1950-an, waktu konstruksi kapal dan struktur lepas pantai telah berkurang secara signifikan oleh perkembangan teknologi pengelasan dan pemeliharaan. Dengan teknologi pemeliharaan yang berkembang pesat, kegagalan struktur akibat karena kerusakan dalam layanan menurun. Kemajuan ini, bersama dengan perkembangan teknis lainnya, telah memperpanjang umur kapal dan struktur lepas pantai sebanyak dua atau tiga kali lipat (Kim,2014).

Secara historis, berbagai teknologi untuk mencegah korosi telah disarankan, seperti penambahan korosi, pelapisan, proteksi katodik, deoksigenasi air pemberat, dan penghambatan kimiawi (Paik dan Melchers, 2008). Di antara teknologi ini, pelapisan dan penambahan korosi adalah dua teknologi yang paling banyak diadopsi oleh perancang dan pembangun kapal untuk melindungi member struktural dari degradasi korosi karena efektivitas biaya, kepraktisan yang sederhana, dan relevansinya.

Potensi penurunan kemampuan struktur akibat korosi dan retakan yang disebabkan oleh kelelahan sangatlah penting. Struktur kapal yang sudah tua dan tidak terawat dengan baik pada akhirnya dapat menyebabkan korban jiwa di laut yang ganas dan cuaca buruk. Efek kompleks dari korosi dan retak fatik muncul dengan sendirinya pada tingkat kinerja struktur lokal dan global. Ada kemungkinan bahwa degradasi struktural berikutnya, misalnya kegagalan tekuk, akan berkembang dalam bentuk yang progresif dan menyebar dengan korosi lebih lanjut dan retak dengan cara yang bergantung pada waktu, tunduk pada tuntutan lingkungan dan operasional yang berkelanjutan.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya belum ada penelitian yang menganalisis terkait kekuatan struktur kapal arah membujur yang disebabkan oleh korosi terhadap kapal *Double Hull* Tanker Tipe T3 dan T4. Maka dari itu, dilakukannya penelitian ini guna untuk mengetahui kekuatan struktur kapal arah membujur dari kapal tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

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

- a. Bagaimana pengaruh korosi terhadap kekuatan membujur kapal?
- b. Bagaimana perbandingan kekuatan membujur *Double Hull Tanker* Tipe T3 dan T4 dengan kondisi utuh dan kondisi kerusakan akibat korosi?

1.3 Tujuan Penelitian/perancangan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Untuk mengetahui pengaruh korosi terhadap kekuatan membujur kapal.
- b. Untuk mengetahui perbandingan kekuatan membujur *Double Hull Tanker* Tipe T3 dan T4 dalam kondisi utuh dan kondisi kerusakan akibat korosi.

1.4 Manfaat Penelitian/perancangan

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

- a. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya mengetahui analisis struktur baja.
- b. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kepada perusahaan-perusahaan.
- c. Bagi peneliti, memberikan pengetahuan cara menganalisis kekuatan pada kapal Tanker dalam kondisi *hogging* dan *sagging* dan sebagai tugas akhir sarjana Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
- d. Sebagai informasi dalam hal menentukan kebijakan dalam hal regulasi/peraturan pada galangan kapal untuk membuat perencanaan struktur kapal Tanker.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan

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

- a. Beban yang bekerja hanya momen lentur vertikal longitudinal (*hogging* dan *sagging*) dengan kerusakan sebesar 1 jarak gading dengan menggunakan metode elemen hingga.
- b. Kerusakan akibat korosi hanya pada pelat bagian bottom dan pada titik-titik tertentu
- c. Menganalisa kekuatan *Double Hull Tanker* Tipe T3 dan T4 menggunakan *software ANSYS Mechanical*.

BAB II. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di *Ocean Structure Analysis Research Laboratory* (OSAREL) Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa dan dilaksanakan pada bulan Februari 2024.

2.2 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta menampilkan hasil dari studi kasus mengenai simulasi kekuatan *double hull tanker* akibat terjadinya korosi pada kapal *double hull tanker* tipe T3 dan T4 dengan metode elemen hingga.

2.3 Metode Penentuan Sampel

Metode NLFEA adalah salah satu metode elemen hingga yang digunakan dan direkomendasikan oleh biro klasifikasi untuk menghitung kekuatan struktur kapal, disamping metode lainnya seperti teori balok, metode *presumed stress distribution*, ISUM dan ISFEM. (Hughes dan Paik, 2010).

Menghitung dan membandingkan kekuatan-batas struktur kapal dengan menggunakan metode teori balok, metode *presumed stress distribution*, NLFEA, ISUM dan ISFEM. Penelitian ini akan menggunakan metode NLFEA untuk menghitung kekuatan-batas *longitudinal* struktur *double hull tanker* tipe T3 dan T4 baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat korosi.

Beberapa metode yang sering digunakan dalam menghitung kekuatan struktur kapal, yaitu metode *Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA)*, metode Smith, dll. Menghitung dan membandingkan kekuatan batas struktur kapal dapat menggunakan metode teori balok, metode *presumed stress distribution*, NLFEA, metode Smith dan *Idealized Structural Unit Method (ISUM)* dan *Intellegent Supersize Finite Element Method (ISFEM)* (Hughes, 2010). Adapun metode yang akan digunakan untuk menghitung kekuatan-batas longitudinal struktur kapal *double hull tanker* Tipe T3 dan T4, baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat korosi pada penelitian ini, yaitu metode *Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA)*.

Secara potensial, hasil yang paling akurat mengenai penilaian *ultimate strength* dapat diperoleh dengan menggunakan analisis NLFEA dari keseluruhan model struktural yang didiskritkan, yang memungkinkan simulasi dan evaluasi respon struktural *non-linear* 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 NLFEM secara sukses (terutama untuk pra/pasca pemrosesan).

Di sisi lain, analisis NLFEM sering digunakan untuk derivasi dan verifikasi berbagai formulasi sederhana dari respons *elasto-plastik* dari komponen struktural yang dikenakan dengan berbagai jenis muatan murni atau gabungan (Kitarović, 2014).

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

2.3.1 Tipe Metode NLFEA

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

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

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

2.3.2 Algoritma *Iterative Solution*

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

2.3.3 Proses Peningkatan Beban

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

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

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

2.3.4 Pembebanan dan Kondisi Syarat Batas

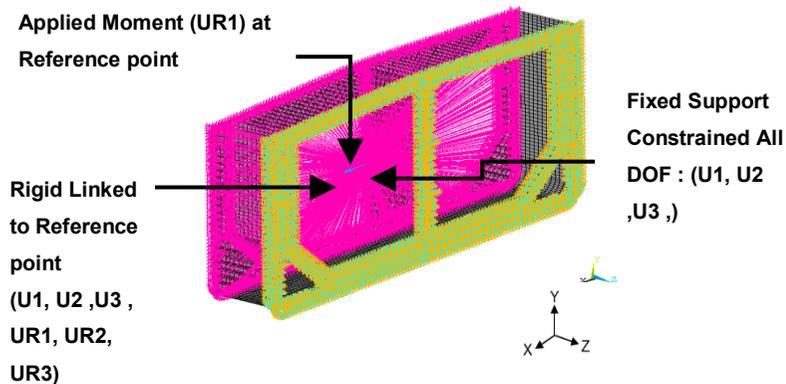
Pembebanan dan kondisi syarat batas yang diaplikasikan pada model elemen hingga sangat tergantung pada jenis proses peningkatan beban yang digunakan. Kontrol kelengkungan menggunakan kondisi syarat batas dimana kedua ujung model diberikan *rigid link* dengan pembebanan seperti pada Gambar 1.

Mengacu pada metode untuk menentukan kondisi batas pada model kapal tanker. U1, U2, U3, UR1, UR2, dan UR3 adalah komponen yang mewakili derajat kebebasan translasi dan rotasi pada titik referensi tersebut. Berikut adalah penjelasan rinci tentang masing-masing komponen:

1. U1 (*Translation in X direction*) adalah perpindahan atau translasi dalam arah sumbu X. Menghubungkan rigid body ke titik referensi pada U1 berarti bahwa perpindahan dalam arah X dari semua node yang terhubung akan sama dengan perpindahan titik referensi di U1.
2. U2 (*Translation in Y direction*) adalah perpindahan atau translasi dalam arah sumbu Y. Menghubungkan rigid body ke titik referensi pada U2 berarti bahwa perpindahan

dalam arah Y dari semua node yang terhubung akan sama dengan perpindahan titik referensi di U2.

3. U3 (*Translation in Z direction*) adalah perpindahan atau translasi dalam arah sumbu Z. Menghubungkan rigid body ke titik referensi pada U3 berarti bahwa perpindahan dalam arah Z dari semua node yang terhubung akan sama dengan perpindahan titik referensi di U3.
4. UR1 (*Rotation about X axis*) adalah rotasi sekitar sumbu X. Menghubungkan rigid body ke titik referensi pada UR1 berarti bahwa rotasi sekitar sumbu X dari semua node yang terhubung akan sama dengan rotasi titik referensi di UR1.
5. UR2 (*Rotation about Y axis*) adalah rotasi sekitar sumbu Y. Menghubungkan rigid body ke titik referensi pada UR2 berarti bahwa rotasi sekitar sumbu Y dari semua node yang terhubung akan sama dengan rotasi titik referensi di UR2.
6. UR3 (*Rotation about Z axis*) adalah rotasi sekitar sumbu Z. Menghubungkan rigid body ke titik referensi pada UR3 berarti bahwa rotasi sekitar sumbu Z dari semua node yang terhubung akan sama dengan rotasi titik referensi di UR3.



Gambar 1 Kondisi Syarat Batas Untuk Kontrol Kelengkungan
(Sumber: Hasil Olahan, 2024)

2.3.5 Ketidaktepatan Geometrik

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

2.3.6 Spesifikasi Material

Kurva tegangan-regangan dari material yang digunakan pada model elemen hingga harus tersedia. Kurva tegangan-regangan sangat menentukan nilai kekuatan-batas dari struktur kapal. Penelitian ini menggunakan spesifikasi material yang dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1 Spesifikasi Material

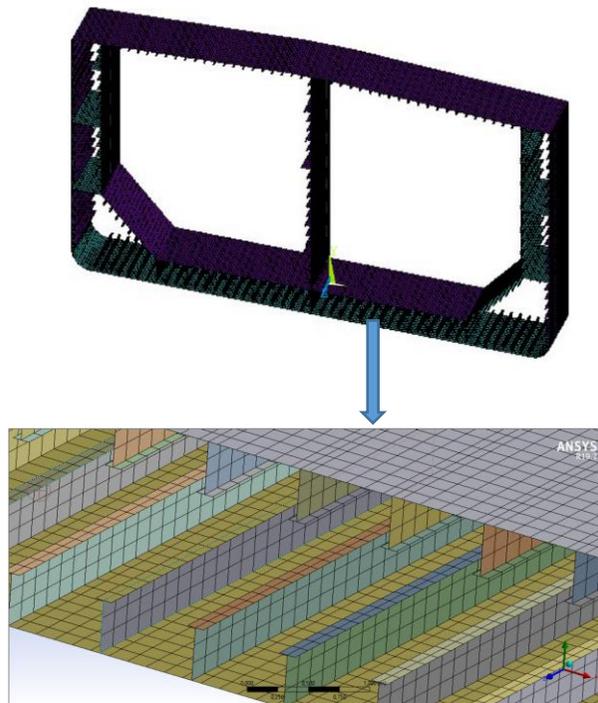
Spesifikasi Material	Jenis Material
	HS36
<i>Modulus Young</i> (N/mm ²)	210.000
<i>Density</i> (kg/m ³)	7.850
<i>Yield Strength</i> (N/mm ²)	355
Rasio Poisson	0,33
<i>Ultimate Tensile Strength</i> (N/mm ²)	490

(Sumber: ABS, 2021)

2.3.7 Meshing

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

Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar sebaiknya di-*meshing* dengan ukuran yang lebih kecil untuk dapat memperlihatkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin kecil nilai *meshing* maka perangkat komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi yang tinggi. Dalam penelitian ini ukuran *meshing* yang digunakan sebesar 450 mm dengan bentuk *quadmapped* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Tanker Tipe T3 Kondisi *Meshing*
(Sumber: Hasil Olahan, 2024)

2.3.8 Tipe Elemen

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

2.4 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang akan digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Observasi: Metode ini melibatkan pengamatan langsung terhadap objek yang diteliti. Tujuannya adalah untuk mendapatkan informasi yang jelas dan akurat mengenai fenomena yang sedang diteliti.
2. Dokumentasi: Dalam metode ini, seluruh data dan kegiatan penelitian didokumentasikan dalam bentuk gambar. Tujuannya adalah untuk melengkapi analisis dan memperkuat kesimpulan penelitian.
3. Studi Kepustakaan: Teknik ini melibatkan membaca dan menelaah buku-buku kepustakaan serta sumber-sumber tekstual lainnya yang berkaitan erat dengan masalah yang sedang diteliti. Tujuannya adalah untuk memperoleh informasi tambahan yang dapat mendukung analisis dan pemahaman terhadap masalah penelitian.

2.5 Sumber Data

Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder merupakan data yang diperoleh secara tidak langsung melalui media perantara, artinya data tersebut dicatat atau dikumpulkan oleh pihak lain dan kemudian digunakan oleh peneliti. Sumber-sumber data sekunder dapat mencakup berbagai bentuk, seperti studi literatur dari buku-buku, skripsi, artikel ilmiah, dan sumber informasi dari internet.

2.6 Data Struktur

Penelitian ini menggunakan kapal tanker dengan ukuran utama sebagai berikut.

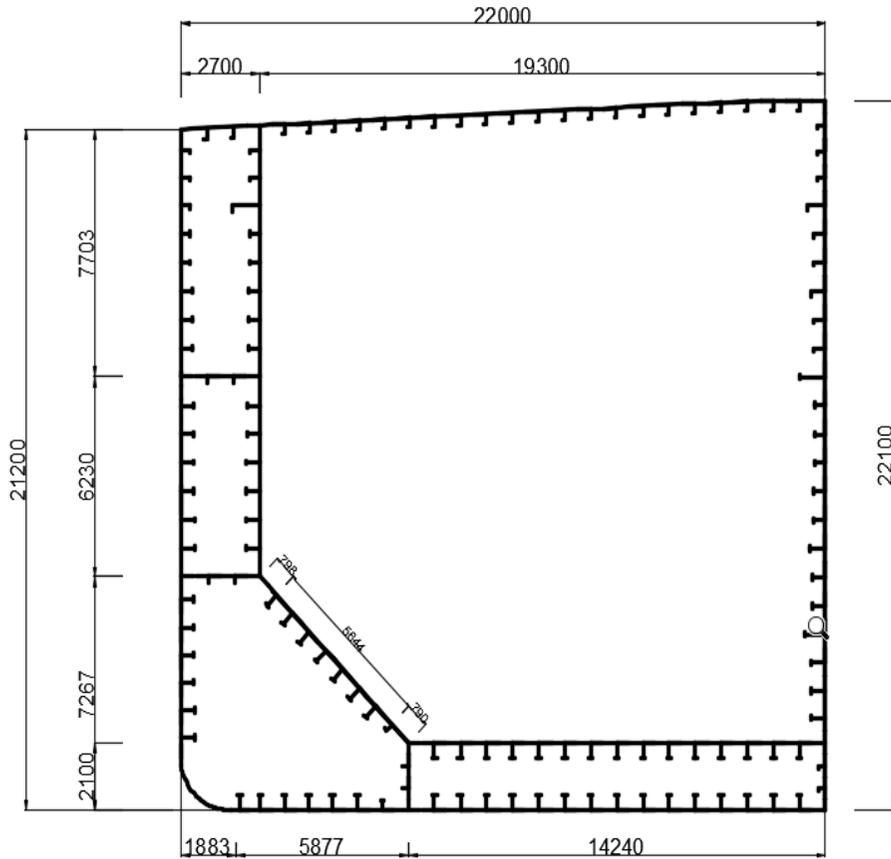
Panjang Kapal, L	: 234	m
Lebar Kapal, B	: 44	m
Tinggi Kapal, H	: 22,1	m

Data konfigurasi *stiffener* penampang dan spesifikasi material untuk kapal *Double Hull Tanker* Tipe T3 ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 3.

Tabel 2 Konfigurasi Material *Stiffener* Kapal Tanker Tipe T3

No. Stiffener	Deskripsi	Tipe
1	L300/12 x 90/ 17	Angle
2	L619/13 x 150/19	Angle
3	L400/11.5 x 100/16	Angle
4	L489/11 x 150/19	Angle
5	L400/13 x 100/18	Tee-Bar
6	L872/14 x 150/22	Tee-Bar
7	L367/11 x 150/22	Tee-Bar
8	L412/11 x 150/22	Tee-Bar
9	L522/11 x 150/22	Tee-Bar
10	L452/11 x 150/22	Tee-Bar
11	L722/14 x 150/22	Tee-Bar
12	L472/11 x 150/22	Tee-Bar
13	L250/12 x 90/16	Angle
14	L485/11 x 150/30	Tee-Bar
15	L300/11 x 90/16	Angle
16	L475/11 x 150/30	Tee-Bar
17	L473/11 x 150/28	Tee-Bar
18	L480/11 x 150/25	Tee-Bar
19	L445/11 x 150/25	Tee-Bar
20	L452/11 x 150/22	Tee-Bar
21	L474/11 x 125/19	Tee-Bar
22	L439/11 x 125/16	Tee-Bar
23	L386/11 x 125/16	Angle
24	L306/11 x 125/16	Angle
25	L300/11 x 90/16	Angle
26	L350/12 x 100/17	Angle
27	L300/11 x 90/16	Angle
28	L487/11 x 150/32	Tee-Bar
29	L250/12 x 90/16	Angle
30	L474/11 x 150/19	Tee-Bar
31	L469/11 x 150/19	Tee-Bar
32	L454/11 x 150/19	Tee-Bar
33	L489/11 x 125/19	Tee-Bar
34	L459/11 x 125/19	Tee-Bar
35	L429/11 x 125/19	Tee-Bar
36	L379/11 x 125/19	Tee-Bar
37	L324/11 x 125/19	Angle
38	L966/16 x 200/16	Angle
39	L350/12 x 100/17	Angle
40	L200/12	Flet Bar

(Sumber: Muis-Alie et al., 2012)



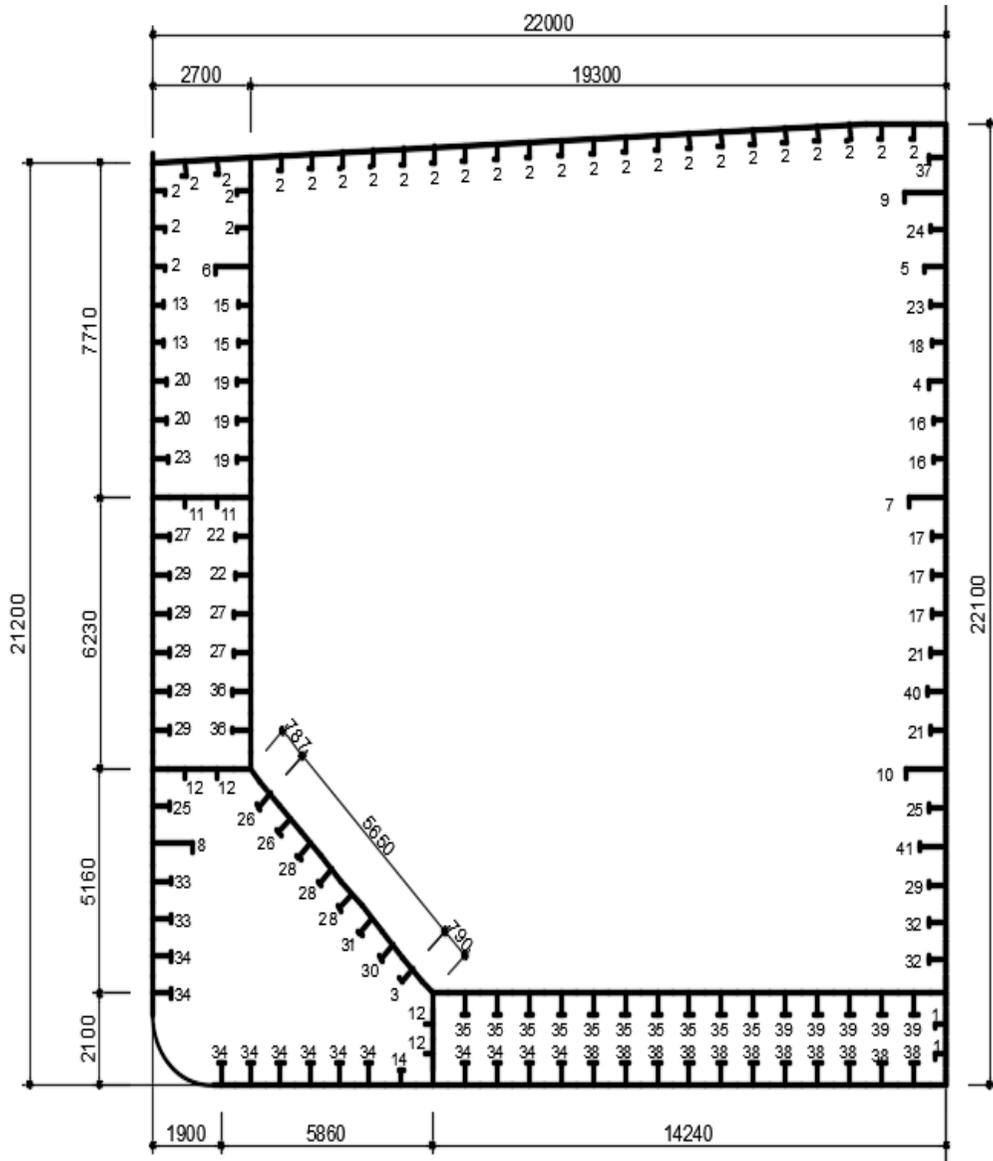
Gambar 3 Konfigurasi Penampang Kapal Tanker Tipe T3 (Muis-Alie et al., 2012)

Sedangkan konfigurasi *stiffener* penampang dan spesifikasi material untuk kapal *Double Hull Tanker* Tipe T4 ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 4.

Tabel 3 Konfigurasi Material *Stiffener* Kapal Tanker tipe T4

No. Stiffener	Deskripsi	Tipe
1	300 x 11 + 90 x 16	Angle Bar
2	350 x 12 + 100 x 17	Angle Bar
3	400 x 11.5 + 100 x 16	Angle Bar
4	489 x 11 + 150 x 19	Angle Bar
5	619 x 12 + 150 x 19	Angle Bar
6	966 x 16 + 200 x 16	Angle Bar
7	1016 x 16 + 200 x 16	Angle Bar
8	1116 x 16 + 200 x 16	Angle Bar
9	1116 x 16 + 200 x 16	Angle Bar
10	1145 x 16 + 200 x 16	Angle Bar
11	200 x 13	Flat Bar
12	200 x 14	Flat Bar
13	306 x 11 + 125 x 16	Tee Bar
14	324 x 12 + 125 x 19	Tee Bar
15	324 x 11 + 125 x 19	Tee Bar
16	344 x 11 + 125 x 19	Tee Bar
17	367 x 11 + 150 x 22	Tee Bar
18	379 x 11 + 125 x 19	Tee Bar
19	379 x 11 + 125 x 19	Tee Bar
20	386 x 11 + 125 x 16	Tee Bar
21	412 x 11 + 150 x 22	Tee Bar
22	429 x 11 + 125 x 19	Tee Bar
23	431 x 11 + 125 x 16	Tee Bar
24	431 x 12 + 125 x 16	Tee Bar
25	452 x 11 + 150 x 22	Tee Bar
26	454 x 11 + 150 x 19	Tee Bar
27	459 x 11 + 125 x 19	Tee Bar
28	469 x 11 + 150 x 19	Tee Bar
29	472 x 11 + 150 x 22	Tee Bar
30	472 x 11 + 150 x 22	Tee Bar
31	474 x 11 + 150 x 19	Tee Bar
32	475 x 11 + 150 x 25	Tee Bar
33	485 x 11 + 150 x 30	Tee Bar
34	487 x 11 + 180 x 32	Tee Bar
35	487 x 11 + 180 x 32	Tee Bar
36	489 x 11 + 125 x 19	Tee Bar
37	492 x 12 + 125 x 25	Tee Bar
38	507 x 11 + 200 x 32	Tee Bar
39	507 x 11 + 200 x 32	Tee Bar
40	522 x 11 + 150 x 22	Tee Bar

(Sumber: Muis-Alie et al., 2012)



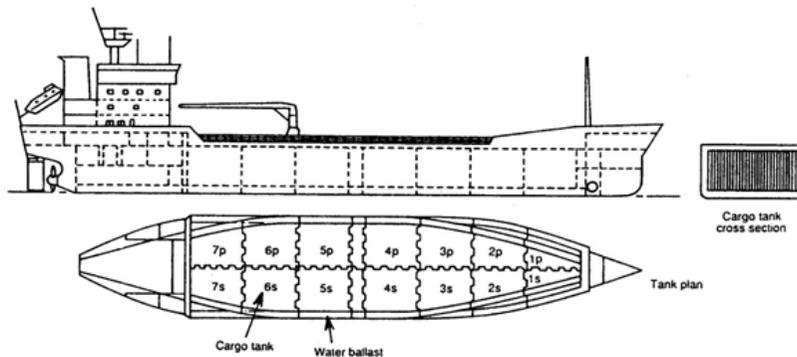
Gambar 4 Konfigurasi Penampang Kapal Tanker Tipe T4 (Muis-Alie et al., 2012)

2.7 Konstruksi Kapal Tanker

Konstruksi kapal tanker didesain dan dibuat secara khusus dengan ketetapan standar keselamatan yang sangat tinggi sesuai dengan spesifikasi yang diatur dalam IMO melalui peraturan *MARPOL 73/78-Annex 1, Regulation 13G, Amandemen 2001* serta SOLAS (Keselamatan Jiwa di Laut).

Kapal tanker dibuat untuk mengangkut minyak mentah melalui laut atau perairan dari pelabuhan muat atau pelabuhan produksi ke pelabuhan bongkar/pengolahan dan minyak produk dari pelabuhan pengolahan menuju pelabuhan bongkar/distribusi. Selain digunakan untuk membawa muatan curah air hasil dari tempat pengeboran menuju darat, kapal tanker juga digunakan sebagai moda transportasi laut untuk keperluan perdagangan minyak antar pelabuhan atau antar negara.

Ukuran dari kapal pengangkut minyak mentah biasanya lebih besar dari pengangkut minyak produksi, tetapi dalam pengaturan jaringan pipa-pipanya lebih kompleks). Adapun contoh konstruksi kapal tanker dapat dilihat pada Gambar 5 sebagai berikut.



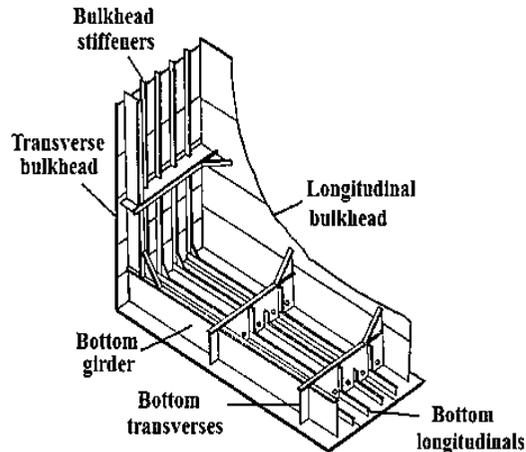
Gambar 5 Konstruksi Kapal Tanker

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

1. Safety : sebagai pengangkut muatan berbahaya.
2. Stabilitas : muatan cair dalam tangka dapat bergerak bebas.
3. Pencemaran : dapat terjadi tumpahan minyak dilaut.

Sistem utama yang memiliki pengaruh signifikan terhadap ukuran dan konfigurasi fasilitas produksi.

Konstruksi kapal tanker terbagi dua yaitu kapal Single Hull Tanker dan kapal double hull tanker yang mana akan dijelaskan pada paragraf sebagai berikut.



Gambar 6 Struktur utama komponen pada bagian tengah *Tanker* dari *single hull tanker*

Single Hull Tanker dapat dilihat pada gambar 6, Tanker lambung tunggal (*single hull tanker*), merupakan jenis tanker yang hanya memiliki satu lambung dan minyak yang dibawa disimpan dalam struktur lambung, model konstruksi *single*.

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

Dalam tiga kasus besar yang melibatkan tiga tanker raksasa hingga terjadi tumpahan minyak yang sangat massif, sistem *single hull* pada ketiga tanker tersebut dituding sebagai penyebab tumpahnya minyak ke laut sehingga mencemari dan merusak lingkungan hidup perairan yang terpapar.

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

1. *Oil Tanker* kategori 1

- a. Kapal tanker 20.000 DWT atau lebih yang memuat *crude oil, fuel oil, heavy diesel oil*, atau *lubricating oil*.
- b. Kapal tanker 30.00 DWT atau lebih yang memuat jenis minyak selain yang disebutkan diatas. (Tanker pra-MARPOL, yaitu tanker *single hull* yang tidak mempunyai *ballast tanks* terpisah pada *protective locations*).

2. *Oil Tanker* kategori 2

- a. Kapal tanker 20.000 DWT atau lebih yang memuat *crude oil, fuel oil, heavy diesel oil*, atau *lubricating oil*.

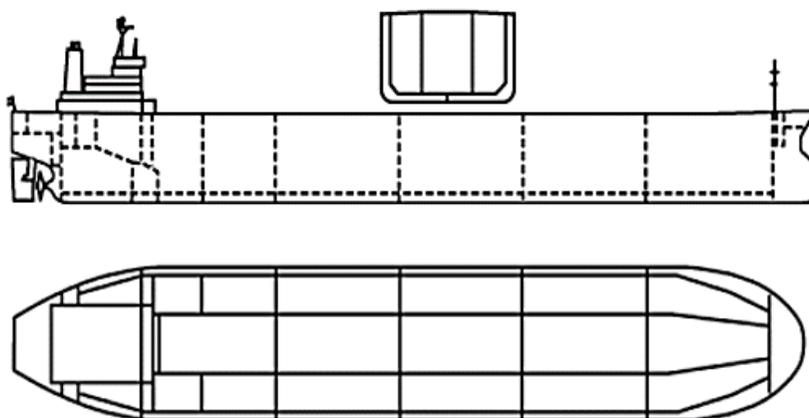
- b. Tanker MARPOL 30.000 DWT atau lebih, *single hull*, yang memuat jenis minyak selain yang disebut diatas, yang dilengkapi *ballast tank* terpisah pada *protective location*)

3. Oil Tanker kategori 3

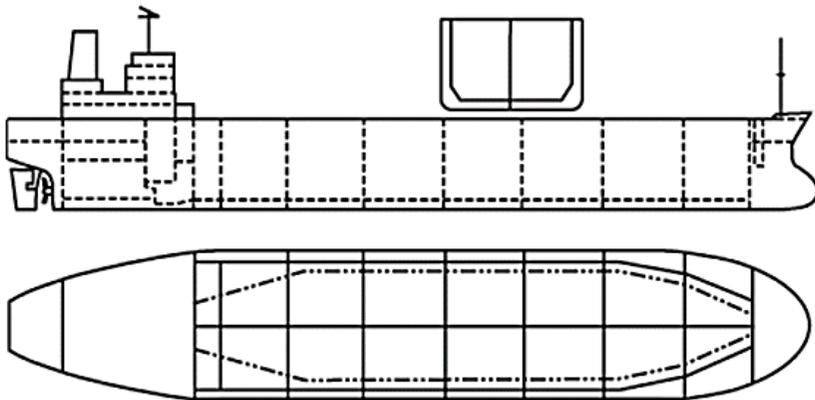
Tanker 5.000 DWT atau lebih, *single hull* yang ukurannya dibawah tanker kategori 1 dan 2 diatas.

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

Double Hull Tanker, Penggunaan *double-hull tanker* merupakan solusi bagi kapal tanker, sesuai namanya kapal ini memiliki lambung ganda, jenis kapal ini memiliki dua tingkat atau lapisan, yaitu: lapisan luar dan lapisan dalam. lambung ganda sekarang ini menjadi persyaratan penting dalam kapal, terutama kapal *tanker* minyak, dikarenakan regulasi atau peraturan pembatasan layer *single-hull tanker*.



Gambar 7 Kapal *Double Hull Tanker* dengan dua sekat memanjang

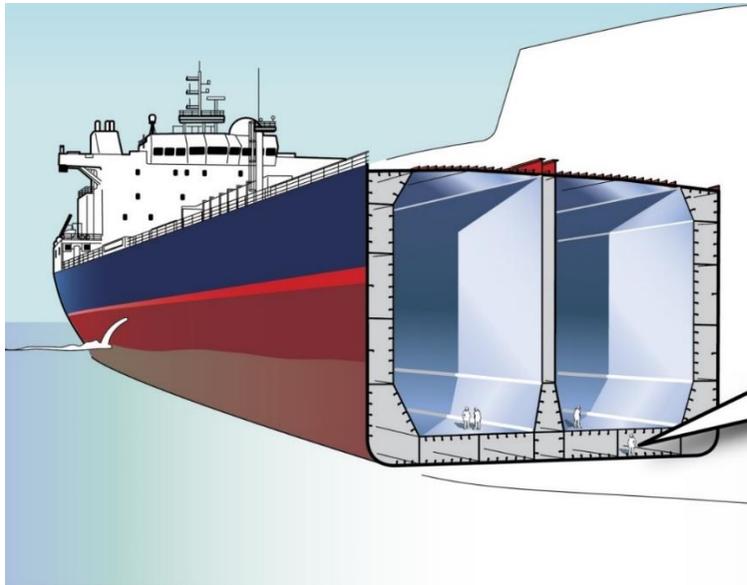


Gambar 8 Kapal *Double Hull Tanker* dengan satu sekat memanjang

Dengan tidak efektifnya Undang-undang Polusi Minyak tahun 1990 (OPA 90) mengenai pencegahan polusi lingkungan yang disebabkan oleh kapal. Untuk itu, *International Maritime Organization* (IMO) mengambil tindakan dan menetapkan standar lambung ganda pada tahun 1992 dalam *International Convention for the Prevention of the Pollution from Ships (MARPOL)*. Konvensi ini mengharuskan semua kapal minyak dengan bobot mati (DWT) 600 ton atau lebih yang diserahkan pada atau setelah tanggal 6 Juli 1996 menggunakan lambung ganda (*double hull*). Jadi apabila ada kapal tanker yang akan dibangun setelah tanggal tersebut, maka kapal tersebut harus memenuhi aturan *double hull*. Sedangkan apabila terdapat kapal tanker yang dibangun sebelum tanggal tersebut, akan diberikan toleransi hingga ketika kapal itu berumur 25 tahun atau pada saat tanggal kelahiran kapal di tahun 2015.

Berdasarkan data *World Ships on Order by Main Vesselype* 2006, hingga saat ini jumlah tanker merupakan jumlah jenis kapal terbanyak yang dibangun dan dikirim yaitu dengan jumlah 2.240. Sedangkan menurut Direktur Perkapalan dan Kepelabuhanan Kementerian Perhubungan Indonesia, hingga saat ini jumlah tanker di Indonesia sebanyak 120 unit dan dari jumlah tersebut sekitar 70% masih menggunakan *single hull*.

Adapun contoh gambar 3D dari konstruksi kapal *double-hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 9.

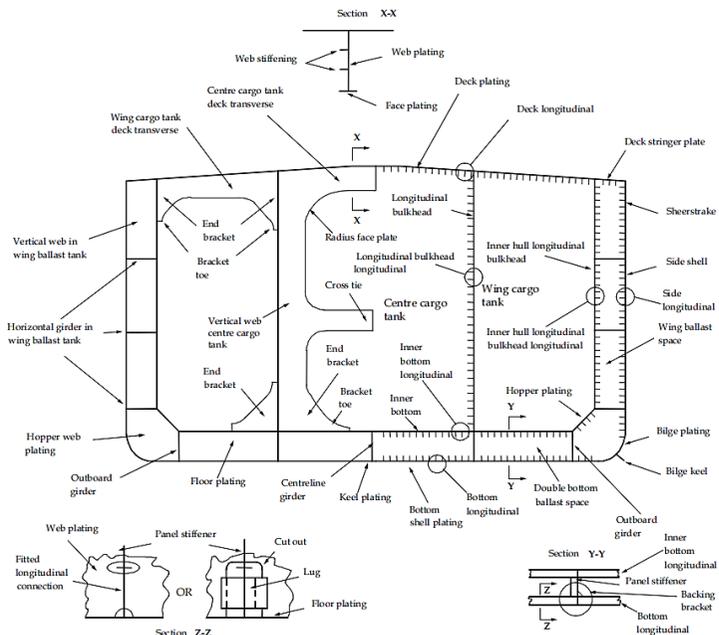


Gambar 9 Kapal *Double Hull Tanker* dengan satu sekat memanjang

1. *Cargo Tanker 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 tabrakan.
4. *Bottom Hull Planting* adalah material pendukung atau 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 jika satu lapisan rusak karena kecelakaan tabrakan atau serupa.
5. *Waterline* adalah garis potong yang mendatar secara horizontal yang menunjukkan garis air kapal *double hull tanker* dalam kondisi tanpa muatan.

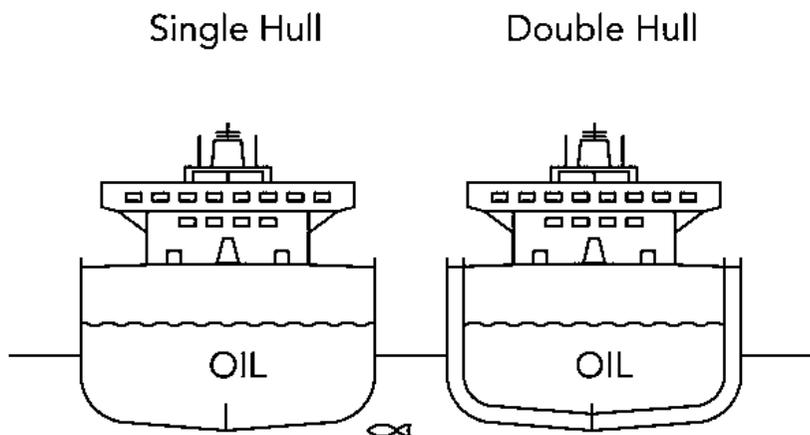
Adapun kekurangan yang dimiliki oleh kapal berlambung ganda adalah terkadang kapal cenderung tidak stabil. Hal ini dikarenakan dari dua lapisan lambung yang menggantikan pusat gravitasi kapal.

Pemeliharaan kapal berlambung ganda juga sangat penting, lambung ganda sangat rentan terhadap erosi sehingga diperlukan perhatian ekstra terhadap kondisi tanker. Beberapa kapal tanker, kapal carrier kombinasi, dan beberapa kapal carrier minyak mentah sudah memiliki *double hull*, yang secara esensial merupakan kombinasi dari *double bottom* dan *double side*.



Gambar 10 Struktur *Midship Double Hull Tanker*

Pemeliharaan kapal berlambung ganda juga sangat penting, lambung ganda sangat rentan terhadap erosi sehingga diperlukan perhatian ekstra terhadap kondisi tanker.



Gambar 11 Perbedaan kapal *Single-Hull Tanker* dan *Double-Hull Tanker*

Lebar tangki samping mungkin kurang dari pada desain *double side*. Namun, karena ballast yang dibutuhkan bisa dibagi antara sisi dan ruang bawah. Oleh karena itu, kapal

double hull mungkin lebih rendah kerusakan ambang sisi yang berkelanjutan pada saat bertabrakan.

2.8 Tegangan yang Bekerja

Tegangan yang bekerja pada struktur kapal umumnya disebabkan oleh beban aksial dan beban lentur. Akibat dari beban-beban tersebut menghasilkan tegangan aksial dan tegangan lentur yang menyebabkan kelelahan pada struktur kapal. sebagai tahapan terhadap gaya-gaya luar. Ini diukur dalam bentuk gaya per satuan luas. Dalam praktek tegangan sering diberikan dua pengertian: (1) gaya per satuan luas, (2) tegangan total gaya adalah gaya total pada suatu bidang (Zainuri, 2008).

Tegangan yang bekerja pada struktur kapal umumnya disebabkan oleh beban aksial dan beban lentur. Akibat dari beban-beban tersebut menghasilkan tegangan aksial dan tegangan lentur yang menyebabkan kelelahan pada struktur kapal.

Tegangan aksial (*axial stress*), adalah tegangan yang bekerja secara tegak lurus terhadap sumbu penampang.

Tegangan lentur (*bending stress*), adalah tegangan yang bekerja secara sesajar sepanjang balok dengan arah yang membujur.

Tegangan geser (*shear stress*), berbeda dengan tegangan tarik dan tekan dimana tegangan ini umumnya disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja secara transversal pada suatu batang.

Hubungan antara tegangan yang dihasilkan oleh suatu gaya (F) yang bekerja pada setiap luas satuan (A) mengalami tegangan yaitu:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Dimana :

σ = tegangan (N/mm²)

F = gaya total (N)

A = luas penampang batang (mm²)

Analisis tegangan metode numerik dengan bantuan *software* umumnya menggunakan tegangan ekuivalen atau yang biasa disebut dengan *Von Mises Stress*. Tegangan ekuivalen atau tegangan rata-rata (σ_e) ini dituliskan dengan bentuk sebagai berikut:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]} \quad (2)$$

Dimana x , y , dan z menyatakan arah sumbu tegangan-tegangan pada setiap elemen yang bekerja. Secara umum mempertimbangkan adanya tekuk (*buckling*) dan luluh (*yielding*). Tegangan-tegangan yang bekerja terdistribusi pada setiap bagian/elemen konstruksi kapal *Double Hull Tanker* termasuk besaran tegangan yang dihasilkan (Muis Alie et al, 2020).

2.9 Tegangan Normal

Menurut Vektor (2014), 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. Sehingga besar tegangan yang dialami batang prismatik tersebut masing-masing sebesar T/A dan P/A .

Tegangan atau tekanan merupakan besaran gaya per satuan luas penampang. Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan bentuk dan ukuran benda bergantung pada arah dan letak gaya luar yang diberikan. Tegangan menunjukkan kekuatan gaya yang menyebabkan perubahan bentuk benda. Secara matematis dituliskan pada Persamaan 3:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

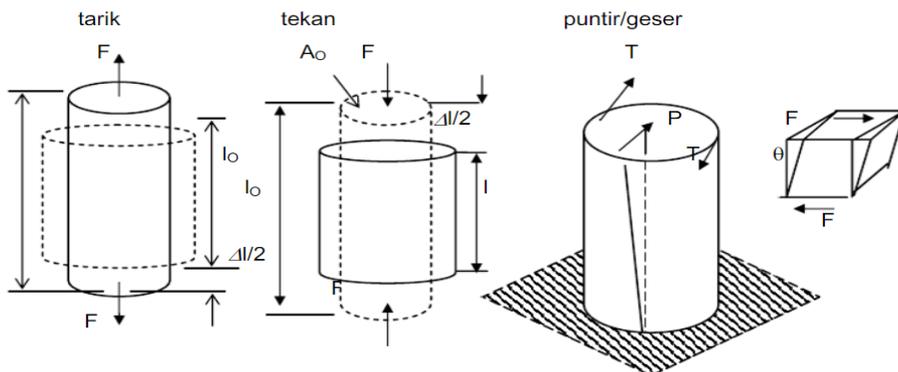
Dimana :

σ = tegangan (N/mm²)

F = gaya (N)

A = luas penampang (mm²)

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm². Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 7 berikut.



Gambar 12 Tegangan-Regangan

2.10 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 sumbu. Tegangan Tarik (σ_{tr}) terjadi akibat bekerjanya gaya Tarik (F_{tr}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio/Perbandingan antara perpanjangan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai

regangan tarik ϵ_{ta} secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 4 dan dapat dilihat pada Gambar 13.

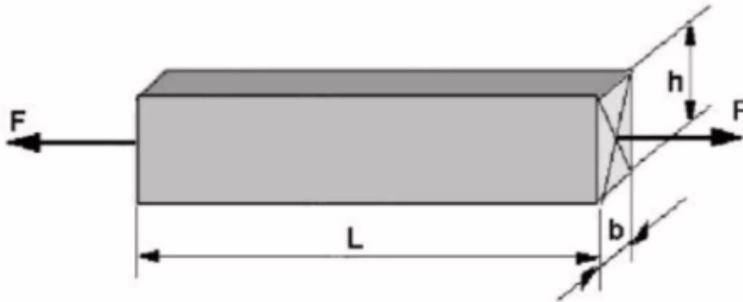
$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (4)$$

Dimana :

σ_{tr} = tegangan tarik (N/mm²)

F_{tr} = gaya tarik (N)

A = luas penampang (mm²)

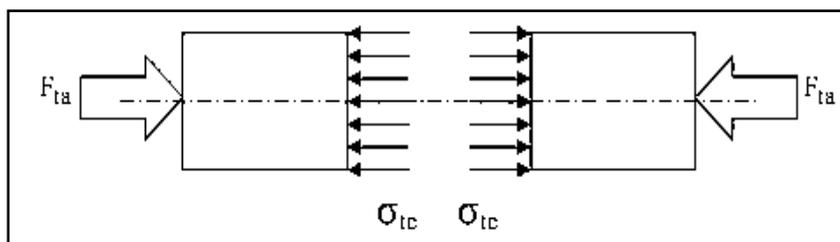


Gambar 13 Tegangan Tarik

2.11 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 (σ_{te}) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan (F_{ta}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan.

Rasio/Perbandingan antara perpendekan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan ϵ_{ta} secara matematik dapat dilihat pada Gambar 14 :



Gambar 14 Tegangan Tekan

selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 5 :

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (5)$$

Dimana :

σ_{te} = tegangan tekan (N/mm²)

F_{ta} = gaya tekan (N)

A = luas penampang (mm²)

2.12 Tegangan Geser (*Shear*)

Tegangan geser (bahasa Inggris: *shear stress*), diberi lambang τ (Yunani: tau), didefinisikan sebagai komponen tegangan *coplanar* dengan penampang melintang sebuah benda. Tegangan geser timbul dari komponen vektor gaya paralel ke penampang melintang. Tegangan normal, di sisi lain, muncul dari komponen vektor gaya tegak lurus dari penampang melintang bahan.

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 (τ) dalam satuan (N/mm²). Tegangan geser terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser didistribusikan pada sebuah luas penampang melintang yang paralel (tangensial) dengan gaya geser tersebut.

Tegangan geser (τ) 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 (τ). Tegangan geser (τ), yaitu tegangan yang timbul akibat gaya geser atau gaya lintang. Ciri dari gaya geser atau gaya lintang adalah melintang batang atau tegak lurus batang. Secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 6 :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Dimana :

τ = tegangan geser (N/mm²)

F = gaya geser atau gaya lintang (N)

A = luas penampang (mm²)

2.13 Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

Tegangan lentur merupakan tegangan yang terjadi pada suatu material seperti balok, ketika material tersebut mengalami pembengkokan akibat beban yang diterapkan. Ketika beban bekerja pada balok, bagian atas balok biasanya mengalami tekan, sedangkan bagian bawah mengalami tegangan Tarik. Tegangan ini dapat dihitung menggunakan rumus yang melibatkan momen lentur dan geometri penampang balok.

2.14 Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut diatur dalam AISC (*American Institute of Steel Construction*). 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. Namun dalam penelitian ini, *rules* yang berkaitan dengan tegangan izin yang digunakan adalah milik ABS (*American Bureau of Shipping*) terkait dengan material HS36.

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.

2.15 Regangan

Sesuai dengan bunyi hukum Hooke bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangannya. Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada Persamaan 7 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

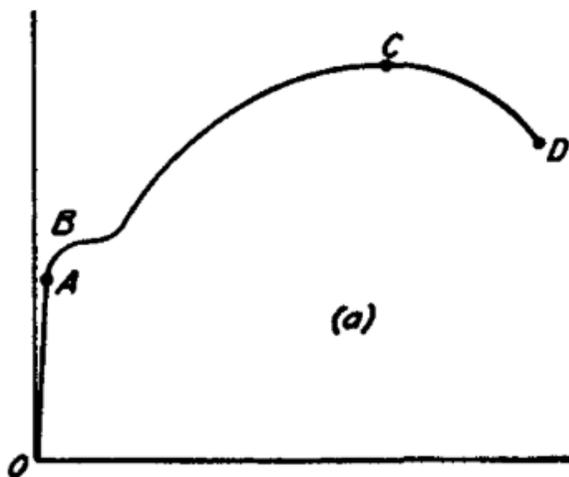
Dimana :

ε = regangan

ΔL = pertambahan panjang (m)

L = panjang mula-mula (m)

Seperti yang terlihat pada Gambar 15 (Timoshenko, 1930), menunjukkan diagram untuk batas elastis baja struktural. Pada gambar tersebut, elongasi diplot sepanjang sumbu horizontal dan tegangan yang sesuai diberikan oleh koordinat kurva OABCD yang pada akhirnya material mencapai batas elastis (*elastic limit*).



Gambar 15 Hubungan antara tegangan dan regangan (Timoshenko, 1930)

Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan, sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Yaitu bahan secara tiba-tiba mulur yang disebut titik mulur (*yield point*), tetapi bahan segera memperlihatkan lagi kemampuan menahan

kenaikan tegangan, tetapi pemanjangan sekarang naik dengan laju yang lebih cepat dari tegangan sampai mencapai titik F_u yaitu tegangan maksimum batas kekuatan bahan. Tegangan ini disebut tegangan batas (*ultimate stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. Diluar titik F_u , pemanjangan akan berlanjut, tetapi secara perlahan tegangan berkurang, sampai akhirnya batang patah.

2.15.1 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.

2.15.2 Titik Luluh (*Batas Proporsional*)

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

2.15.3 Deformasi Plastis (*Plastic Deformation*)

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

2.15.4 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 8 dan 9 :

$$E = \frac{FL}{A\Delta L} \quad (8)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (9)$$

Dimana :

E = *Modulus Young* (N/mm²)

F = gaya (N)

A = luas Penampang (mm²)

L = panjang mula-mula (mm)

ΔL = pertambahan panjang/pendek (mm)

Nilai *modulus young* hanya bergantung pada jenis benda (komposisi benda), tidak bergantung pada ukuran atau bentuk benda. Nilai *modulus young* berbeda tergantung dari jenis materialnya. Jika jenis materialnya aluminium maka nilai *modulus youngnya* adalah

70×10^9 , jika jenis materialnya baja maka nilai *modulus young* adalah 200×10^9 , dan jika jenis materialnya beton maka nilai *modulus young* adalah 20×10^9 .

2.16 Deformasi Material

Deformasi material merujuk pada perubahan bentuk atau dimensi suatu material sebagai hasil dari penerapan gaya kerja. Dalam konteks ini, deformasi material dapat terjadi karena penerapan gaya tarik, gaya geser, atau torsi (kekuatan lipatan atau memutar).

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 10 berikut :

$$\Delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Fl}{AE} \quad (10)$$

Dimana:

- σ = tegangan yang timbul pada material (N/mm^2)
- ε = regangan yang timbul pada material
- F = beban atau gaya yang bekerja pada material (N/mm^2)
- A = luas penampang material (mm^2)
- E = modulus elastisitas material (N/mm^2)
- l = panjang material (mm)
- Δl = deformasi material (mm)

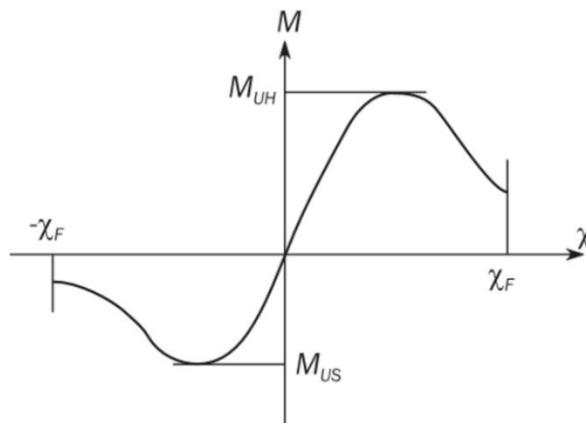
2.17 Kekuatan Batas (*Ultimate Strength*)

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

Kekuatan-batas kapal Tanker (MU) harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria seperti Persamaan 11 dibawah ini (DNV GL, 2017b).

$$M_t \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (11)$$

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



Gambar 16 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan (DNV GL, 2017b)

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 16 Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.

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

$$\sigma = \frac{M \times z}{I} \quad (12)$$

Dimana:

- σ = tegangan lentur (N/mm²)
- M = momen lentur (Nmm)
- z = jarak dari sumbu netral (mm)
- I = inersia penampang (mm⁴)

Tegangan lentur maksimum (σ_{max}) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad (13)$$

dimana S adalah modulus penampang.

Modulus penampang (S) seperti pada Persamaan 13, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut :

$$S_d = \frac{I}{z_d}, \text{ untuk bagian deck} \quad (14)$$

$$S_b = \frac{I}{z_b}, \text{ untuk bagian } \textit{bottom} \quad (15)$$

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

Pada teori balok, lambung kapal akan mengalami kekuatan-batas ketika tegangan lentur maksimum pada bagian yang tertekan mencapai kekuatan tekan batas, yaitu untuk *deck* pada saat *sagging* dan untuk *bottom* pada saat *hogging*. Kekuatan-batas akibat momen lentur untuk kapal dapat dihitung dengan Persamaan 16 dan 17 sebagai berikut :

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud}, \text{ untuk } \textit{deck} \quad (16)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub}, \text{ untuk } \textit{bottom} \quad (17)$$

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

2.18 Nodal Constrained

Ada dua jenis *nodal constraints* : *single-point* dan *multi-point*. *Single-point constraint* membatasi satu atau beberapa DOF dari Gerakan tertentu (misalnya nol perpindahan ke segala arah, nol Gerakan vertikal tetapi bebas bergerak secara horizontal, dll) pada sebuah titik. Sebuah *node* tidak dapat memiliki *single-point constrained* sementara pada saat yang sama didefinisikan sebagai bagian dari satu set *multipoint constrained*. Untuk Batasan *single-point*, nilai yang ditentukan bisa nol atau bukan nol. Nol kendala perpindahan juga dikenal sebagai kendala homogen, sementara bukan nol kendala dikenal sebagai gerakan yang ditentukan atau kendala nonhomogen. (Yang, 2017)

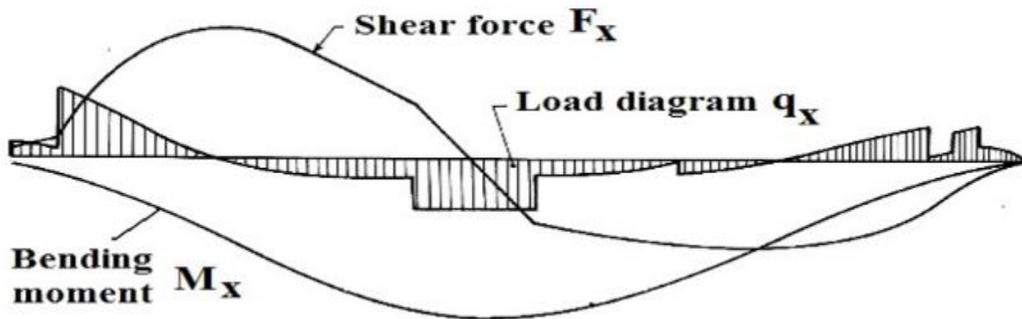
Dalam kondisi batas (*boundary condition*) penentuan letak *netral axis* sangat berpengaruh terhadap proses *running* di ANSYS sementara diketahui bahwa *netral axis* merupakan titik pusat massa bekerja pada sebuah struktur. Apabila letak *netral axis* struktur tersebut berada pada posisi tengah, hal tersebut membuat tumpuan yang akan diberikan pada *netral axis* tidak diketahui, oleh karena itu *software* ANSYS dapat membuat titik/node bayangan yang dapat digunakan sebagai letak tumpuan/*multiple point constrained* (MPC) (Alie et al., 2021)

2.19 Beban-beban yang Bekerja

Untuk setiap Kasus Beban, beban yang diterapkan yang digunakan untuk analisis struktur kapal harus mencakup bagian statis dan dinamis dari setiap komponen beban. Kasus Muatan menunjukkan efek gabungan dari beban dominan dan beban lain yang bekerja secara bersamaan pada struktur lambung termasuk tekanan gelombang eksternal, tekanan tangki internal dan beban inersia pada komponen dan peralatan struktur. Dalam menghitung bagian dinamis suatu beban, perlu mempertimbangkan berbagai kondisi laut, yang menghasilkan respons kritis yang dipertimbangkan dari struktur lambung. Kasus Beban yang dikembangkan kemudian digunakan dalam analisis struktur untuk menentukan tegangan yang dihasilkan dan efek beban lainnya di dalam struktur lambung (ABS, 2004).

2.20 Pembebanan *Hogging* dan *Sagging*

Momen lentur dan gaya geser pada kondisi air tenang berasal dari gaya apung dan distribusi berat sepanjang panjang kapal seperti pada Gambar 17 (Shama, 2013).



Gambar 17 Distribusi Beban, Gaya Geser dan Momen Lentur pada Kapal
(Sumber: Shama, 2013)

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

$$q_x = b_x - w_x \quad (18)$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal adalah

$$F_x = \int_0^x (b_x - w_x) dx \quad (19)$$

$$M_x = \int_0^x F_x dx \quad (20)$$

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

$$M_{SW} = -0,05168 K_M C L^2 B (C_b + 0,7) kN-m, \text{ kondisi } sagging \quad (21)$$

$$M_{SW} = +0,01 K_M C L^2 B (11,97 - 1,9 C_b) kN-m, \text{ kondisi } hogging \quad (22)$$

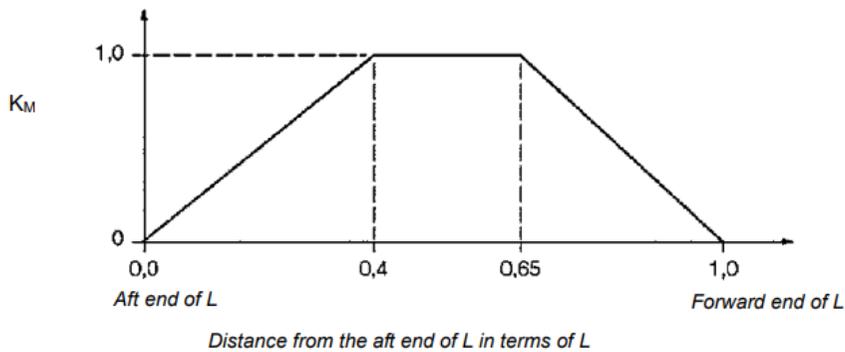
Dimana :

K_M = Faktor distribusi seperti pada Gambar 13

L, B = lebar dan panjang kapal dalam satuan meter

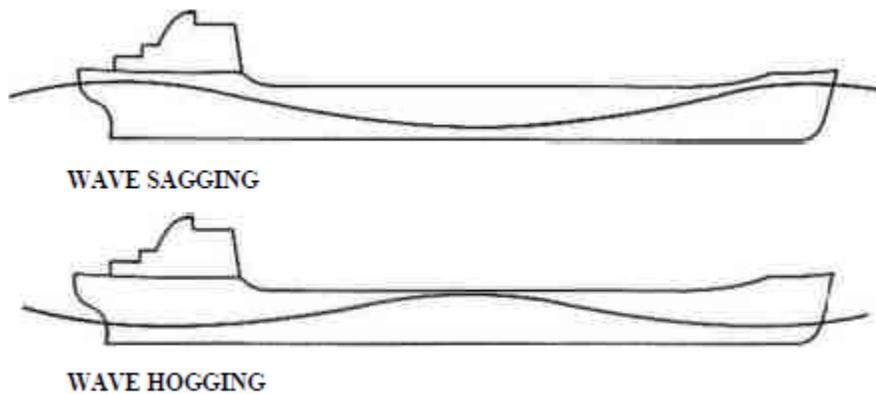
C_b = koefisien blok, tidak boleh kurang dari 0,6

C = $10,75 - [(300 - L)/100]^{1,5}$ untuk $90 \leq L \leq 300$ m
 = 10,75 untuk $300 \leq L \leq 350$ m
 = $10,75 - [(L - 350)/150]^{1,5}$ untuk $350 \leq L \leq 500$ m



Gambar 18 Faktor distribusi K_M
(Sumber: DNV GL, 2017a)

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



Gambar 19 Momen Lentur Vertikal Akibat Gelombang
(Sumber: Bachman, 1991)

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

$$M_W = -0,11 K_M C L^2 B (C_b + 0,7) \text{ kN-m, kondisi sagging} \quad (23)$$

$$M_W = +0,19 K_M C L^2 B C_b \text{ kN-m, kondisi hogging} \quad (24)$$

dimana, C dan K_M seperti pada Persamaan 21 dan 22.

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

$$M_t = M_{SW} + 1,2M_W \quad (25)$$

2.21 Model Estimasi Tingkat Korosi pada Kapal Tanker

Korosi umum adalah pola korosi skala besar yang paling umum dan khas. Model korosi yang ada mengasumsikan bahwa korosi terjadi di seluruh permukaan logam yang terpapar dengan laju nominal yang sama. Laju degradasi korosi bervariasi sesuai dengan area operasi, jenis kargo, suhu, lokasi korosi, dan faktor lainnya. Ini adalah pertanyaan tentang keandalan proses pengukuran dan pengambilan sampel yang digunakan untuk mengumpulkan data dari struktur yang terkorosi dan untuk mengatur data tersebut dengan cara yang valid dan akurat. Ada banyak model korosi yang telah dikembangkan dan dipublikasikan, tetapi hanya beberapa model yang dapat diandalkan secara memadai dan diadopsi sebagai model korosi yang dapat diterima untuk aplikasi selama desain struktur dan evaluasi keandalan struktur kapal yang ada. Tidak ada satu model terpadu untuk memperkirakan laju korosi. Nilai-nilai yang diukur dari masing-masing model sangat tersebar, oleh karena itu perlu dikembangkan model korosi rata-rata terpadu yang didasarkan pada model-model yang sudah ada. Setiap badan klasifikasi memiliki panduan sendiri untuk nilai pengurangan korosi minimum untuk pelapisan dan member struktural untuk tanker minyak (SODES, 2015).

Dalam kasus kapal tanker lambung ganda, ruang sayap dan lambung ganda bertindak sebagai penghalang termal dan ruang ini mengisolasi tangki kargo dari air laut. Sebenarnya tangki kargo tidak terpengaruh secara signifikan oleh fluktuasi suhu lingkungan normal, seperti suhu air laut dan suhu udara, dan cenderung menjaga suhu pemuatan kargo. Kadang-kadang pemanasan minyak kargo tidak diperlukan selama musim panas atau untuk pelayaran sarat muatan yang singkat. Setelah muatan kargo dikeluarkan, struktur tangki kargo tetap berada pada suhu tinggi selama periode tertentu sampai tangki balas terisi air laut. Dalam lingkungan bersuhu tinggi, bakteri berkembang lebih lama dan akibatnya akan terjadi peningkatan laju korosi yang dipengaruhi mikroba.

Baru-baru ini IACS menerbitkan aturan dan panduan baru yang terpadu, yang disebut "Aturan Struktural Umum untuk Kapal Tanker Minyak Lambung Ganda", tentang penambahan korosi untuk struktur kapal tanker lambung ganda. Aturan ini berlaku untuk tanker minyak lambung ganda dengan panjang 150m ke atas yang diklasifikasikan dengan masyarakat dan dihubungi untuk konstruksi pada atau setelah 1 April 2006 tetapi untuk tanker lambung ganda dengan panjang kurang dari 150m, aturan Badan klasifikasi individu harus diterapkan (IACS, 2006).

Saat ini prosedur penilaian kelelahan Badan Klasifikasi didasarkan pada pengurangan scantling dan karenanya tunjangan korosi yang diperlukan oleh masing-masing Lembaga Klasifikasi harus dikurangi dari scantling as-built sebelum perhitungan umur kelelahan. Akan sangat bermanfaat untuk menghitung umur kelelahan berdasarkan laju korosi yang diharapkan dari model korosi yang ada dan membandingkannya dengan masing-masing Persyaratan Badan Klasifikasi untuk memutuskan program pemeliharaan dan periode pemeliharaan pada kapal yang menua.

2.22 Metode Elemen Hingga

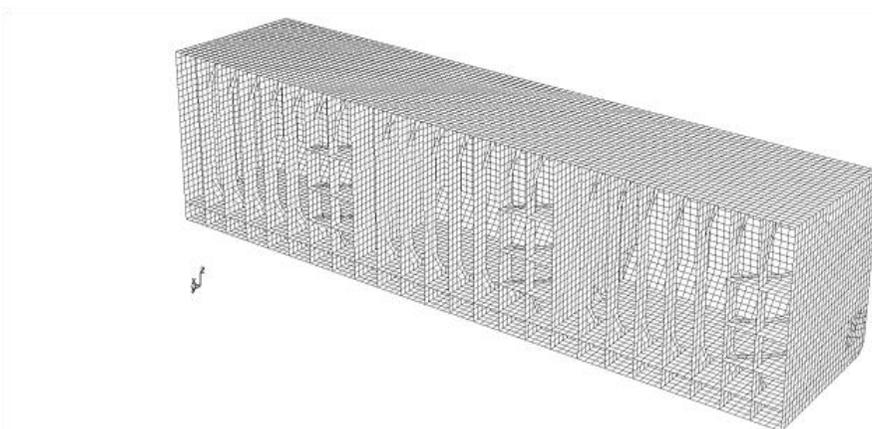
Metode Elemen Hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation*). Pada awalnya, metode elemen hingga dikembangkan untuk memecahkan masalah dibidang mekanika benda padat (*solid mechanic*), tetapi kini metode ini sudah merambah hampir ke semua masalah seperti mekanika fluida, perpindahan panas, elektromagnetik, getaran, serta analisis modal (Ansyah, P. R. 2018)

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.

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 (EST, 2010).. 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 (Setyawan, D. 2017).

Muis Alie M.Z. (2016) memodelkan elemen hingga *single hull tanker* ukuran Panamax dengan struktur satu sisi. Model ini mencakup tiga ruang kargo dan dua sekat melintang dalam arah membujur. Kerusakan diasumsikan berada ditengah.

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan matematis dari suatu gejala phisis yaitu tegangan, regangan, kekuatan, dan analisa getaran.



Gambar 20 *Typical Cargo Tank Model of an Aframax Oil Tanker*

Metode elemen hingga inilah yang dapat membandingkan antara perhitungan dengan menggunakan *software Catia* dan dengan menggunakan perhitungan secara manual. Dalam hal ini metode elemen hingga yang akan dipergunakan adalah metode elemen

hingga 2D (bidang) yaitu elemen segitiga dengan 3 node. Metode elemen hingga 2D dalam hal ini elemen bidang segitiga dengan 3 node didasarkan untuk keperluan analisa suatu *continuum* yang berupa luasan. Permasalahan yang dapat dipecahkan oleh elemen bidang segitiga ini menyangkut matrik kekakuan elemen, *plain strain* dan *plain stress* serta vector- vector gaya yang bekerja pada elemen dari produk tongkat lansia tersebut. Secara terperinci hal-hal yang disebut akan ditinjau dalam system koordinat *local* dan *system* koordinat global (Mulyadi, S. 2011).

2.23 Analisis Data

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan meliputi pengumpulan data, penyusunan data, menganalisis data dan menginterpretasikan serangkaian data. Adapun tahap-tahap yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

2.23.1 Tahapan Pertama

Tahap pertama dari penelitian ini adalah pengumpulan data dari sumber-sumber terkait dalam bentuk buku-buku, artikel maupun jurnal yang berhubungan dengan penelitian ini.

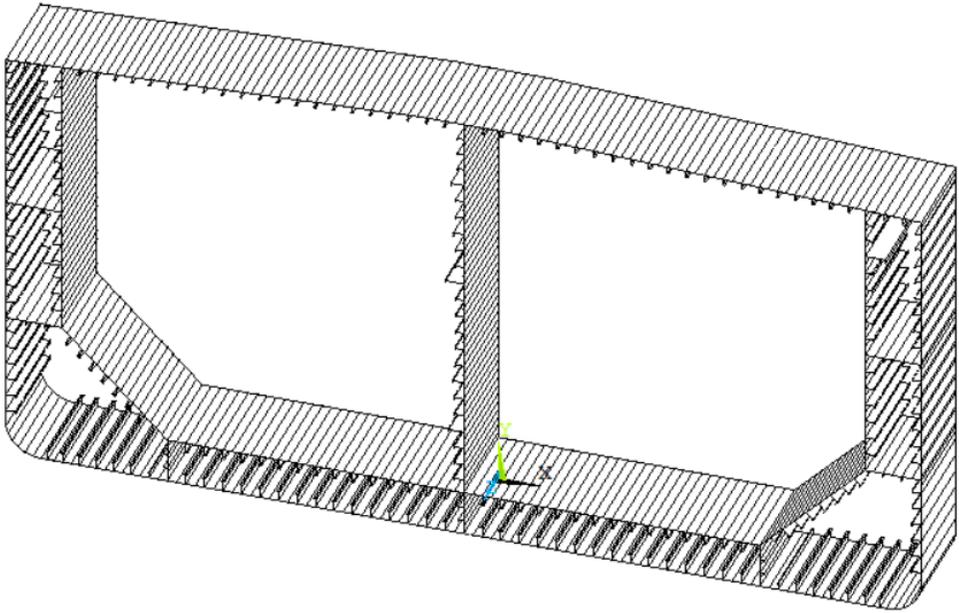
2.23.2 Tahap Kedua

Setelah tahap pengumpulan data selesai, perlu diadakan studi atau pemahaman terkait data-data yang telah dikumpulkan sebelum dilakukan pengolahan data berupa:

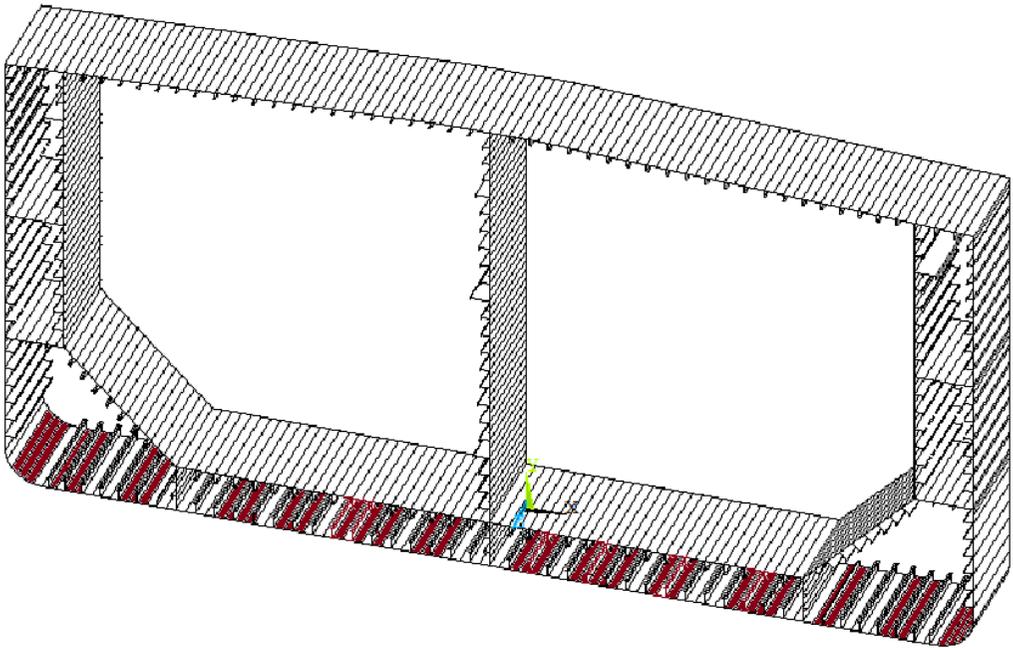
- a. Mengidentifikasi data struktur yang menjadi objek dari penelitian ini, dalam hal ini data utama dari kapal Tanker Tipe T3 dan T4, konfigurasi *stiffener*, tebal dari setiap pelat serta *properties* material.
- b. Melakukan studi literatur terkait dengan metode perhitungan kekuatan batas lentur menggunakan perangkat ANSYS, dengan penerapan metode linear dan non-linear, serta melakukan analisis kekuatan struktur kapal sebelum dan setelah mengalami perubahan.
- c. Mengidentifikasi beban-beban yang bekerja pada struktur kapal Tanker T3 dan T4.
- d. Mengidentifikasi gaya-gaya yang bekerja pada kapal Tanker T3 dan T4 yang mempengaruhi kapal dalam mencapai kekuatan batasnya.

2.23.3 Tahapan Ketiga

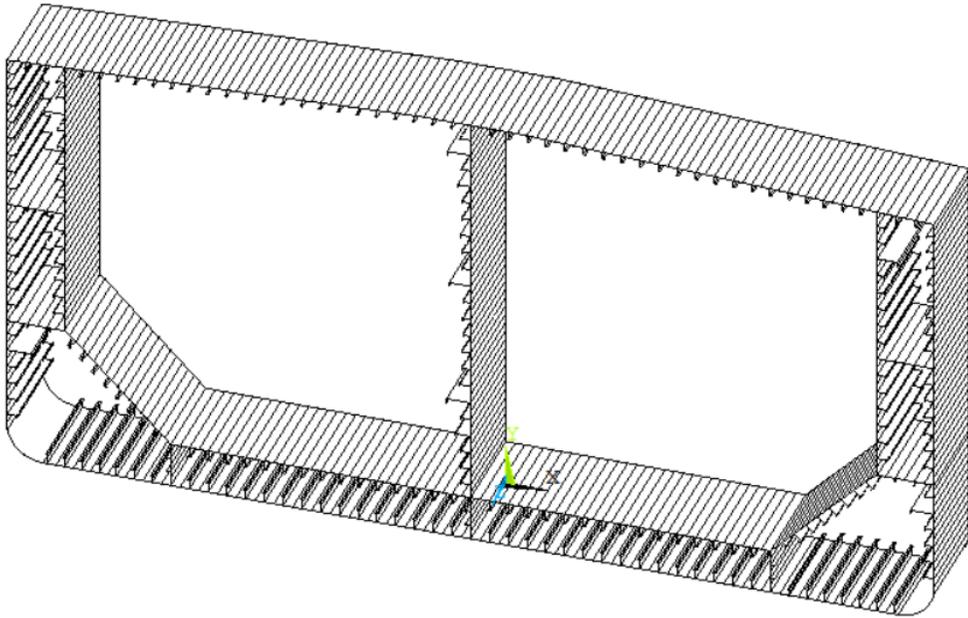
Pada penelitian ini, pemodelan dibuat dengan 4 kondisi dimana pada kondisi pertama yaitu kapal Tanker T3 dalam kondisi utuh dan kondisi kedua yaitu kapal Tanker T3 dalam kondisi kerusakan akibat korosi yang sudah dimodifikasi dengan pengurangan tebal pelat pada bagian *bottom*. Kondisi ketiga yaitu kapal Tanker T4 dalam kondisi utuh dan kondisi keempat yaitu kapal Tanker T4 dalam kondisi kerusakan akibat korosi yang sudah dimodifikasi dengan pengurangan tebal pelat pada bagian *bottom*. Keempat kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 21, Gambar 22, Gambar 23 dan Gambar 24 sebagai berikut.



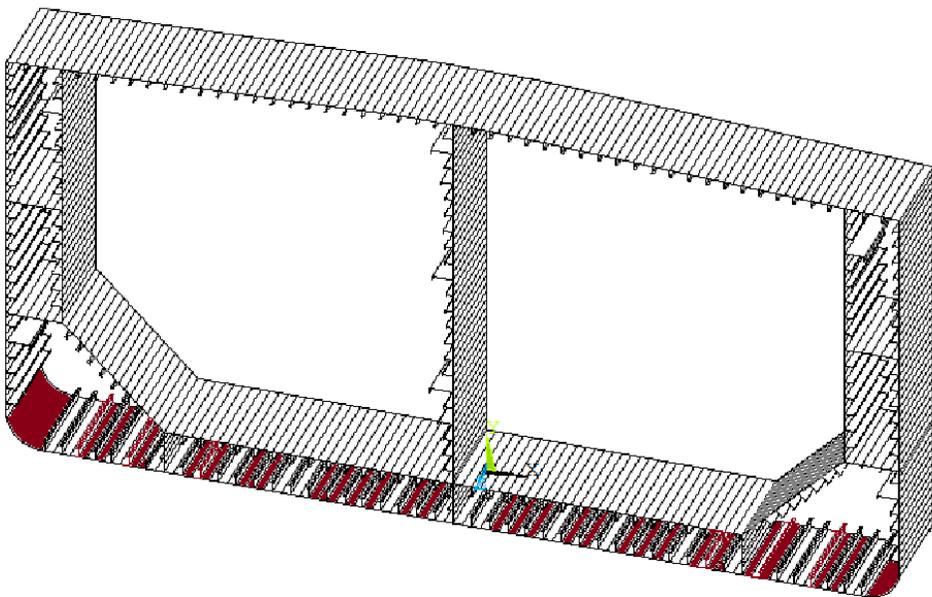
Gambar 21 Kapal Tanker T3 Kondisi Utuh



Gambar 22 Kapal Tanker T3 Kondisi Kerusakan Akibat Korosi



Gambar 23 Kapal Tanker T4 Kondisi Utuh



Gambar 24 Kapal Tanker T4 Kondisi Kerusakan Akibat Korosi

Tabel 4 Data Kerusakan Penampang Akibat Korosi Pada Tanker T3 dan T4

Data	No. Element Pelat	Ukuran ketebalan pelat utuh dan kerusakan
Pelat pada <i>bottom plate</i> T3 dan T4	31,33,35,37,39,41,42,44 47,49,52,176,178,180,182, 184,186,187,189	19.5 mm dan 18 mm
Kerusakan akibat korosi	20% dari ketebalan utuh	15.5 mm dan 14 mm

2.23.4 Hasil Penelitian

Setelah menyelesaikan pengecekan dan analisis model yang menjadi objek penelitian, selanjutnya adalah memaparkan hasil analisis yang didapatkan dalam bentuk kurva hubungan antara *bending moment* dan *curvature* serta bentuk deformasi yang didapatkan sebagai akibat oleh beban yang bekerja pada struktur kapal Tanker tipe T3 dan T4.

Selanjutnya, kapal Tanker tipe T3 dan T4 dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi dengan menggunakan *software* ANSYS APDL 19.2. Elemen yang digunakan untuk pemodelan ini adalah Elemen *Shell* 181 dengan konfigurasi yang terlihat pada kedua gambar di atas dan spesifikasi material tiap elemen yang dapat dilihat pada Tabel 1. Keempat model tersebut di-*meshing* dengan ukuran *meshing* yang berbeda. Untuk kondisi utuh dan kerusakan pada kapal T3 nilai *mesh* yang digunakan adalah 450 mm sedangkan untuk kondisi utuh dan kerusakan pada T4 nilai *mesh* yang digunakan adalah 350 mm.

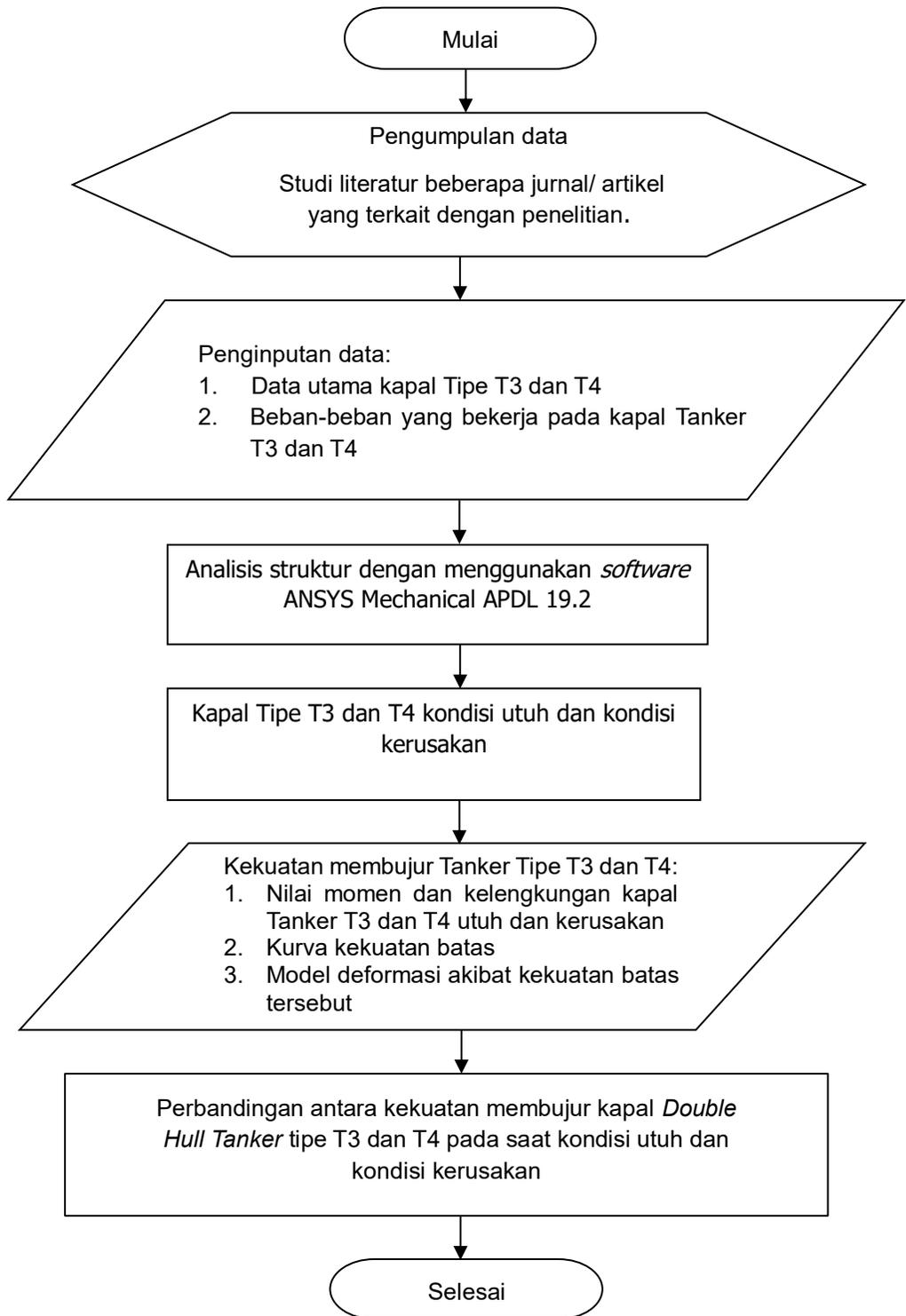
Penelitian ini menerapkan proses kontrol momen untuk mengevaluasi nilai kekuatan batas struktur sebelum dan setelah mengalami kerusakan. Kondisi batas pada penelitian ini adalah seluruh titik ujung model bagian *aft* di-*full constrain*, tanpa pembebanan pada titik acuan *aft*. Ujung model bagian *fwd* diberikan momen lentur pada titik acuan sumbu netral, dan semua titik pada ujung *fwd* di-*rigid link full constrain* ke titik acuan sumbu netral. Momen lentur yang diaplikasikan pada titik *fwd* dilakukan dalam dua tahapan pembebanan dengan peningkatan nilai momen lentur pada setiap tahapan, hingga aplikasi ANSYS menghasilkan nilai kekuatan batas struktur. Metode *Nonlinier Finite Element Analysis* (NLFEA) menggunakan analisis statis dengan metode *arc length* untuk mendapatkan nilai batas *buckling* dan *post buckling* pada struktur.

2.24 Kesimpulan

Kesimpulan mengenai hasil perbandingan pengaruh korosi terhadap kekuatan membujur kapal *Double Hull Tanker* Tipe T3 dan T4 baik dalam kondisi utuh dan juga kondisi kerusakan.

2.25 Diagram Alir

Diagram alir dalam penelitian Pengaruh Korosi Terhadap Kekuatan Membujur Kapal *Double Hull Tanker* Tipe T3 dan T4 dapat dilihat pada Gambar 25:



Gambar 25 Diagram Alir