

SKRIPSI

**APLIKASI *MULTIPLE POINT CONSTRAINED* (MPC) PADA
KEKUATAN MELINTANG KAPAL *DOUBLE HULL TANKER* TIPE T3
DAN TIPE T4**

Disusun dan diajukan oleh

NUR INDRI NOVIANTI H.

D081 18 1020



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

SKRIPSI

**APLIKASI *MULTIPLE POINT CONSTRAINED* (MPC) PADA
KEKUATAN MELINTANG KAPAL *DOUBLE HULL TANKER* TIPE T3
DAN TIPE T4**

Disusun dan diajukan oleh

NUR INDRI NOVIANTI H.

D081 18 1020



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI
APLIKASI *MULTIPLE POINT CONSTRAINED* (MPC) PADA
KEKUATAN MELINTANG KAPAL *DOUBLE HULL TANKER* TIPE T3
DAN TIPE T4

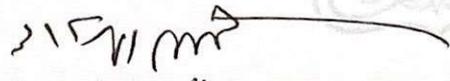
Disusun dan diajukan oleh
NUR INDRI NOVIANTI H.
D081 18 1020

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

Menyetujui,

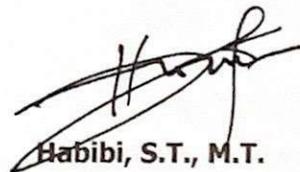
Pembimbing utama,

Pembimbing Pendamping,



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

NIP.197506082005011003



Habibi, S.T., M.T.

NIP. 198704252019031012

Ketua Program Studi



Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.

NIP.197506052002121003

PERNYATAAN KEASLIAN SKIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nur Indri Novianti H.
Nomor Mahasiswa : D081 18 1020
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

"Aplikasi *Multiple Point Constrained* (MPC) pada Kapal *Double Hull Tanker*
Tipe T3 dan Tipe T4"

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

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

Gowa, 30 Mei 2022

Yang menyatakan,



Nur Indri Novianti H.

ABSTRAK

NUR INDRI NOVIANTI H. *Aplikasi Multiple Point Constrained Pada Kekuatan Melintang Kapal Double Hull Tanker Tipe T3 dan Tipe T4* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Habibi**).

Struktur kapal merupakan salah satu aspek yang mempengaruhi nilai dari kekuatan kapal dalam mengangkut muatan dan menahan beban-beban yang dialaminya sehingga menganalisis kekuatan batas struktur kapal double hull tanker merupakan salah satu hal yang penting. Objek penelitian ini adalah menganalisis kekuatan melintang kapal *Double Hull Tanker*, dan membandingkan hasil analisis dari dua kapal *Double Hull Tanker*. *Multiple Point Constrained* (MPC) digunakan dalam menganalisis kekuatan melintang kapal. Analisis kekuatan melintang kapal menggunakan metode numerik. Analisis kekuatan melintang dilakukan pada bagian tengah dari kedua kapal *Double Hull Tanker* dalam satu jarak gading. Analisis kekuatan melintang dilakukan pada kondisi *hogging* dan *sagging*. Hasil penelitian analisis kekuatan melintang kapal *Double Hull Tanker* ditunjukkan dalam bentuk grafik hubungan antara momen dan kelengkungan, dimana diperoleh kekuatan melintang kapal *Double Hull Tanker* tipe T3 lebih baik dari kapal *Double Hull Tanker* tipe T4 dengan diperoleh tegangan kerja pada kapal *double hull tanker* T3 pada kondisi *sagging* untuk tegangan kerja maksimum sebesar $-10,204 \text{ N/mm}^2$ dan untuk minimumnya sebesar $9,770 \text{ N/mm}^2$, pada kondisi *hogging* untuk tegangan kerja maksimum sebesar $179,255 \text{ N/mm}^2$ dan untuk minimum sebesar $-171,816 \text{ N/mm}^2$. Tegangan kerja pada kapal *double hull tanker* T4 pada kondisi *sagging* untuk tegangan kerja maksimum sebesar $-12,975 \text{ N/mm}^2$ dan untuk minimumnya sebesar $11,327 \text{ N/mm}^2$, pada kondisi *hogging* untuk tegangan kerja maksimum sebesar $177,254 \text{ N/mm}^2$ dan untuk minimumnya sebesar $-169,876 \text{ N/mm}^2$. Perilaku deformasi dari kedua kapal juga dijelaskan dalam penelitian ini.

Kata kunci: *Double Hull Tanker*, penampang melintang, metode numerik, kekuatan melintang

ABSTRACT

NUR INDRI NOVIANTI H. *Multiple Point Constrained Application on the Transverse Strength of Double Hull Tanker Ships Type T3 and Type T4 (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Habibi**)*

Ship structure is one of the most important aspect that affect to the ultimate strength to loading and unloading cargo and to withstanding the loads it experienced, so analyzing the boundary strength of the double hull tanker structure is one of the important things. The objective of the present study is to analyse the transversal strength of Double Hull Tanker. Two Double Hull Tankers are taken to be considered in this analysis. The Multiple Point Constrained (MPC) is adopted to be used in the analysis for transversal strength. The transversal strength is conducted by using numerical method. The target of the transversal strength for the ship is in the middle part both two double Hull Tankers in one-frame-space. The analysis of the transversal strength is performed under hogging and sagging condition. The results of the transversal strength both two double Hull Tankers are shown in terms of moment-curvature relationships. It is pound that double Hull Tanker Type-3 is better than double Hull Tanker Type-4 with the obtained working voltage on double hull tanker T3 at sagging conditions for maximum working voltage of -10.204 N/mm^2 and for minimum of $9,770 \text{ N/mm}^2$, at hogging conditions for a maximum working voltage of 179.255 N/mm^2 and for a minimum of $-171,816 \text{ N/mm}^2$. The working voltage on double hull tanker T4 at sagging conditions for maximum working voltage of -12.975 N/mm^2 and for a minimum of 11.327 N/mm^2 , at hogging conditions for a maximum working voltage of $177,254 \text{ N/mm}^2$ and for a minimum of $-169,876 \text{ N/mm}^2$ for the transversal strength. The behaviors of deformations for two ships are also described in this study.

Keywords: Double Hull Tanker, cross-section, numerical method, transversal strength.

PRAKATA

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

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

"APLIKASI MULTIPLE POINT CONSTRAINED (MPC) PADA KEKUATAN MELINTANG KAPAL DOUBLE HULL TANKER TIPE T3 DAN TIPE T4"

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Haslimin** dan Ibu **Nurbaya** 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, S.T., M.T.** selaku dosen pembimbing pendamping yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, S.T., M.T.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.

4. Bapak **Dr. Eng. Achmad Yasir Baeda, S.T., M.T.** selaku penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga saya dapat menyelesaikan studi.
5. Bapak **Taufiqur Rachman, S.T., M.T.** dan **Ir. Juswan, M.T.** selaku dosen penguji yang selalu memberikan bantuan saran kepada penulis.
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. Kakanda **Indah Melati Suci, S.T.** yang telah membantu dalam memberi pemahaman selama proses pengerjaan skripsi ini.
9. **Safitri Anwar** selaku *partner* yang selalu berjuang bersama selama proses pengerjaan skripsi ini dari awal hingga selesai.
10. **Teman-teman Teknik Kelautan 2018 Khususnya Kelas B** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama. Rekan-rekan Labo **OSAREL angkatan 2018** yang sama-sama berjuang dan saling membantu dalam menyelesaikan studi.
11. Teman-teman **KKN UNHAS GEL 107** Posko Gowa-4 yang telah memberikan pengalaman yang berharga dalam masa pengabdian kami ber-KKN di Desa Nirannuang dan Desa Bili-Bili.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan 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, 30 Mei 2022

Nur Indri Novianti H.

DAFTAR ISI

PRAKATA	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
DAFTAR ISTILAH.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Kapal Tanker	7
2.2 <i>Oil Tanker</i>	8
2.3 <i>Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker</i>	9
2.4 <i>Chemical Tanker</i>	9
2.5 Kosntruksi Kapal Tanker.....	10
2.6 <i>Single Hull Tanker</i>	11
2.7 <i>Double Hull Tanker</i>	12
2.8 Sistem Konstruksi Kapal	16
2.9 Sistem Konstruksi Melintang	17
2.10 Sistem Konstruksi Memanjang	17
2.11 Sistem Konstruksi Kombinasi	18
2.12 Beban-Beban pada Konstruksi Kapal	18
2.13 Beban Geladak Cuaca	19
2.14 Beban Luar Sisi Kapal.....	20

2.15	Beban Luar Alas kapal.....	21
2.16	Tegangan yang Bekerja	21
2.17	Tegangan Normal	21
2.18	Tegangan Tarik (<i>Tensile Stress</i>)	22
2.19	Tegangan Tekan (<i>Compressive Stress</i>)	23
2.20	Tegangan Geser (<i>Shear</i>)	24
2.21	Tegangan Lentur (<i>Bending Stress</i>)	25
2.22	Tegangan Luluh (<i>Crushing/Bearing Stress</i>)	25
2.23	Tegangan Izin Dasar	25
2.24	Regangan.....	25
2.25	Deformasi Material	28
2.26	Metode Matriks Kekakuan	29
2.27	<i>Multiple Point Constrained</i> (MPC)	31
2.28	Kekuatan Batas Kapal <i>Tanker</i> (<i>Ultimate Strength</i>)	32
2.29	Metode <i>Non-Linear Finite Element Analysis</i> (NLFEA)	33
BAB III METODE PENELITIAN		37
3.1	Jenis Penelitian.....	37
3.2	Lokasi dan Waktu Penelitian	37
3.3	Penyajian Data	37
3.4	Analisis Data.....	42
3.5	Diagram Alir	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		45
4.1	Tegangan Kerja Tanker T3 Kondisi Utuh Saat <i>Sagging</i>	45
4.2	Tegangan Kerja Tanker T3 Kondisi Utuh Saat <i>Hogging</i>	45
4.3	Tegangan Kerja Tanker T4 Kondisi Utuh Saat <i>Sagging</i>	46
4.4	Tegangan Kerja Tanker T4 Kondisi Utuh Saat <i>Hogging</i>	47
4.5	Kekuatan Batas Momen Vertikal Tanker T3.....	48
4.6	Kekuatan Batas Momen Vertikal Tanker T4.....	52
4.7	Perbandingan Kekuatan Batas Tanker T3 dan T4	56

BAB V PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.1.1. Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kapal <i>Oil Tanker</i>	8
Gambar 2.2	Kapal <i>LNG Tanker</i>	9
Gambar 2.3	Kapal <i>Chemical Tanker</i>	9
Gambar 2.4	Konstruksi Kapal Tanker	11
Gambar 2.5	<i>Single Hull Tanker</i>	11
Gambar 2.6	Kapal <i>double hull tanker</i> dengan dua sekat memanjang ...	13
Gambar 2.7	Kapal <i>double hull tanker</i> dengan satu sekat memanjang ..	13
Gambar 2.8	Konstruksi <i>Midship</i> Kapal <i>Double Hull Tanker</i>	14
Gambar 2.9	Konstruksi Kapal <i>Double Hull Tanker</i>	15
Gambar 2.10	Tegangan-Regangan	22
Gambar 2.11	Tegangan Tarik	23
Gambar 2.12	Tegangan Tekan.....	23
Gambar 2.13	Hubungan antara tegangan dan regangan.....	26
Gambar 2.14	<i>Box Girder</i> tanpa elemen di tengah batang.....	31
Gambar 2.15	Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan	33
Gambar 2.16	Model material <i>bilinear isotropic hardening</i>	36
Gambar 3.1	Konfigurasi Penampang Kapal Tanker Tipe T3	38
Gambar 3.2	Konfigurasi Penampang Kapal Tanker Tipe T4	40
Gambar 3.3	Diagram Alir	44
Gambar 4.1	Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal <i>double hull tanker</i> T3 pada kondisi utuh akibat <i>sagging</i>	45
Gambar 4.2	Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal <i>double hull tanker</i> T3 pada kondisi utuh akibat <i>hogging</i>	46
Gambar 4.3	Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal <i>double hull tanker</i> T4 pada kondisi utuh akibat <i>sagging</i>	46
Gambar 4.4	Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal <i>double hull tanker</i> T4 pada kondisi utuh akibat <i>hogging</i>	47
Gambar 4.5	Grafik momen kelengkungan kapal Tanker T3	49
Gambar 4.6	Deformasi sebelum titik kekuatan batas kapal Tanker T3 kondisi utuh akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>	50

Gambar 4.7	Deformasi pada titik kekuatan batas kapal tanker T3 kondisi utuh akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>	51
Gambar 4.8	Deformasi setelah titik kekuatan batas kapal tanker T3 kondisi utuh akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>	52
Gambar 4.9	Grafik Momen kelengkungan kapal Tanker T4.....	53
Gambar 4.10	Deformasi sebelum titik kekuatan batas kapal Tanker T4 kondisi utuh akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>	54
Gambar 4.11	Deformasi pada titik kekuatan batas kapal Tanker T4 kondisi utuh akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>	55
Gambar 4.12	Deformasi setelah titik kekuatan batas kapal Tanker T4 kondisi utuh akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>	56
Gambar 4.13	Grafik momen kelengkungan kondisi utuh kapal <i>double hull tanker</i> T3 dan T4.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Modulus <i>Young</i> pada material.....	28
Tabel 2.2	Spesifikasi material	35
Tabel 3.1	Konfigurasi material <i>stiffener</i> Kapal Tanker Tipe T3	38
Tabel 3.2	Konfigurasi material <i>stiffener</i> Kapal Tanker Tipe T4	41
Tabel 4.1	Rekapitulasi tegangan kerja pada kapal <i>double hull tanker</i> T3 dan T4	48
Tabel 4.2	Kekuatan batas kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3.....	48
Tabel 4.3	Kekuatan batas kapal <i>Double Hull Tanker</i> T4.....	52
Tabel 4.4	Kekuatan batas momen lentur kapal tanker T3 dan T4 kondisi utuh untuk arah melintang	57

DAFTAR NOTASI

A	= luas penampang	(mm ²)
a	= jarak antar <i>stiffener</i>	(mm)
B	= lebar kapal	(mm)
C _b	= koefisien blok kapal	
C _D	= koefisien distribusi	
E	= modulus elastisitas	(N/mm ²)
F	= gaya	(N)
H	= tinggi kapal	(mm)
I	= inersia penampang	(mm ⁴)
L	= panjang kapal	(mm)
M	= momen lentur	(Nmm)
M _{US}	= kekuatan batas momen lentur <i>sagging</i>	(Nmm)
M _{UH}	= kekuatan batas momen lentur <i>hogging</i>	(Nmm)
M _t	= momen lentur- batas total	(Nmm)
P	= gaya geser atau gaya lintang	(N)
P _B	= beban luar alas kapal	(N/mm ²)
P _C	= beban statik kapal	(N/mm ²)
P _D	= beban geladak cuaca	(N/mm ²)
P _i	= beban alas dalam kapal	(N/mm ²)
P _{S1}	= beban luar sisi kapal di bawah garis air muat	(N/mm ²)
P _{S2}	= beban luar sisi kapal di atas garis air muat	(N/mm ²)
P ₀	= <i>basic external dynamic load</i>	(N/mm ²)
T	= sarat kapal	(mm)
z	= jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah	(mm)
ε	= regangan	
σ	= tegangan	(N/mm ²)
σ _{tr}	= tegangan tarik	(N/mm ²)
σ _{te}	= tegangan tekan	(N/mm ²)
τ	= tegangan geser	(N/mm ²)

DAFTAR ISTILAH

- ANSYS* : *Software* yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
- MPC* : *Multiple Point Constrained*
- IACS* : *International Association of Classification Societies*
- Defleksi : Perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertikal 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.
- 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 T3* : Tipe kapal tanker Aframax dengan konfigurasi material penampang *hull girder* terlampir pada Gambar 3.1
- Tanker T4* : Tipe kapal tanker Aframax dengan konfigurasi material penampang *hull girder* terlampir pada Gambar 3.2
- Software* : Istilah khusus untuk data yang diformat dan disimpan secara digital, termasuk program komputer, dokumentasinya dan berbagai informasi yang bisa dibaca dan bisa ditulis oleh komputer.
- Tensile Strength* : Tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah bahan ketika diregangkan atau ditarik, sebelum bahan tersebut patah

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal merupakan alat transportasi laut yang mampu membawa muatan berupa barang dan penumpang dengan jumlah yang besar dibandingkan dengan transportasi lainnya, sehingga sangat penting untuk memperhatikan kekuatan struktur kapal yang memberikan efek besar terhadap kapal agar bisa beroperasi dengan waktu yang lama serta dengan lingkungan yang cepat berubah [1]. Struktur konstruksi kapal akan mengalami berbagai beban antara lain beban internal yang disebabkan oleh pembebanan yang ada di kapal dan beban eksternal seperti gelombang laut serta posisi kapal terhadap gelombang itu sendiri dan juga angin. Desain dan material dari struktur kapal tersebut turut mempengaruhi nilai dari kekuatan struktur kapal dalam mengangkut muatan dan menahan beban-beban yang dialaminya. Bentuk dan konstruksi kapal mempunyai fungsi tertentu sesuai muatan yang dibawa dan rute pelayaran. Sistem konstruksi kapal pada umumnya dibedakan menjadi 3 bagian yaitu sistem konstruksi melintang (*tranverse framing system*), sistem konstruksi memanjang (*longitudinal framing system*) dan sistem konstruksi campuran (*mixed framing system*).

Kapal tanker adalah kapal khusus yang muatannya dapat berupa minyak, bahan kimia, gas, dan muatan lainnya yang dapat menimbulkan kebakaran dan ledakan. Muatan ini sangat berbahaya tidak hanya untuk kapal tetapi juga kondisi lingkungan [2].

Lambung kapal (*hull*) merupakan bagian utama kapal yang mampu menyediakan daya apung untuk mencegah kapal agar tidak tenggelam. Pada kapal tanker, lambung kapal difungsikan sebagai ruangan untuk mengangkut muatan, yaitu minyak [3]. Kerusakan akibat kandas dapat terjadi pada lambung kapal dan mengancam keselamatan kapal dan

lingkungan sekitarnya. Fenomena ini harus diselidiki sebagai salah satu persyaratan fungsional untuk desain struktur kapal. Banyak penelitian yang menjelaskan betapa pentingnya penilaian kekuatan *hull girder* kapal [4]. Sebelum pecahnya lambung bagian dalam, struktur lambung ganda dapat mengalami respons dinamis yang kompleks yang mencakup perambatan retak pada lambung luar dan efek sambungan antara anggota struktur. Oleh karena itu, investigasi respon struktur lambung ganda yang mengalami tabrakan sangat penting untuk penilaian kelayakan tabrakan yang andal dalam keadaan pra-desain [5].

Pada kasus kecelakaan *oil tanker Exxon Valdez* tahun 1989 di *Prince William Sound, Alaska, Amerika Serikat (AS)* menunjukkan tidak efektifnya Undang-Undang Polusi Minyak tahun 1990 (OPA 90) berstandar Internasional mengenai pencegahan polusi lingkungan yang disebabkan oleh kapal. Untuk itu, diberlakukan persyaratan penggunaan lambung ganda (*double hull*) pada kapal tanker baru dan kapal tanker lama. Karena itu *International Maritime Organization (IMO)* mengambil tindakan dan menetapkan standar lambung ganda pada tahun 1992 dalam *International Convention for the Prevention of the Pollution from Ships (MARPOL)* [6].

Telah diketahui dengan baik bahwa kekuatan batas (*ultimate strength*) sangat penting dalam desain kapal. Kekuatan ini harus diperhitungkan untuk melindungi kapal dari kerusakan. Dalam studi ini, terdapat tiga jenis kekuatan akan dinilai: longitudinal, transversal dan lokal. Kekuatan longitudinal adalah yang paling signifikan dan parameternya yang selalu dinilai untuk menetapkan kapasitas momen lentur kapal terhadap beban eksternal saat di laut [7].

Metode keandalan struktur telah diterapkan secara konsisten dalam beberapa dekade terakhir untuk menilai keamanan struktur kapal dan komponen struktur. Sebagian besar aplikasi menggunakan metode keandalan struktur untuk membandingkan tingkat keselamatan dari jenis kapal yang berbeda, kapal dari jenis yang sama dan konsep yang berbeda dari jenis kapal yang sama, seperti kapal curah dan kapal tanker.

Formulasi keandalan juga telah dikembangkan untuk kapal dalam kondisi rusak serta untuk menilai efek dari proses degradasi seperti korosi pada keselamatan strukturalnya dan deskripsi peningkatan efek beban [8].

Sebuah langkah penting dalam metodologi penilaian realistik kekuatan batas (*ultimate strength*) untuk kapal dilakukan oleh Smith dan diikuti oleh orang lain, termasuk Gordo et al. dan Yao dkk. [9]. *Finite Element Method* atau metode elemen hingga dapat menjadi metode yang ampuh untuk melakukan analisis kekuatan lambung kapal setelah terjadi kerusakan. Banyak peneliti telah melakukan penelitian tentang perhitungan kekuatan longitudinal residu atau kekuatan longitudinal kapal dalam kondisi utuh atau rusak dengan menggunakan analisis FEM nonlinear [10]. Metode elemen hingga nonlinier (NFEM) memungkinkan pemodelan struktur secara rinci dan telah dikenal sejak lama. Namun, kekuatan pemrosesan yang tersedia saat itu tidak memungkinkan metode ini digunakan secara luas. Baru-baru ini, metode ini menjadi lebih luas dan berbagai penelitian sekarang tersedia, termasuk yang dilakukan oleh Amlashi dan Moan, Paik et al., dan Khedmati dan Rashedi [9]. Penyelesaian dari metode elemen hingga umumnya menggunakan metode matriks. Metode matriks cara kekakuan dikembangkan dengan anggapan struktur bersifat elastik-linier. Prinsip superposisi digunakan supaya terbentuk persamaan keseimbangan aksi yang selaras perpindahan titik kumpul. Solusi persamaan simultan yaitu perpindahan titik kumpul. Selanjutnya, besaran reaksi serta aksi ujung batang dapat dihitung [11].

Dalam penelitian sebelumnya telah dilakukan perbandingan hasil analisis kekuatan batas kapal *double hull tanker* dengan konfigurasi material yang berbeda dengan dimensi utama yang identik sama yaitu kapal *double hull tanker* T3 dan kapal *double hull tanker* T4 dengan perbandingan hasil analisis metode NLFEA (*Non Linear Finite Element Analysis*) di ANSYS.

Dalam menganalisis berbagai macam struktur dalam ilmu keteknikan, terdapat begitu banyak *software* yang dapat digunakan. Pada

studi ini digunakan aplikasi MPC pada penampang kapal untuk analisis kekuatan struktur kapal dengan menggunakan metode elemen hingga [12].

Berdasarkan latar belakang tersebut, serta penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan analisa kekuatan kapal *double hull tanker*, menjadi latar belakang dalam pengerjaan tugas akhir dengan penelitian tentang aplikasi *Multiple Point Constrained* (MPC) terhadap kekuatan melintang pada kapal *double hull tanker*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah berapa besar kekuatan batas arah melintang kapal *double hull tanker* T3 dan T4, serta berapa besar tegangan yang bekerja?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan dan memudahkan dalam penelitian ini, maka ruang lingkup penelitian dibatasi dengan beberapa hal berikut.

1. Beban yang bekerja yaitu momen lentur vertikal longitudinal (*hongging dan sagging*).
2. Pemodelan dilakukan pada bagian penampang *midship* dengan arah memanjang sebesar satu jarak gading.
3. Ketidaksempurnaan awal, tegangan sisa pengelasan, cacat pengelasan, korosi, dan retak material diabaikan.
4. Analisa kekuatan menggunakan metode NLFEA (*Non Linear Finite Element Analysis*).

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui berapa besar kekuatan batas arah melintang kapal *double hull tanker* T3 dan T4, serta berapa besar tegangan yang bekerja.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat diantaranya :

1. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi media penerapan ilmu pengetahuan dan menambah wawasan baik bagi penulis maupun bagi pembacanya, khususnya mengetahui aplikasi MPC (*Multiple Point Constrained*) pada kekuatan melintang pada kapal *double hull tanker*.
2. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan manfaat yang positif terhadap perkembangan ilmu pengetahuan terutama di bidang keteknikan dan dapat menjadi referensi untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

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 aplikasi MPC (*Multiple Point Constrained*) terhadap kekuatan melintang pada kapal *double hull tanker*. Selain itu berisi juga mengenai perumusan masalah yang akan dianalisis, batasan masalah penelitian yang tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini karena keterbatasan alat bantu dan juga membatasi agar penelitian lebih spesifik, juga dalam bab ini terdapat tujuan dari penelitian dan manfaat penelitian yang dapat diambil dari penelitian ini serta sistematika penulisan skripsi.

BAB II Tinjauan Pustaka

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

Analysis kekuatan di ANSYS serta cara perhitungan beban yang diterima struktur kapal tanker ketika mengalami kondisi *hogging* ataupun *sagging*.

BAB III Metode Penelitian

Bab ini berisi jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, objek penelitian yaitu penampang *midship* pada kapal *double hull tanker*, jenis dan sumber data dimana penelitian ini bersifat kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta penampilan dari hasilnya dengan melakukan investigasi untuk mendapatkan nilai kekuatan batas kapal *double hull tanker* dengan pengaplikasian MPC pada kekuatan melintang pada struktur kapal *double hull tanker* dengan metode FEM dan data yang digunakan adalah data dari rancangan [27] dan kerangka alur pemikiran.

BAB IV Pembahasan

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

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 khusus yang muatannya dapat berupa minyak, bahan kimia, gas, dan muatan lainnya yang dapat menimbulkan kebakaran dan ledakan. Muatan ini sangat berbahaya tidak hanya untuk kapal tetapi juga kondisi lingkungan [2]. Tanker adalah kategori kapal yang didesain dengan lambung dek tunggal termasuk penyusunan tangki-tangki secara integral maupun independen, khususnya untuk angkutan kargo curah dalam bentuk cairan [13]. Pengangkutan cairan curah menggunakan kapal sebelumnya menimbulkan beberapa masalah, yaitu :

- Penahan, pada kapal kayu untuk curah cair, seperti air, minyak, memiliki banyak celah yang dapat menyebabkan bocor atau merembesnya cairan. Pengembangan lambung besi dan baja memecahkan masalah ini.
- Bongkar-muat, pada saat melakukan aktivitas bongkar muat untuk cairan curah harus terlebih dahulu dipompa, pengembangan pompa yang efisien dan sistem perpipaan sangat penting untuk pengembangan tanker. Pada awalnya mesin uap dikembangkan sebagai penggerak utama untuk sistem pemompaan, selain itu pasar juga menerima produk dalam jumlah yang terbatas, dikarenakan sifat tong, yang hanya dapat memiliki volume relatif kecil untuk cairan, menyebabkan kelangkaan dan harga yang mahal pada jenis curah cair.
- *Free Surface Effect* atau efek permukaan bebas, cairan dalam jumlah banyak yang dibawa di atas kapal akan berdampak pada stabilitas kapal, terutama ketika cairan tersebut mengalir di sekitar palka atau tangki sebagai respon terhadap pergerakan kapal. Efeknya dapat diabaikan dalam penggunaan tong, namun dapat menyebabkan terbaliknya kapal jika tong berkumpul pada satu tempat, masalah ini

dapat diselesaikan dengan pemberian sekat pembatas, agar tong tidak bergerak secara bebas.

Tipe-tipe tanker antara lain tanker minyak, tanker kimia, tanker gas cair, dan tanker-tanker lainnya seperti tanker aspal, tanker jus buah, tanker bir, dan tanker air. Sedangkan variasi fitur tanker termasuk struktur *double bottom*, *double hull*, *double side*, *tank coating*, serta fitur lain menyesuaikan kargo yang diangkut [13].

Adapun jenis kapal tanker menurut muatannya sebagai berikut.

2.2 Oil Tanker

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



Gambar 2.1 Kapal *Oil Tanker* [31]

Crude Tanker adalah tanker yang membawa muatan minyak mentah, sedangkan *Product Tanker* adalah tanker yang membawa muatan yang sudah diolah dari kilang. Ukuran *Crude Tanker* biasanya lebih besar dari *Product Tanker*.

2.3 *Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker*

Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker adalah jenis kapal tanker yang dirancang untuk mengangkut muatan gas alam cair. Adapun contoh kapal *Liquefied Natural Gas Tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kapal *LNG Tanker* [31]

2.4 *Chemical Tanker*

Chemical Tanker adalah jenis kapal tanker yang dirancang untuk mengangkut bahan kimia. Adapun contoh kapal *Chemical Tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.3 sebagai berikut.



Gambar 2.3 Kapal *Chemical Tanker* [31]

Chemical Tanker juga digunakan untuk mengangkut jenis bahan sensitif dengan standar kebersihan tangki yang tinggi seperti minyak nabati, lemak, minyak sawit, soda kaustik, dan metanol.

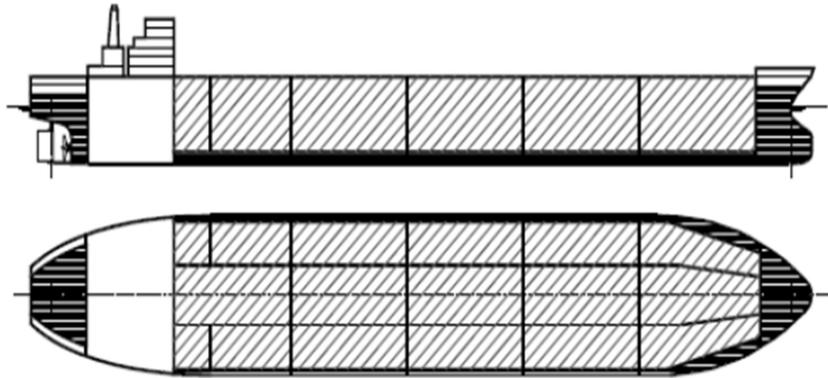
Sedangkan berdasarkan ukurannya, kapal tanker dibagi menjadi enam yaitu terdiri dari ULCC, VLCC, *Suezmax*, *Aframax*, *Panamax*, *Handysize/Handymax*.

1. ULCC (*Ultra-Large Crude Carrier*), adalah kapal tanker yang biasanya memiliki bobot mati antara 30.000-550.000 DWT.
2. VLCC (*Very-Large Crude Carrier*), adalah kapal tanker yang biasanya memiliki bobot mati antara 200.000-300.000 DWT.
3. *Suezmax*, adalah kapal *oil tanker* terbesar yang dapat transit di terusan Suez bermuatan penuh dengan bobot mati sekitar 150.000 DWT.
4. *Aframax*, menunjukkan kapal *crude oil tanker* yang lebih kecil, tetapi menunjukkan ukuran kapal tanker terbesar di *AFRA Freight Rate Assessment Scale Large One Category*. AFRA adalah singkatan dari *American Freight Rate Association*. Dikabarkan memiliki bobot mati sekitar 80.000-115.000 DWT.
5. *Panamax*, adalah kapal *oil tanker* ukuran maksimum, dengan batasan balok 32.2 meter dan batasan panjang 275 meter, yang dapat melewati terusan panama dengan ukuran tipikal adalah sekitar 55.000-70.000 DWT.
6. *Handysize/Handymax*, adalah tipikal kapal tanker dengan bobot mati sekitar 35.000-45.000 DWT.

2.5 Konstruksi Kapal Tanker

Kapal tanker dibuat untuk mengangkut minyak mentah melalui laut atau perairan dari pelabuhan muat atau pelabuhan produksi ke pelabuhan bongkar/pengolahan dan minyak produk dari pelabuhan pengolahan menuju pelabuhan bongkar/distribusi.

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 2.4 berikut.



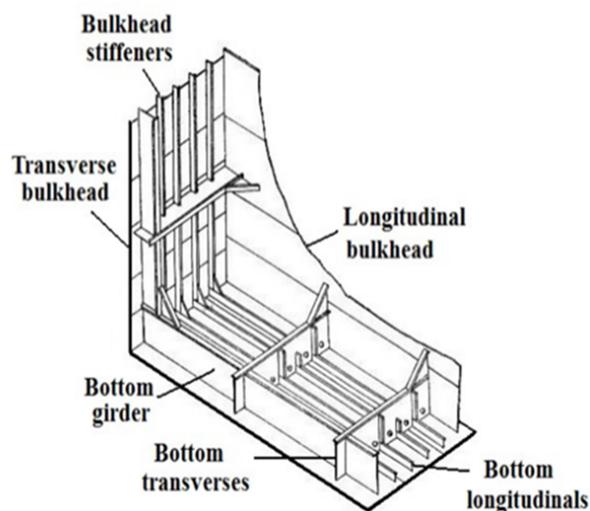
Gambar 2.4 Konstruksi Kapal Tanker [14]

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

1. *Safety* : sebagai pengangkut muatan berbahaya.
2. Stabilitas : muatan cair dalam tangki dapat bergerak bebas.
3. Pencemaran : dapat terjadi tumpahan minyak di laut.

2.6 *Single Hull Tanker*

Tanker lambung tunggal (*single hull tanker*), merupakan jenis tanker yang hanya memiliki satu lambung dan minyak yang dibawa disimpan dalam struktur lambung tersebut. Adapun contoh konstruksi *single hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.5 sebagai berikut.



Gambar 2.5 *Single Hull Tanker* [21]

IMO melalui peraturan MARPOL 73/78-Annex 1, Regulation 13G, Amandemen 2001 membagi kapal tanker minyak dalam 3 kategori, yaitu kategori 1, 2, dan 3. Dengan rincian sebagai berikut :

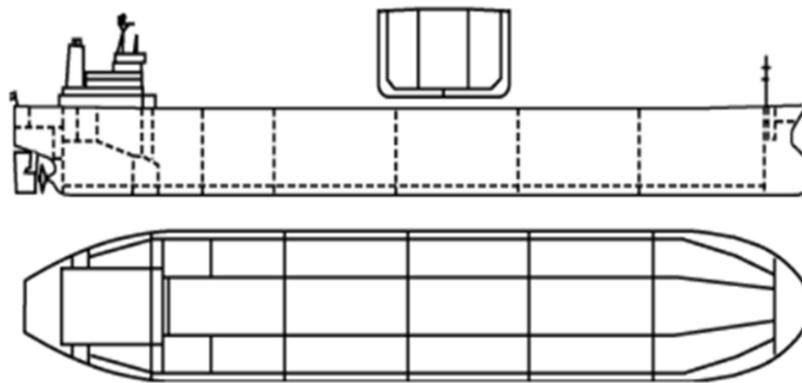
1. *Oil Tanker* kategori 1
 - a. Kapal tanker 20.000 DWT atau lebih yang memuat *crude oil, fuel oil, heavy diesel oil*, atau *lubricating oil*.
 - b. Kapal tanker 30.000 DWT atau lebih yang memuat jenis minyak selain yang disebutkan diatas. (Tanker pra-MARPOL, yaitu tanker *single hull* yang tidak mempunyai *ballast tanks* terpisah pada *protective locations*).
2. *Oil Tanker* kategori 2
 - a. Kapal tanker 20.000 DWT atau lebih, *single hull*, yang memuat *crude oil, fuel oil, heavy diesel oil*, atau *lubricating oil*.
 - b. Tanker MARPOL 30.000 DWT atau lebih, *single hull*, yang memuat jenis minyak selain yang disebut diatas, yang dilengkapi *ballast tanks* terpisah pada *protective locations*.
3. *Oil Tanker* kategori 3
Tanker 5.000 DWT atau lebih, *single hull* yang ukurannya dibawah tanker kategori 1 dan 2 diatas.

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

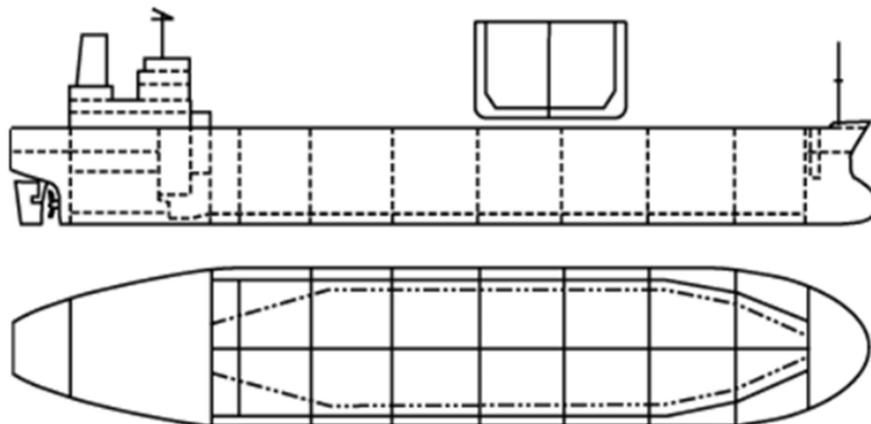
2.7 Double Hull Tanker

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 [3].

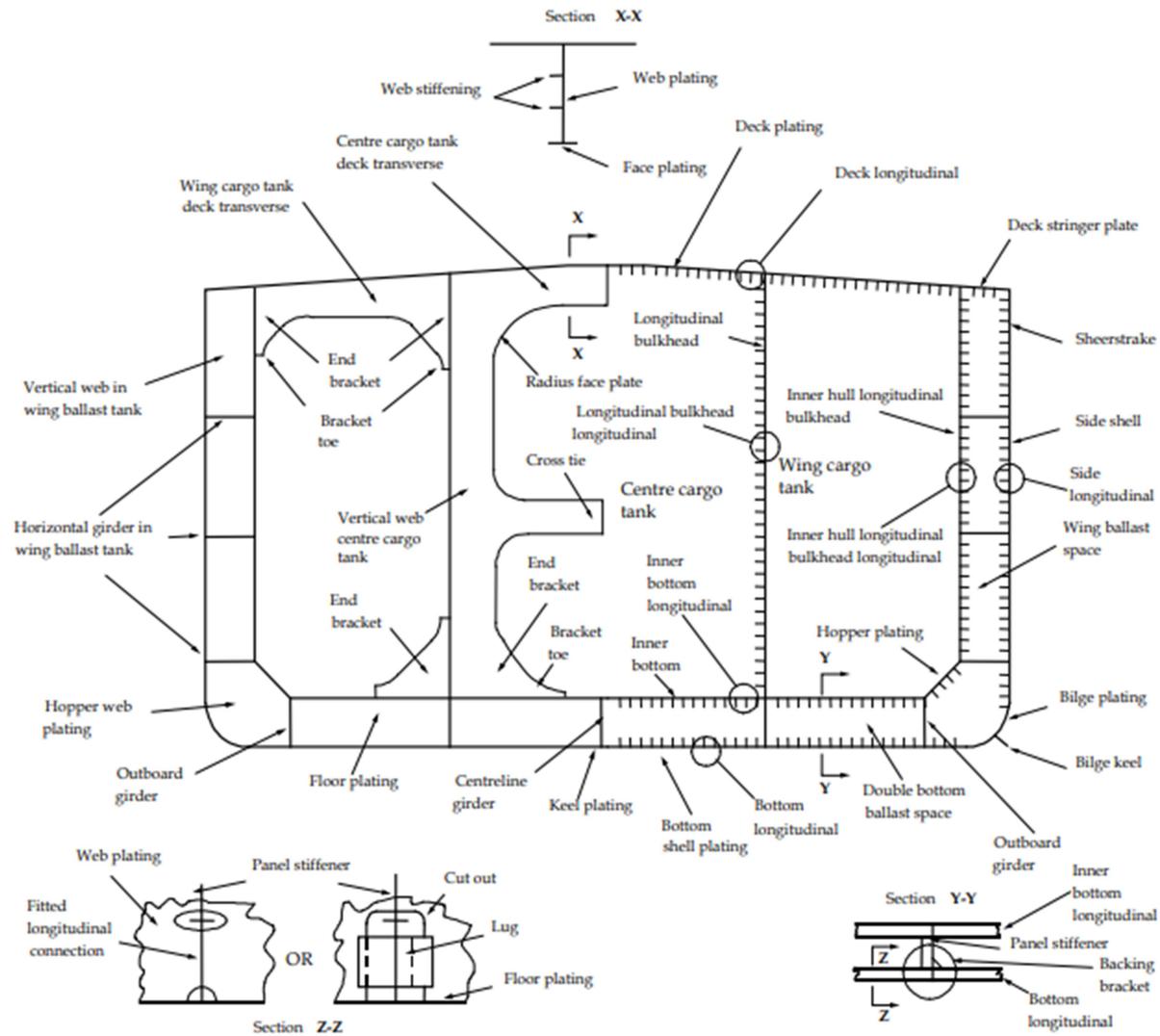


Gambar 2.6 Kapal *double hull tanker* dengan dua sekat memanjang [22]



Gambar 2.7 Kapal *double hull tanker* dengan satu sekat memanjang [22]

Pada gambar 2.6 dan 2.7 di atas menunjukkan gambaran umum tentang tanker minyak *hull* ganda dengan dua sekat longitudinal atau satu sekat memanjang.

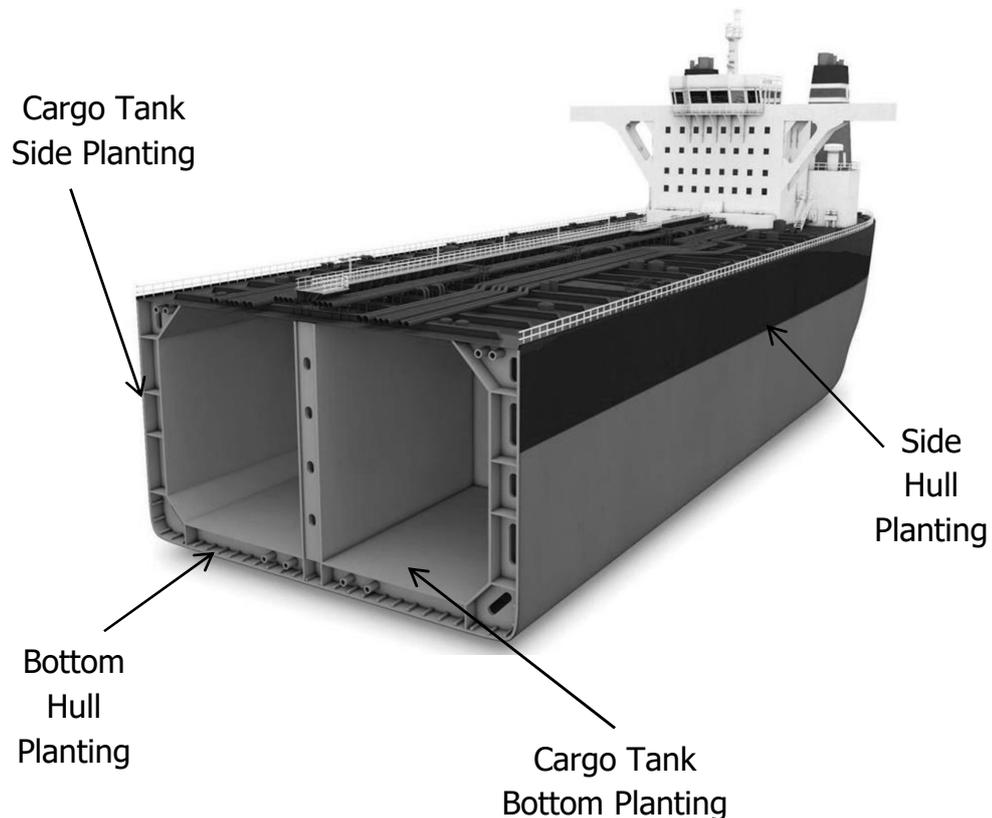


Gambar 2.8 Konstruksi *Midship* Kapal *Double Hull Tanker* [14]

Double Hull, seperti namanya, adalah lambung kapal tanker dengan lapisan permukaan lambung kedap air. Lapisan dalam dan luar lambung ada di bagian bawah dan juga sisi kapal tanker.

Konstruksi lapisan ganda membantu mengurangi risiko pencemaran laut selama benturan, landasan, dan bentuk kerusakan lambung kapal lainnya. Adapun konstruksi *midship* kapal *double hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.8.

Adapun contoh konstruksi kapal *double hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Konstruksi Kapal *Double Hull Tanker* [32]

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 tabrakan.
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. Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan tabrakan atau serupa.

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*. 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 [14].

2.8 Sistem Konstruksi Kapal

Pemilihan jenis sistem untuk suatu kapal sangat ditentukan oleh ukuran kapal (dalam hal ini panjangnya sehubungan dengan kebutuhan akan kekuatan memanjang), jenis/fungsi kapal menjadikan dasar pertimbangan-pertimbangan lainnya. Sistem kerangka/konstruksi kapal (*framing system*) dibedakan dalam dua jenis utama; yaitu sistem kerangka melintang (*transverse framing system*) dan sistem membujur atau memanjang (*longitudinal framing system*). Dari kedua sistem utama ini

maka dikenal pula sistem kombinasi (*combination/mixed framing system*).
[15]

2.9 Sistem Konstruksi Melintang

Dalam sistem ini gading-gading (*frame*) dipasang vertikal (mengikuti bentuk *body plan*) dengan jarak antara (*spacing*), ke arah memanjang kapal, satu sama lain yang rapat (sekitar antara 500 mm – 1000 mm, tergantung panjang kapal). Pada geladak, baik geladak kekuatan maupun geladak-geladak lainnya, dipasang balok-balok geladak (*deck beam*) dengan jarak antara yang sama seperti jarak antara gading-gading. Ujung masing-masing balok geladak ditumpu oleh gading-gading yang terletak pada vertikal yang sama. Pada alas dipasang wrang-wrang dengan jarak yang sama pula dengan jarak antara gading-gading sedemikian rupa sehingga masing-masing wrang, gading-gading dan balok geladak membentuk sebuah rangkaian yang saling berhubungan dan terletak pada satu bidang vertikal sesuai penampang melintang kapal pada tempat yang bersangkutan. Elemen-elemen yang dipasang membujur dalam sistem melintang yaitu :

- a. Pada alas : *Centre girder* dan *Side girder*
- b. Pada sisi : *Side Stringer*
- c. Pada geladak : *Deck girder* atau *carling*

2.10 Sistem Konstruksi Memanjang

Dalam sistem ini gading-gading utama tidak dipasang vertikal, tetapi dipasang membujur pada sisi kapal dengan jarak antara, diukur ke arah vertikal, sekitar 700 mm-1.000 mm. gading-gading ini (pada sisi) dinamakan pembujur sisi (*side longitudinal*). Pada setiap jarak tertentu (sekitar 3-5 m) dipasang gading-gading besar, sebagaimana gading-gading besar pada sistem melintang, yang disebut pelintang sisi (*side transverse*). Pada alas, dan alas dalam, juga dipasang pembujur-pembujur seperti pembujur-pembujur sisi tersebut di atas dengan jarak antara yang

sama, ini dinamakan pembujur-pembujur alas (*bottom longitudinal*) dan, pada alas dalam, pembujur alas dalam (*inner bottom longitudinal*). Pada alas juga dipasang wrang-wrang, dan dihubungkan pada pelintang-pelintang sisi. Penumpu tengah dan penumpu samping sama halnya seperti pada sistem melintang. Pada geladak juga dipasang pembujur-pembujur seperti halnya pembujur-pembujur yang lain tersebut di atas. Pembujur-pembujur ini dinamakan pembujur geladak (*deck longitudinal*). Balok-balok geladak dengan bilah yang besar dipasang pada setiap pelintang sisi dan disebut pelintang geladak (*deck transverse*).

2.11 Sistem Konstruksi Kombinasi

Sistem kombinasi ini diartikan bahwa sistem melintang dan sistem membujur dipakai bersama-sama dalam badan kapal. Dalam sistem ini geladak dan alas dibuat menurut sistem membujur sedangkan sisinya menurut sistem melintang. Jadi, sisi-sisinya diperkuat dengan gading-gading melintang dengan jarak antara yang rapat seperti halnya dalam sistem melintang, sedangkan alas dan geladaknya diperkuat dengan pembujur-pembujur. Dengan demikian maka dalam mengikuti peraturan klasifikasi (*rules*) sisi-sisi kapal tunduk pada ketentuan yang berlaku untuk sistem melintang, sedangkan alas dan geladaknya mengikuti ketentuan yang berlaku untuk sistem membujur, untuk hal-hal yang memang diperlukan secara terpisah.

2.12 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 [16]. 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.

2.13 Beban Geladak Cuaca

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak dibelakang 0,15 L dari garis tegak haluan (FP) [17]. Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.1.

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

Dengan P_0 terdiri dari P_{01} untuk arah gelombang searah atau berlawanan arah kapal dan P_{02} untuk arah gelombang melintang arah kapal yang dapat dihitung seperti pada Persamaan 2.2 dan Persamaan 2.3

$$P_{01} = 2,1 \cdot (C_B + 0,7) \cdot C_D \cdot C_L \cdot f \quad (2.2)$$

$$P_{02} = 2,6 \cdot (C_B + 0,7) \cdot C_D \cdot C_L \quad (2.3)$$

Dimana :

P_D = Beban geladak cuaca (kN/m²)

P_0 = *Basic external dynamic load* (kN/m²)

C_D = Faktor Distribusi

f = Faktor Probabilitas

C_L = Koefisien Panjang

$$= \sqrt{\frac{L}{90}} \text{ untuk } L < 90 \text{ m}$$

$$= 1,0 \text{ untuk } L \geq 90 \text{ m}$$

z = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)

T = Sarat kapal (m)

H = Tinggi kapal (m)

2.14 Beban Luar Sisi Kapal

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang timbul karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal [17]. Beban luar sisi kapal dibagi atas dua beban yaitu:

1. Beban luar sisi kapal dibawah garis air muat (P_{S1})
2. Beban luar sisi kapal diatas garis air muat (P_{S2})

Adapun beban luar sisi kapal tersebut dihitung dengan Persamaan 2.4 dan 2.5.

$$P_{S1} = 10(T - z) + P_O \cdot C_F \left(1 + \frac{z}{T}\right) a \quad (2.4)$$

$$P_{S2} = P_O \cdot C_F \quad (2.5)$$

Dimana :

P_{S1} = Beban luar sisi kapal dibawah garis air muat (kN/m^2)

P_{S2} = Beban luar sisi kapal diatas garis air muat (kN/m^2)

P_O = *Basic eksternal dynamic load* (kN/m^2)

C_F = Faktor distribusi

a = Jarak antar *stiffener* (m)

z = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)

T = Sarat kapal (m)

H = Tinggi kapal (m)

2.15 Beban Luar Alas Kapal

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal [17]. Beban luar alas kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.6.

$$P_B = 10 \cdot T + P_O \cdot C_F \quad (2.6)$$

Dimana:

P_B = Beban luar alas kapal (kN/m²)

P_O = *Basic eksternal dynamic load* (kN/m²)

C_F = Faktor distribusi

T = Sarat kapal (m)

2.16 Tegangan yang Bekerja

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

2.17 Tegangan Normal

Pengetahuan dan pengertian tentang bahan dan perilakunya jika mendapat gaya atau beban sangat dibutuhkan di bidang teknik bangunan. Jika suatu batang prismatik, dengan luas penampang seragam di sepanjang batang menerima beban atau gaya searah dengan panjang batang, maka gaya tersebut akan menimbulkan tegangan atau tekanan pada penampang batang.

Tegangan atau tekanan merupakan besaran gaya per satuan luas 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 2.7:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

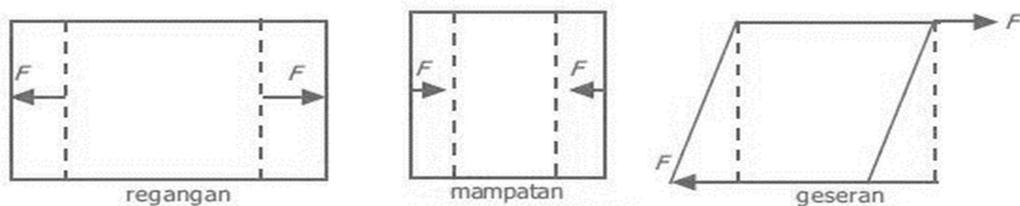
Dimana :

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 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Tegangan-Regangan [25]

2.18 Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

Tegangan tarik yaitu tegangan yang timbul akibat gaya tarik. Apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang, dan akibatnya batang ini cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbunya. Tegangan Tarik (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 2.8 dan dapat dilihat pada Gambar 2.11.

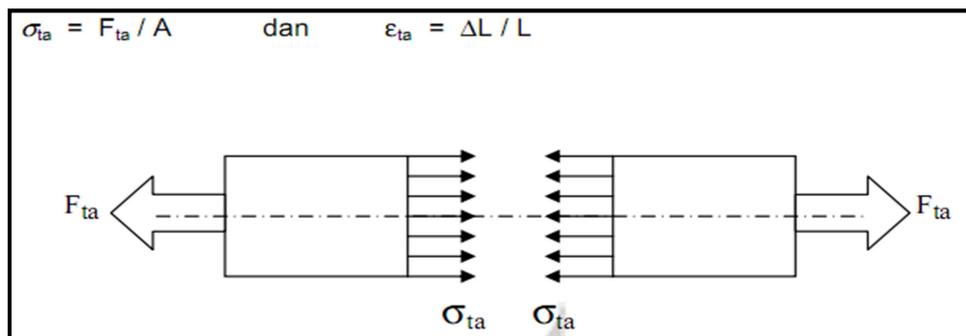
$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (2.8)$$

Dimana :

σ_{tr} = tegangan tarik (N/mm²)

F = gaya tarik (N)

A = Luas penampang (mm²)

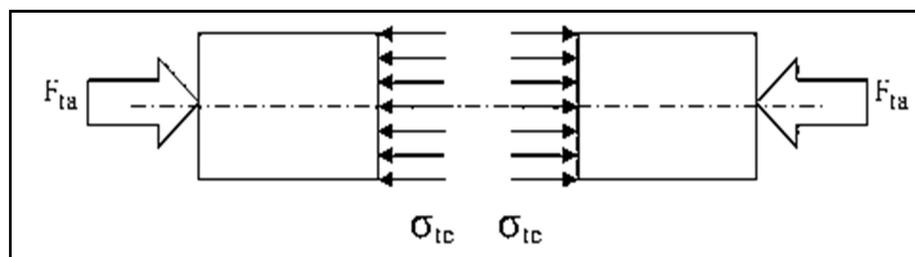


Gambar 2.11 Tegangan Tarik [25]

2.19 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 2.12 :



Gambar 2.12 Tegangan Tekan [25]

selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.9:

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

Dimana :

σ_{te} = tegangan tekan (N/mm²)

F_{ta} = gaya tekan (N)

A = Luas penampang (mm²)

2.20 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 (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 2.10:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.10)$$

Dimana :

τ = tegangan geser (N/mm²)

P = gaya geser atau gaya lintang (N)

A = Luas penampang (mm²)

2.21 Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

Tegangan lentur memiliki nilai terbesar di atas dan di bawah balok. Tegangan lentur tersebut bekerja secara tegak lurus terhadap penampang melintang dan berada dalam arah longitudinal dari balok. Merupakan gaya yang bekerja pada jarak tertentu (L) dari tumpuan benda dengan arah kerja tegak lurus sumbu benda. Sehingga mengakibatkan benda melentur/melengkung di sepanjang sumbunya.

2.22 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.

2.23 Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut diatur dalam AISC [28] dan API [29]. 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.

2.24 Regangan

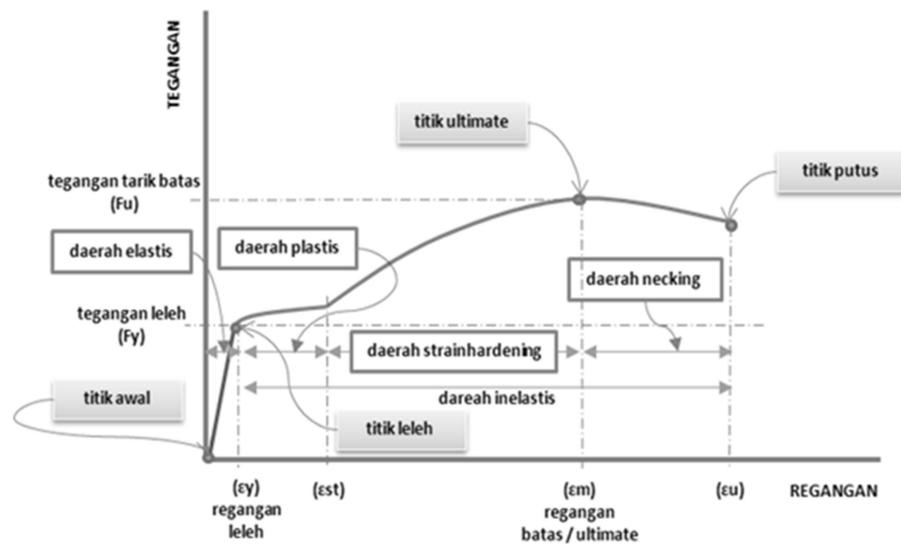
Sesuai dengan bunyi hukum *Hooke* bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangannya. Adapun regangan (*strain*) didefinisikan

sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada Persamaan 2.11

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.11)$$

Dimana :

- ε = Regangan
- ΔL = Pertambahan panjang (m)
- L = Panjang mula-mula (m)



Gambar 2.13 Hubungan antara tegangan dan regangan [33]

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.13, 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_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.

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 *Hooke* masih bisa ditolerir. Dalam praktek, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis.

3. Deformasi plastis (*plastic deformation*)

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

4. Titik Putus

Merupakan besar tegangan di mana bahan yang diuji putus atau patah. Regangan merupakan ukuran mengenai seberapa jauh batang tersebut berubah bentuk. Tegangan diberikan pada material dari arah luar, sedangkan regangan adalah tanggapan material terhadap tegangan. Pada daerah elastis, besarnya tegangan berbanding lurus dengan regangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan benda tersebut disebut modulus elastisitas atau *Modulus Young*. Pengukuran *Modulus Young* dapat dilakukan dengan menggunakan gelombang akustik, karena kecepatan jalannya bergantung pada *Modulus Young*. Secara matematis dirumuskan pada Persamaan 2.12 dan 2.13:

$$E = \frac{F L}{A \Delta L} \quad (2.12)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

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* beberapa jenis bahan dapat kalian lihat pada Tabel 2.1 Satuan SI untuk E adalah *pascal* (Pa) atau N/mm².

Tabel 2.1 Modulus *Young* pada Material [25]

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

2.25 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 2.14 berikut:

$$\delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.14)$$

Dimana:

σ = Tegangan yang timbul pada material (N/mm²)

ε = Regangan yang timbul pada material

P = Beban atau gaya yang bekerja pada material (N/mm²)

A = Luas penampang material (mm²)

E = Modulus elastisitas material (N/mm²)

l = Panjang material (mm)

δl = Deformasi material (mm)

2.26 Metode Matriks Kekakuan

Metode elemen hingga (*finite element method*) biasa dipandang sebagai perluasan dari metode perpindahan ke masalah *continuum* berdimensi dua dan tiga seperti plat, struktur selaput (*shell*) dan benda pejal. Dalam metode ini, *continuum* sebenarnya diganti dengan sebuah struktur ideal ekuivalen yang terdiri dari elemen-elemen unik (*discrete element*). Elemen ini disebut elemen berhingga dan dihubungkan bersama-sama di sejumlah titik simpul [18]. 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 [1].

Penyelesaian dari metode elemen hingga umumnya menggunakan metode matriks. Metode matriks cara kekakuan dikembangkan dengan

anggapan struktur bersifat elastik-linier. Prinsip superposisi digunakan supaya terbentuk persamaan keseimbangan aksi yang selaras perpindahan titik kumpul. Solusi persamaan simultan yaitu perpindahan titik kumpul. Selanjutnya, besaran reaksi serta aksi ujung batang dapat dihitung.

Prosedur perhitungan diformalisasi dengan menganggap semua titik kumpul mengalami perpindahan dengan demikian hubungan aksi dan perpindahan pada semua batang ditangani seragam. Matriks kekakuan struktur dirakit dengan cara penjumlahan langsung dari matriks kekakuan batang serta matriks beban ekuivalen struktur dirakit dengan cara sama dari matriks beban ekuivalen pada ujung batang dengan syarat semua arah dalam sumbu struktur dan ordo matriks Sesuai koordinat struktur. Cara ini disebut metode kekakuan langsung (*direct stiffness*). Kondisi titik tumpuan akan diperhitungkan kemudian [11].

Persamaan 2.15 menunjukkan persamaan antara aksi dan perpindahan elemen batang.

$$[S_M][D_M] = [A_M] \quad (2.15)$$

Dimana :

D_M = Perpindahan ujung batang

A_M = Aksi pada ujung batang

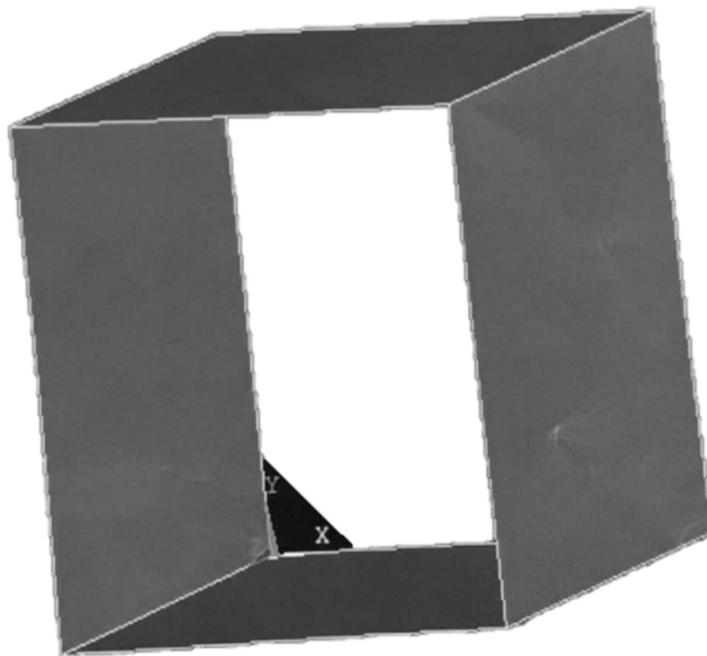
S_M = Aksi pada titik ujung batang akibat satu satuan perpindahan pada ujung batang.

Weaver dan Gere (1980), merumuskan matriks $[S_M]$ seperti pada Persamaan 2.16 dimana A_x adalah luas penampang batang, E adalah modulus elastisitas, merupakan panjang batang, I_z adalah inersia terhadap sumbu Z. Elemen matriks $[S_M]$ ditentukan dengan menggunakan tabel aksi ujung batang akibat perpindahan pada struktur terkekang. Angka-angka dengan huruf miring adalah indeks perpindahan pada batang yang disebut koordinat lokal [11].

$$\begin{bmatrix}
 \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA_x}{L} & 0 & 0 \\
 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} \\
 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} \\
 -\frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 \\
 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & -\frac{6EI_z}{L^2} \\
 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L}
 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.27 Multiple Point Constrained (MPC)

Sebagai contoh sebuah *box girder* berukuran 5000 x5000x5000 mm dengan material pelat $t = 10$ mm diketahui material propertis dengan *Modulus Elastis* = 200000 N/mm², *Poison Ratio* = 0,3 dan densitas = $7,8 \times 10^{-5}$ N/mm² adapun bentuk *box girder* dapat dilihat seperti gambar yang telah didesain di ANSYS [12].



Gambar 2.14 *Box Girder* tanpa elemen di tengah batang

Gambar 2.14 menunjukkan bahwa *box girder* tidak memiliki penampang tengah yang dapat dijadikan sebagai contoh sederhana apabila penampang kapal tidak memiliki elemen di tengah penampang. 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 di tengah, hal tersebut membuat tumpuan yang akan diberikan pada sumbu *netral axis* tidak diketahui, oleh karena itu software ANSYS dapat membuat titik/node bayangan yang dapat digunakan sebagai letak tumpuan/*multiple point constrained* (MPC) [12].

2.28 Kekuatan Batas Kapal Tanker (*Ultimate Strength*)

Kekuatan batas (*ultimate strength*) adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami keruntuhan (*collapse*) total [19]. Perhitungan kekuatan batas kapal tanker (MU) berdasarkan keakuratan dan kompleksitas dapat dihitung dengan metode PSDM (*Presumed Stress Distribution Method*), metode ISUM (*Smith Method and Idealized Structural Unit Method*), metode ISFEM (*Intelligent Supersize Finite Element Method*), (*Finite Element Analysis*) NLFEA dan harus memenuhi kriteria Persamaan 2.17 [20].

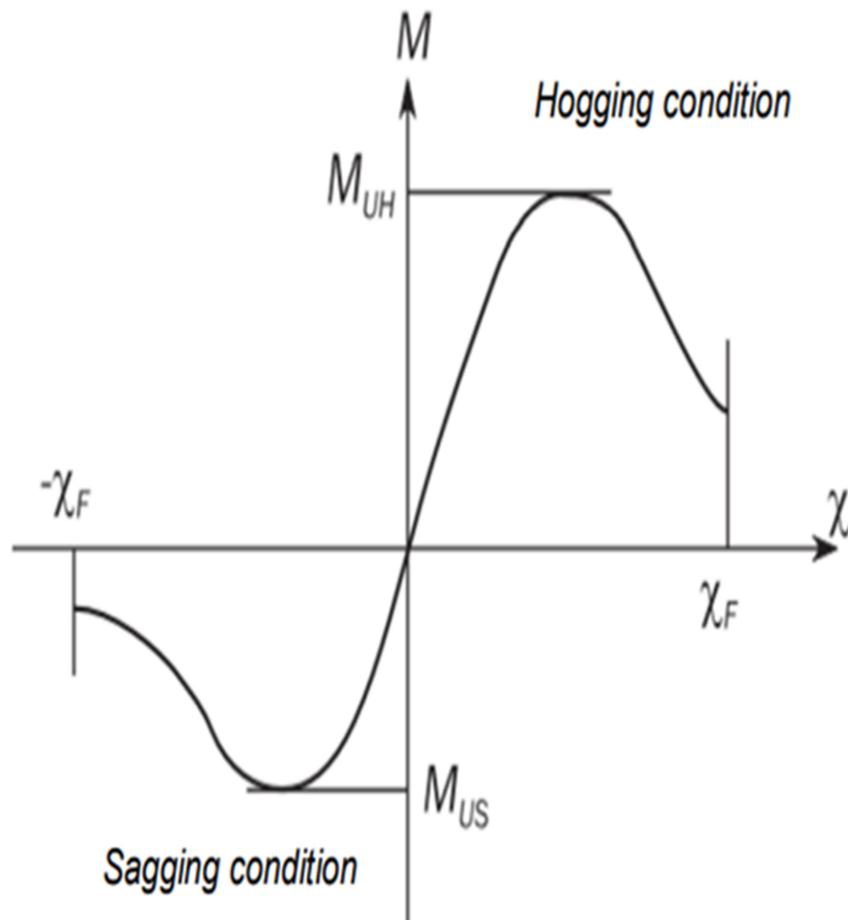
$$M_t \leq \frac{M_u}{\gamma_R} \quad (2.17)$$

Dimana :

M_t = Momen lentur-batas total vertikal (Nm)

γ_R = Faktor keamanan kekuatan batas lentur vertikal
 kondisi *sagging* = 1,1 dan kondisi *hogging* = 1,21

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.15. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.



Gambar 2.15 Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan

2.29 Metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA)

Metode NLFEA adalah salah satu metode elemen hingga yang digunakan dan direkomendasikan oleh biro klasifikasi untuk menghitung kekuatan struktur kapal, disamping metode lainnya seperti teori balok, metode *presumed stress distribution*, ISUM dan ISFEM. Menghitung dan membandingkan kekuatan-batas struktur kapal dengan menggunakan metode teori balok, metode *presumed stress distribution*, NLFEA, ISUM dan ISFEM [30]. Penelitian ini akan menggunakan metode NLFEA untuk menghitung kekuatan-batas longitudinal struktur kapal tanker baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat kandas dan tubrukan. Perhitungan kekuatan-batas struktur dengan metode NLFEA perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

1. Tipe metode NLFEA

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

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

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

2. Algoritma *iterative solution*

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

3. Proses peningkatan beban

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

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

Kontrol momen dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada salah satu ujung model elemen hingga dan ujung yang lainnya di-*full constrain*. Ujung model yang menggunakan *rigid link*, diberikan momen

lentur. Reaksi pada ujung model yang di-*constrain* akan mencapai titik batas kekuatan dari struktur.

4. Pembebanan dan Kondisi Syarat Batas

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

5. 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 dapat mengkondisikan ketidaksempurnaan geometrik tersebut.

6. Spesifikasi Material

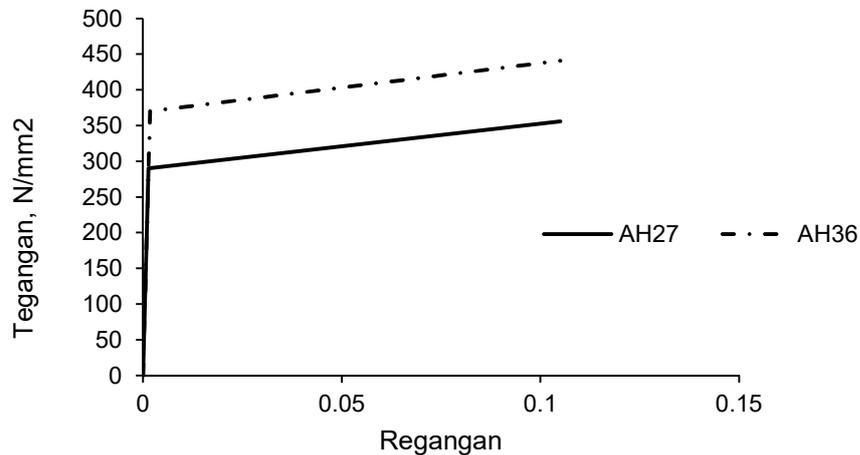
Kurva tegangan regangan dari material yang digunakan pada model elemen hingga harus tersedia. Kurva tegangan regangan sangat menentukan nilai kekuatan-batas dari struktur kapal. Penelitian ini menggunakan spesifikasi material pada Tabel 2.2, serta kurva tegangan regangan seperti pada Gambar 2.16.

Tabel 2.2. Spesifikasi material [26]

Spesifikasi Material	Jenis Material	
	AH27	AH37
<i>Density</i> (kg/m ³)	7850	7850
<i>Modulus Young</i> (N/mm ²)	210000	210000
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3	0,3
<i>Yield Strength</i> (N/mm ²)	290	370
<i>Tangent Modulus</i> (N/mm ²)	625	675

Berdasarkan Tabel di atas Material AH27 dan AH37 merupakan material khusus untuk *marine*. Modulus elastisitas sebesar 210000 N/mm², rasio

poisson 0,3 dan tegangan luluh AH27 sebesar 290 N/mm², AH36 sebesar 370 N/mm² serta *tangent* modulus AH27 sebesar 625 N/mm² dan AH36 sebesar 675 N/mm². Model material *bilinear isotropic hardening* dapat dilihat pada Gambar 2.16 berikut.



Gambar 2.16 Model material *bilinear isotropic hardening* [26]

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 400 mm dengan bentuk *quadmapped*.

8. Tipe Elemen

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