

SKRIPSI

**ANALISIS KEKUATAN MELINTANG KAPAL FPSO DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN ATURAN TINGGI DASAR GANDA
BKI DAN IACS**

Disusun dan diajukan oleh:

**RISKA
D081 19 1044**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

SKRIPSI

ANALISIS KEKUATAN MELINTANG KAPAL FPSO DENGAN MEMPERTIMBANGKAN ATURAN TINGGI DASAR GANDA BKI DAN IACS

Disusun dan diajukan oleh:

**RISKA
D081 19 1044**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**ANALISIS KEKUATAN MELINTANG FPSO DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN ATURAN TINGGI DASAR GANDA
BKI DAN IACS**

Disusun dan diajukan oleh

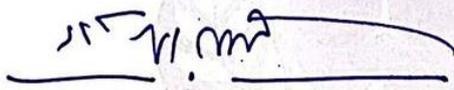
RISKA
D081 19 1044

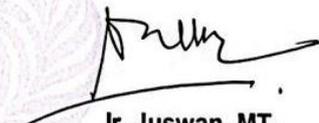
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana pada Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 10 Juli 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph. D.
NIP. 19760606 200501 1003


Ir. Juswan, MT.
NIP. 19621231 198903 1031

Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT
NIP. 19750605 200212 1003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Riska
NIM : D081191044
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul "Analisis Kekuatan Melintang Kapal FPSO dengan Mempertimbangkn Aturan Dasar Ganda BKI dan IACS" Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu, semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

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

Gowa, Mei 2023

Yang Menyatakan
Tanda tangan




Riska

ABSTRAK

Riska. *Analisis Kekuatan Melintang Kapal FPSO Dengan Mempertimbangkan Aturan Tinggi Dasar Ganda BKI Dan IACS* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Juswan**)

Salah satu aspek terpenting yang harus dianalisis dalam pembuatan kapal FPSO adalah kekuatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tinggi dasar ganda terhadap kekuatan melintang kapal FPSO yang terjadi pada bagian *deck* dan *bottom* pada kondisi *hogging* dan *sagging* berdasarkan aturan BKI dan IACS. Analisa kekuatan batas dilakukan pada daerah *midship* dalam satu jarak gading FPSO dengan menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA). Hasil menurut aturan tinggi dasar ganda BKI, pada kondisi *hogging* bagian *deck* mengalami tegangan sebesar 157,24 N/mm² dan bagian *bottom* mengalami tegangan sebesar 51,81 N/mm², sedangkan pada kondisi *sagging* bagian *deck* mengalami tegangan sebesar 142,39 N/mm² dan bagian *bottom* mengalami tegangan sebesar 427,16 N/mm². Kekuatan batas kapal saat kondisi *hogging* sebesar $2,30 \times 10^8$ Nmm dan saat kondisi *sagging* sebesar $-9,15 \times 10^8$ Nmm. Hasil menurut aturan tinggi dasar ganda IACS, pada kondisi *hogging* bagian *deck* mengalami tegangan sebesar 128,68 N/mm² dan bagian *bottom* mengalami tegangan sebesar 44,57 N/mm², sedangkan pada kondisi *sagging* bagian *deck* mengalami tegangan sebesar 171,19 N/mm² dan bagian *bottom* mengalami tegangan sebesar 318,70 N/mm². Kekuatan batas kapal saat kondisi *hogging* sebesar $1,58 \times 10^8$ Nmm dan saat kondisi *sagging* sebesar $-5,55 \times 10^8$ Nmm.

Kata Kunci: dasar ganda, FPSO, NLFEA, *ultimate strength*

ABSTRACT

Riska. *The Analysis of The Transversal Strength on The FPSO Vessel According to IACS and BKI Regulations* (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Juswan**)

One of the most important aspects to be analyzed in FPSO vessel is the ultimate strength. The objective of this study is to analyze the effect of double bottom height on the transversal ultimate strength on the FPSO acting on the deck and bottom part under hogging and sagging conditions according to BKI and IACS rules. The transversal ultimate strength analysis is carry in midship section area within one frame space of the FPSO using the Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA) method. The results obtained by BKI rules that the double bottom height in the hogging condition the deck experienced stress of 157,24 N/mm² and the bottom is subjected to stress of 51,81 N/mm², while in the hogging sagging the deck experienced stress of 142,39 N/mm² and the bottom experienced stress of 427,16 N/mm². The ultimate strength of the ship when the hogging condition is 2,30 x 10⁸ Nmm and when the sagging condition is -9,15 x 10⁸ Nmm. The results according to the IACS double bottom height rules, in the hogging condition the deck experienced stress of 128,68 N/mm² and the bottom experienced stress of 44,57 N/mm², while in the sagging condition the deck experienced stress of 171,19 N/mm² and the bottom is subjected to a stress of 318,70 N/mm². The ultimate strength of the ship when the hogging condition take place is 1,58 x 10⁸ Nmm and the sagging condition is -5,55 x 10⁸ Nmm.

Keywords: double bottom, FPSO, NLFEA, ultimate strength

DAFTAR ISI

SAMPUL	
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
KATA PENGANTAR	xiv
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	3
1.5 Ruang lingkup/Asumsi perancangan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Pengertian FPSO.....	4
2.2 Desain Struktur Lambung FPSO.....	5
2.3 Konstruksi Dasar Ganda	9
2.4 Tinggi Dasar Ganda menurut BKI dan IACS	12
2.5 Matriks Kekakuan (<i>Stiffener</i>).....	13
2.6 Sistem Konstruksi Kapal.....	15
2.7 Beban-Beban Pada Konstruksi Kapal.....	17
2.8 Tegangan yang Bekerja	21
2.9 Tegangan Normal.....	21
2.10 Tegangan Tarik (<i>Tensile Stress</i>).....	22
2.11 Tegangan Tekan (<i>Compressive Stress</i>)	22
2.12 Tegangan Geser (<i>Shear</i>).....	23
2.13 Tegangan Lentur (<i>Bending Stress</i>).....	24
2.14 Tegangan Luluh (<i>Crushing/Bearing Stress</i>).....	24

2.15	Tegangan Izin Dasar	24
2.16	Regangan	25
2.17	Deformasi Material	28
2.18	<i>Single Point Constrained</i> (SPC)	28
2.19	<i>Multiple Point Constrained</i> (MPC)	29
2.20	Kekuatan Batas FPSO (<i>Ultimate Strength</i>).....	30
2.21	Metode NLFEA	31
BAB III METODE PENELITIAN		36
3.1	Jenis Penelitian.....	36
3.2	Lokasi dan Waktu Penelitian	36
3.3	Penyajian Data	36
3.4	Analisa Data	38
BAB IV PEMBAHASAN		40
4.1	Tegangan Izin	40
4.2	Tegangan Kerja FPSO Kondisi Utuh Saat <i>Sagging</i> Menurut Aturan BKI	40
4.3	Tegangan Kerja FPSO Kondisi Utuh Saat <i>Sagging</i> Menurut Aturan IACS.....	42
4.4	Tegangan Kerja FPSO Kondisi Utuh Saat <i>Hogging</i> Menurut Aturan BKI	43
4.5	Tegangan Kerja FPSO Kondisi Utuh Saat <i>Hogging</i> Menurut Aturan IACS.....	44
4.6	Deformasi FPSO Menurut Aturan Tinggi Dasar Ganda BKI.....	46
4.7	Deformasi FPSO Menurut Aturan Tinggi Dasar Ganda IACS.....	50
4.8	Kekuatan Batas Momen Vertikal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD	55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		59
5.1	Kesimpulan	59
5.1	Saran	59
DAFTAR PUSTAKA.....		60
LAMPIRAN.....		62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Floating Production Storage and Offloading System (FPSO)</i>	4
Gambar 2. 2 <i>Wrang Alas Penuh pada Dasar Ganda dengan Sistem Konstruksi Melintang</i>	10
Gambar 2. 3 <i>Wrang Alas Terbuka pada Alas Ganda dengan Sistem Konstruksi Melintang</i>	10
Gambar 2. 4 <i>Sistem Konstruksi Memanjang</i>	11
Gambar 2. 5 <i>Garis Batas Tangki Muat</i>	13
Gambar 2. 6 <i>Tegangan Normal</i>	21
Gambar 2.7 <i>Tegangan-Tarik</i>	22
Gambar 2.8 <i>Tegangan-Tekan</i>	23
Gambar 2.9 <i>Hubungan antara Tegangan dan Regangan</i>	26
Gambar 2.10 <i>Box Girder Tanpa Elemen di Tengah Batang</i>	29
Gambar 2.11 <i>Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan</i>	31
Gambar 2.12 <i>Rigid Link Kekuatan Melintang Kapal</i>	34
Gambar 3.1 <i>Midship Kapal FSO dan FPSO SANTOS (SAMPANG) PTY.LTD, 2018</i>	37
Gambar 3.2 <i>Diagram Alir</i>	39
Gambar 4.1 <i>Perilaku dan Distribusi Tegangan Kerja Kapal FPSO pada Kondisi Utuh Akibat Sagging BKI Rules</i>	41
Gambar 4.2 <i>Perilaku dan Distribusi Tegangan Kerja Kapal FPSO pada Kondisi Utuh Akibat Sagging IACS Rules</i>	42
Gambar 4.3 <i>Perilaku dan Distribusi Tegangan Kerja Kapal FPSO pada Kondisi Utuh Akibat Hogging BKI Rules</i>	44
Gambar 4.4 <i>Perilaku dan Distribusi Tegangan Kerja Kapal FPSO pada Kondisi Utuh Akibat Hogging Menurut IACS Rules</i>	45
Gambar 4.5 <i>Deformasi Sebelum Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat Sagging BKI Rules</i>	46
Gambar 4.6 <i>Deformasi Sebelum Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat Hogging BKI Rules</i>	47
Gambar 4.7 <i>Deformasi Pada Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat Sagging BKI Rules</i>	48
Gambar 4.8 <i>Deformasi Pada Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat Hogging BKI Rules</i>	48

Gambar 4.9 Deformasi Setelah Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat <i>Sagging</i> BKI Rules.....	49
Gambar 4.10 Deformasi Setelah Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat <i>Hogging</i> BKI Rules.....	50
Gambar 4.11 Deformasi Sebelum Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat <i>Sagging</i> IACS Rules.....	51
Gambar 4.12 Deformasi Sebelum Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat <i>Hogging</i> IACS Rules.....	51
Gambar 4.13 Deformasi Pada Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat <i>Sagging</i> IACS Rules.....	52
Gambar 4.14 Deformasi Pada Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat <i>Hogging</i> menurut IACS Rules.....	53
Gambar 4.15 Deformasi Setelah Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat <i>Sagging</i>	53
Gambar 4.16 Deformasi Setelah Titik Kekuatan Batas Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD Kondisi Utuh Akibat <i>Hogging</i>	54
Gambar 4.17 Hubungan Momen Kelengkungan Pada Kondisi <i>Hogging</i>	55
Gambar 4.8 Hubungan Momen Kelengkungan Pada Kondisi <i>Sagging</i>	56
Gambar 4.19 Perbandingan Grafik Momen Kelengkungan Antara Aturan BKI dan IACS	57

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Parameter Desain Lambung Utama dan Dependensinya.....	8
Tabel 2.2 <i>Modulus Young</i> pada Material.....	27
Tabel 4.1 Tegangan Izin.....	40
Tabel 4.2 Rekapitulasi Tegangan Kerja Pada Kapal FPSO.....	40
Tabel 4.3 Rekapitulasi Tegangan Kerja Pada Kapal FPSO.....	42
Tabel 4.4 Rekapitulasi Tegangan Kerja pada Kapal FPSO Kondisi <i>Hogging</i> ...	43
Tabel 4.5 Rekapitulasi Tegangan Kerja pada Kapal FPSO Kondisi <i>Hogging</i> ...	44
Tabel 4.6 Rasio perbandingan Kekuatan Batas Kapal FPSO.....	57
Lampiran 1 Konfigurasi Stiffener Kapal FPSO PT. Santos (Sampang) PTY. LTD.....	63

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
A	Luas penampang	m ²
B	Lebar kapal	m
b _x	Gaya apung	N
C	Koefisien momen lentur	
C _b	Koefisien blok kapal	
C _D	Faktor distribusi	
C _L	Koefisien panjang	
D	Tinggi kapal	m
E	Modulus elastisitas	N/mm ²
F	Gaya	N
F _x	Gaya geser arah sumbu x	N
I	Inersia penampang	mm ⁴
I _{min}	Inersia penampang izin	mm ⁴
K _M	Faktor distribusi	
L	Panjang kapal	m
M	Momen lentur	Nmm
M _T	Kekuatan batas momen lentur <i>sagging</i>	Nmm
M _U	Kekuatan batas momen lentur <i>hogging</i>	Nmm
S	Modulus penampang	mm ³
S _b	Modulus penampang bagian <i>bottom</i>	mm ³
S _d	Modulus penampang bagian <i>deck</i>	mm ³
S _p	Modulus penampang ijin	mm ³
z	Jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan Lentur	mm
z _b	Jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan Lentur <i>bottom</i>	mm
z _d	Jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan Lentur <i>deck</i>	mm
σ _b	Tegangan lentur	N/mm ²
σ _{bi}	Tegangan lentur ijin	N/mm ²

σ_{\max}
 γr

Tegangan lentur maksimum
Faktor keamanan

N/mm²

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Konfigurasi Stifener Kapal FPSO Santos (Sampang) PTY. LTD.... 62

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dan atas kehendak-Nyalah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat diatasi. Salawat serta salam penulis panjatkan kehadiran Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“ANALISIS KEKUATAN MELINTANG KAPAL FPSO DENGAN MEMPERTIMBANGKAN ATURAN TINGGI DASAR GANDA BKI DAN IACS”

Doa dan dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Attan** dan Ibu **Ramasia** 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 I yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
2. Bapak **Ir. Juswan, ST. MT.** selaku dosen pembimbing II yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Program Studi Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. Ibu **Dr. Hasdinar Umar, ST., MT.** selaku penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga saya dapat menyelesaikan studi.

5. Bapak **Dr. Ir. Taufiqur Rachman, ST., MT** dan **Fuad Mahfud Assidiq, S.T., MT** selaku dosen penguji yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
6. **Dosen–Dosen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
7. **Staf Tata Usaha Program Studi Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
8. Kakanda **Rahmayanti, Neneng, Haeruddin** atas dukungan, baik itu dukungan moril maupun doa dorongan sehingga penulis mampu menyelesaikan studi di Universitas Hasanuddin.
9. Kakanda senior yang telah membimbing dan memberi pemahaman selama proses pengerjaan skripsi ini.
10. **Nur Alifya Iqrani** yang selalu memberi pemahaman dalam menyelesaikan skripsi.
11. **Sriwahdana, Fitria Ramadani, Ratih Purwasih, Dwi Agusdiansyah, Alfiand Bahari, Samuel Budi Defrianto, Rasfiawal, Muh. Syaifullah dan Ghayatri Gigi S.W.** yang selalu membersamai saya dalam suka maupun duka.
12. Teman-teman **Mahasiswa khususnya Teknik Kelautan 2019** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka. Rekan-rekan Labo **OSAREL angkatan 2019** yang sama-sama berjuang dan saling membantu dalam menyelesaikan studi di universitas tercinta kita, yaitu Universitas Hasanuddin.
13. Teman-teman **KKNT Perhutanan Sosial dan KKNT Kebencanaan Desa Maipi Gelombang 109 Unhas** yang telah mendukung dan memberikan semangat kepada penulis.
14. Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terima kasih yang sebesar besarnya untuk segala sumbangsih selama proses penyelesaian skripsi ini.

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

menutupi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Gowa, 10 Mei 2023



Riska

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal merupakan Indonesia adalah negara dengan luas wilayah 2/3 dari daratan. Hal tersebut menjadikan Indonesia memiliki potensi sumber daya yang lautan melimpah, terutama minyak dan gas bumi. Dengan banyaknya potensi sumber daya lautan yang ada, maka diperlukan struktur yang dapat mengangkut semua hasil produksi dari sumber daya yang ditemukan tersebut. Salah satu jenis bangunan struktur lepas pantai adalah kapal *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO).

FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*) adalah bangunan terapung yang digunakan sebagai tempat mengelola serta menyimpan minyak dan gas secara *mobile* atau berpindah-pindah pada suatu daerah daerah produksi minyak dan gas lepas pantai di seluruh dunia.

Perancangan struktur merupakan salah satu aspek yang terpenting dalam perancangan dan pembuatan suatu kapal. Konstruksi kapal harus mampu menahan beban-beban yang bekerja pada kapal, baik pada kondisi normal maupun ekstrem. Bebarapa kerusakan yang disebabkan oleh tubrukan, kandas, korosi dan lain sebagainya seringkali menjadi permasalahan yang terjadi pada kapal. Hal tersebut dapat mengakibatkan struktur pada kapal mengalami kegagalan serta menyebabkan adanya korban jiwa serta pencemaran lingkungan dalam bentuk tumpahan minyak dan sebagainya.

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 sehingga persyaratan penggunaan lambung ganda (*double hull*) pada kapal tanker baru dan kapal tanker lama diberlakukan. Oleh 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) (Ramadhan & Mulyatno, 2016).

Dasar ganda merupakan salah bagian kapal yang berfungsi sebagai ruang muatan benda cair, mengatur stabilitas kapal dan untuk mencegah kapal tenggelam ketika terjadi kebocoran pada lambung kapal. Salah satu aspek

penting dalam evaluasi struktur FPSO adalah kekuatan dasar ganda. Perhitungan nilai kekuatan batas pada kondisi *buckling* suatu kapal dianjurkan menggunakan metode *Nonlinear Finite Element Analysis* (NLFEA) sesuai dengan standar DNV (2017).

Analisis kekuatan kapal sudah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Analisis keandalan dan sensitivitas dari penumpu lambu Kapal Tanker dan Bulk Carrier pada kondisi utuh (Piscopo & Scamardella, 2019). Analisa kekuatan batas *hull girder* dengan mempertimbangkan lentur longitudinal modulus bagian bawah (Muis Alie, 2016). Penilaian keandalan penumpu lambung untuk FPSO. Studi tentang kekuatan batas lambung kapal yang mempertimbangkan penampang dan elemen hingga balok (Muis Alie, 2018). Mengembangkan metode evaluasi untuk batas struktur kapal dan bangunan apung lepas pantai (Paik & Kim, 2008). Analisis kelelahan kapal FSO setelah dikonversi menjadi FPSO terhadap umur kapal (Phady, 2021).

Berdasarkan latar belakang di atas serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan FPSO dan analisa kekuatan, maka focus penelitian ini adalah **“Analisis Kekuatan Melintang Kapal FPSO Dengan Mempertimbangkan Aturan Tinggi Dasar Ganda BKI dan IACS”** serta perbandingan hasil analisa dengan menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA).

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Tegangan kerja kapal FPSO berdasarkan aturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI).
2. Tegangan kerja kapal FPSO berdasarkan aturan *International Association of Classification Societies* (IACS).
3. Perbandingan kekuatan batas kapal FPSO antara aturan Biro Klasifikasi Indonesia dan *International Association of Classification Societies* (IACS).

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kekuatan melintang kapal FPSO dengan mempertimbangkan aturan tinggi dasar ganda berdasarkan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *International Association of Classification Societies* (IACS).

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Adapun manfaat dari penelitian aturan tinggi dasar ganda FPSO berdasarkan BKI dan IACS terhadap kekuatan melintang FPSO adalah:

1. Bagi peneliti, memberi pengetahuan cara menganalisis aturan tinggi alas ganda terhadap kekuatan melintang kapal FPSO berdasarkan BKI dan IACS pada kondisi *buckling* serta sebagai tugas akhir sarjana Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
2. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya mengetahui analisis struktur baja.
3. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kepada perusahaan-perusahaan.
4. Sebagai informasi dalam hal menentukan kebijakan dalam hal regulasi/peraturan pada galangan kapal untuk membuat perencanaan struktur kapal FPSO.

1.5 Ruang lingkup/Asumsi perancangan

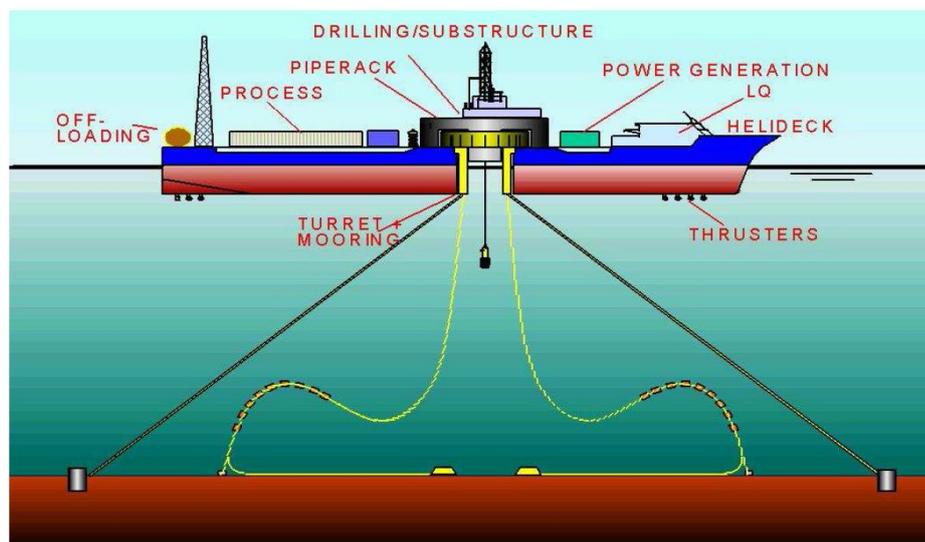
Agar penelitian lebih terarah dan sesuai dengan kerangka yang direncanakan, maka penelitian dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut;

1. Analisis dilakukan hanya pada kapal FPSO
2. Pemodelan yang dilakukan dengan satu jarak gading
3. Kekuatan melintang kapal FPSO dihitung dalam satu jarak gading besar
4. Analisa dilakukan pada dasar ganda kapal FPSO
5. Ketidaktersempurnaan awal, cacat pengelasan dan retak awal diabaikan
6. Analisa kekuatan menggunakan Metode NLFEA

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian FPSO

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) merupakan bangunan terapung paling produktif di bidang industri lepas pantai yang dikembangkan pada tahun 1970 untuk menghasilkan minyak dan gas dengan menggunakan jaringan pipa atau struktur tetap. FPSO merupakan bangunan pengeboran dan penyimpanan minyak dan gas bumi lepas pantai yang bersifat *portable*, dalam artian dapat dipindah-pindahkan. FPSO ini dioperasikan untuk menerima, memproses, menyimpan, dan menyalurkan hidrokarbon yang ditambatkan di tempat beroperasinya. Awalnya, FPSO dibatasi pada daerah dengan beban lingkungan yang ringan. Hal ini memungkinkan konversi kapal tanker menjadi FPSO (Paik & Thayambali, 2017). Adapun hasil pemisahan dari produk pengeboran adalah *crude oil*, air dan gas. Ciri umum FPSO adalah konstruksi gading-gading lebih kuat daripada kapal dengan ukuran yang sama, disebabkan adanya beban di atas *deck* yang sangat besar berupa *equipment* atau pabrik produksi minyak dan gas seperti yang terlihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 *Floating Production Storage and Offloading System (FPSO)*
Sumber : (Paik & Thayambali, 2007)

Membangun serta memelihara infrastruktur pipa dari segi biaya dan teknologi sangat mahal. Di sisi lain, mengembangkan cadangan minyak dan gas di perairan dalam yang mencapai 1000 m tidaklah mudah. Menggunakan tangki penyimpanan dianggap tidak selalu menjadi cara terbaik. Dalam hal ini,

FSO atau FPSO lebih menarik untuk dikembangkan untuk mengambil dan menyimpan cadangan minyak dan gas lepas pantai di perairan dari segi biaya dan efisiensi. Penempatan tangki penyimpanan bersama-sama yang dapat diturunkan secara langsung, yang lebih efisien ketika minyak atau gas yang dikembangkan dapat ditransfer ke *tanker shuttle* atau tongkang.

Unit lepas pantai yang berbentuk kapal memiliki berbagai manfaat bila dibandingkan dengan jenis struktur apung lainnya dalam hal luas kerja yang cukup, beban dek, kemampuan penyimpanan yang tinggi, kekuatan struktural, waktu tunggu yang lebih singkat, biaya bangunan/modal dan kesesuaian untuk konversi dan penggunaan kembali. Namun, serupa dengan jenis platform terapung lainnya, volume penggantinya di bawah garis air relatif besar serta respons dan kegagalan struktur di bawah kondisi lingkungan yang ekstrem terkait dengan gelombang, angin dan arus adalah masalah signifikan untuk dipertimbangkan dalam desain dan operasi.

FPSO terdiri dari kapal jenis tanker besar yang ditambatkan ke lautan. FPSO dirancang untuk memproses dan menghentikan produksi dari sumur bawah laut di dekatnya dan untuk secara berkala mengisi oli yang tersimpan ke tanker ulang-alik yang lebih kecil. Tanker ulang-alik kemudian mengangkut minyak ke fasilitas darat untuk diproses lebih lanjut. Sebuah FPSO mungkin cocok untuk lahan ekonomi sedikit yang terletak di daerah perairan dalam yang terpencil di mana infrastruktur pipa tidak ada. Saat ini, tidak ada FPSO yang disetujui untuk digunakan di Teluk Meksiko. Namun, ada lebih dari 70 sistem ini yang digunakan di tempat lain di dunia.

2.2 Desain Struktur Lambung FPSO

Sesuai dengan tingkat kedalaman air, kepekaan sistem tambak dan *riser* FPSO terhadap gerakan frekuensi gelombang meningkat dengan cepat mempengaruhi bentuk lambung FPSO yang dapat dioptimalkan untuk mengatasi hal ini dengan memvariasikan panjang, lebar tinggi, sarat dan distribusi massa pada struktur apung. Panjang lambung FPSO dapat disesuaikan dengan panjang gelombang yang direncanakan untuk memastikan bahwa kondisi lingkungan yang ekstrem tidak menghasilkan panjang gelombang yang berada pada kisaran *respons heave* dan atau *pitching* puncak, sehingga mengurangi gerakan vertikal *topside* dan beban dinamis yang terkait.

Salah satu penyebab terjadinya *ultimate strength failure* pada suatu struktur bangunan apung umumnya adalah disebabkan oleh beban ekstrem dan atau kurangnya daya tahan struktur terhadap degradasi material. Misalnya korosi yang terjadi secara menerus akan mengurangi dimensi *scantling*, sehingga girder penopang pada lambung kapal akan rawan mengalami *buckling* ataupun retak ketika ditimpa beban ekstrem. Beban ekstrem juga dapat menyebabkan komponen struktur mengalami *plastic deformation* yang menyebabkan struktur tersebut tidak dapat kembali ke bentuk semula. Untuk itu, perlu suatu pertimbangan jangka panjang untuk mengantisipasi adanya degradasi material ketika mendesain sebuah struktur.

Bentuk lambung juga dapat disesuaikan untuk mengendalikan perilaku *rolling* dan *pitching* sehingga mengurangi persyaratan desain *bend-stiffener rise*, terutama untuk kondisi melintang. Pengoptimalan ini juga mengurangi kebutuhan akan persyaratan desain peralatan proses *topside* khusus seperti *baffle* untuk pemisah. Optimalisasi bentuk lambung yang disebutkan di atas dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat bagi kinerja operasional FPSO jangka panjang, namun hal ini harus dinilai secara hati-hati terhadap biaya fabrikasi dan biaya *life of field* (LOF) (Chakrabarti, 2005).

FPSO tidak diharuskan untuk bergerak maju, akibatnya resistensi tidak menjadi masalah. Namun, dalam model *weathervaning*, rasio kelangsingan lambung (rasio panjang terhadap balok) berfungsi untuk menyajikan daerah beban lingkungan yang ada dan membentuk gerakan alami pada pembebanan.

Rasio kelangsingan yang rendah menghasilkan gerakan yang lebih baik dengan perilaku tambat di atas lambung yang lebih pendek yang lebih besar. Lambung yang lebih pendek akan mengefisienkan baja dan pengurangan biaya titik rentang perbandingan perbandingan luas lempeng ke lambung adalah prospek yang bekerja karena FPSO, tidak seperti kapal tanker yang tidak dibatasi oleh syarat maksimum sehingga rasio 2:1 dapat dioptimalkan. Hal ini membantu desain struktur dan *seakeeping* dengan meningkatkan *freeboard*.

Identifikasi syarat utama untuk lambung pada FPSO mengenai ukuran lambung kapal dan ukuran fasilitas produksi harus dipertimbangkan oleh pemilik, operator, dan perancang FPSO dalam memilih unit yang sesuai untuk mengembangkan FPSO di lapangan.

Untuk FPSO yang dirancang khusus untuk pembuatan baru, ukuran lambung biasanya didorong oleh kebutuhan penyimpanan minyak mentah. Hal ini

juga dipengaruhi oleh waktu siklus kapal tanker setiap pembongkaran titik waktu siklus kapal tanker terdiri dari:

1. Waktu memuat di lapangan.
2. Waktu berlayar ke atau dari pelabuhan (termasuk penundaan cuaca *enroute*).
3. Durasi debit pelabuhan.
4. Menghubungkan atau memutuskan waktu untuk FPSO.
5. Menunggu waktu cuaca untuk mengatasi cuaca ekstrem. Hal ini tergantung pada tinggi gelombang dan ambang kecepatan angin untuk koneksi dan pemutusan.

Pengukuran lambung FPSO juga harus menyediakan kapasitas pemberat yang baik untuk memastikan rancangan pemberat yang memadai agar memberikan kinerja stabilitas yang diperlukan untuk performa *seakeeping*.

Umumnya, bentuk lambung konvensional dapat dirancang, dari pengalaman desain dan data yang memadai untuk memberikan kinerja gerakan yang baik dengan *down time* fasilitas produksi yang minim, serta fasilitas dengan gerak sensitif (desain *separator*, turbin gas, dll) yang efisien sehingga tidak memerlukan pemeriksaan rinci karakteristik gerak pada tahap desain awal.

Tujuan utama desain lambung pada FPSO adalah:

1. Keandalan

Desain lambung FPSO harus memperhitungkan fungsi FPSO yang lebih berat dibandingkan dengan kapal tanker. Pembebanan lambung yang meningkat akibat kondisi di lingkungan yang ekstrem dan penghindaran cuaca dan efek lingkungan *non-collinear* merupakan indikator yang penting. Oleh karena itu, mengenai kasus keselamatan, lingkungan dan ekonomi untuk desain lambung harus tepat dan memenuhi nilai keandalan yang mana FPSO diperlakukan sebagai instalasi lepas pantai dan bukan sebagai kapal tanker pada umumnya.

2. Kinerja

Kinerja diukur dalam hal uptime FPSO secara keseluruhan yang terdiri dari *uptime* fasilitas produksi dan waktu kerja sistem ekspor serta nilai ekonomi dari *downtime* cuaca ekstrem. Desain lambung (terutama melalui ukuran lambung) perlu meminimalkan *downtime* dengan menyediakan *platform* yang stabil untuk fasilitas produksi dan

penyimpanan *buffer* yang cukup untuk mencakup kemungkinan jarak tempuh kapal tanker.

3. Fleksibilitas untuk ekspansi

Desain lambung harus mengenali kemungkinan kebutuhan masa depan untuk mengembangkan sumur yang memerlukan *slot riser* tambahan dan mungkin modul ekstra.

4. Desain untuk operasi

Desain lambung juga harus mengenali inspeksi insitu khusus dan kebutuhan pemeliharaan FPSO untuk penggunaan jangka panjang. Tabel 2.1 berikut merupakan parameter desain lambung utama serta dependensinya.

Tabel 2. 1 Parameter Desain Lambung Utama dan Dependensinya

Parameter	Function of
<i>Hull steel weight</i>	<i>Length/depth ratio and size of hull</i>
<i>Deck space</i>	<i>Length and breadth</i>
<i>Stability</i>	<i>Breadth/length</i>
<i>Sea-keeping (Primary pitch)</i>	<i>Breadth/depth</i>
<i>Green water on deck</i>	<i>Freeboard</i>
<i>Bottom slamming forward</i>	<i>Ballast capacity</i>
<i>Bow wave impact</i>	<i>Bow fineness</i>

Sumber : (Paik & Thayambali, 2007)

Bobot keseluruhan perpindahan FPSO adalah fungsi berat baja berat dan bobot mati kargo minyak mentah. Biasanya berat baja lambung tidak termasuk *top side* adalah 13 sampai 16% perpindahan dan bobot mati sekitar 75% titik lambung kapal juga harus memiliki volume yang cukup untuk menampung penyimpanan minyak mentah dan tangki pemberat terpisah untuk mencapai jarak pemberat yang diperlukan dan menghindari pergerakan yang berarti. Kapasitas pemberat adalah 35% perpindahan.

Secara umum, panjang lambung FPSO adalah dimensi yang paling mahal dan harus dikurangi semaksimal mungkin, namun konsisten dengan pencapaian ruang dek yang memadai. Luas harus dikurangi untuk menghindari beban *mooring* tinggi dan stabilitas yang berlebihan yang dapat menyebabkan percepatan rol tinggi, dalam batasan yang diberlakukan oleh stabilitas dan ruang dek titik keselarasan melambung harus seimbang antara meminimalkan beban gelombang dan meminimalkan berat baja lambung.

Lambung FPSO berfungsi seperti balok dan deformasi di bidang vertikal (distribusi bobot dan *bouyancy* yang tidak merata) dan pembuatan gelombang. Hal ini diperlukan untuk mempertimbangkan nilai ekstrem dari kedua jenis penguatan untuk mendapatkan tegangan tarik dan tegangan tarik maksimum pada dek dan bagian bawah. Untuk FPSO, kondisi segel ekstrem akan menjadi beban penuh dalam tangki penyimpanan minyak mentah ditambah dengan gelombang yang mana panjang kapal dengan palangnya ditengah kapal. Pada Kondisi *hogging* yang ekstrem akan menjadi kondisi pemberat ditambah dengan gelombang kira-kira panjang kapal dengan puncaknya di atas kapal.

2.3 Konstruksi Dasar Ganda

Double bottom berarti alas berganda atau memiliki dasar ganda. Dasar ganda ini sendiri memiliki peranan penting terhadap kapal, seperti membantu stabilitas kapal, menambah kekuatan melintang kapal dan apabila kapal kandas yang menyebabkan kebocoran, masih ada dasar yang kedap air serta sebagai ruangan muatan cair, bahan bakar, balas, air tawar dll. Pada semua kapal penumpang dan kapal barang sebesar 500 GT dan lebih selain dari kapal tangki, alas ganda harus dipasang menerus dari sekat tubrukan ke sekat buritan (BKI, 2022b)

Double Bottom merupakan konstruksi paling bawah dari bagian kapal sehingga konstruksi harus kuat karena di samping adanya gaya tekan air ke atas, juga harus mampu menahan beban dari lambung dan geladak kapal. Daerah yang disebut alas ganda meliputi pelat alas, pelat alas dalam, pelat bilga, pelat tepi, penumpu tengah, penumpu samping, dan penegar.

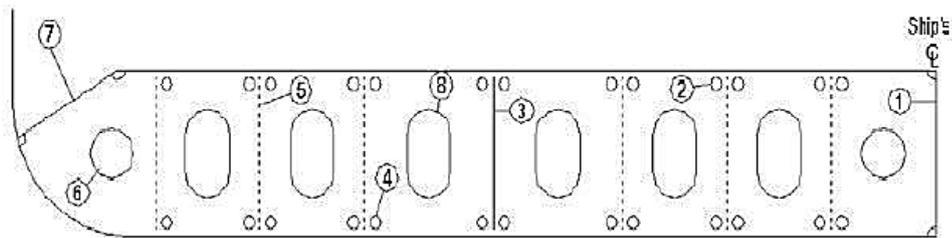
Double Bottom merupakan bagian dari konstruksi kapal yang di batas:

Bagian bawah	: Oleh kulit kapal bagian bawah (<i>bottom shell plating</i>)
Bagian atas	: Oleh plat dasar dalam (<i>inner bottom plating</i>)
Bagian samping	: Oleh lempeng samping (<i>Margin plate</i>)
Bagian samping	: Oleh sekat kedap air terdepan/sekat tubrukan
Bagian belakang	: Sekat kedap air paling belakang atau sering disebut sekat ceruk belakang (<i>after peak bulkhead</i>)

Konstruksi dasar berganda terdiri dari dua sistem konstruksi, yaitu konstruksi kerangka melintang dan konstruksi kerangka membujur. Dasar berganda kerangka melintang memiliki ciri-ciri:

- 1) Memiliki *wrang-wrang* penuh (*solid floor*) pada setiap gading di bawah kamar

mesin.

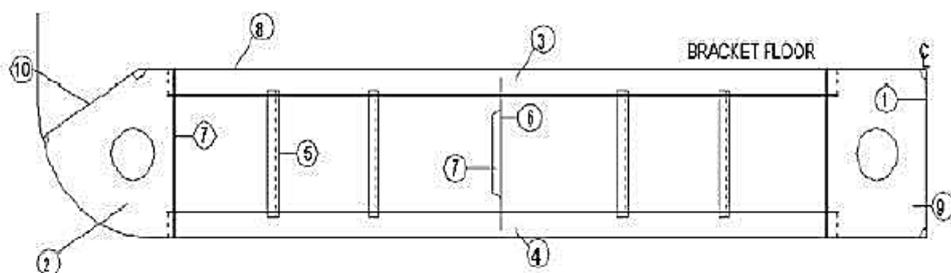


Gambar 2. 2 *Wrang* Alas Penuh pada Dasar Ganda dengan Sistem Konstruksi Melintang

Sumber : (Ali Tan, 2013)

Sistem konstruksi dasar ganda melintang memiliki beberapa bagian. Bagian-bagian yang dimaksud dijelaskan pada Gambar 2.2. Keterangan yang ada pada Gambar 2.2 adalah sebagai berikut:

1. Penumpu tengah
 2. Lubang udara
 3. Penumpu sisi terputus
 4. Lubang jalan air
 5. Penegar wrang
 6. Lubang peringan
 7. Pelat margin
 8. Lubang orang
- 2) Jarak antara *wrang* penuh (*solid floor*) tidak boleh lebih dari 3,05 m dan diselingi *wrang* terbuka.
- 3) *Wrang* penuh yang melintang dari penyanggah tengah hingga lempeng samping pada setiap sisinya diberi lubang peringan.
- 4) Penyanggah tengah dan lempeng samping tidak terputus.



Gambar 2.3 *Wrang* Alas Terbuka pada Alas Ganda dengan Sistem Konstruksi Melintang

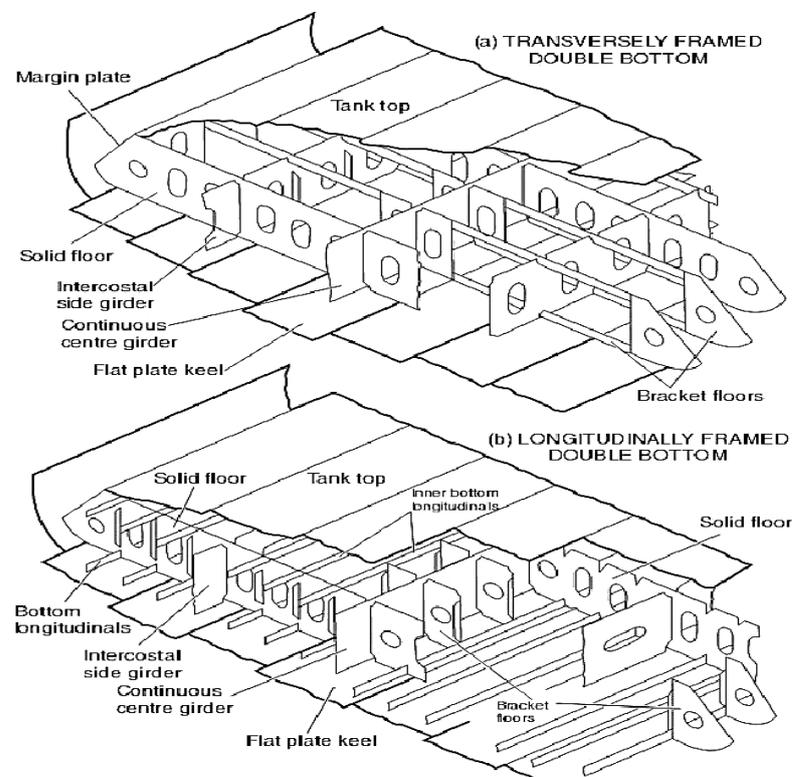
Sumber: Ali Tan, 2013

Wrang terbuka dipasang pada tiap-tiap jarak gading di antara *wrang* alas penuh seperti pada Gambar 2.3. Konstruksi *wrang* alas terbuka terdiri dari gading alas pada pelat alas dan gading balik pada pelat alas tengah, penumpu samping dan pelat tepi untuk menghubungkan gading balik dan gading alas

Menurut SOLAS 74 mengenai dasar berganda Bab II-I Peraturan 10 untuk kapal yang memiliki panjang 76 m (249 kaki) atau lebih harus dipasang dasar berganda dari sekat ceruk haluan sampai sekat ceruk buritan (Lie, 2016). Berdasarkan PM No. 44 Tahun 2021 tentang stabilitas kapal, kapal bangunan baru dengan jenis kapal tangki minyak (*oil tanker*) dengan ukuran DWT 600 atau lebih harus dilengkapi dasar ganda. Konstruksi dasar ganda (*double bottom*) dipasang di kapal dengan tujuan:

- 1) Penahan konstruksi alas kapal pada saat terjadi kebocoran akibat kandas
- 2) Kekuatan melintang kapal
- 3) Penambah daya apung dan stabilitas kapal.

Dasar ganda dapat digunakan untuk menyimpan bermacam-macam cairan sehingga membutuhkan *wrang* kedap. Fungsi *wrang* kedap ini untuk membagi tangki di dasar kapal ke dalam bagian-bagian tersendiri secara memanjang dan juga untuk membatasi ruang pemisah.



Gambar 2. 4 Sistem Konstruksi Memanjang
Sumber : (Ali, 2013)

Kerangka sistem konstruksi dasar ganda memanjang terdiri atas *wrang* penumpu tengah, penumpu samping, pembujur alas dan pembujur alas dalam seperti pada Gambar 2.4. *Wrang-wrang* pada alas ganda dengan sistem memanjang terdiri *wrang* alas penuh atau juga disebut pelintang alas yang diletakkan tidak lebih dari lima kali jarak gading. Selain dipasang dengan jarak tersebut di atas *wrang* alas penuh atau pelintang alas harus dipasang yaitu dibawah pondasi ketel, di bawah sekat melintang dibawah topang ruang muat dan pada alas ganda pada kamar mesin, pembujur alas dan pembujur alas dalam diletakkan atau dipasang secara memanjang dan menembus *wrang* melalui lubang-lubang pada *wrang*

Alas ganda pada sistem konstruksi campuran diberlakukan sama dengan alas ganda dengan sistem konstruksi memanjang, di mana pada bagian memanjang terdapat:

1. Penumpu tengah
2. Penumpu samping
3. Pembujur alas
4. Pembujur alas dalam

Sedangkan pada bagian yang melintang terdapat:

1. Pelintang alas
2. *Wrang* kedap air

2.4 Tinggi Dasar Ganda menurut BKI dan IACS

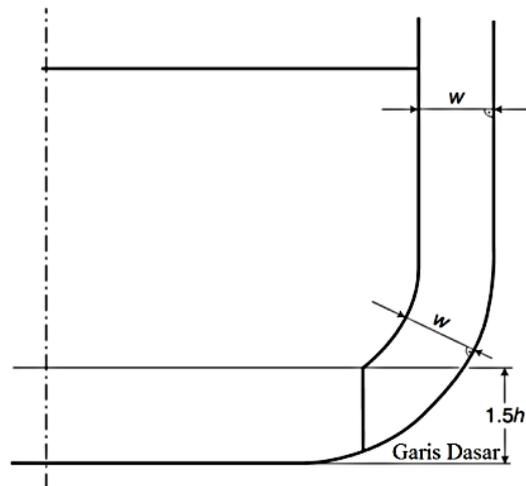
Tinggi dasar ganda (*double bottom*) pada kapal tergantung pada klasifikasi yang diikutinya. Jika alas ganda dipersyaratkan harus dipasang, alas dalam harus diteruskan ke sisi kapal sedemikian rupa untuk melindungi bagian alas sampai lengkung bilga (BKI, 2019). Perlindungan tersebut akan dipertimbangkan sebagai keamanan jika alas dalam tidak lebih rendah pada bagian penampang manapun selain bidang sejajar dengan garis lunas dan yang terletak tidak boleh kurang dari jarak vertikal (*h*) yang diukur dari garis lunas, seperti pada Persamaan (2.1) sebagai berikut:

$$h = \frac{B}{20} \quad (2.1)$$

Namun, nilai *h* tidak boleh kurang dari 760 mm dan tidak lebih dari 2000 mm.

Untuk pengangkut curah, dasar ganda harus dipasang memanjang dari sekat tabrakan ke sekat puncak buritan, sejauh hal ini dapat dilakukan dan

kompatibel dengan desain dan pengerjaan kapal yang tepat (Gambar 2.5). Untuk kapal tanker minyak, *double bottom* harus dipasang untuk melindungi wilayah kargo dan ruang pompa (BKI, 2022).



Gambar 2. 5 Garis Batas Tangki Muat
Sumber : (BKI, 2022a)

Setiap kapal tanker harus dilengkapi dengan tangki dan ruang alas ganda, ruang sisi ganda. Dasar ganda, tangki dan ruang sisi ganda melindungi tangki atau ruang muatan dan tidak boleh digunakan untuk muatan minyak (IACS, 2014). Jika *double bottom* perlu dipasang, *inner bottom* harus dilanjutkan ke sisi kapal sedemikian rupa untuk melindungi *bottom* dari pergantian bilga di area di mana ruang *hopper* atau *double side* yang tidak disediakan. Jika tidak ditentukan, ketinggian *double bottom* tidak boleh kurang dari yang lebih rendah daripada Persamaan 2.2 berikut:

$$h = \frac{B}{15} \quad (2.2)$$

Di mana:

h = Tinggi dasar ganda (m)

B = Lebar kapal (m)

Namun, nilai h tidak boleh kurang dari 100 mm.

2.5 Matriks Kekakuan (*Stiffener*)

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 (Zulfikar and Zakki, 2015). 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 (Ardianus, dkk, 2017).

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 (Harahap, 2016)

Persamaan 2.3 menunjukkan persamaan antara aksi dan perpindahan elemen batang. Di mana aksi pada ujung batang disebabkan oleh perpindahan ujung batang dan aksi pada titik ujung batang akibat satu satuan perpindahan pada ujung batang.

$$[S_M][D_M] = [A_M] \quad (2.3)$$

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 2.4 di mana 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 (Harahap, 2016).

$$\begin{bmatrix} \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.6 Sistem Konstruksi Kapal

Dalam 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*) (Sofi'i and Djaja, 2018).

a. 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 bagian 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 girder*
- c. Pada geladak : *Deck girder* atau *carling*

b. 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*).

c. 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 untuk sisinya dibuat menurut sistem melintang. Dengan demikian, 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*), baik itu Biro Klasifikasi Indonesia maupun IACS, sisi-sisi kapal tunduk pada ketentuan yang

berlaku untuk aturan sistem melintang untuk kapal, sedangkan alas dan geladaknya mengikuti ketentuan yang berlaku untuk aturan sistem membujur yang ditetapkan untuk, untuk hal-hal yang memang diperlukan secara terpisah.

2.7 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. Kasus muatan kapal 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. 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. Beban-beban pada konstruksi kapal dapat dikelompokkan sesuai dengan karakteristik beban-beban yang bekerja pada konstruksi kapal tersebut. 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. 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.

Fasilitas produksi biasanya terletak pada dek produksi dan pada umumnya diposisikan 2.5 m di atas dek utama. Hal ini bertujuan untuk meminimalisir *green water* (kejadian dimana geladak pada haluan kapal tersentuh oleh permukaan air

laut) dan untuk meminimalisir efek yang terjadi ledakan atau api yang mengenai *module* agar tidak banyak memengaruhi lambung. *Topside Module* merupakan struktur yang berada di atas FPSO Terdapat beberapa module di atas *deck* FPSO, diantaranya adalah *export compressors module*, *gas processing module*, *gas cooling module*, *utility module*, *oil separation module*, dan lain-lain. Untuk kapal FSO beban yang terdapat pada bagian dek kapal hanya beban geladak cuaca (UKOOA, 2002).

Beban dari struktur dan peralatan kapal FPSO terdiri dari komponen statis dan dinamis. Beban statis dihasilkan dari gaya gravitasi. Beban dinamis selanjutnya dapat diuraikan menjadi komponen statis dan inersia. Beban statik dihasilkan dari gravitasi, dengan mempertimbangkan kemiringan *roll* dan *pitch* sesaat kapal. Beban inersia dihasilkan dari percepatan lokal sesaat dari struktur dan peralatan kapal penerangan yang disebabkan oleh gerakan kapal dalam enam derajat kebebasan. Beban statis dan dinamis dari peralatan dan fasilitas sisi atas harus diterapkan ke struktur pendukung modul sisi atas yang terletak di dek utama instalasi (ABS, 2004).

a. Beban Geladak Cuaca

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak dibelakang 0,15 L dari garis tegak haluan (FP) (BKI, 2022b). Di mana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.5.

$$P_D = P_0 \frac{20 \cdot T}{(10 + z - T) H} C_D \quad (2.5)$$

Dengan P_0 terdiri dari P_{O1} untuk arah gelombang searah atau berlawanan arah kapal dan P_{O2} untuk arah gelombang melintang arah kapal yang dapat dihitung seperti pada Persamaan 2.6 dan Persamaan 2.7.

$$P_{O1} = 2,1 \cdot (C_B + 0,7) \cdot C_D \cdot C_L \cdot f \quad (2.6)$$

$$P_{O2} = 2,6 \cdot (C_B + 0,7) \cdot C_D \cdot C_L \quad (2.7)$$

Di mana :

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)

b. Beban Luar Sisi Kapal

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang timbul karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal (BKI, 2022b). 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 untuk arah gelombang searah atau berlawanan dengan arah maju kapal dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.8 dan 2.9.

$$P_{S1} = 10(T - z) + P_O \cdot C_F \left(1 + \frac{z}{T}\right) a \quad (2.8)$$

$$P_{S2} = P_O \cdot C_F \quad (2.9)$$

Di mana,

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)

c. Beban Luar Alas Kapal

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air yang disebabkan oleh kapal (BKI, 2022b). Adapun beban luar alas kapal dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.10 berdasarkan aturan BKI (Biro Klasifikasi Indonesia).

$$P_B = 10 \cdot T + P_O \cdot C_F \quad (2.10)$$

Di mana,

P_B = Beban luar alas kapal (kN/m²)

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

C_F = Faktor distribusi

T = Sarat kapal (m)

d. **Beban Geladak Muatan Kapal (*Load on Cargo Decks*)**

Beban geladak muatan merupakan beban yang ditimbulkan karena adanya muatan pada geladak (BKI, 2022b). Berdasarkan Biro Klasifikasi Indonesia, beban geladak muatan dapat dihitung dengan Persamaan 2.11.

$$P_L = P_C(1 + a_v) \quad (2.11)$$

Dimana:

P_L = Beban geladak muatan (N/mm²)

P_C = Beban statik kapal (N/mm²)

a_v = Faktor distribusi = C_D

T = Sarat kapal (m)

e. **Beban Alas Dalam Kapal (*External Load on The Ship's Bottom*)**

Beban alas dalam kapal merupakan beban yang terjadi karena adanya tekanan beban dari dalam kapal (BKI, 2022b). Berdasarkan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) beban alas dalam kapal ini dapat dihitung dengan Persamaan 2.12.

$$P_i = 9,81 \times \left(\frac{G}{V}\right) \times h \times (1 + a_v) \quad (2.12)$$

Dimana:

G = Massa cargo di ruang palka (Ton)

V = Volume Ruang (m³) (Tidak termasuk palka)

h = Ketinggian titik tertinggi kargo di atas dasar dalam (m), dengan asumsi palka

a_v = Faktor distribusi = C_D

2.8 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 menghasilkan tegangan aksial dan tegangan lentur yang menyebabkan kelelahan pada struktur kapal.

2.9 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 2.13:

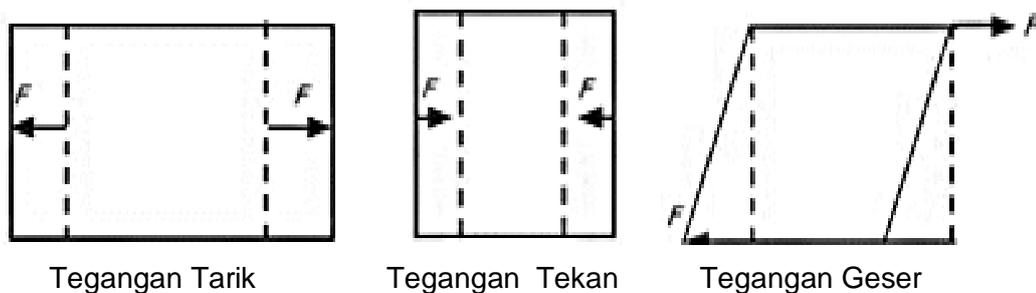
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.13)$$

Dimana :

σ = tegangan (N/mm²)

F = gaya (N)

A = luas penampang (mm²)



Gambar 2. 6 Tegangan Normal

Gambar 2.6 menunjukkan tegangan normal yang dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser. Di mana satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$.

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 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 2.14 dan dapat dilihat pada Gambar 2.7.

$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (2.14)$$

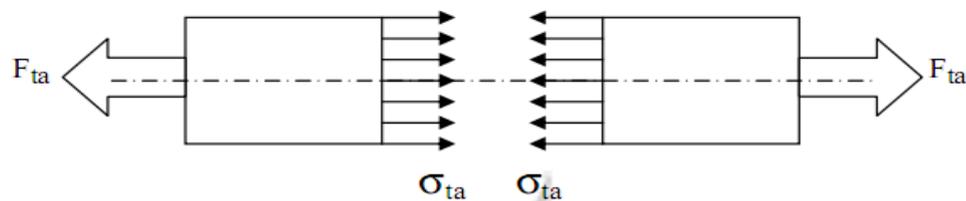
Dimana :

σ_{tr} = Tegangan tarik (N/mm^2)

F = Gaya tarik (N)

A = Luas penampang (mm^2)

$$\sigma_{ta} = F_{ta} / A \quad \text{dan} \quad \varepsilon_{ta} = \Delta L / L$$

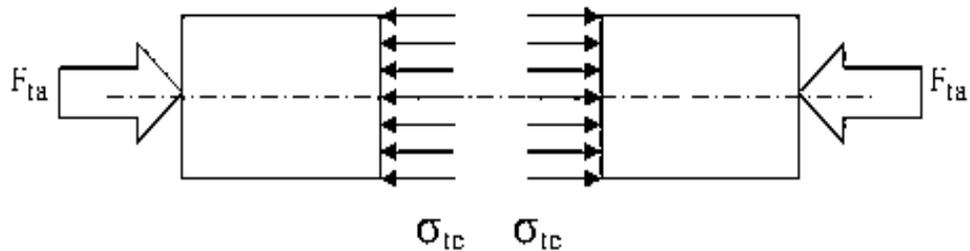


Gambar 2.7 Tegangan-Tarik

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.



Gambar 2.8 Tegangan-Tekan

Gambar 2.8 menunjukkan rasio/perbandingan antara perpendekan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan ε_{ta} secara matematik. Selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.15:

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (2.15)$$

Dimana :

σ_{te} = Tegangan tekan (N/mm^2)

F_{ta} = Gaya tekan (N)

A = Luas penampang (mm^2)

2.12 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/mm^2). 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). Dengan demikian, 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 2.16. Persamaan 2.16 menunjukkan tegangan geser yang diakibatkan oleh kerja dari dua gaya yang saling berlawanan arah terhadap satuan luas bidang penampang tahanan elemen struktur. Regangan geser tersebut searah dengan bekerjanya gaya.

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.16)$$

Dimana :

τ = Tegangan geser (N/mm²)

P = Gaya geser atau gaya lintang (N)

A = Luas penampang (mm²)

2.13 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.

2.14 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.

2.15 Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut diatur dalam AISC (*American Petroleum Institute Recommended Practice 2A*, 1989) dan API (*Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tanker*, 2014). 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.

Modulus penampang tidak boleh kurang dari nilai formula yang dikeluarkan oleh IACS (*International Association of Classification Societies*) (2016), di mana untuk kapal dengan panjang tidak kurang dari 150 m untuk modulus penampang ijin digunakan Persamaan 2.17.

$$S_p = \frac{M_t}{\sigma_p} \times 10^3 \text{ m}^3 \quad (2.17)$$

Di mana S_p adalah modulus penampang ijin, M_t adalah momen lentur total, σ_p adalah tegangan lentur ijin sebesar $175/k$ (N/mm^2) dengan nilai k sebesar 1,0 (*mild steel*), 0,93 untuk *grade* AH27, k sebesar 0,78 untuk *Grade* AH32, k sebesar 0,72 untuk *Grade* AH36 dan k sebesar 0,68 untuk *Grade* AH40.

Inersia ijin bagian *midship* tidak boleh kurang dari nilai formula yang dikeluarkan oleh IACS (*International Association of Classification Societies*) (2016) untuk kapal dengan panjang tidak kurang dari 150 m dinyatakan dalam persamaan 2.18 berikut:

$$I_{min} = 3C^3 B(C_b + 0,7), \text{ m}^4 \quad (2.18)$$

2.16 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 2.19.

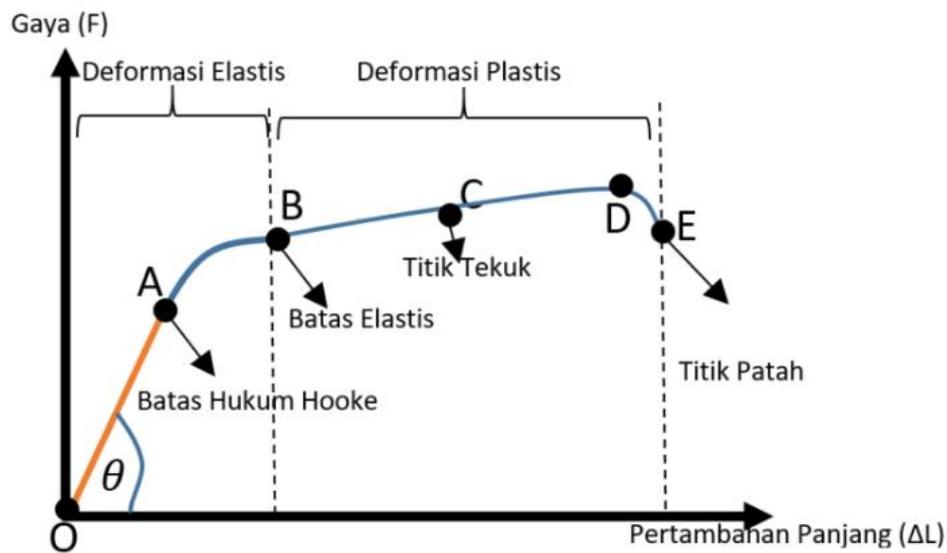
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.19)$$

Dimana :

ε = Regangan

ΔL = Pertambahan panjang (m)

L = Panjang mula-mula (m)



Gambar 2.9 Hubungan antara Tegangan dan Regangan
 Sumber: (Utami, 2016)

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.9, 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. Di luar 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 “no” 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 di mana suatu bahan apabila diberi suatu bahan memasuki fase peralihan deformasi elastis ke plastis. Titik luluh merupakan 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 2.20 dan 2.21:

$$E = \frac{F \cdot L}{A \cdot \Delta L} \quad (2.20)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.21)$$

Dimana :

E = *Modulus Young* (N/mm²)

F = Gaya (N)

A = Luas Penampang (mm²)

L = Panjang mula-mula (mm)

ΔL = Pertambahan panjang/pendek (mm)

Tabel 2.2 *Modulus Young* pada Material

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

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

Young beberapa jenis bahan dapat dilihat pada Tabel 2.2 di atas. Di mana satuan SI untuk E adalah pascal (Pa) atau N/mm^2 .

2.17 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 2.22 berikut:

$$\delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.22)$$

Dimana:

- σ = Tegangan yang timbul pada material (N/mm^2)
- ε = Regangan yang timbul pada material
- P = 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)

2.18 *Single Point Constrained (SPC)*

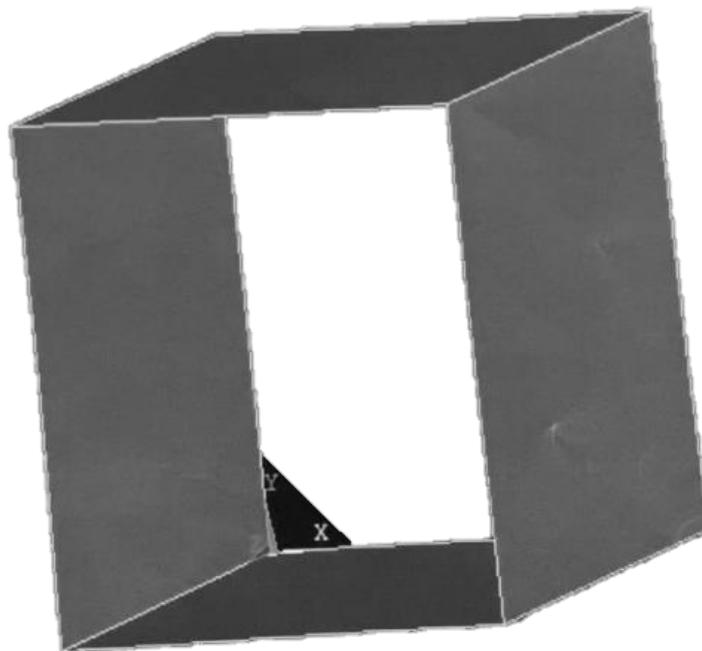
Ada dua jenis *nodal constraints*: *single-point* dan *multipoint*. *Single point constraint* membatasi satu atau beberapa DOF dari gerakan tertentu (misalnya nol perpindahan ke segala arah, nol gerakan vertikal tetapi bebas bergerak secara horizontal, dll) pada sebuah titik. Untuk batasan *single point*, 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).

2.19 *Multiple Point Constrained (MPC)*

Sebagai contoh sebuah box girder berukuran 5000 x 5000 x 5000 mm dengan material pelat $t = 10$ mm diketahui material propertis dengan Modulus Elastis = 200000 N/mm^2 , *Poison Ratio* = 0,3 dan densitas = $7,8 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^2$ adapun bentuk box girder dapat dilihat seperti gambar yang telah didesain di ANSYS.

Gambar 2.10 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)* (Muiz Alie et al., 2021).



Gambar 2.10 *Box Girder* Tanpa Elemen di Tengah Batang

2.20 Kekuatan Batas FPSO (*Ultimate Strength*)

Kekuatan struktur konstruksi merupakan salah satu aspek teknis yang turut mempengaruhi tingkat keselamatan kapal baik di kondisi laut yang tenang, bergelombang bahkan di atas dok. 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. Tolak ukur yang dapat menjamin kekuatan struktur kapal adalah tegangan (*stress*).

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

Kekuatan-batas kapal tanker (M_u) harus dihitung dengan metode *NLFEA* atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria seperti Persamaan 2.23 di bawah ini (DNV GL, 2017b).

$$M_T \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (2.23)$$

Di mana,

M_T = Momen lentur total vertikal (N.mm)

M_U = Momen maksimum kekuatan batas (N.mm)

γ_R = Faktor keamanan kekuatan-batas lentur vertikal

Berdasarkan teori balok, tegangan lentur (σ) pada penampang balok yang mengalami momen lentur dapat dihitung dengan persamaan 2.24:

$$\sigma = \frac{M z}{I} \quad (2.24)$$

Di mana,

M = Momen lentur

I = Inersia

Z = Jarak dari sumbu netral dari penampang balok ke lokasi tegangan lentur pada arah tinggi dari balok

Tegangan lentur maksimum (σ_{\max}) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.25 sebagai berikut:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad (2.25)$$

Di mana S adalah modulus penampang.

Modulus penampang (S), untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu pada Persamaan 2.26 dan 2.27:

$$S_d = \frac{I}{z_d}, \text{ untuk bagian } deck \quad (2.26)$$

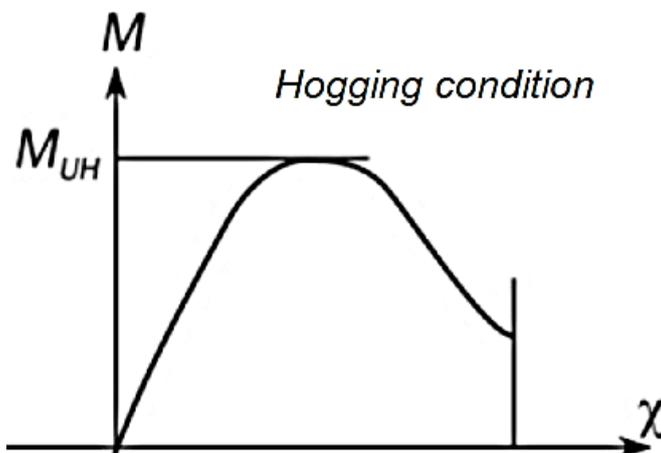
$$S_b = \frac{I}{z_b}, \text{ untuk bagian } bottom \quad (2.27)$$

Di mana S_d dan S_b adalah potongan penampang vertikal pada bagian *deck* dan *bottom* kapal, z_d dan z_b merupakan jarak 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* mengalami tarik dan *bottom* mengalami tekan pada saat kondisi *hogging*. Kekuatan-batas akibat momen lentur untuk kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.28 dan 2.29 sebagai berikut:

$$M_{UH} = S_d \sigma_{ud}, \text{ untuk } deck \quad (2.28)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub}, \text{ untuk } bottom \quad (2.29)$$



Gambar 2. 11 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan
Sumber : (DNV GL, 2017a)

2.21 Metode NLFEA

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 *premesud 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 FPSO, baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat kandas atau tubrukan pada penelitian ini, yaitu metode *Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA)*.

Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA) merupakan salah satu metode elemen hingga yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur kapal di mana metode ini direkomendasikan oleh badan klasifikasi nasional hingga internasional, di samping metode lain yang digunakan, seperti teori balok, metode *premesud stress distribution* (Hughes, 2010).

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-linier untuk berbagai tingkat pembebanan. Namun, kualitas hasil yang diperoleh sangat bergantung pada kepatutan teknik idealisasi struktural yang digunakan (geometri, sifat material, ketidaksempurnaan struktural awal); kesetiaan diskritisasi (digunakan jenis elemen hingga, kepadatan mesh); dan sejauh mana model yang dianalisis (model struktural lengkap atau parsial). Secara umum, dapat disimpulkan bahwa sejumlah besar waktu, pengetahuan dan pengalaman masih diperlukan untuk menyelesaikan seluruh prosedur analisis NLFEM secara sukses (terutama untuk pra/pasca pemrosesan). Oleh karena itu, pemanfaatan NLFEM dalam praktik analisis kekuatan ultimate girder lambung saat ini sebagian besar dikurangi menjadi analisis model parsial untuk tujuan verifikasi metode analisis alternatif, atau untuk analisis langka dari model lengkap dan terperinci untuk merekonstruksi keadaan dan mengidentifikasi sebab-sebab keruntuhan struktural yang nyata terjadi selama eksploitasi strukturstruktur tertentu. 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:

a. Tipe metode NLFEA

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

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

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

b. Algoritma *iterative solution*

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

c. Metode *arc-length*

Metode *arc-length* cocok untuk solusi kesetimbangan statis nonlinier masalah tidak stabil. Penerapan metode busur-panjang melibatkan penelusuran jalur yang kompleks dalam respon beban-perpindahan ke dalam sistem *buckling/post buckling*. Metode *arc-length* menggunakan metode *Crisfield* untuk mencegah fluktuasi ukuran langkah selama iterasi ekuilibrium. Diasumsikan bahwa semua besaran beban dapat dikontrol oleh parameter skalar tunggal (yaitu, *total load factor*).

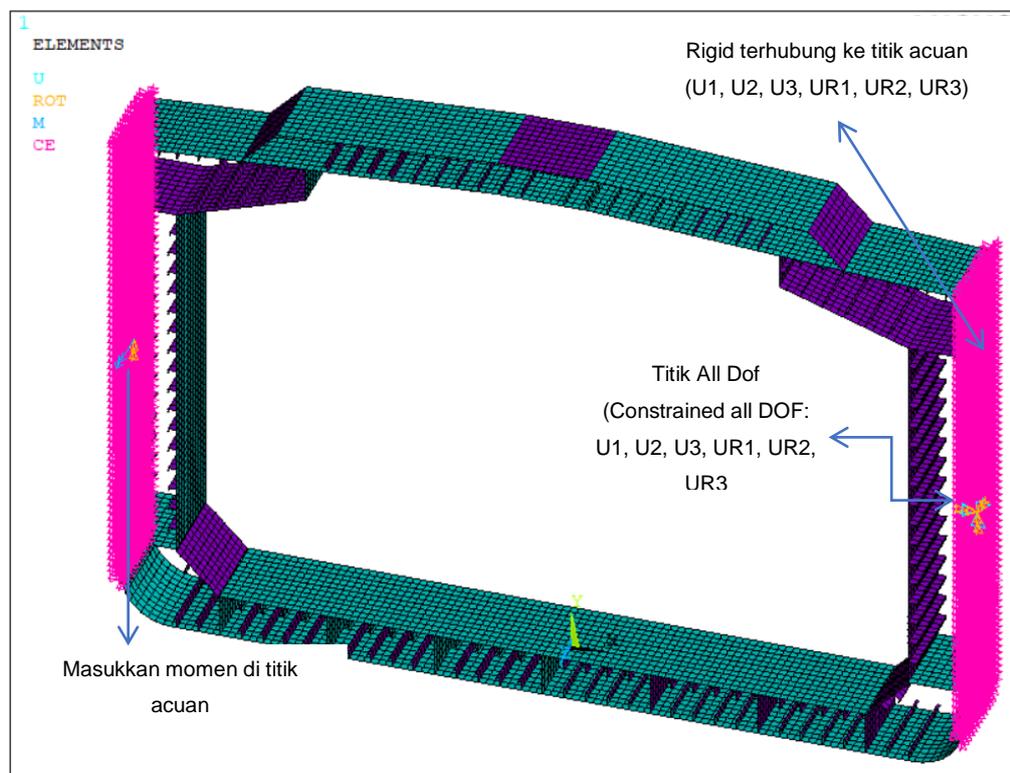
d. Proses peningkatan beban

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.

e. 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 di mana kedua ujung model diberikan *rigid link* seperti pada Gambar 2.12. Di mana dengan menggunakan kecepatan akselerasi dan damping faktro akan diperoleh peningkatan kelengkungan. Hal demikian dilakukan dengan memberikan beban momen pada kedua titik acuan. Gambar 2.12 menunjukkan pemberian *rigid link* pada kapal FPSO yang tidak memiliki penampang tengah untuk pembebanan kekuatan melintang pada kapal tersebut.



Gambar 2.12 *Rigid Link* Kekuatan Melintang

Sumber : Hasil Olahan, 2023

f. Ketidaktepatan Geometri

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 geometri tersebut.

g. 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.

h. 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 dan memerlukan waktu yang lebih lama. Dalam penelitian ini, ukuran *meshing* yang digunakan sebesar 300 mm. Metode *Non Linear Finite Element Analysis* (NLFEA).