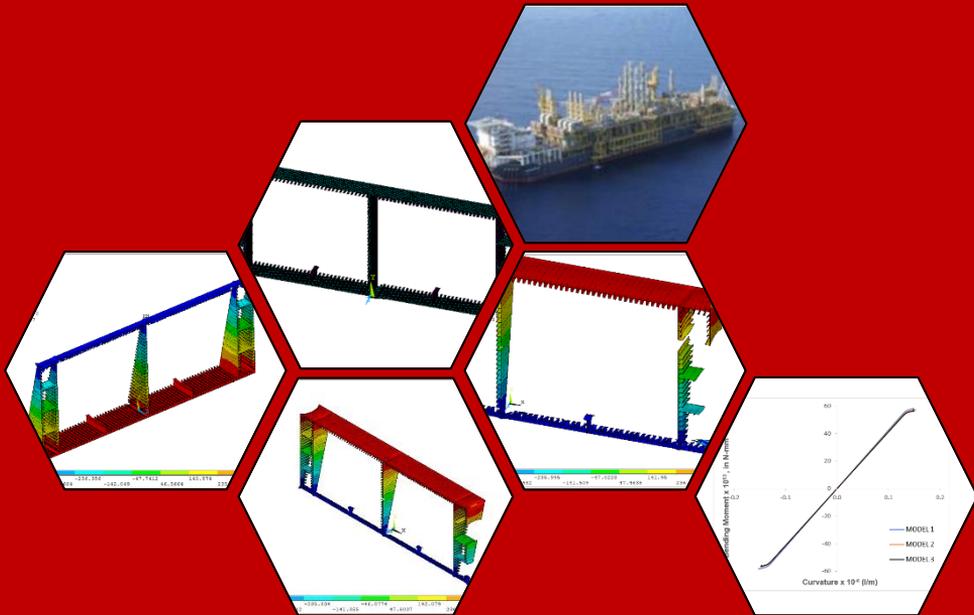


# ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR FPSO PASCA COLLISION DISEBABKAN *BULBOUS BOW*



HALIZAH BAHAR

D081 20 1059



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024

**ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR FPSO PASCA *COLLISION*  
DISEBABKAN *BULBOUS BOW***

**HALIZAH BAHAR**

**D081201059**



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

**ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR FPSO PASCA *COLLISION*  
DISEBABKAN *BULBOUS BOW***

**HALIZAH BAHAR**

**D081 20 1059**

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Teknik Kelautan

pada

Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

Gowa

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

**ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR FPSO PASCA COLLISION  
DISEBABKAN BULBOUS BOW**

**HALIZAH BAHAR**  
**D081201059**

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana pada tanggal 12 Juli 2024  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan  
pada



Mengesahkan:  
Pembimbing Utama,

**Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.**

**NIP. 19750608 200501 1 003**

Mengetahui:  
Ketua Departemen,

**Dr. Ir. Chaerul Paotonan, ST., MT.**

**NIP. 19750605 200212 1 003**

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "**Analisis Kekuatan Membujur FPSO Pasca *Collision* disebabkan *Bulbous Bow***" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

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

Gowa, 10 Juli 2024



Halizah Bahar  
D081201059

## UCAPAN TERIMA KASIH

### Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah Robbil'Aalamiin, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan kemudahan yang telah diberikan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi berjudul "Analisis Kekuatan Membujur FPSO Pasca *Collision* disebabkan *Bulbous Bow*" dengan baik yang sekaligus menjadi syarat untuk menyelesaikan studi di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Sholawat serta salam senantiasa tercurah kepada Rasulullah SAW, yang telah membimbing umatnya dari zaman kegelapan menuju zaman yang terang-benderang.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak menemukan hambatan dan tantangan. Namun, berkat arahan, bimbingan, serta bantuan baik secara material maupun spiritual dari berbagai pihak, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus dan terdalam kepada ayah dan ibu tercinta, **Baharuddin, BR** dan **Darni**. Mereka adalah orang tua yang luar biasa, selalu menjadi penyemangat dan tak henti-hentinya memberikan kasih sayang serta motivasi. Berkat doa dan dukungan mereka, penulis bisa berada di titik ini. Semoga Allah SWT senantiasa menjaga ayah dan ibu dalam kebaikan dan kemudahan, Aamiin.

Dengan segala kerendahan hati, penulis juga ingin menyampaikan terima kasih yang tulus dan sebesar-besarnya kepada Bapak **Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D** selaku dosen pembimbing, atas bimbingan dan bantuannya dari awal hingga akhir penyusunan skripsi ini. Tidak lupa pula, penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak **Ir. Juswan M.T** dan Bapak **Dr. Eng. Firman Husain, ST., MT.** selaku dosen penguji, atas masukan dan saran yang diberikan untuk perbaikan skripsi ini.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada:

1. Bapak **Dr. Chairul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
2. Bapak **Dr. Eng. Achmad Yasir Baeda, ST., MT.** selaku Penasehat Akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan, sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik.
3. Seluruh **Dosen Departemen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu pengetahuan serta pengalaman berharga selama masa perkuliahan.
4. **Staf Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan** yang telah banyak membantu segala aktivitas administrasi, baik selama perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini.
5. Sahabat-sahabat **Calon Ibu (Silfi, Suci, Imma, Ninis, Caca, Nadia, dan Wina)**. Mereka adalah teman-teman yang selalu menyemangati dan menemani penulis dalam segala kondisi, baik senang maupun susah. Entah saat penulis merasa tertekan dengan tugas-tugas kuliah, atau ketika penulis sedang bingung

- memikirkan masa depan, mereka selalu memberi dukungan dan motivasi. Terkadang di sela-sela kesibukan, kami masih menyempatkan diri untuk berkumpul, berbagi cerita, dan bercanda. Penulis merasa sangat beruntung memiliki sahabat-sahabat seperti mereka. Kehadiran mereka telah mewarnai hari-hari penulis selama menjalani masa-masa perkuliahan di Teknik Kelautan. Semoga persahabatan ini akan terus terjalin, bahkan setelah kami lulus nanti.
6. Teman-teman **OSAREL 2020** yang selalu memberikan semangat kepada penulis. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada **Alumni Labo OSAREL** yang selalu bersedia memberikan pengarahan.
  7. Seluruh pihak yang turut serta dalam penyelesaian pendidikan, penelitian, dan penyusunan skripsi penulis, meskipun tidak dapat disebutkan satu per satu, penulis ucapkan terima kasih yang tulus.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka menerima kritik dan saran yang bersifat membangun dari berbagai pihak. Masukan-masukan tersebut diharapkan dapat menyempurnakan kualitas skripsi ini.

Akhirnya, hanya kepada Allah SWT penulis memohon ridha-Nya. Penulis berharap segala dukungan serta bantuan yang diberikan oleh semua pihak akan mendapat pahala yang berlipat ganda di sisi Allah SWT. Penulis berharap karya ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, serta berguna bagi para pembaca dan penulis pada khususnya, Aamiin.

**Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh**

Penulis,

Halizah Bahar

## ABSTRAK

HALIZAH BAHAR. **Analisis Kekuatan Membujur FPSO Pasca Collision disebabkan *Bulbous Bow*** (dibimbing oleh Muhammad Zubair Muis Alie).

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) menjadi salah satu konsep yang lebih tepat untuk kondisi perairan laut dalam. FPSO mempunyai kemampuan untuk menyimpan dan mendistribusikan minyak ke kapal pengangkut minyak (*Shuttle Tanker*) dan kemudian minyak didistribusikan ke kilang-kilang minyak yang tersedia. Dalam operasinya, kemungkinan terjadinya tabrakan selalu ada dan konsekuensi dari tabrakan tersebut bisa sangat parah. Tabrakan kapal merupakan salah satu ancaman utama saat kapal beroperasi, terutama untuk FPSO. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan membujur kapal FPSO yang mengalami kerusakan setelah tubrukan yang disebabkan oleh *bulbous bow*. Analisis kekuatan membujur dilakukan dengan menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA). Kerusakan akibat tubrukan dimodelkan dengan menghilangkan semua elemen pelat dan *stiffener* pada area kerusakan. Objek penelitian analisa hanya dilakukan pada bagian *midship* dengan satu jarak gading, sementara ketidaksempurnaan awal, retak, dan cacat pengelasan diabaikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai kekuatan pada setiap skenario kerusakan akibat tubrukan. Pada kondisi utuh kapal FPSO model 1, kekuatan batas momen lenturnya adalah  $5,80 \times 10^{13}$  Nmm pada kondisi *hogging* dan  $-5,82 \times 10^{13}$  Nmm pada kondisi *sagging*. Pada kondisi kerusakan kapal FPSO model 2, kekuatan batas momen lenturnya berkurang menjadi  $5,71 \times 10^{13}$  Nmm pada kondisi *hogging* dan  $-5,68 \times 10^{13}$  Nmm pada kondisi *sagging*. Sementara pada kondisi kerusakan kapal FPSO model 3, kekuatan batas momen lenturnya menurun lagi menjadi  $5,64 \times 10^{13}$  Nmm pada kondisi *hogging* dan  $-5,63 \times 10^{13}$  Nmm pada kondisi *sagging*. Perubahan bentuk dari FPSO untuk kondisi *intact* dan kondisi kerusakan dalam kondisi *hogging* dan *sagging* juga dipaparkan di penelitian ini.

Kata Kunci: FPSO, Penampang FPSO, *bulbous bow*, tubrukan, NLFEA

## ABSTRACT

HALIZAH BAHAR. **Analysis of Longitudinal Strength of FPSO After Collision due to Bulbous Bow** (supervised by Muhammad Zubair Muis Alie).

FPSO (Floating Production Storage and Offloading) has become one of the more suitable concepts for deep water conditions. FPSO has the capability to store and distribute oil to tanker/shuttle tanker and then it is distributed to available oil refineries. During its operation, the possibility of a collision is always happen, and the consequences of such a collision can be severe. Ship collision is one of the major threats when the ship is under operation, especially for FPSO. The objective of the present study is to determine the longitudinal strength on FPSO due to collision damage caused by a bulbous bow. The longitudinal strength analysis is performed using the Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA). The collision damage is modeled by removing all plate and stiffener elements in the damaged area. The main target of the object is only carried out on the midship section with one frame space. While initial imperfections, cracks, and welding defects are neglected. It is found that there is a decrease in the ultimate strength for each collision damage scenario. In the intact condition of the FPSO model 1, the ultimate bending moment capacity is  $5,80 \times 10^{13}$  Nmm in the hogging condition and  $-5,82 \times 10^{13}$  Nmm in the sagging condition. In the damaged condition of the FPSO model 2, the ultimate bending moment capacity is reduced to  $5,71 \times 10^{13}$  Nmm in the hogging condition and  $-5,68 \times 10^{13}$  Nmm in the sagging condition. Meanwhile, in the damaged condition of the FPSO model 3, the ultimate bending moment capacity also decreases to  $5,64 \times 10^{13}$  Nmm in the hogging condition and  $-5,63 \times 10^{13}$  Nmm in sagging condition. Deformation of the FPSO for intact and collision damages under hogging and sagging conditions are also plotted in this study.

Keywords: FPSO, Crosssectional of FPSO, bulbous bow, collision, NLFEA

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
PERNYATAAN PENGAJUAN .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA .....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH .....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG .....	xv
DAFTAR ISTILAH .....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xviii
BAB I. PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
BAB II. METODOLOGI PENELITIAN .....	3
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	3
2.2 Jenis Penelitian .....	3
2.3 Metode <i>Non-Linear Finite Element Analysis</i> (NLFEA) .....	3
2.4 Penyajian Data .....	6
2.5 Desain Struktur <i>Topside</i> FPSO .....	9
2.6 Desain Struktur Lambung FPSO .....	11
2.7 Beban-beban yang Bekerja .....	14
2.8 Tegangan yang Bekerja .....	15
2.9 Tegangan Normal .....	16
2.10 Tegangan Tarik ( <i>Tensile Stress</i> ) .....	17
2.11 Tegangan Tekan ( <i>Compressive Stress</i> ) .....	18

2.12 Tegangan Geser ( <i>Shear Stress</i> ) .....	18
2.13 Tegangan Lentur ( <i>Bending Stress</i> ) .....	19
2.14 Tegangan Luluh ( <i>Yield Stress</i> ).....	19
2.15 Tegangan Izin Dasar .....	19
2.16 Regangan.....	19
2.17 Hubungan Tegangan Regangan .....	21
2.18 Deformasi Material .....	22
2.19 Kekuatan Batas ( <i>Ultimate Strength</i> ) .....	23
2.20 <i>Nodal Constrained</i> .....	25
2.21 Momen Lentur Batas Vertikal .....	26
2.22 Momen Lentur Batas pada Air Tenang.....	26
2.23 Momen Lentur Batas Akibat Gelombang.....	27
2.24 Kombinasi Beban .....	28
2.25 Analisa Data .....	28
2.26 Diagram Alir .....	29
BAB III. HASIL .....	31
3.1 Objek Penelitian .....	31
3.2 Perhitungan Momen Lentur-Batas Vertikal.....	32
3.3 Tegangan Izin.....	34
3.4 Tegangan Kerja Kapal FPSO Terhadap Momen Lentur-Batas Vertikal.....	34
3.4.1 Tegangan Kerja Kapal FPSO Model 1 pada Kondisi <i>Sagging</i> .....	34
3.4.2 Tegangan Kerja Kapal FPSO Model 1 pada Kondisi <i>Hogging</i> .....	35
3.4.3 Tegangan Kerja Kapal FPSO Model 2 pada Kondisi <i>Sagging</i> .....	36
3.4.4 Tegangan Kerja Kapal FPSO Model 2 pada Kondisi <i>Hogging</i> .....	36
3.4.5 Tegangan Kerja Kapal FPSO Model 3 pada Kondisi <i>Sagging</i> .....	37
3.4.6 Tegangan Kerja Kapal FPSO Model 3 pada Kondisi <i>Hogging</i> .....	38
BAB IV. PEMBAHASAN .....	40
4.1 Perhitungan Momen Lentur-Batas Vertikal.....	40
4.2 Kekuatan Batas Momen Lentur Vertikal Kapal FPSO .....	41
4.2.1 Kekuatan Batas Momen Lentur Vertikal Kapal FPSO Model 1 .....	41
4.2.2 Kekuatan Batas Momen Lentur Vertikal Kapal FPSO Model 2.....	44
4.2.3 Kekuatan Batas Momen Lentur Vertikal Kapal FPSO Model 3.....	47
4.3 Perbandingan Kekuatan Batas Kapal FPSO.....	50
BAB V. KESIMPULAN .....	53

5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	54
LAMPIRAN .....	56

**DAFTAR TABEL**

1. Spesifikasi material.....	5
2. Konfigurasi ukuran <i>stiffener</i> .....	6
3. Formula perhitungan momen lentur-batas vertikal .....	32
4. Momen lentur-batas vertikal <i>sagging</i> dan <i>hogging</i> kapal FPSO .....	33
5. Tegangan izin kerja material FPSO.....	34
6. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal FPSO akibat kekuatan batas .....	39
7. Kekuatan batas kapal FPSO model 1.....	41
8. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal FPSO model 1 .....	43
9. Kekuatan batas kapal FPSO model 2.....	44
10. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal FPSO model 2 .....	46
11. Kekuatan batas kapal FPSO model 3.....	47
12. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal FPSO model 3 .....	49
13. Kekuatan batas kapal FPSO model 1, model 2 dan model 3 .....	51

## DAFTAR GAMBAR

1. Kondisi batas untuk kontrol kelengkungan .....	4
2. FPSO model 1 kondisi <i>meshing</i> .....	5
3. <i>General arrangement</i> .....	7
4. Penampang atas kapal arah membujur .....	8
5. Setengah <i>midship</i> kapal FPSO.....	9
6. <i>Layout Topsides</i> Kapal FPSO .....	10
7. <i>Midship</i> Kapal FPSO .....	14
8. Jenis-jenis tegangan.....	17
9. Tegangan tarik.....	18
10. Tegangan tekan.....	18
11. Diagram tegangan-regangan baja.....	20
12. Hubungan antara tegangan dan regangan.....	22
13. Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan .....	23
14. <i>Box girder</i> tanpa elemen di tengah batang.....	25
15. Distribusi beban, gaya geser, dan momen lentur pada kapal.....	26
16. Faktor distribusi KM.....	27
17. Momen lentur vertikal akibat gelombang .....	27
18. Diagram Alir.....	30
19. Model 1.....	31
20. Model 2.....	31
21. Model 3.....	32
22. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 1 pada kondisi <i>sagging</i> .....	35
23. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 1 pada kondisi <i>hogging</i> .....	35
24. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 2 pada kondisi <i>sagging</i> .....	36
25. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 2 pada kondisi <i>hogging</i> .....	37
26. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 3 pada kondisi <i>sagging</i> .....	38
27. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 3 pada kondisi <i>hogging</i> .....	38
28. Grafik momen kelengkungan kapal FPSO model 1 .....	42
29. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 1 akibat <i>hogging</i> .....	42

30. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 1 akibat <i>sagging</i> .....	43
31. Grafik momen kelengkungan kapal FPSO model 2.....	45
32. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 2 akibat <i>hogging</i> .....	45
33. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 2 akibat <i>sagging</i> .....	46
34. Grafik momen kelengkungan kapal FPSO model 3.....	48
35. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 3 akibat <i>hogging</i> .....	48
36. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 3 akibat <i>sagging</i> .....	49
37. Grafik momen kelengkungan kapal FPSO model 1, model 2 dan model 3 .....	51

## DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

Lambang/Singkatan	Arti dan Penjelasan	Satuan
$A$	Luas penampang	$\text{mm}^2$
ABS	American Bureau of Shipping	
$B$	Lebar kapal	m
BKI	Biro Klasifikasi Indonesia	
$b_x$	Gaya apung	N
$C$	Koefisien momen lentur	
$C_b$	Koefisien blok kapal	
$D$	Tinggi kapal	m
$E$	Modulus Elastisitas	$\text{N/mm}^2$
$F$	Gaya	N
$F_{te}$	Gaya tekan	N
$F_{tr}$	Gaya tarik	N
$F_x$	Gaya geser arah sumbu x	N
$I$	Inersia penampang	$\text{m}^4$
IACS	International Association of Classification Societies	
$K_M$	Faktor distribusi	
$L$	Panjang kapal	m
$M$	Momen	$\text{Nmm}$
$M_u$	Kekuatan batas	$\text{Nmm}$
$M_{US}$	Kekuatan batas momen lentur <i>sagging</i>	$\text{Nmm}$
$M_{UH}$	Kekuatan batas momen lentur <i>hogging</i>	$\text{Nmm}$
$M_{sw}$	Momen lentur pada air tenang	$\text{Nmm}$
$M_w$	Momen lentur akibat gelombang	$\text{Nmm}$
$M_t$	Momen lentur- batas total	$\text{Nmm}$
$P$	Gaya total	N
$S$	Modulus penampang	$\text{m}^3$
$S_b$	Modulus penampang bagian <i>bottom</i>	$\text{m}^3$
$S_d$	Modulus penampang bagian <i>deck</i>	$\text{m}^3$
$Y_R$	Faktor keamanan	
$z$	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
$\sigma$	Tegangan	$\text{N/mm}^2$

$\sigma_{max}$	Tegangan lentur maksimum	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_e$	Tegangan rata-rata	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{te}$	Tegangan tekan	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{tr}$	Tegangan tarik	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{ub}$	Tegangan tekan batas <i>bottom</i>	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{ud}$	Tegangan tekan bataas <i>deck</i>	N/mm <sup>2</sup>
$\tau$	Tegangan geser	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Regangan	
$\delta l$	Deformasi material	mm
$\Delta L$	Pertambahan panjang/pendek	mm

---

## DAFTAR ISTILAH

Istilah	Arti dan Penjelasan
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
<i>Mesh</i>	Membagi struktur menjadi bagian-bagian kecil
Modulus Elastisitas	Sebuah ukuran yang digunakan untuk merepresentasikan kekakuan suatu bahan
Modulus Geser	Satu dari beberapa kuantitas untuk pengukuran kekuatan suatu bahan
Momen	Sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi
<i>Run Software</i>	Menjalankan program untuk menghitung hasil analisis 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
<i>Tensile strength</i>	Tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah bahan ketika diregangkan atau ditarik sebelum bahan tersebut patah

## DAFTAR LAMPIRAN

1. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Momen Lentur Kapal FPSO Model 1 menggunakan Metode NLFEA Kondisi *Sagging* dan *Hogging* ..... 56
2. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Momen Lentur Kapal FPSO Model 2 menggunakan Metode NLFEA Kondisi *Sagging* dan *Hogging*..... 59
3. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Momen Lentur Kapal FPSO Model 3 menggunakan Metode NLFEA Kondisi *Sagging* dan *Hogging*..... 62

## BAB I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia secara geografis merupakan negara maritim yang memiliki luas laut mencakup dua per tiga dari total luas wilayahnya. Kekayaan sumber daya alam laut khususnya minyak dan gas bumi menjadikan sektor migas sebagai sumber daya strategis yang penting bagi perekonomian nasional. Untuk memanfaatkan potensi sumber daya alam laut tersebut, maka diperlukan teknologi yang mampu mendukung kegiatan eksplorasi dan produksi minyak dan gas bumi di wilayah perairan dalam salah satunya adalah teknologi FPSO.

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) menjadi salah satu konsep yang lebih tepat untuk kondisi perairan dalam. FPSO mempunyai kemampuan untuk menyimpan dan mendistribusikan minyak ke kapal pengangkut minyak (*Shuttle Tanker*) dan kemudian minyak didistribusikan ke kilang-kilang minyak yang tersedia. Selain itu, bangunan lepas pantai jenis FPSO ini juga memiliki kemampuan untuk memproduksi minyak, yaitu dapat mengolah minyak mentah (*crude oil*) yang berasal dari reservoir menjadi minyak yang sudah siap jual.

Meskipun FPSO memiliki banyak keunggulan, namun dalam pengoperasiannya FPSO juga menghadapi berbagai risiko, terutama risiko tabrakan dengan kapal-kapal lain seperti *shuttle tanker*, kapal suplai, dan kapal dagang yang berlalu-lalang di sekitar lokasi. Tabrakan semacam itu dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang besar, pencemaran lingkungan, bahkan korban jiwa. Sebagai contoh, tabrakan antara "Atlantic Empress" dan "Aegean Captain" pada tahun 1979 mengakibatkan salah satu tumpahan minyak kapal terbesar dalam sejarah, dengan sekitar 90 juta galon minyak tumpah ke perairan dekat Tobago (Fingas, 2011).

Saat ini, kepedulian publik terhadap pencemaran lingkungan akibat tumpahan minyak semakin meningkat, sehingga perhatian yang lebih besar diberikan pada kemampuan struktur lambung FPSO untuk menahan tabrakan. Ancaman utama bagi FPSO adalah tabrakan dengan *shuttle tank*, kapal suplai, dan kapal dagang yang dilengkapi dengan *bulbous bow*, yang lebih mungkin untuk menembus sisi lambung FPSO dari pada haluan tradisional (Aryawan *et al.*, 2020).

Ketahanan struktur FPSO terhadap tabrakan telah menjadi topik penelitian yang banyak dikaji sebelumnya. Salah satu studi yang dilakukan oleh Aryawan *et al.* (2020) menganalisis integritas struktur lambung FPSO akibat beban tabrakan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa struktur lambung FPSO mampu menahan beban tabrakan dengan baik selama tidak melebihi batas tegangan dan deformasi yang diizinkan. Selain itu, Goerlandt *et al.* (2017) melakukan analisis tentang operasi pengawalan dan konvoi kapal di kondisi es. Meskipun fokus penelitiannya berbeda, hasil studi tersebut menunjukkan bahwa koordinasi dan pengaturan lalu lintas kapal di sekitar FPSO sangat penting untuk mengurangi risiko tabrakan. Sementara itu, Shadan *et al.* (2019) mengembangkan simulasi numerik untuk mengevaluasi perilaku tabrakan

antar kapal menggunakan analisis elemen hingga *non-linier*. Pendekatan ini dapat diterapkan juga untuk menganalisis respons struktur FPSO saat terjadi tabrakan.

Namun, penelitian-penelitian sebelumnya belum secara spesifik membahas mengenai analisis ketahanan struktur FPSO terhadap tubrukan *bulbous bow* kapal. Oleh karena itu, studi ini akan berfokus pada respon tegangan dan energi yang diserap oleh FPSO selama tubrukan dengan menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA).

Berdasarkan latar belakang di atas serta penelitian sebelumnya, maka fokus pada penelitian ini adalah “Analisis Kekuatan Membujur FPSO Pasca *Collision* disebabkan *Bulbous Bow*”.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana kekuatan membujur FPSO pada saat kondisi utuh dan setelah mengalami tubrukan yang disebabkan *bulbous bow*.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan membujur FPSO pada saat kondisi utuh dan setelah mengalami tubrukan yang disebabkan *bulbous bow*.

## 1.4 Batasan Masalah

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

1. Ketidaktepatan awal, retak dan cacat pengelasan diabaikan
2. Kekuatan memanjang kapal dihitung dalam 1 jarak gading
3. Beban yang bekerja adalah *hogging* dan *sagging*
4. Analisis kekuatan menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA)

## 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya mengetahui analisis struktur baja
2. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kepada perusahaan-perusahaan
3. Sebagai informasi dalam menentukan kebijakan dalam hal regulasi/peraturan pada galangan kapal untuk membuat perencanaan struktur kapal FPSO

## BAB II. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

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

### 2.2 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data, serta menampilkan hasil dari studi kasus mengenai kekuatan membujur FPSO terhadap kerusakan setelah mengalami tubrukan yang disebabkan *bulbous bow* dengan menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA).

### 2.3 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.

Hughes dan Paik (2010), menghitung dan membandingkan kekuatan-batas longitudinal struktur kapal FPSO. Pada penelitian ini akan menggunakan metode NLFEA untuk menghitung kekuatan-batas struktur kapal FPSO baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat 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 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*.

#### 3. Proses Peningkatan Beban

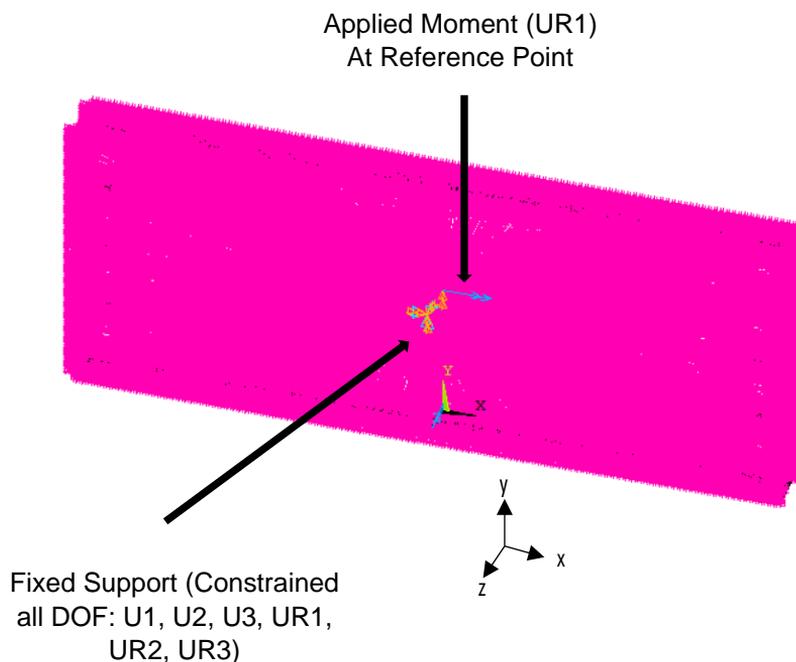
Pembebanan yang diaplikasikan pada metode NLFEA menggunakan proses peningkatan pembebanan. Dua jenis kontrol beban yang digunakan untuk mendapatkan nilai kekuatan-batas momen lentur kapal tanker yaitu kontrol kelengkungan dan kontrol momen.

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

Kontrol momen dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada salah satu ujung model elemen hingga dan ujung 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 Batas

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



Gambar 1 Kondisi batas untuk kontrol kelengkungan

Sumber: Hasil Olahan, 2024

#### 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 geometri 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 yang dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1  
Spesifikasi material

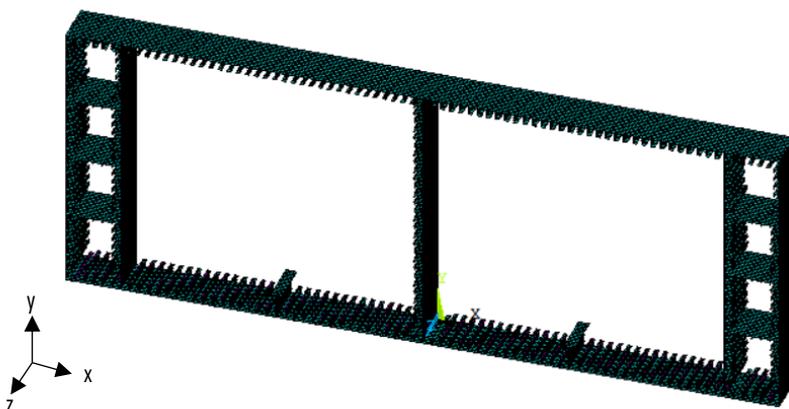
Spesifikasi Material	Jenis Material HS36
<i>Modulus Young</i> (N/mm <sup>2</sup> )	210.000
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	7.850
<i>Yield Strength</i> (N/mm <sup>2</sup> )	355
Rasio Poisson	0,33
<i>Tensile Strength</i> (N/mm <sup>2</sup> )	490

Sumber: ABS, 2021

#### 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 convergnnce*.

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 350 mm dengan bentuk *quadmapped* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2 FPSO model 1 kondisi *meshing*

Sumber: Hasil Olahan, 2024

## 8. Tipe Elemen

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

## 2.4 Penyajian Data

Pada penelitian ini menggunakan data dari PT. Irvine Engineering, Dubai. Penelitian ini menggunakan kapal FPSO dengan ukuran utama sebagai berikut :

### 1. Main Dimension

- a. Panjang kapal (L) : 256,5 m
- b. Lebar kapal (B) : 70,2 m
- c. Tinggi kapal (D) : 20,7 m
- d. Koefisien blok Kapal (Cb) : 0,83

### 2. Material

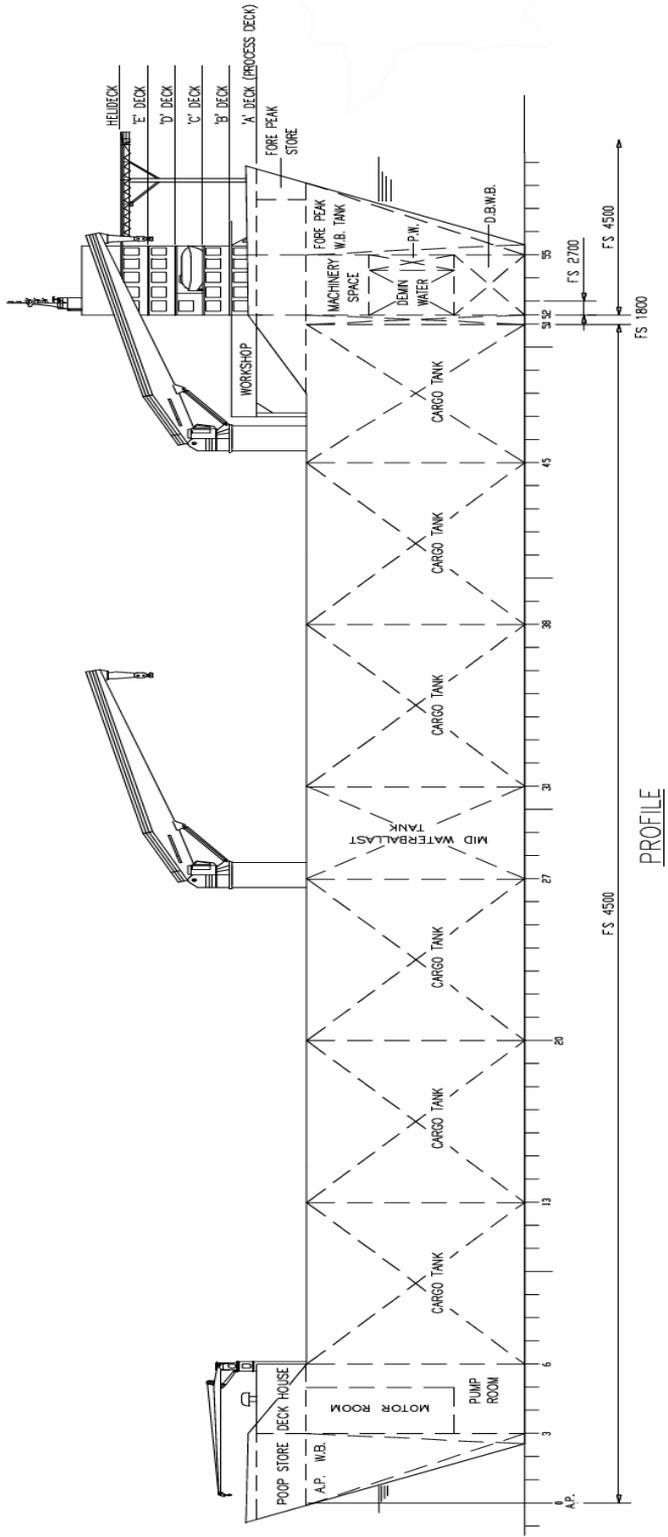
- a. *Type of material* : HS36
- b. *Elastic modulus* : 210000 N/mm<sup>2</sup>
- c. *Density* :  $7,7 \times 10^{-5}$  N/mm<sup>3</sup>
- d. *Yield strength* : 355 N/mm<sup>2</sup>
- e. *Poisson ratio* : 0,33

Konfigurasi penampang pada arah membujur kapal FPSO dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5, dan Tabel 2 untuk konfigurasi ukuran *stiffener*.

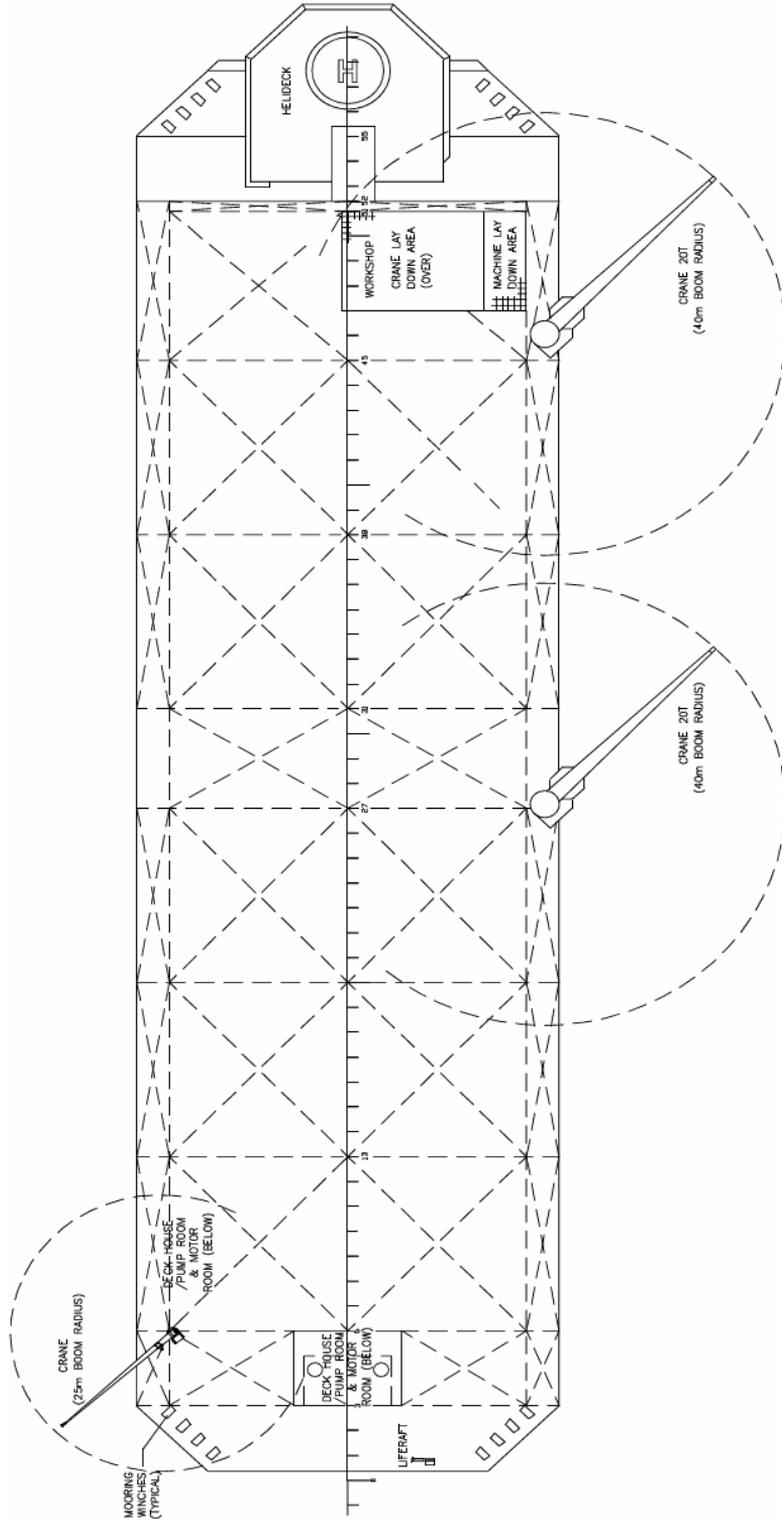
Tabel 2

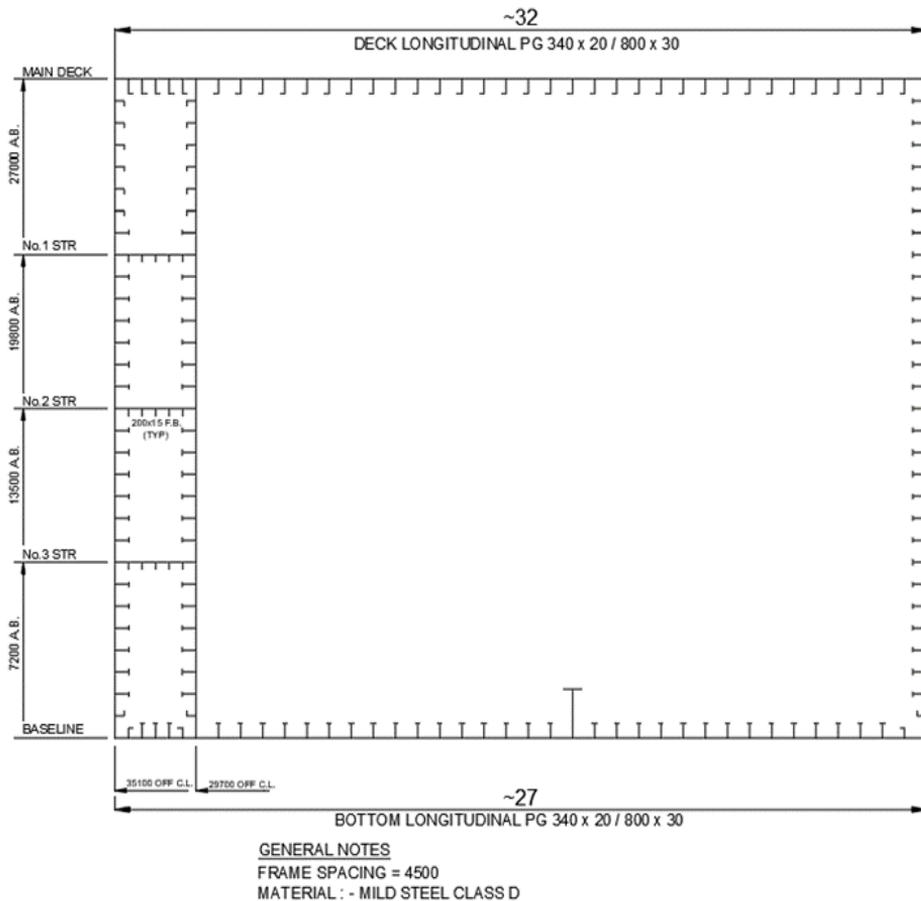
Konfigurasi ukuran *stiffener*

LONGITUDINAL NO.	SIDE SHELL LONGITUDINAL BULKHEADS (mm)
39-41	600x15 / 200x30 F.B.
42-45	550x15 / 150x25 F.B.
50-53	550x15 / 150x25 F.B.
54-57	450x15 / 150x25 F.B.
58-61	450x15 / 150x25 F.B.
62-64	400x14 O.B.P
65-67	370x13 O.B.P



Gambar 3 General arrangement





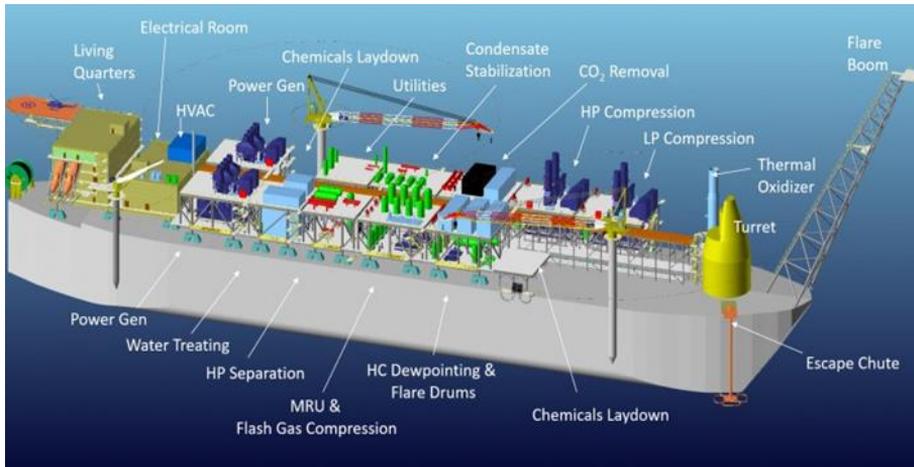
Gambar 5 Setengah *midship* kapal FPSO

## 2.5 Desain Struktur *Topside* FPSO

Desain struktur *topside* yang direncanakan mempunyai tujuan untuk memusatkan pembebanan pada lambung FPSO. Untuk menilai dengan benar beban ini perlu diketahui:

1. Struktur utama *topside*.
2. Berat dan pusat gravitasi perlengkapan utama.
3. Berat, pusat gravitasi dan inersia sisa bagian atas (baik struktur dan peralatan yang lebih kecil).

Beban *topside* yang ditransmisikan ke lambung seperti pada Gambar 6 juga bergantung dari lambung yang mengalami gerak dan akselerasi. Hasil ini berasal dari analisa hidrodinamika. Tempat kru dan *deck house* diposisikan di buritan kapal. Selain itu, area *helipad* terletak di belakang tempat tersebut. Terdapat dua *dereck* untuk membantu proses produksi dan penyimpanan pada ruang muat. Pengelolaan fasilitas diwakili oleh blok di bagian atas dek utama. Menara suar terletak di seberang *deck* tempat tinggal kru di haluan kapal (Hughes & Paik, 2010).



Gambar 6 *Layout Topsides* Kapal FPSO

Faktor yang mempengaruhi muatan *main deck* yang harus dibawa FPSO dalam bentuk fasilitas produksi adalah:

1. Jumlah sistem utama
2. Karakteristik reservoir
3. Pilihan jalur ekspor
4. Sistem tunggal atau dua produksi
5. Pемindahan yang mungkin dilakukan pada bidang lain

Sistem utama yang memiliki pengaruh signifikan terhadap ukuran dan konfigurasi fasilitas produksi FPSO adalah pemisahan minyak mentah, pengolahan gas (dehidrasi dan kompresi) dan kemungkinan ekspor, pengolahan dan penanganan air yang dihasilkan termasuk injeksi ulang, perawatan dan injeksi air laut, ekspor minyak mentah melalui kapal tanker atau pipa penyalur pembangkit listrik utama yaitu ukuran dan jumlah unit.

Sebagaimana dinyatakan atas, karakteristik reservoir lapangan memiliki pengaruh besar yang mana perancang fasilitas perlu mendapat informasi yang baik mengenai profil produksi untuk minyak, gas dan air yang dihasilkan, kemungkinan durasi produksi tinggi atau puncak, potensi dan waktu pengembangan sumur dimasa yang akan datang yang mana bisa memperpanjang pada puncak produksi, tekanan reservoir dan luasnya dukungan tekanan reservoir untuk menentukan jumlah injeksi ulang air dan gas, rasio minyak-gas dan kemungkinan kebutuhan gas angkat, dan suhu kedatangan cairan di FPSO. Dukungan injeksi air mungkin diperlukan lebih awal di muka untuk injeksi ulang. Dalam hal ini, fasilitas pengolahan air laut seperti unit deaerasi harus berukuran sesuai.

Tingkat keakuratan dalam data reservoir dan kinerja yang diprediksi diinginkan untuk meminimalkan kemungkinan perubahan desain yang terlambat dan karenanya dampaknya terhadap jadwal dan anggaran proyek serta mengurangi risiko kendala produksi karena sistem atau peralatan pada kondisi yang awalnya tidak dirancang. FPSO juga dapat digunakan di daerah dengan kepercayaan

reservoir rendah sebagai sistem produksi jangka pendek dan mempersiapkan sistem produksi jangka panjang yang optimal.

Pemilihan sistem ekspor minyak mentah memiliki dampak signifikan terhadap ukuran fasilitas, karena tidak hanya melibatkan pengaliran minyak mentah ke berbagai pipa dan kapal tanker, tetapi juga melibatkan tingkat pemisahan di fasilitas pengolahan minyak untuk mencapai spesifikasi yang berbeda sesuai dengan setiap rute. Pada kasus minyak mentah yang berat, kental, atau licin, suhu rendah pada saat kedatangan cairan mungkin memerlukan fasilitas pemanas yang luas, termasuk unit pemulihan panas limbah pada turbin gas. Profil produksi membutuhkan satu atau dua pemisah minyak mentah dan kompresi gas.

Pertimbangan terkait hilangnya pendapatan karena pemadaman yang berkepanjangan dari satu aliran produksi 100% dibandingkan dengan biaya tambahan yang terkait dengan penyediaan dua aliran 50%. Jika dipilih satu aliran produksi tunggal, maka pemilihan peralatan pemisahan yang efisien harus dilakukan untuk memastikan ketersediaan sistem sebaik mungkin. Pemanfaatan fasilitas pemisahan uji yang sesuai dapat memberikan tingkat cadangan yang optimal dan pengelolaan sumur yang lebih efisien.

Apabila FPSO digunakan di lapangan dengan masa kerja singkat, misalnya, lima sampai tujuh tahun, pemilik harus membuat keputusan apakah merancang fasilitas produksi untuk kehidupan lapangan tersebut atau membuat persyaratan terkait pemindahan FPSO ke sumur lain atau lokasi lainnya. Dalam kasus tersebut, potensi peluang pemasaran dapat memengaruhi konfigurasi fasilitas, tingkat fleksibilitas yang diberikan untuk memproses berbagai jenis cairan, tingkat produksi, serta ketentuan ruang dan berat untuk penambahan modul atau peralatan secara bertahap. FPSO dilengkapi dengan peralatan *hydroprocessing* di atas *deck* dan fasilitas penyimpanan hidrokarbon di bawah *deck*. Kapal juga dapat dilengkapi dengan sistem tambat yang memungkinkannya untuk tetap berada di lokasi jika diperlukan.

## 2.6 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 *pitching* puncak, sehingga mengurangi gerakan vertikal *topsides* dan beban dinamis yang terkait.

Salah satu penyebab terjadinya kegagalan *ultimate strength* 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 dapat mengurangi dimensi *scantling*, sehingga *girder*

penopang pada lambung kapal rawan mengalami tekuk 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 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 pabrikasi 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 dapat 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 rumah ukuran lambung biasanya didorong oleh kebutuhan penyimpanan minyak mentah. Hal ini juga dipengaruhi oleh waktu siklus kapal FPSO saat melakukan pembongkaran terdiri dari:

1. Waktu memuat di Lapangan
2. Waktu berlayar ke atau dari pelabuhan (termasuk penundaan cuaca dalam perjalanan)
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 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*. Pada kapal tanker yang telah dikonversi, biasanya tidak mungkin untuk mendapatkan kapal tanker yang sesuai dengan persyaratan penyimpanan minyak mentah yang optimal. Maka jika tanker yang dipilih memiliki volume penyimpanan yang kurang dari volume

penyimpanan yang disyaratkan frekuensi pembongkaran tanker dapat meningkat selama puncak produksi titik dan sebaliknya, kapal tanker yang sangat besar untuk peran FPSO dapat berdampak pada nilai ekonomisnya.

Umumnya, bentuk lambung konvensional dapat dirancang, dari pengalaman desain dan data yang memadai untuk memberikan kinerja gerakan yang baik dengan *downtime* 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 penyiangan 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.

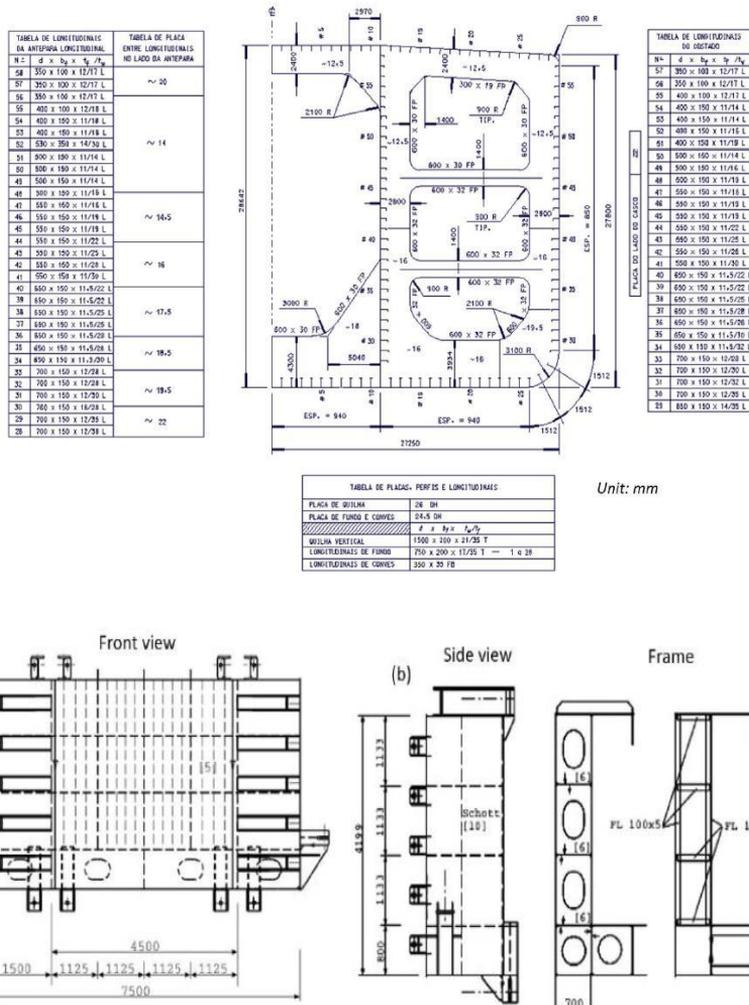
4. Desain untuk operasi

Desain lambung juga harus mengenali inspeksi insitu khusus dan kebutuhan pemeliharaan FPSO untuk penggunaan jangka Panjang.

Bobot keseluruhan perpindahan FPSO adalah fungsi berat baja dan bobot mati kargo minyak mentah. Biasanya berat baja lambung tidak termasuk *topside* 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 *deck* yang memadai seperti yang terlihat pada Gambar 7. 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 *deck* titik keselarasan melambung harus seimbang antara meminimalkan beban gelombang dan meminimalkan berat baja lambung.



Gambar 7 Midship Kapal FPSO

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 nilai dari tegangan rata-rata pada *deck* dan *bottom*. Untuk FPSO, kondisi ekstrem muatan menjadi beban penuh dalam tangki penyimpanan minyak mentah ditambah dengan gelombang yang mengenai panjang kapal dan bagian di tengah kapal.

### 2.7 Beban-bekan yang Bekerja

Untuk setiap kasus beban, beban yang diterapkan yang digunakan untuk analisis struktur kapal harus mencakup bagian statis dan dinamis dari setiap komponen

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

Fasilitas produksi biasanya terletak pada *deck* produksi dan pada umumnya diposisikan 2.5 m di atas *deck* 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 (UKOOA, 2002). Untuk kapal FSO beban yang terdapat pada bagian *deck* kapal hanya beban geladak cuaca.

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 statis 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 *deck* utama instalasi (ABS, 2004).

## 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 (Zainuri, 2008). 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.

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

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

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

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

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

Dimana :

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

P = Gaya total (N)

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

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

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

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

## 2.9 Tegangan Normal

Menurut Vektor (2014), Pengetahuan dan pengertian tentang bahan dan perilakunya jika mendapat gaya atau beban sangat dibutuhkan di bidang teknik bangunan. Jika suatu batang prismatik, dengan luas penampang seragam di sepanjang batang menerima beban atau gaya searah dengan panjang batang, maka gaya tersebut akan menimbulkan tegangan atau tekanan pada penampang batang.

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

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

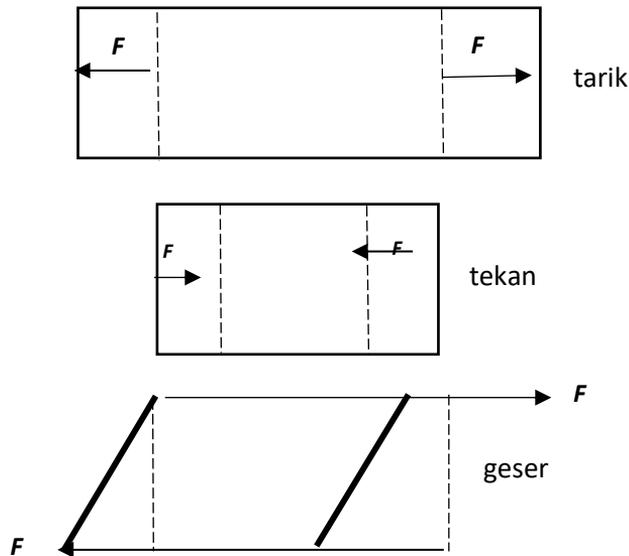
Dimana:

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

F = Gaya (N)

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

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm<sup>2</sup>. Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Jenis-jenis tegangan

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

Tegangan tarik yaitu tegangan yang timbul akibat gaya tarik. Apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang, dan akibatnya batang ini cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbu. Tegangan tarik ( $\sigma_{tr}$ ) terjadi akibat bekerjanya gaya tarik ( $F_{tr}$ ) pada satuan luas penampang ( $A$ ) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio/perbandingan antara perpanjangan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tarik  $\varepsilon_{tr}$  secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 4.

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

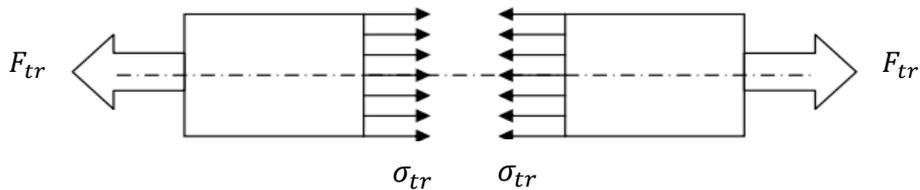
Dimana :

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

$F_{tr}$  = Gaya tarik (N)

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

Gaya tarik aksial yang menghasilkan tegangan tarik dapat dilihat pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9 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. Tegangan tekan ( $\sigma_{te}$ ) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan ( $F_{te}$ ) pada satuan luas penampang ( $A$ ) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpindahan seperti yang terlihat pada Gambar 10. Rasio/perbandingan antara perpindahan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tekan  $\varepsilon_{te}$  secara matematik dapat dilihat pada Persamaan 5.

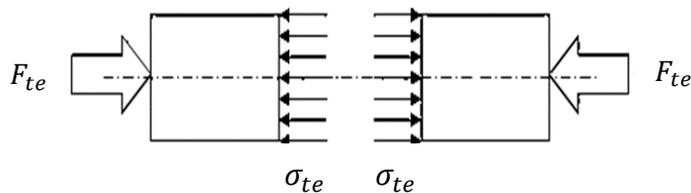
$$\sigma_{te} = \frac{F_{te}}{A} \quad (5)$$

Dimana :

$\sigma_{te}$  = Tegangan tekan (N/mm<sup>2</sup>)

$F_{te}$  = Gaya tekan (N)

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



Gambar 10 Tegangan tekan

### 2.12 Tegangan Geser (*Shear Stress*)

Jika gaya normal/tangensial merupakan gaya sejajar arah memanjang batang, gaya geser merupakan gaya yang berarah tegak lurus dengan panjang batang. Besaran tegangan geser dinyatakan dengan simbol ( $\tau$ ) dalam satuan (N/mm<sup>2</sup>). Tegangan geser terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser didistribusikan pada sebuah luas penampang melintang yang paralel (tangensial) dengan gaya geser tersebut.

Tegangan geser ( $\tau$ ) timbul akibat kerja dari dua gaya geser 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 ( $P$ ) dikerjakan pada batang akan menimbulkan tegangan geser ( $\tau$ ). Tegangan geser ( $\tau$ ), yaitu tegangan yang timbul akibat gaya geser atau gaya lintang. Ciri dari gaya geser atau gaya lintang adalah melintang batang atau tegak lurus batang. Secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 6.

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

Dimana :

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

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

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

### 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 (*Yield 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 bersumber pada ABS (ABS,2021). 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.

### 2.16 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 7.

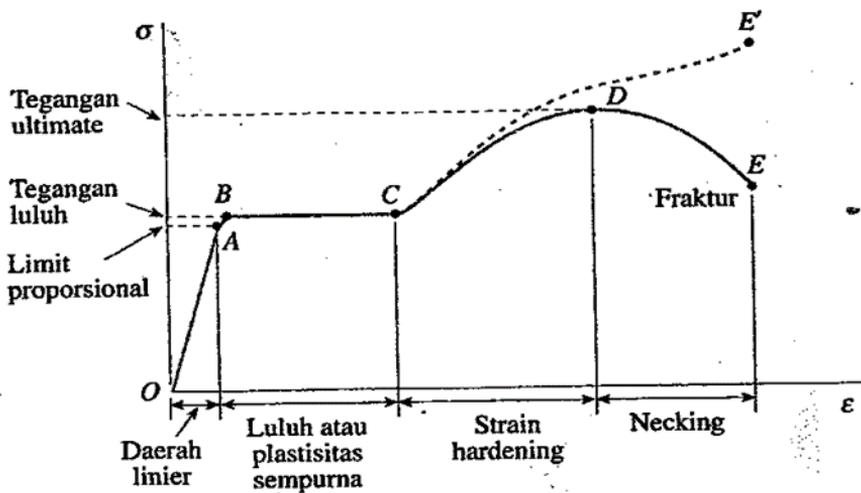
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

Dimana :

$\varepsilon$  = Regangan

$\Delta L$  = Pertambahan panjang (mm)

$L$  = Panjang mula-mula (mm)



Gambar 11 Diagram tegangan-regangan baja

Sumber: Mulyati, 2014

Seperti yang terlihat pada Gambar 11, 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 D 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 D, pemanjangan akan berlanjut ke titik E, tetapi secara perlahan tegangan berkurang (*posisi necking*), 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 8 dan Persamaan 9.

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

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

Dimana :

$E$  = *Modulus Young* (N/mm<sup>2</sup>)

$F$  = gaya (N)

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

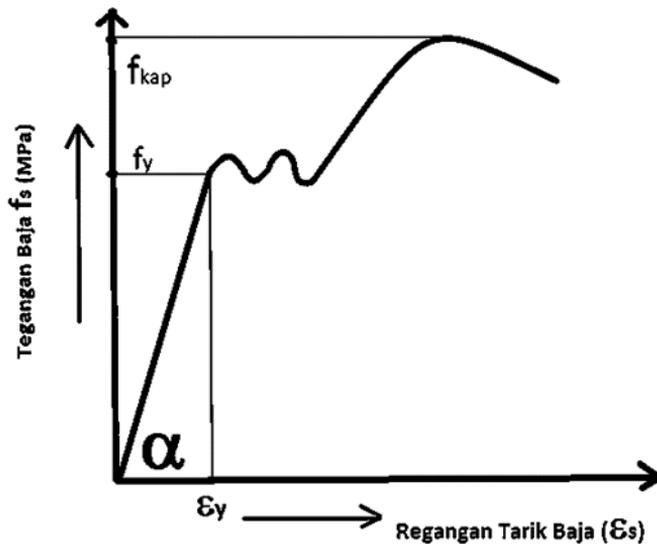
$L$  = panjang mula-mula (mm)

$\Delta L$  = pertambahan panjang/pendek (mm)

## 2.17 Hubungan Tegangan Regangan

Sebuah gaya dan momen yang bekerja pada sebuah titik potongan penampang menghasilkan distribusi yang bekerja pada penampang tersebut. Secara umum, tegangan terbagi dalam dua macam yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal adalah intensitas gaya normal per unit luasan dan dinyatakan dalam unit gaya per unit luasan, misalnya  $\frac{lb}{in^2}$  atau  $\frac{N}{m^2}$ . Apabila gaya-gaya dikenakan pada ujung-ujung batang sedemikian hingga batang dalam kondisi tertarik, maka terjadi suatu tegangan tarik pada ujung batang. Jika batang dalam kondisi tertekan

maka terjadi tegangan tekan. Gaya aksi dari gaya yang bekerja adalah melalui pusat setiap bagian penampang melintang batang.



Gambar 12 Hubungan antara tegangan dan regangan

Hubungan tegangan dan regangan dapat dipisahkan menjadi komponen plastik dan komponen elastis dimana bentuk kurvanya ada pada Gambar 12. Regangan linear elastis ialah bagian dari regangan yang diperoleh kembali saat dibongkar. Regangan plastik (*nonlinear*) merupakan bagian regangan yang tidak dapat kembali lagi pada bentuk semula (Bannantine et al, 1990).

## 2.18 Deformasi Material

Deformasi material merujuk pada perubahan bentuk atau dimensi suatu material sebagai hasil dari penerapan gaya kerja. 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 10 berikut.

$$\delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (10)$$

Dimana:

$\delta l$  = Deformasi material (mm)

$\varepsilon$  = Regangan yang timbul pada material

$\sigma$  = Tegangan yang timbul pada material (N/mm<sup>2</sup>)

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

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

$E$  = Modulus elastisitas material (N/mm<sup>2</sup>)

$l$  = Panjang material (mm)

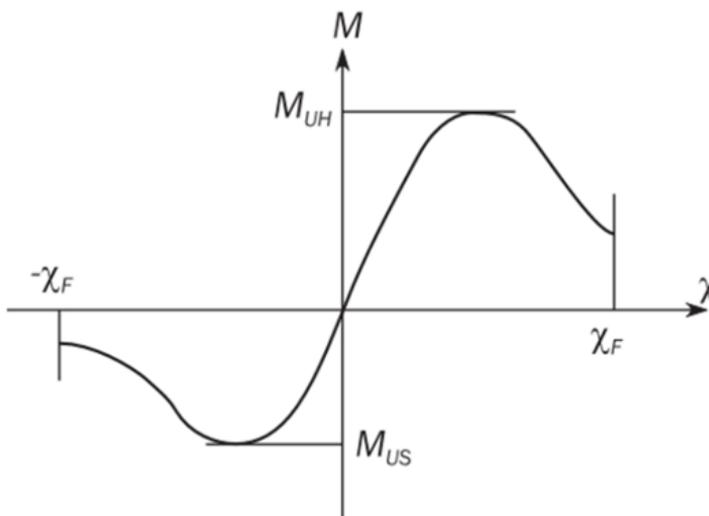
## 2.19 Kekuatan Batas (*Ultimate Strength*)

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

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

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

dimana  $M_t$  adalah momen lentur-batas total vertikal dan  $\gamma_R$  adalah faktor keamanan untuk kekuatan-batas lentur vertikal.



Gambar 13 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan  
Sumber: DNV GL, 2017b

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 13. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.

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

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

dimana M adalah momen lentur, I adalah inersia dan z adalah jarak dari sumbu netral dari penampang balok ke lokasi tegangan lentur pada arah tinggi dari balok.

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

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

dimana S adalah modulus penampang. Modulus penampang (S) untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut :

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

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

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

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

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

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

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

## 2.20 Nodal Constrained

Ada dua jenis *nodal constraints* : *single-point* dan *multi-point*.

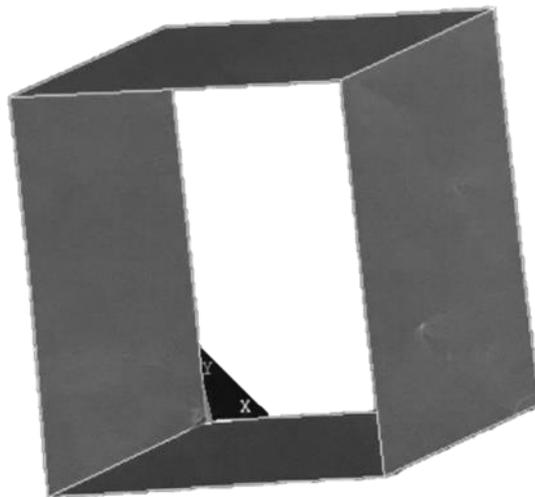
### 1. *Single-point constraint* (SPC)

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

### 2. *Multiple Point Constrained* (MPC)

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

Gambar 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 tengah, hal tersebut membuat tumpuan yang akan diberikan pada *netral axis* tidak diketahui, oleh karena itu *software* ANSYS dapat membuat titik/node bayangan yang dapat digunakan sebagai letak tumpuan/*multiple point constrained* (MPC) (Alie et al., 2021)



Gambar 14 *Box girder* tanpa elemen di tengah batang

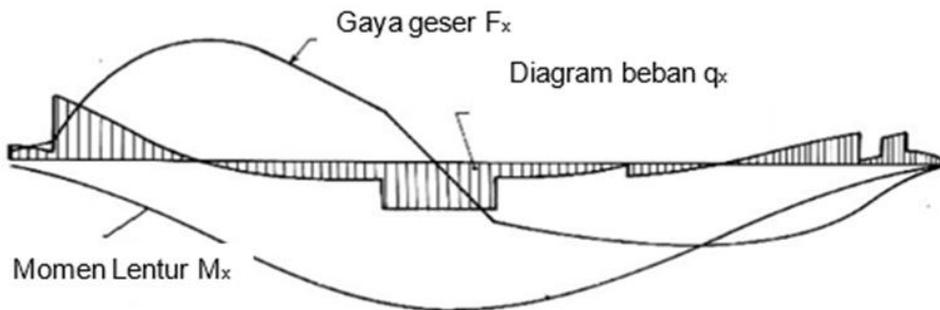
## 2.21 Momen Lentur Batas Vertikal

Momen lentur-batas vertikal dalam analisa kekuatan struktur kapal terdiri dari beban pada air tenang ( $M_{sw}$ ) untuk skenario pembebanan statis dan penjumlahan beban pada air tenang dan beban akibat gelombang ( $M_w$ ) untuk skenario pembebanan statis dan dinamis (IACS, 2014).

Paik et al (1998), menjumlahkan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang untuk mendapatkan nilai ekstrem dari momen lentur batas vertikal.

## 2.22 Momen Lentur Batas pada Air Tenang

Momen lentur dan gaya geser pada kondisi air tenang berasal dari gaya apung dan distribusi berat sepanjang panjang kapal seperti pada Gambar 15.



Gambar 15 Distribusi beban, gaya geser, dan momen lentur pada kapal  
Sumber: Shama, 2013

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

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

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal adalah

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

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

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

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

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

Dimana :

$K_M$  = Faktor distribusi seperti pada Gambar 16

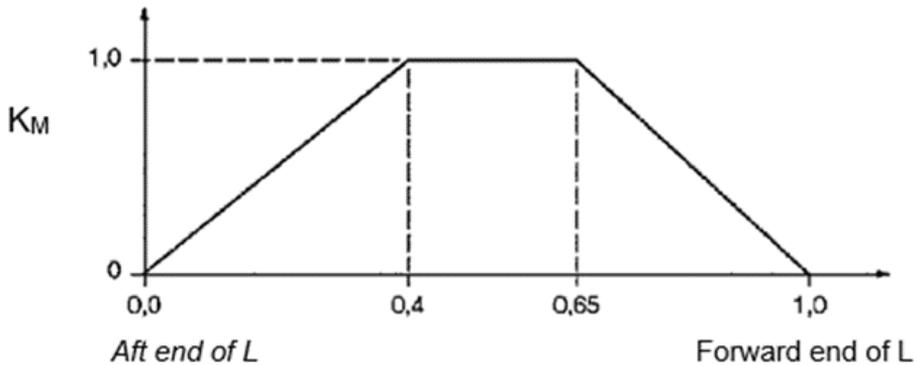
$L, B$  = lebar dan panjang kapal dalam satuan meter

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

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

$= 10,75$       untuk  $300 < L < 350$  m

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

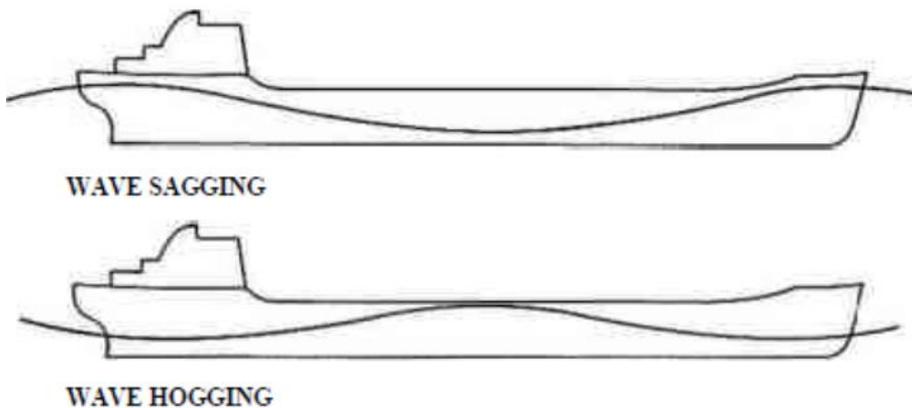


Gambar 16 Faktor distribusi  $K_M$

Sumber: DNV GL, 2017a

### 2.23 Momen Lentur Batas Akibat Gelombang

Beban dinamis longitudinal diakibatkan oleh gelombang. Ketika kapal berada pada puncak gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *hogging*. Ketika kapal berada di lembah gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *sagging*. Adapun kondisi kapal akan mengalami *hogging* ataupun *sagging* dapat dilihat pada Gambar 17 dibawah ini.



Gambar 17 Momen lentur vertikal akibat gelombang

Sumber: Bachman, 1991

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

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

$$M_W = +0,19K_M CL^2 BC_b \text{ kN-m, kondisi hogging} \quad (24)$$

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

## 2.24 Kombinasi Beban

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

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

Dimana:

$M_t$  = Momen lentur batas total (Nmm)

$M_{SW}$  = Momen lentur pada air tenang (Nmm)

$M_W$  = Momen lentur akibat gelombang (Nmm)

## 2.25 Analisa Data

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode atau cara yang ditempuh dalam rangka mengumpulkan, menyusun (mengatur), menganalisis dan memberikan penafsiran terhadap sekumpulan melalui tahapan-tahapan yang dilakukan dalam menganalisis data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

### 1. Tahapan Pertama

Kegiatan penelitian dilakukan dengan pengambilan data dari berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, buku, literatur, web resmi, serta industri yang berhubungan dengan tema penelitian.

### 2. Tahapan Kedua

Setelah mengadakan studi atau pemahaman terhadap data yang dikumpulkan, dilanjutkan dengan pengolahan data berupa:

- a. Mengidentifikasi data-data yang digunakan pada struktur kapal FPSO seperti dimensi kapal dan konfigurasi material stiffener.
- b. Mengidentifikasi beban-beban yang bekerja pada struktur kapal FPSO.
- c. Pemodelan bentuk kerusakan arah membujur pada salah satu sisi kapal dengan menggunakan metode elemen hingga.

### 3. Tahapan Ketiga

Menghitung kekuatan batas dengan menggunakan konsep metode elemen hingga yang menghasilkan kekuatan kapal pada kondisi *intact* dan kondisi setelah terjadi tubrukan.

#### 4. Hasil Penelitian

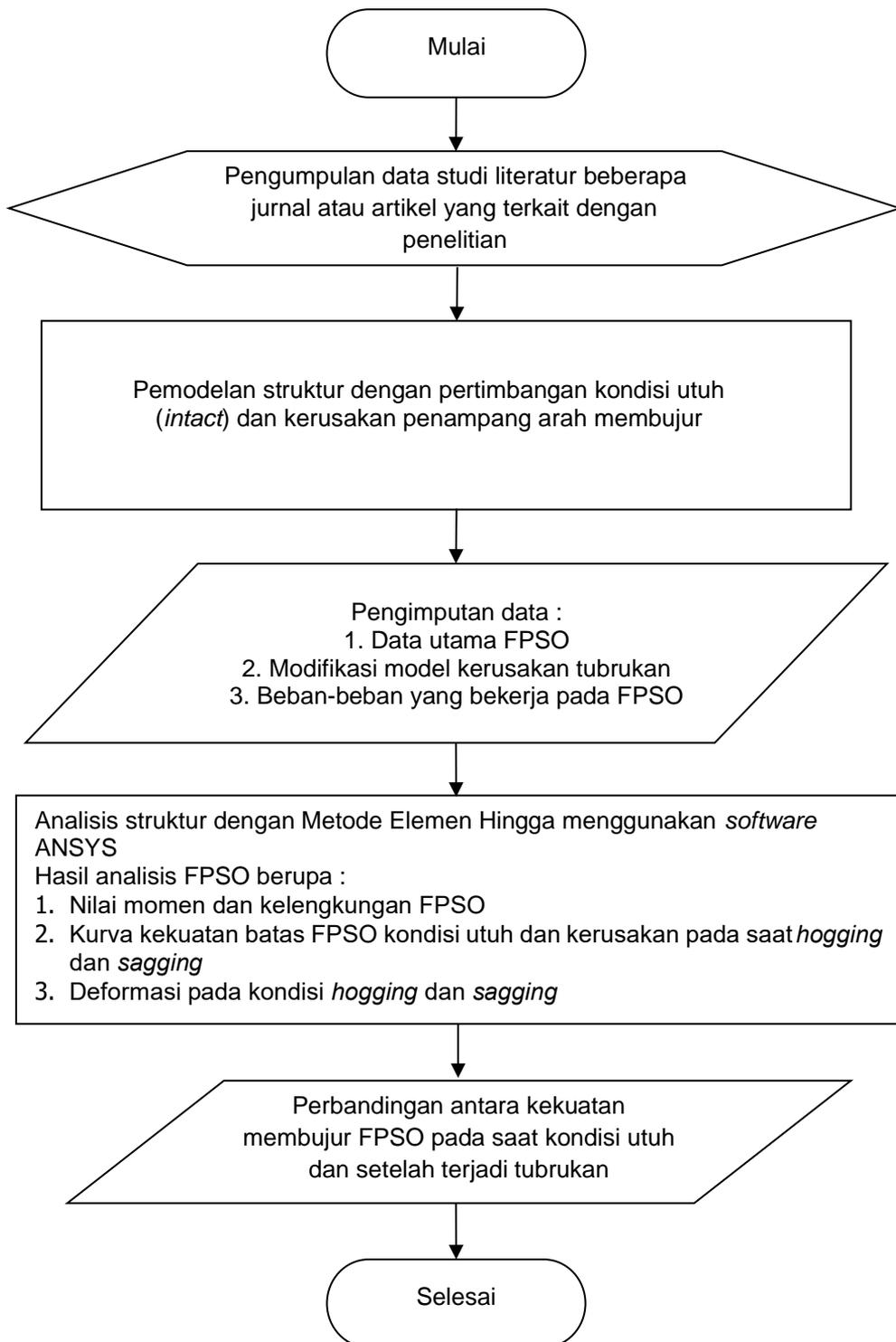
Pada hasil penelitian dengan menggunakan metode elemen hingga, selanjutnya dilakukan *plotting* dengan menghubungkan momen *curvature* pada kondisi *intact* dan kondisi tubrukan. Ketika pengecekan analisis selesai dan analisis model dinyatakan berhasil maka tahapan selanjutnya adalah memaparkan hasil analisis yang telah didapatkan.

#### 5. Kesimpulan

Kesimpulan mengenai penjelasan hasil perhitungan kekuatan batas FPSO pada kondisi utuh dan setelah terjadi tubrukan.

### 2.26 Diagram Alir

Adapun diagram alir/*flowchart* dalam menjalankan penelitian ini agar lebih terstruktur dan sistematis dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18 Diagram Alir  
Sumber: Hasil Olahan, 2024