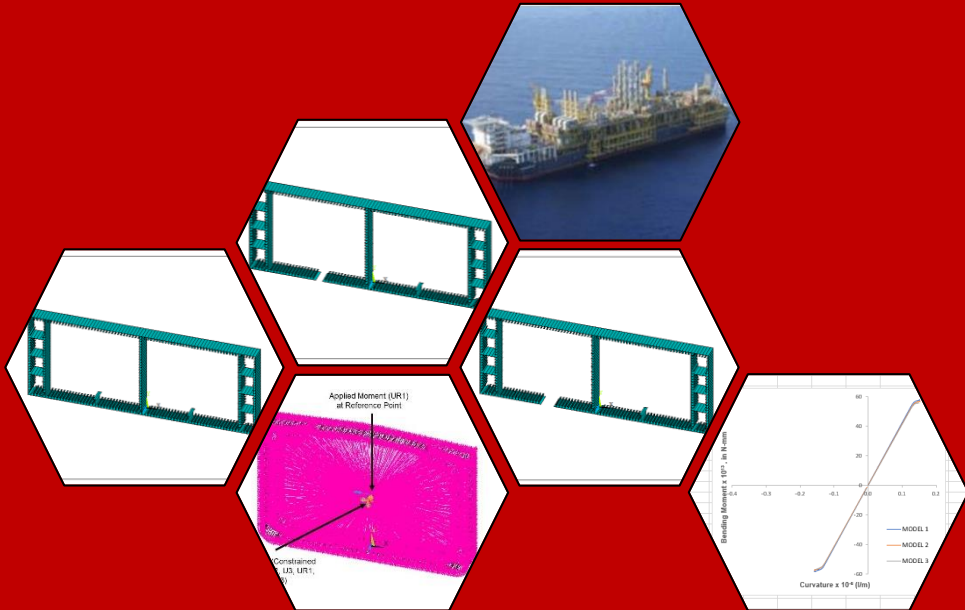


ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR FPSO PASCA *GROUNDING*



SELVIANI

D081 20 1002



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

ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR FPSO PASCA *GROUNDING*

SELVIANI

D081201002



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

ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR FPSO PASCA *GROUNDING*

SELVIANI

D081 20 1002

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 GROUNDING

SELVIANI
D081201002

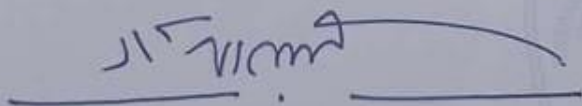
Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana pada tanggal 02/08/2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA

Mengesahkan:
Pembimbing Utama,



Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alle, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 19750608 200501 1 003

Mengetahui:
Ketua Departemen,



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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi "**Analisis Kekuatan Membujur FPSO Pasca Grounding**" 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, 5 Juli 2024



Selviani
D081201002

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi dengan judul " Analisis Kekuatan Membujur FPSO Pasca *Grounding*". Shalawat dan salam tak lupa juga penulis kirimkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW yang telah mengantarkan dari zaman kegelapan menuju zaman yang terang-benderang. Penulis menyadari bahwa dalam proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini telah banyak pihak yang membantu dalam bentuk apapun itu. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada semua pihak dengan segala keikhlasannya yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini terutama kepada:

1. Kedua Orang Tua, **Bapak Sahir** dan **Ibu Saheriani** yang telah berjuang dan terus mendoakan sedari awal serta melakukan apapun untuk mengusahakan anaknya bisa berada di titik lebih dari dirinya. Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan banyak terima kasih untuk semua pengorbanan tulus yang tentunya tidak akan pernah bisa terbalaskan. Penulis percaya bahwa setiap langkah yang dimudahkan oleh-Nya adalah hasil pengijabahan doa kedua orang tua penulis.
2. Dosen Pembimbing, **Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alie. ST., MT., Ph.D-Eng.** Terima kasih atas segala keikhlasan, kesabaran dan ketulusannya serta dukungan tak terhitung dalam mengarahkan, memberikan bimbingan, bantuan dan motivasi serta masukan-masukan kepada penulis dimulai dari awal perkuliahan dan ditahap penelitian, penulisan skripsi sampai dengan hari ini.
3. Bapak **Ir. H. Juswan, ST., MT.** dan **Dr. Eng. Firman Husain, ST., MT.** selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu dan memberikan kritik serta saran yang sangat membantu penulis dalam proses penelitian maupun penyusunan skripsi ini.
4. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
5. Bapak **Sabaruddin Rahman, ST., MT., Ph.D** selaku Penasehat Akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga saya dapat menyelesaikan studi.
6. **Dosen - Dosen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
7. **Tenaga Kependidikan Departemen Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
8. Kakak penulis **Budi Anto** dan **Ewin Mubarak**. Terima kasih selalu menemani, memberikan masukan, motivasi dan semangat yang tak henti-hentinya.

9. Teman - teman Naval20 dan khususnya mahasiswa Teknik Kelautan 2020 yang kebersamai serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka. Tak lupa pula penulis sampaikan banyak terimakasih kepada kanda-kanda Senior dan dinda-dinda Junior atas motivasi dan dukungannya.
10. Teman-teman **Labo OSAREL** yang selalu memberikan semangat kepada saya, penulis mengucapkan banyak terima kasih juga kepada **Alumni Labo OSAREL** yang selalu bersedia memberikan pengarahan, bantuan dan masukan.
11. Serta semua pihak yang turut serta dalam penyelesaian pendidikan, penelitian, dan penyusunan skripsi yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Penulis menyampaikan ucapan Terima Kasih yang sebesar-besarnya untuk seluruh bantuan yang diberikan. Dengan segala kerendahan hati penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Penulis,

Selviani

ABSTRAK

Selviani. **Analisis Kekuatan Membujur FPSO Pasca *Grounding***. (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie**)

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan batas momen lentur vertikal kapal FPSO yang mengalami kerusakan akibat kandas. Analisis kekuatan batas dilakukan dengan menggunakan metode Nonlinear Finite Element Analysis (NLFEA) dengan proses kontrol momen. Analisa kekuatan batas dibagi atas dua kondisi yaitu kondisi kapal FPSO pada saat utuh (intact) dan kondisi pada saat mengalami kandas. Kerusakan akibat kandas dimodelkan dengan menghapus semua elemen pelat dan stiffener yang ada pada area kerusakan. Dalam hal ini objek penelitian analisa hanya dilakukan pada satu jarak gading pada bagian midship dari kapal FPSO dengan ketidaksempurnaan awal, retak dan cacat pengelasan diabaikan. Kerusakan akibat kandas divariasikan dengan kerusakan akibat kandas dan setelah kandas. Tegangan izin yang digunakan pada objek penelitian ini yaitu kelas baja SH36 dengan tegangan luluh 355 N/mm^2 memiliki tegangan izin sebesar 490 N/mm^2 . Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan batas momen lentur vertikal FPSO untuk model 1 pada kondisi utuh (intact) memiliki kekuatan batas momen lentur vertikal sebesar $5,83 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ pada kondisi hogging dan $-5,85 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ pada kondisi sagging. Kekuatan batas momen lentur vertikal FPSO setelah mengalami kandas dapat diketahui melalui analisis kekuatan batas momen lentur vertikal struktur kapal FPSO model 2 dan 3. Untuk model 2 memiliki kekuatan batas momen lentur vertikal sebesar $5,68 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ pada kondisi hogging dan $-5,77 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ pada kondisi sagging. Sedangkan model 3 memiliki kekuatan batas momen lentur vertikal sebesar $5,62 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ pada kondisi hogging dan $-5,68 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ pada kondisi sagging.

Kata Kunci: FPSO, kandas, kekuatan batas, NLFEA.

ABSTRACT

Selviani. **Analysis of Longitudinal Strength of FPSO Pasca Grounding** (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie.**)

This research aims to determine the limit strength of the vertical bending moment of an FPSO ship that has suffered damage due to running aground. The limit strength analysis is carried out using the NLFEA (Non-linear Finite Element Analysis) method with the moment control process. The limit strength analysis is divided into two conditions, namely the condition of the FPSO ship when intact and the condition when it runs aground. Damage due to grounding is modelled by removing all plate and stiffener elements in the damage area. In this case, the research object was analysed only at one tusk spacing on the midship section of the FPSO vessel with initial imperfections, cracks and welding defects ignored. Damage due to grounding is varied with damage due to grounding and after grounding. The allowable stress used in this research object, SH36 steel grade with a yield stress of 355 N/mm^2 , has a allowable stress of 490 N/mm^2 . The results showed that the FPSO vertical bending moment limit strength for model 1 in intact condition has a vertical bending moment limit strength of $5,83 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ in hogging condition and $-5,85 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ in sagging condition. The strength of the vertical bending moment limit of the FPSO after running aground can be determined through the analysis of the vertical bending moment limit strength of the FPSO ship structure models 2 and 3. For model 2, the vertical bending moment limit strength is $5,68 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ under hogging conditions and $-5,77 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ under sagging conditions. While model 3 has a vertical bending moment limit strength of $5,62 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ under hogging conditions and $-5,68 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ under sagging conditions.

Key Words: FPSO, grounding, ultimate strength, 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	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR NOTASI	xiv
DAFTAR ISTILAH	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II. METODOLOGI PENELITIAN	4
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	4
2.2 Jenis Penelitian	4
2.3 Metode Penelitian	4
2.4 Teknik Pengumpulan Data	8
2.5 Studi Literatur	8
2.6 Data Struktur	21
2.7 Analisis Data	24
BAB III. HASIL	27
3.1 Objek Penelitian	27
3.2 Perhitungan Momen Lentur-Batas Vertikal	28
3.3 Tegangan Izin	29

3.4 Tegangan Kerja Kapal FPSO Terhadap Momen Lentur-Batas Vertikal.....	30
BAB IV. PEMBAHASAN	35
4.1 Momen Lentur-Batas Vertikal	35
4.2 Kekuatan Batas Momen Lentur Vertikal	35
4.3 Perbandingan Kekuatan Batas FPSO Menggunakan Metode NLFEA	42
BAB V. KESIMPULAN	44
5.1 Kesimpulan.....	44
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN	47

DAFTAR TABEL

1. Spesifikasi material.....	6
2. Konfigurasi ukuran <i>stiffener</i>	21
3. Formula perhitungan momen lentur-batas vertikal	28
4. Momen lentur-batas vertikal <i>sagging</i> dan <i>hogging</i>	29
5. Tegangan izin kerja material FPSO.....	30
6. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal FPSO model 1 akibat kekuatan batas	31
7. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal FPSO model 2 akibat kekuatan batas	33
8. Rekapitulasi tegangan kerja arah z kapal FPSO model 3 akibat kekuatan batas	34
9. Kekuatan batas FPSO model 1	36
10. Kekuatan batas FPSO model 2	38
11. Kekuatan batas FPSO model 3	40
12. Kekuatan batas FPSO model 1, model 2 dan model 3.....	42

DAFTAR GAMBAR

1. <i>Floating production storage and offloading (FPSO)</i>	1
2. <i>General load-displacement curve</i>	5
3. Kondisi syarat batas untuk control kelengkungan.....	6
4. FPSO model 1 kondisi <i>meshing</i>	7
5. <i>Quadrilateral shell element</i>	8
6. Tegangan-regangan.....	10
7. Tegangan tarik.....	11
8. Tegangan tekan.....	11
9. Von mises <i>yield surface for plain stress</i>	13
10. Hubungan antara tegangan dan regangan.....	14
11. Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan.....	15
12. <i>Box girder</i> tanpa elemen di tengah penampang.....	17
13. Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal.....	18
14. Faktor distribusi K_M	19
15. Momen lentur vertikal akibat gelombang.....	19
16. Asumsi Caldwell mengenai distribusi tegangan lentur pada kondisi batas.....	20
17. <i>General arrangement</i> Kapal FPSO.....	22
18. Penampang atas kapal arah membujur.....	23
19. <i>Midship</i> kapal FPSO.....	24
20. Diagram Alir.....	26
21. Model 1.....	27
22. Model 2.....	27
23. Model 3.....	27
24. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 1 pada kondisi <i>ultimate strength</i> akibat <i>hogging</i>	30
25. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 1 pada kondisi elastik akibat <i>sagging</i>	31
26. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 2 pada kondisi <i>ultimate strength</i> akibat <i>hogging</i>	32
27. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 2 pada kondisi elastik akibat <i>sagging</i>	32

28. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 3 pada kondisi <i>ultimate strength</i> akibat <i>hogging</i>	33
29. Perilaku dan distribusi tegangan kerja kapal FPSO model 3 pada kondisi elastik akibat <i>sagging</i>	34
30. Grafik momen kelengkungan FPSO model 1	36
31. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 1 akibat <i>hogging</i>	37
32. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 1 akibat <i>sagging</i>	37
33. Grafik momen kelengkungan FPSO model 2	38
34. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 2 akibat <i>hogging</i>	39
35. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 2 akibat <i>sagging</i>	39
36. Grafik momen kelengkungan FPSO model 3	40
37. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 3 akibat <i>hogging</i>	41
38. Deformasi kekuatan batas kapal FPSO model 3 akibat <i>sagging</i>	41
39. Grafik momen kelengkungan FPSO model 1, 2 dan 3	42

DAFTAR NOTASI

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
B	lebar kapal	m
L	panjang kapal	m
b_x	gaya apung	N
w_x	berat beban	N
C	koefisien momen lentur	
C_b	koefisien blok kapal	
K_M	faktor distribusi momen lentur daya gaya geser	
γ_R	faktor keamanan kekuatan-batas lentur	
D	tinggi kapal	m
E	modulus elastisitas	N/mm ²
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>	
FSO	<i>Floating Storage and Offloading</i>	
NLFEA	<i>Non-Linear Finite Element Analysis</i>	
ABS	<i>American Bureau of Shipping</i>	
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>	
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>	
MPC	<i>Multi Point Constrained</i>	
APDL	<i>Ansys Parametric Design Language</i>	
R_{eH}	titik luluh nominal minimum	N/mm ²
F_x	gaya geser arah sumbu x	N
F_{tr}	gaya tarik	N
F_{te}	gaya tekan	N
F_r	gaya geser	N
h	tinggi kerusakan akibat tubrukan	m
I	momen inersia	m ⁴
I_y	momen inersia penampang kapal yang memanjang	m ⁴

e_z	jarak horizontal struktur dari sumbu vertikal dan netral	m
A	luas penampang	mm ²
I_{min}	momen inersia ijin	m ⁴
K_M	faktor distribusi	
l	panjang material	mm
δl	deformasi material	mm
L	panjang kapal	m
M	momen lentur	Nmm
M_{US}	kekuatan batas momen lentur <i>sagging</i>	Nmm
M_{UH}	kekuatan batas momen lentur <i>hogging</i>	Nmm
M_{sw}	momen lentur pada air tenang	Nmm
M_w	momen lentur akibat gelombang	Nmm
M_t	momen lentur- batas total	Nmm
S	modulus penampang	m ³
S_b	modulus penampang bagian <i>bottom</i>	m ³
S_d	modulus penampang bagian <i>deck</i>	m ³
S_p	modulus penampang ijin	m ³
z	jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur	m
z_b	jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur <i>bottom</i>	m
z_d	jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur <i>deck</i>	m
ΔL	pertambahan panjang	m
L	panjang mula-mula	m
ε	regangan	
P	gaya yang bekerja	N
σ	tegangan	N/mm ²
σ_p	tegangan lentur ijin	N/mm ²
σ_{max}	tegangan lentur maksimum	N/mm ²
σ_{tr}	tegangan tarik	N/mm ²
σ_{te}	tegangan tekan	N/mm ²

σ_{ub}	tegangan tekan bagian <i>bottom</i>	N/mm ²
σ_{ud}	tegangan tekan bagian <i>deck</i>	N/mm ²
σ_r	tegangan geser	N/mm ²
σ_{sw}	tegangan statis akibat momen lentur vertikal	N/mm ²
σ_{WH}	tegangan statis akibat momen lentur horizontal	N/mm ²

DAFTAR ISTILAH

ABS	American Bureau of Shipping
BKI	Biro Klasifikasi Indonesia
IACS	International Association of Classification Societies
Defleksi	Perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertikal yang diberikan pada balok atau batang
Deformasi	Perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah objek karena pengaruh gaya
<i>Mesh</i>	Membagi struktur menjadi bagian-bagian kecil
Modulus Elastisitas	Sebuah ukuran yang digunakan untuk mepresentasikan 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</i>	Menjalankan program untuk menghitung hasil analisis
<i>Software</i>	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

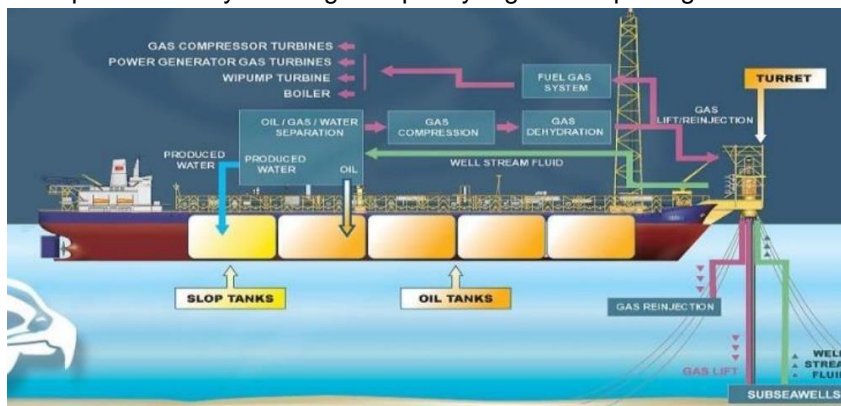
DAFTAR LAMPIRAN

1. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas FPSO menggunakan Metode NLFEA Kondisi *Sagging* dan *Hogging* Model 1 48
2. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas FPSO menggunakan Metode NLFEA Kondisi *Sagging* dan *Hogging* Model 2 50
3. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas FPSO menggunakan Metode NLFEA Kondisi *Sagging* dan *Hogging* Model 3 53
4. Kartu kontrol asistensi 55

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

FPSO (Floating Production Storage and Offloading) adalah 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. Awalnya, FPSO dibatasi pada daerah dengan beban lingkungan yang ringan. Hal ini memungkinkan konversi kapal tanker menjadi FPSO (Paik J, 2007). FPSO merupakan bangunan pengeboran dan penyimpanan minyak lepas pantai yang bersifat portable, dalam artian dapat berpindah-pindah. Adapun hasil pemisahan dari produk pengeboran adalah crude oil, air dan gas. Sebuah kapal yang hanya digunakan untuk menyimpan minyak disebut sebagai Floating Storage and Offloading (FSO). FPSO memiliki karakteristik berbeda dengan FSO, walaupun demikian FPSO dapat dibangun dengan konversi FSO, adapun 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 1.



Gambar 1 *Floating production storage and offloading (FPSO)*

Sumber: Paik J K et al., 2007. *Ship-Shaped Offshore Installations*

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 (Nallayarasu S, 2012).

Seiring pertumbuhan jumlah dan ukuran kapal yang meningkat, maka potensi kecelakaan kandas atau tubrukan dapat terjadi saat kapal beroperasi. Kandas adalah suatu keadaan darurat pada kapal yang dikarenakan kandasnya suatu kapal di dasar perairan baik secara sengaja ataupun tidak sengaja sehingga dapat membahayakan keselamatan jiwa manusia, harta benda dan lingkungan. Ada banyak penyebab yang dapat memicu terjadinya kandas seperti arus, gelombang, pasang dan surut air laut serta keadaan perairan.

Berdasarkan uraian diatas, maka fokus dari penelitian ini mengenai kandas pada FPSO dengan memodelkan struktur dan beban yang terjadi selama operasionalnya untuk digunakan dalam analisis kekuatan membujur kapal FPSO setelah kandas. Dengan adanya penelitian ini pembaca dapat mengetahui kekuatan batas struktur kapal FPSO yakni momen lengkung, momen inersia dan tegangan serta deformasi maksimum pada saat kondisi *sagging* maupun *hogging*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana kekuatan batas kapal FPSO pada kondisi utuh (intact) dan bagaimana kekuatannya pada kondisi setelah mengalami kandas serta bagaimana kekuatan batas yang tersisa akibat kandas?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan batas struktur kapal FPSO pada saat kondisi utuh (intact), untuk mengetahui kekuatan batas struktur kapal FPSO pada kondisi setelah mengalami kandas dan untuk mengetahui kekuatan batas yang tersisa akibat kandas serta mengetahui perilaku yang terjadi pada saat kondisi *hogging* maupun *sagging* pada kapal FPSO.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Beban yang bekerja pada kapal yaitu momen arah membujur dan momen lentur vertikal *longitudinal (hogging and sagging)* dengan kerusakan sebesar 1 jarak gading dengan menggunakan metode elemen hingga.
2. Kerusakan akibat kandas dengan dimensi tertentu pada alas kapal FPSO.
3. Perhitungan respon struktur menggunakan metode elemen hingga atau *Non Linier Finite Element Method*. (Software: ANSYS Mechanical APDL).
4. Tidak meneliti kekuatan melintang kapal.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapaun manfaat pada penelitian ini adalah:

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 hal menentukan kebijakan dalam hal regulasi atau peraturan pada galangan kapal untuk membuat perencanaan struktur kapal FPSO.

BAB II. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di *Ocean Structure Analysis Research Laboratory* (OSAREL). Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa dengan waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Januari – Juli 2024.

2.2 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta menampilkan hasil dari studi kasus mengenai kekuatan membujur kapal terhadap kerusakan akibat kandas pada kapal FPSO dengan metode *Non Linear Finite Element Analysis* (NLFEA).

2.3 Metode Penelitian

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). Adapun metode yang akan digunakan untuk menghitung kekuatan-batas *longitudinal* struktur kapal FPSO, baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami pengurangan elemen membujur setelah mengalami kerusakan akibat kandas pada penelitian ini, yaitu metode *Non Linear Finite Element Analysis* (NLFEA).

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:

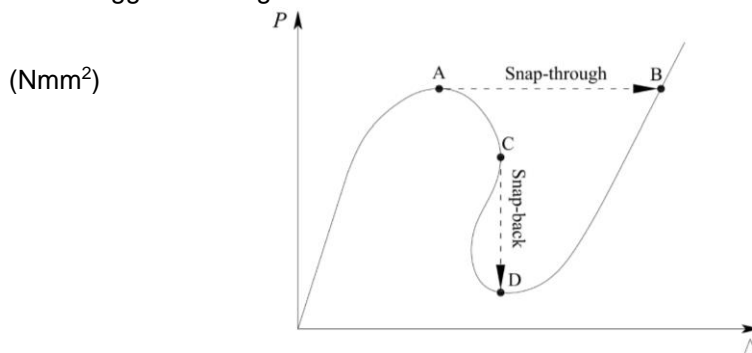
- a. Analisa statis
- b. Analisa quasi-statis
- c. Analisa dinamis

Analisa statis dan analisa quasi-statis banyak digunakan oleh para peneliti untuk menghitung kekuatan-batas struktur kapal. Penelitian kali ini menggunakan tipe analisis statis. Selama analisis statis, beban atau perpindahan diterapkan secara bertahap. Pada setiap kenaikan beban, keseimbangan statis ditemukan menggunakan algoritma numerik berulang (misalnya, N-R atau panjang busur). efek inersia tidak diperhitungkan, begitu pula material yang bergantung pada waktu. Namun, efek laju regangan pada plastisitas material dapat diperhitungkan. Kapan algoritma iterasi N-R digunakan dan ketidakstabilan lokal (tekuk lokal, material, dll) diharapkan terjadi, teknik stabilisasi numerik harus diterapkan.

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 *arc length* (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. Metode *arc length* direkomendasikan untuk analisis statis pada permasalahan tidak stabil yang sangat *nonlinier* termasuk masalah *snap-through* dan *snap-back*. Karena beban dan perpindahan sudah teratasi secara bersamaan, metode ini memungkinkan tercapainya solusi kesetimbangan sepanjang beban-perpindahan kurva (titik A-C-D-B gambar 2), yang menjadikannya satu-satunya metode yang dapat melacak statis penyelesaian kesetimbangan antara titik C dan D. Karena metode *arc length* mengontrol beban pada seluruh struktur menggunakan satu parameter global, ini mungkin tidak cocok untuk menganalisis kasus dengan parameter lokal ketidakstabilan seperti *local buckling and neckling* pada struktur kompleks seperti gelagar lambung kapal. Juga metode *arc length* tidak dapat digunakan dalam analisis dinamis atau kuasi-statis penuh analisa dinamis eksplisit tidak menggunakan algoritma *iterative solution*.



Gambar 2 General load-displacement curve

Sumber: ABS, 2024. NLFEA of marine and offshore structure

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* (m) 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.

4) Ketidaktepatan geometrik

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

5) 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.

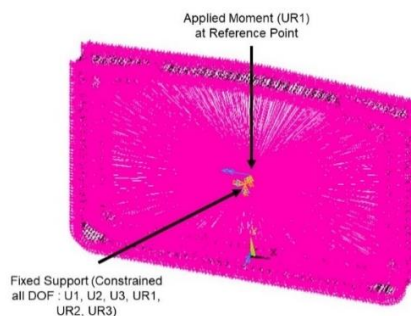
Tabel 1 Spesifikasi material

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

Sumber: ABS, 2021

6) 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. Setiap NLFEA memerlukan beberapa tingkat asumsi mengenai kondisi batas. Pentingnya merepresentasikan secara realistis kondisi batas dalam model elemen hingga bahkan lebih penting lagi analisis *nonlinier* dibandingkan analisis *linier*. Ketika asumsi mengenai kondisi batas perlu dibuat, hal tersebut harus dibuat sedemikian rupa sehingga mengarah pada respons struktur yang konservatif. Kontrol kelengkungan menggunakan kondisi batas dimana kedua ujung model diberikan *rigid link* dengan pembebanan tertentu seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 Kondisi syarat batas untuk kontrol kelengkungan

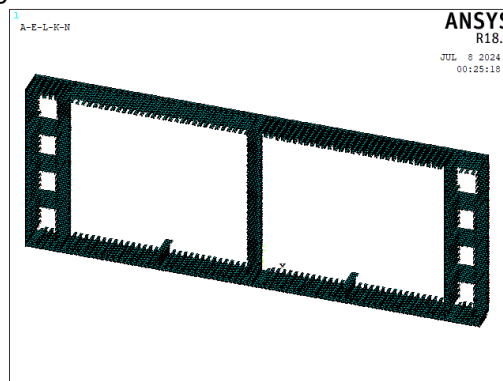
Sumber: Hasil olahan, 2024

7) Meshing

Ukuran dan kualitas *meshing* sangat penting untuk membandingkan hasil perhitungan antara metode NLFEA dan metode *linear* FEA. Dalam *nonlinear finite element analysis* selain algoritma *iterative solution* dan tingkat model, *mesh* merupakan salah satu aspek teknis utama dalam penelitian ini. Kehalusan elemen *mesh* dan jenis elemen yang digunakan dalam model elemen hingga harus cukup untuk memungkinkan model mewakili pola deformasi struktur nyata sehubungan dengan hal-hal seperti *effective flange (shear flag)* dan deformasi lentur struktur balok. Jika elemen mengalami deformasi ataupun distorsi yang signifikan selama perpindahan *nonlinear* analisis, keakuratan dan keandalan solusi dapat berkurang. Oleh karena itu, perhatian khusus harus diberikan pada kualitas elemen yang sering kali dapat ditentukan dengan menggunakan ukuran berikut (ABS 2024, NLFEA of marine and offshore structure):

- *Element aspect ratio*
Rasio panjang tipe elemen maksimum dan minimum
- Sudut kemiringan
Selisih sudut siku-siku dan sudut terkecil antar titik potong elemen garis tengah
- Sudut kelengkungan
Lengkungan elemen di luar bidang
- Jacobian
Ukuran penyimpangan elemen dari bentuk ideal

Metode perhitungan standar kekuatan struktur berbanding lurus dengan ukuran *mesh* pada elemen hingga diberikan dalam catatan klasifikasi yang relevan. Sebelum melakukan analisa dengan metode NLFEA dalam skala besar perlu untuk melakukan studi *mesh convergence*. Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar sebaiknya di-*meshing* dengan ukuran yang lebih kecil untuk dapat memperlihatkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin kecil nilai *meshing* maka perangkat komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi yang tinggi. Dalam penelitian ini, ukuran *meshing* yang digunakan sebesar 350 mm dengan bentuk *quadmapped* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.

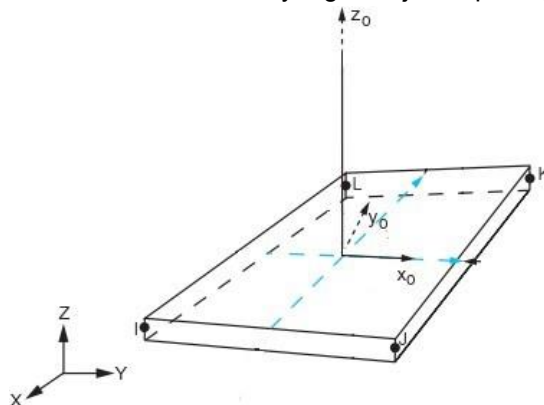


Gambar 4 FPSO model 1 kondisi *meshing*

Sumber: Hasil olahan, 2024

8) Tipe Elemen

Semua pelat yang digunakan pada penelitian ini menggunakan tipe *Shell 181* (*quadrilateral elements*). Elemen ini sangat cocok untuk geometri yang rumit karena cocok digunakan untuk menganalisis pelat tipis atau ketebalan struktur yang sedang yaitu 4 *node element* dengan 6 derajat kebebasan (DOF) dalam arah translasi x,y,z dan rotasi arah x,y,z . Untuk menentukan bagian *beam* dalam penelitian ini menggunakan tipe abaqus yang dapat langsung menemukan *cross-sectional properties* pada setiap elemen (*cross-sectional area, moment of inertia, torsion constant, modulus of elasticity, poisson ration*) kemudian akan dikalibrasi sehingga struktur memiliki konstanta kekakuan yang sesuai disemua sisi seperti yang disyaratkan oleh panduan ABS 2024 mengenai aturan tipe elemen pada *NLFEA of marine and offshore structure* yang ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5 *Quadrilateral shell element (SHELL181)*

Sumber: Putranto, T. 2018. *A smoothed finite element method for the static and free vibration analysis of shells*

2.4 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah:

Observasi, yaitu metode pengumpulan data dengan cara melakukan pengamatan langsung pada objek yang diteliti dengan tujuan untuk memperoleh informasi yang jelas

Dokumentasi, yaitu melengkapi analisis dan memperkuat kesimpulan, seluruh data dan kegiatan dalam penelitian didokumentasikan dalam bentuk gambar

Teknik kepustakaan adalah suatu teknik penelitian dengan cara membaca dan menelaah buku kepustakaan dan sumber-sumber yang bersifat tekstual yang erat hubungannya dengan masalah yang saat ini sedang diteliti oleh peneliti.

2.5 Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi literatur dari berbagai literasi yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini. Secara umum perhitungan langsung struktur *bottom* maupun *deck* harus dilakukan untuk mengetahui kekuatan batas struktur kapal FPSO. Berikut merupakan data-data yang akan digunakan untuk menghitung analisis kekuatan membujur kapal FPSO pada penelitian ini:

1. Tegangan Kerja

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

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

Tegangan lentur (*bending stress*), adalah tegangan yang bekerja secara sejajar 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:

σ = Tegangan (N/mm²)

P = Gaya total (N)

A = Luas penampang batang (mm²)

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

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

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

2. 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:

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

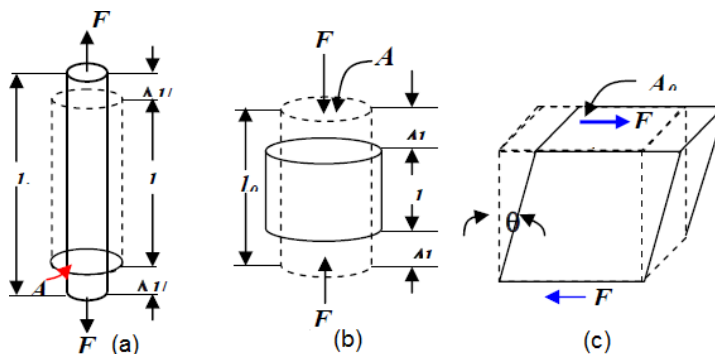
Dimana:

σ = Tegangan (N/mm²)

F = Gaya (N)

A = Luas penampang (mm²)

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm². Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti yang ditunjukkan pada gambar 6 berikut.



Gambar 6 Tegangan-regangan

Sumber: NPTEL

3. Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

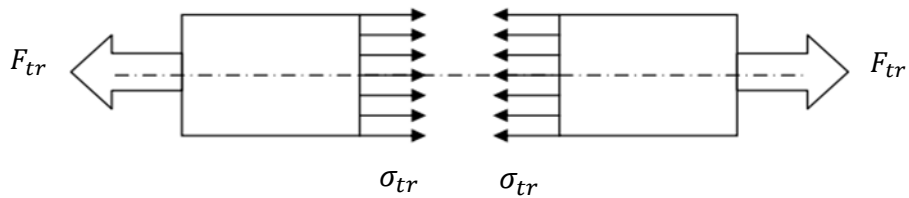
Tegangan tarik (σ_{tr}) terjadi akibat bekerjanya gaya tarik (F_{tr}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio atau perbandingan antara perpanjangan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tarik ϵ_{ta} secara matematik dapat dituliskan dengan persamaan 4 dan dapat dilihat pada gambar 7.

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

Dimana:

σ_{tr} = Tegangan tarik (N/mm²)

F_{tr} = Gaya tarik (N)
 A = Luas penampang (mm^2)



Gambar 7 Tegangan tarik

Sumber: NPTEL

4. Tegangan Tekan

Tegangan tekan (σ_{te}) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan (F_{te}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan. Rasio atau perbandingan antara perpendekan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan ε_{ta} secara matematik dapat dilihat pada gambar 8, selanjutnya dapat dinyatakan dengan persamaan 5:

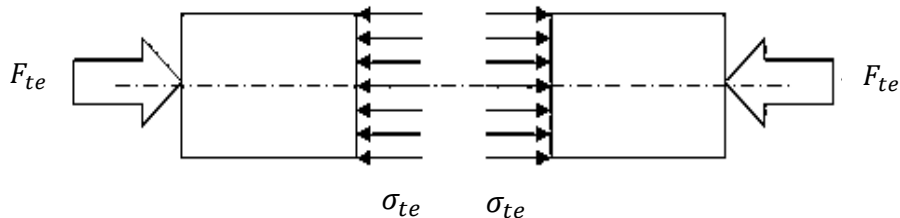
$$\sigma_{te} = \frac{F_{te}}{A} \quad (5)$$

Dimana:

σ_{te} = Tegangan tekan (N/mm^2)

F_{te} = Gaya tekan (N)

A = Luas penampang (mm^2)



Gambar 8 Tegangan tekan

Sumber: NPTEL

5. Tegangan Geser

Jika gaya normal atau 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 (σ_r) timbul akibat kerja dari dua gaya geser (F_r) yang saling berlawanan arah (aksi-reaksi) terhadap suatu bidang geser, pada satuan luas bidang penampang tahanan elemen struktur (A). Sehingga bidang penampang tersebut mengalami regangan geser searah bekerjanya gaya. Jika besaran gaya

geser (S) dikerjakan pada batang akan menimbulkan tegangan geser (σ_r). Tegangan geser (σ_r), 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:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A} \quad (6)$$

Dimana:

σ_r = Tegangan geser (N/mm²)

F_r = Gaya geser atau gaya lintang (N)

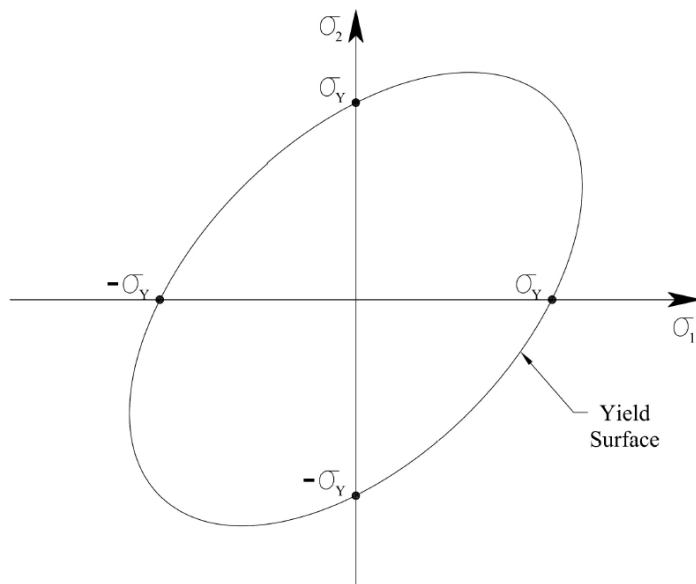
A = Luas penampang (mm²)

6. Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

Tegangan lentur akibat beban berat statis tidak boleh kurang dari $0,35 \times R_{eH}$ atau kuat luluh (BKI, volume 2, 2024), secara khusus mengacu pada hambatan internal benda yang melawan momen lentur. Ini didistribusikan secara tidak merata di seluruh penampang, dengan bagian balok yang berbeda mengalami tingkat tegangan yang berbeda. Distribusi yang tidak seragam ini terutama disebabkan oleh bagaimana sumbu netral dan geometri balok berhubungan dengan gaya yang diterapkan. Sumbu netral adalah sumbu pada penampang balok yang tegangannya nol. Pada saat balok dibengkokkan, distribusi tegangan internal menyebabkan bagian tertentu dari balok mengalami tekan (tegangan negatif) dan bagian lain mengalami tarikan (tegangan positif). Sumbu netral memisahkan daerah kompresi dan tegangan, dan lokasinya bergantung pada geometri balok.

7. Tegangan Luluh (*Yield Stress*)

Tegangan luluh merupakan tegangan yang timbul akibat terkonsentrasi atau terpusatnya gaya tekan pada suatu daerah kontak yang sangat kecil, diantara suatu elemen struktur yang sedang bekerja sama dalam meneruskan tegangan. Kondisi luluh menentukan kombinasi tegangan pada komponen struktural tertentu dimana material mulai luluh. Direkomendasikan agar kriteria hasil Von Mises (juga disebut oktahedral kriteria luluh tegangan geser) digunakan dalam NLFEA. Kriterianya menyatakan bahwa bahan mulai luluh ketika nilai tegangan Von Mises ekuivalen mencapai tegangan luluh material seperti pada persamaan 2.2 dan ditunjukkan pada gambar 9, dimana semua keadaan tegangan di dalam permukaan luluh berada dalam domain elastis dan semua keadaan tegangan pada permukaan luluh berada dalam domain elastis-plastik. Perlu diperhatikan juga bahwa permukaan luluh bergeser atau berubah ukuran seiring berkembangnya regangan plastis pada material, namun keadaan tegangan selalu tetap pada permukaan luluh. Keadaan tegangan tidak mungkin berada di luar permukaan luluh. Kriteria hasil Von Mises sudah tertanam di sebagian besar dari program NLFEA.



Gambar 9 Von Mises *yield surface for plain stress*

Sumber: ABS, 2024

8. 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.

9. Regangan

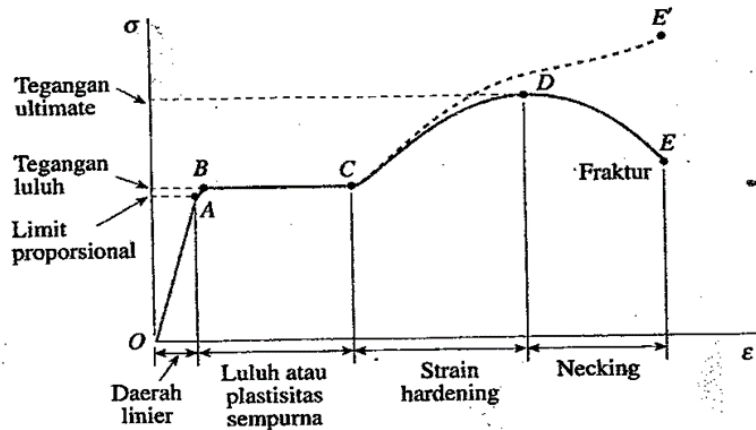
Sesuai dengan bunyi hukum Hooke bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangannya. Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada persamaan 7 dan ditunjukkan pada gambar 10:

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

Dimana:

ε = Regangan

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



Gambar 10 Hubungan antara tegangan dan regangan
 Sumber: Mulyati, 2014

Seperti yang terlihat pada gambar 10 (Mulyati,2014), menunjukkan diagram untuk batas elastis baja struktural. Pada gambar tersebut, elongasi diplot sepanjang sumbu horizontal dan tegangan yang sesuai diberikan oleh koordinat kurva OABCDE yang pada akhirnya material mencapai batas elastis (*elastic limit*). Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan, sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Yaitu bahan secara tiba-tiba mulur yang disebut titik mulur (*yield point*), tetapi bahan segera memperlihatkan lagi kemampuan menahan kenaikan tegangan, tetapi pemanjangan sekarang naik dengan laju yang lebih cepat dari tegangan sampai mencapai titik F_u yaitu tegangan maksimum batas kekuatan bahan. Tegangan ini disebut tegangan batas (*ultimate stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. Diluar titik F_u , pemanjangan akan berlanjut, tetapi secara perlahan tegangan berkurang, sampai akhirnya batang patah.

10. 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). Adapun deformasi yang timbul pada material dapat dihitung dengan persamaan 8 berikut:

$$\delta l = \epsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (8)$$

Dimana:

σ = Tegangan yang timbul pada material (N/mm^2)

- ε = Regangan yang timbul pada material
 l = Panjang material (mm)
 δl = Deformasi material (mm)
 P = Beban atau gaya yang bekerja pada material (N)
 A = Luas penampang material (mm²)
 E = Modulus elastisitas material (N/mm²)

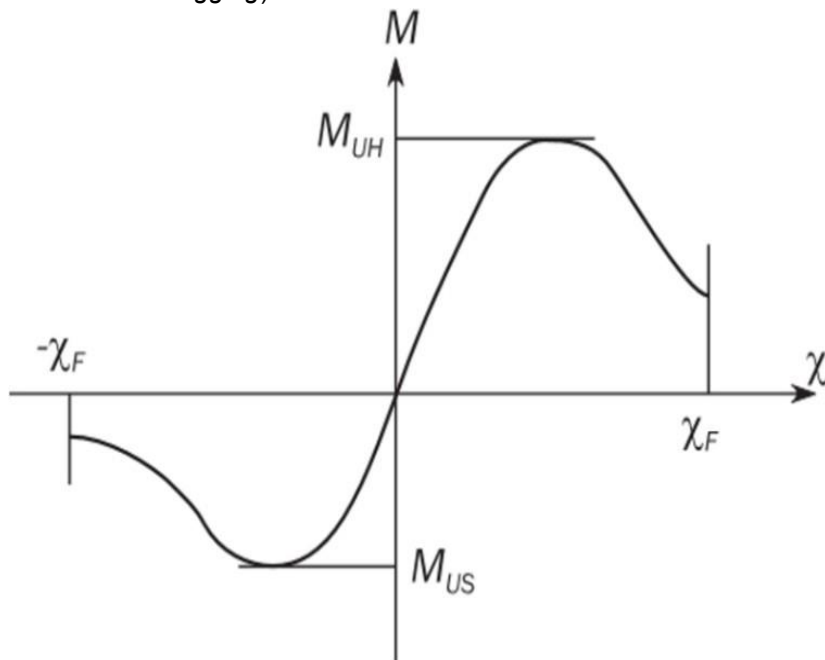
11. Kekuatan Batas (*Ultimate Strength*)

Kekuatan-batas adalah 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 FPSO (M_U) harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria seperti persamaan 9 dibawah ini (DNV GL, 2017b).

$$M_t \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (9)$$

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



Gambar 11 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan
 Sumber: DNV GL, 2017b

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada gambar 11. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*. Berdasarkan teori balok, tegangan lentur (σ) pada penampang balok yang mengalami momen lentur dapat dihitung dengan:

$$\sigma = \frac{M \times z}{I} \quad (10)$$

dimana M adalah momen lentur, I adalah momen inersia dan z adalah 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 sebagai berikut:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad (11)$$

dimana S modulus penampang. Modulus penampang (S) seperti pada persamaan 11, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut:

$$S_d = \frac{I}{z_d}, \text{ untuk bagian } deck \quad (12)$$

$$S_b = \frac{I}{z_b}, \text{ untuk bagian } bottom \quad (13)$$

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 14 dan 15 sebagai berikut:

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud}, \text{ untuk } deck \quad (14)$$

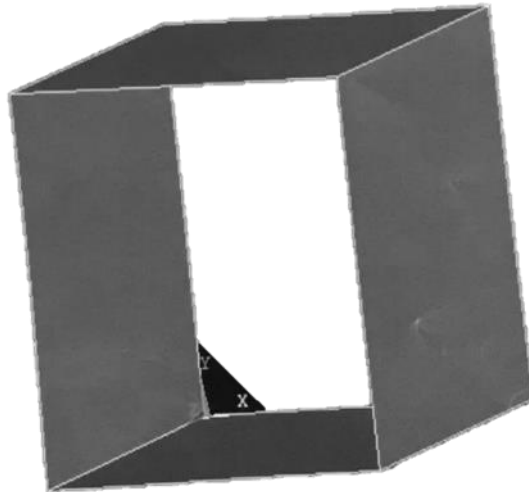
$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub}, \text{ untuk } bottom \quad (15)$$

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

12. Nodal Constrained

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

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/mm², Poison Ratio = 0,3 dan densitas = $7,8 \times 10^{-5}$ N/mm² adapun bentuk *box girder* dapat dilihat seperti gambar yang telah didesain di ANSYS.

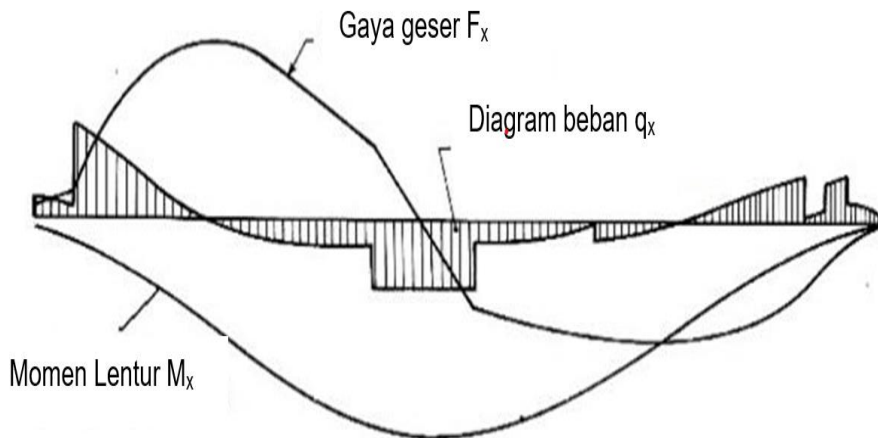


Gambar 12 Box girder tanpa elemen di tengah penampang
Sumber: Muis Alie et al., 2021

Gambar 12 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 atau *node* bayangan yang dapat digunakan sebagai letak tumpuan atau *multiple point constrained* (MPC) (Muis Alie et al., 2021)

13. Pembebanan *Hogging dan Sagging*

Momen lentur dan gaya geser pada kondisi air tenang berasal dari gaya apung dan distribusi berat sepanjang panjang kapal seperti pada gambar 13.



Gambar 13 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

$$q_x = b_x - w_x \quad (16)$$

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

$$M_{SW} = -0,05168K_M C L^2 B (C_b + 0,7) kN\cdot m, \quad \text{kondisi } \textit{sagging} \quad (17)$$

$$M_{SW} = +0,01K_M C L^2 B (11,97 - 1,9C_b) kN\cdot m, \quad \text{kondisi } \textit{hogging} \quad (18)$$

dimana:

K_M = Faktor distribusi seperti pada gambar 14

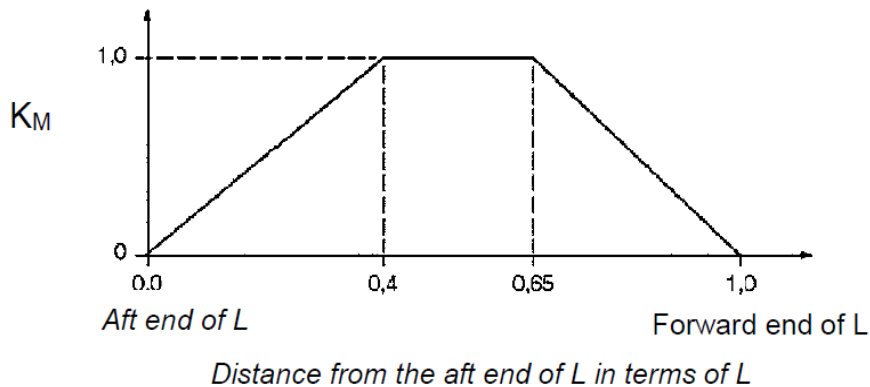
L, B = Lebar dan panjang kapal dalam satuan meter

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

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

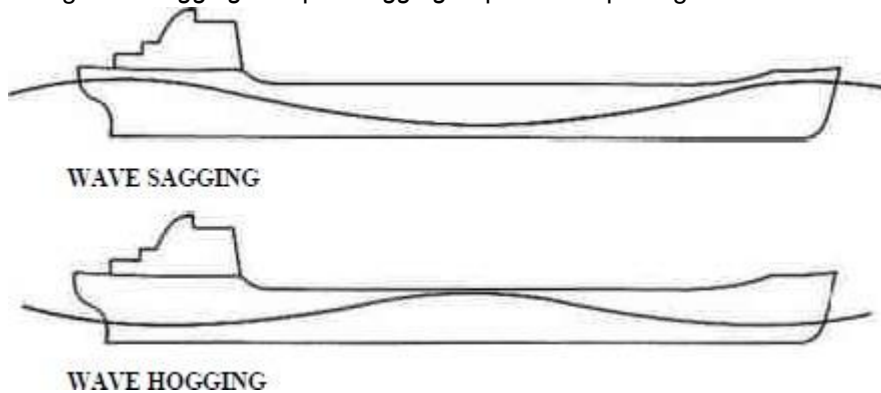
= 10,75 untuk $300 \leq L \leq 350$ m

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



Gambar 14 Faktor distribusi K_M
 Sumber: (DNV GL, 2017a)

Beban dinamis *longitudinal* diakibatkan oleh gelombang. Ketika kapal berada pada puncak gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *hogging*. Ketika kapal berada di lembah gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *sagging*. Adapun kondisi kapal akan mengalami *hogging* ataupun *sagging* dapat dilihat pada gambar 15 dibawah ini.



Gambar 15 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:

$$M_w = -0,11K_M C L^2 B (C_b + 0,7) \text{ kN-m, kondisi sagging} \quad (19)$$

$$M_w = +0,19K_M C L^2 B C_b \text{ kN-m, kondisi hogging} \quad (20)$$

dimana, C dan K_m seperti pada persamaan 17 dan 18.

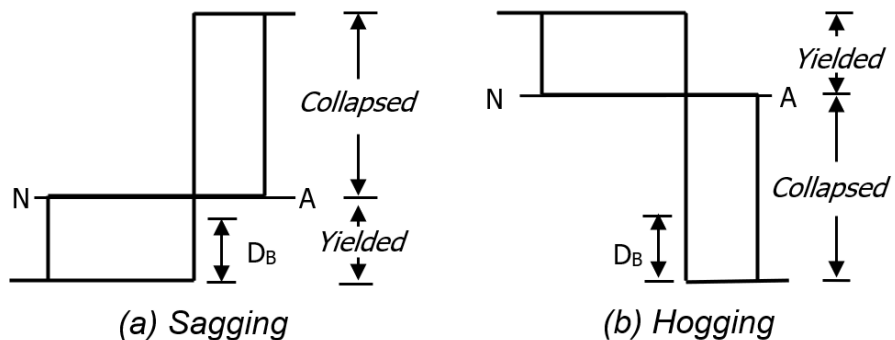
Kombinasi beban statis dan dinamis (M_t) untuk menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur-batas vertikal dihitung dengan penjumlahan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang (DNV GL, 2017b).

$$M_t = M_{sw} + 1,2M_w \quad (21)$$

14. 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 (M_{sw}) 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.

Caldwell (1965), mengasumsikan distribusi tegangan lentur di atas penampang lambung pada batasan *ultimate* di bawah momen lentur vertikal, seperti yang digambarkan pada gambar 16, dimana seluruh material yang terkompresi telah mencapai kekuatan batas dengan tekuk dan semua material yang mengalami *tension* akan kalah. Momen lentur batas mengintegrasikan dengan asumsi tegangan lentur di atas penampang (Hughes & Paik, 2010).



Gambar 16 Asumsi Caldwell mengenai distribusi tegangan lentur pada kondisi batas *ultimate* dibawah momen lentur vertikal

Sumber: Hughes & Paik, 2010

15. Displacement Control

Pendekatan pembebanan ini terdiri dari peningkatan perpindahan batas struktur. Dalam kasus *hull girder under* momen lentur, rotasi kekakuan (*rigid*) elemen dari model *cross-section* (kelengkungan) menjadi bertambah, maka dari itu *displacement control* berfungsi untuk menghitung perilaku struktur pasca keruntuhan (*post collapse*) wilayah di luar titik batas (titik A, gambar 9).

Diperlukan pengolahan hasil tegangan untuk menghitung gaya dan momen pada berbagai *cross-section* yang dibutuhkan di dalam struktur. Ketika *displacement control* diterapkan pada struktur asimetris misalnya, asimetris *hull girder damaged*.

2.6 Data Struktur

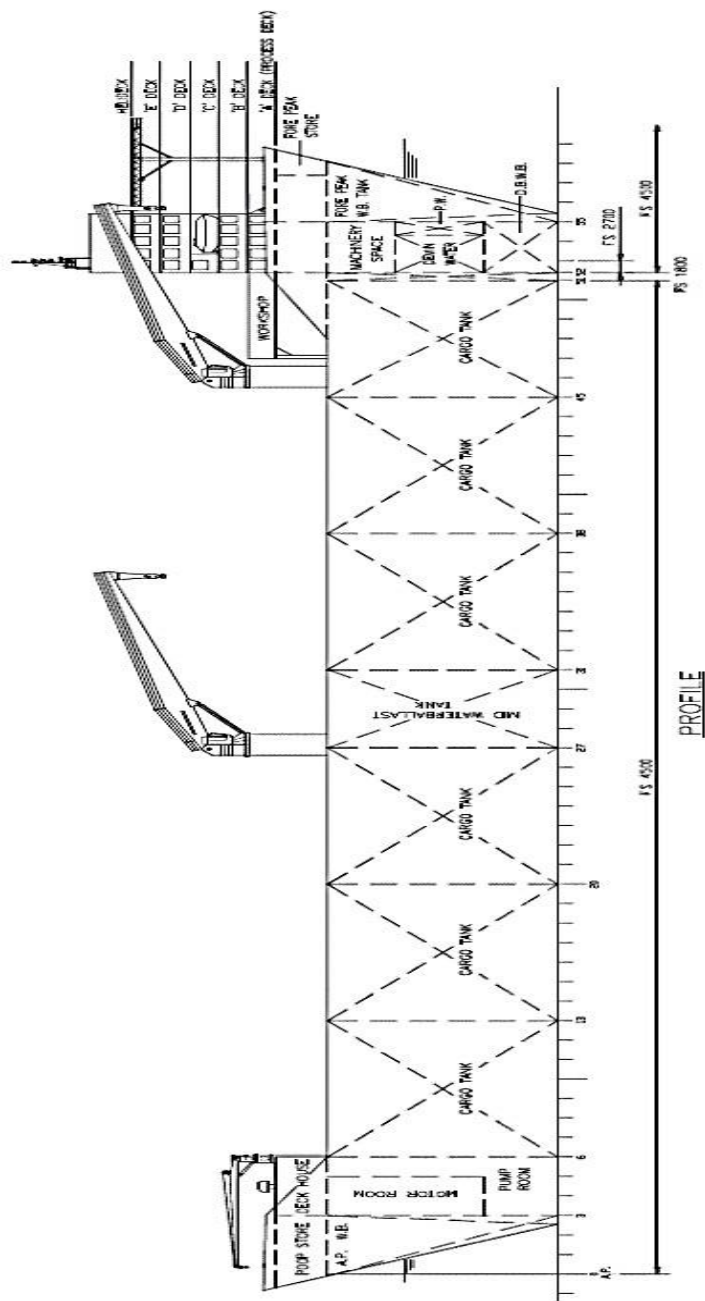
Data pada penelitian ini menggunakan data dari PT. Irvine Engineering, Dubai. Penelitian ini menggunakan kapal FPSO dengan ukuran utama sebagai berikut:

Panjang Kapal, L	:	256,5	m
Lebar Kapal, B	:	70,2	m
Tinggi Kapal, D	:	20,7	m
Koefisien Blok Kapal	:	0,83	
Type of Material	:	HS36	
Elastic Modulus	:	210.000	N/mm ²
Density	:	7,7 x 10 ⁻⁵	N/mm ³
Yield Strength	:	355	N/mm ²
Rasio Poisson	:	0,33	

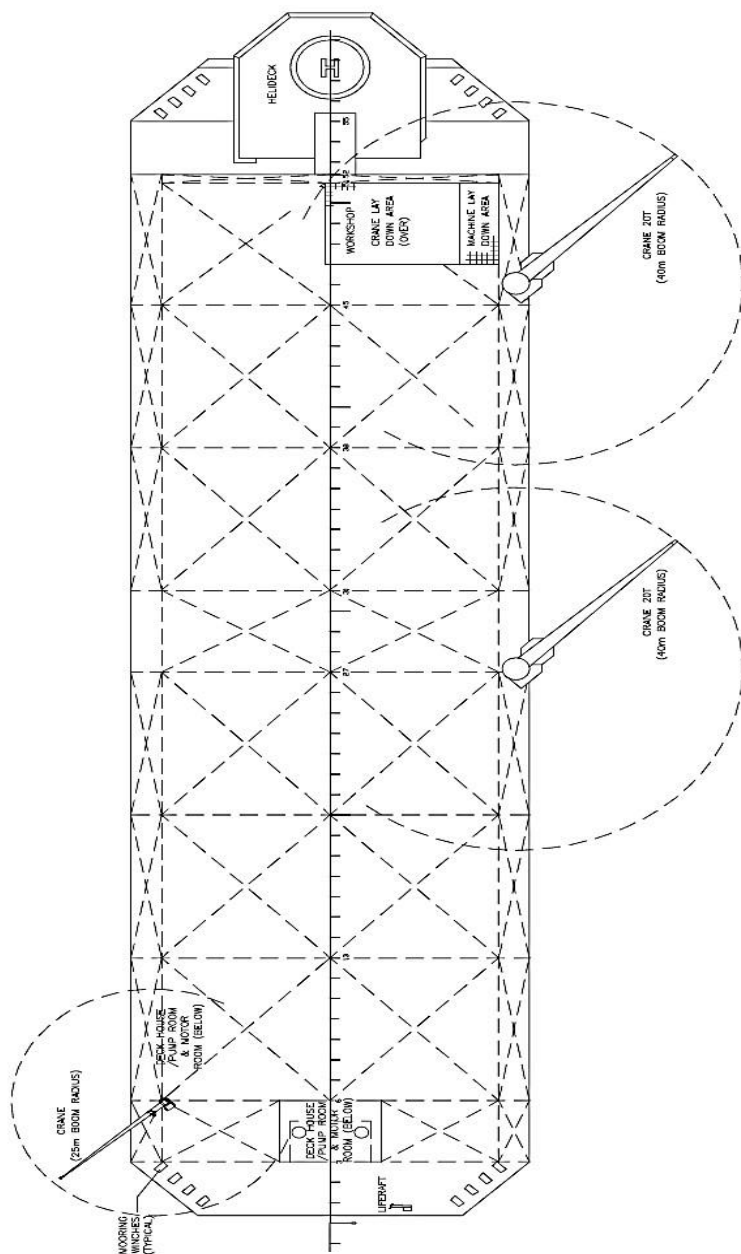
Konfigurasi penampang pada arah membujur kapal FPSO dapat dilihat pada gambar 17, gambar 18, dan gambar 19, dan Tabel 2 untuk konfigurasi ukuran *stiffener*.

Tabel 2 Konfigurasi Ukuran *Stiffener*

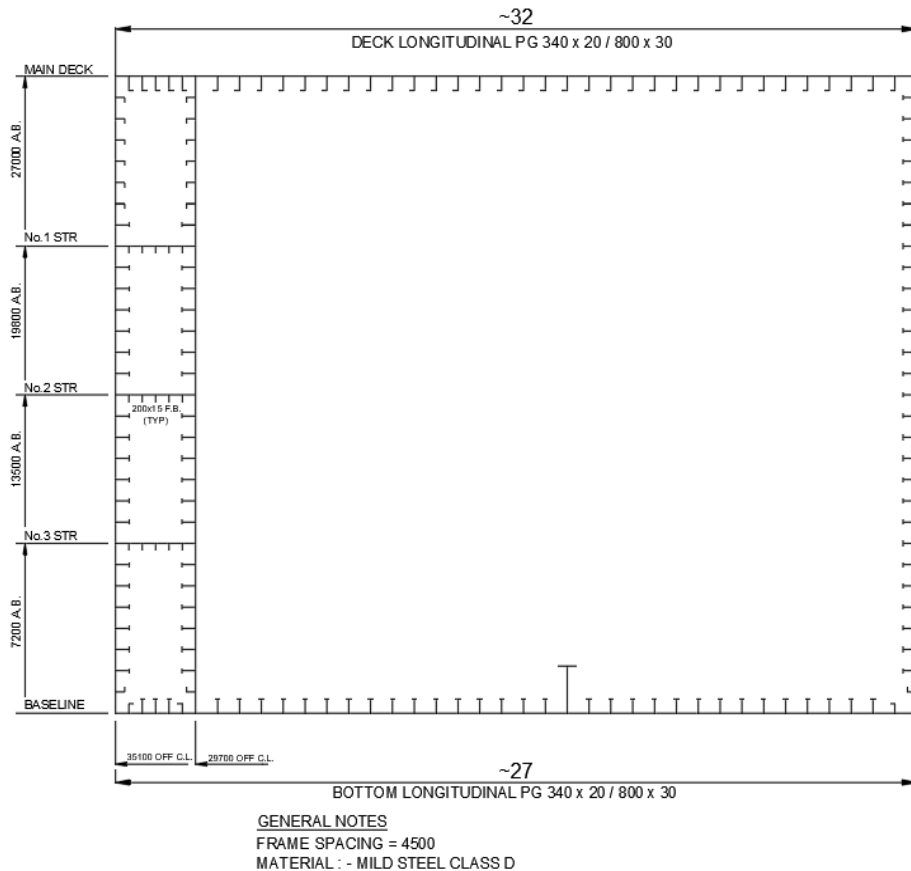
LONGITUDINAL NO.	SIDE SHELL LONGITUDINAL BULKHEADS (mm)
39-41	600x15 / 200x30 F.B.
42-45	550x15 / 150x25 F.B.
50-53	550x15 / 150x25 F.B.
54-57	450x15 / 150x25 F.B.
58-61	450x15 / 150x25 F.B.
62-64	400x14 O.B.P.
65-67	370x13 O.B.P.



Gambar 17 General arrangement



Gambar 18 Penampang atas kapal arah membujur



Gambar 19 Setengah *midship* kapal FPSO

2.7 Analisis Data

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam melakukan analisis data dalam penelitian pengaruh *topside tank* terhadap kekuatan membujur kapal FPSO ini adalah:

1) Tahapan Pertama

Kegiatan penelitian dilakukan dengan pengambilan data dari berbagai sumber seperti artikel-artikel ilmiah pada dan proceeding serta buku yang berhubungan dengan tema penelitian. Data diperoleh di Laboratorium ataupun dari sumber-sumber lainnya.

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 bagian bawah sisi kapal dengan menggunakan metode elemen hingga.

3) Tahapan Ketiga

Kegiatan pada tahap ini ditekankan pada pemodelan penampang serta pengolahan data meliputi analisa struktur penampang tengah kapal FPSO berupa tegangan dan kekuatan batas yang terjadi pada kapal FPSO saat kondisi intact dan kondisi setelah terjadi kandas akibat beban yang bekerja dengan menggunakan alat berupa *software* ANSYS.

4) Hasil Penelitian

Ketika pengecekan analisis selesai dan analisis model dinyatakan berhasil maka tahapan selanjutnya adalah memaparkan hasil analisis yang telah didapatkan, berupa kurva hubungan antara *bending moment* dengan *curvature* dan bentuk deformasi yang diakibatkan oleh beban yang bekerja pada struktur FPSO.

Penelitian ini menggunakan proses kontrol momen untuk mengetahui nilai kekuatan-batas struktur baik sebelum dan setelah mengalami kerusakan. Kondisi syarat batas pada penelitian ini adalah seluruh titik ujung model bagian *aft* di-*full constrain*. Tidak ada pembebanan pada titik acuan *aft*. Ujung model bagian *fore* pada titik acuan sumbu netral, diberikan momen lentur kemudian semua titik pada ujung *fore* di-*rigid link full constrain* ke titik acuan sumbu netral. Besaran nilai momen lentur yang diaplikasikan pada titik *fore* dilakukan dalam dua tahapan pembebanan dimana ada peningkatan nilai momen lentur pada setiap tahapan sampai aplikasi ANSYS mendapatkan nilai kekuatan-batas struktur.

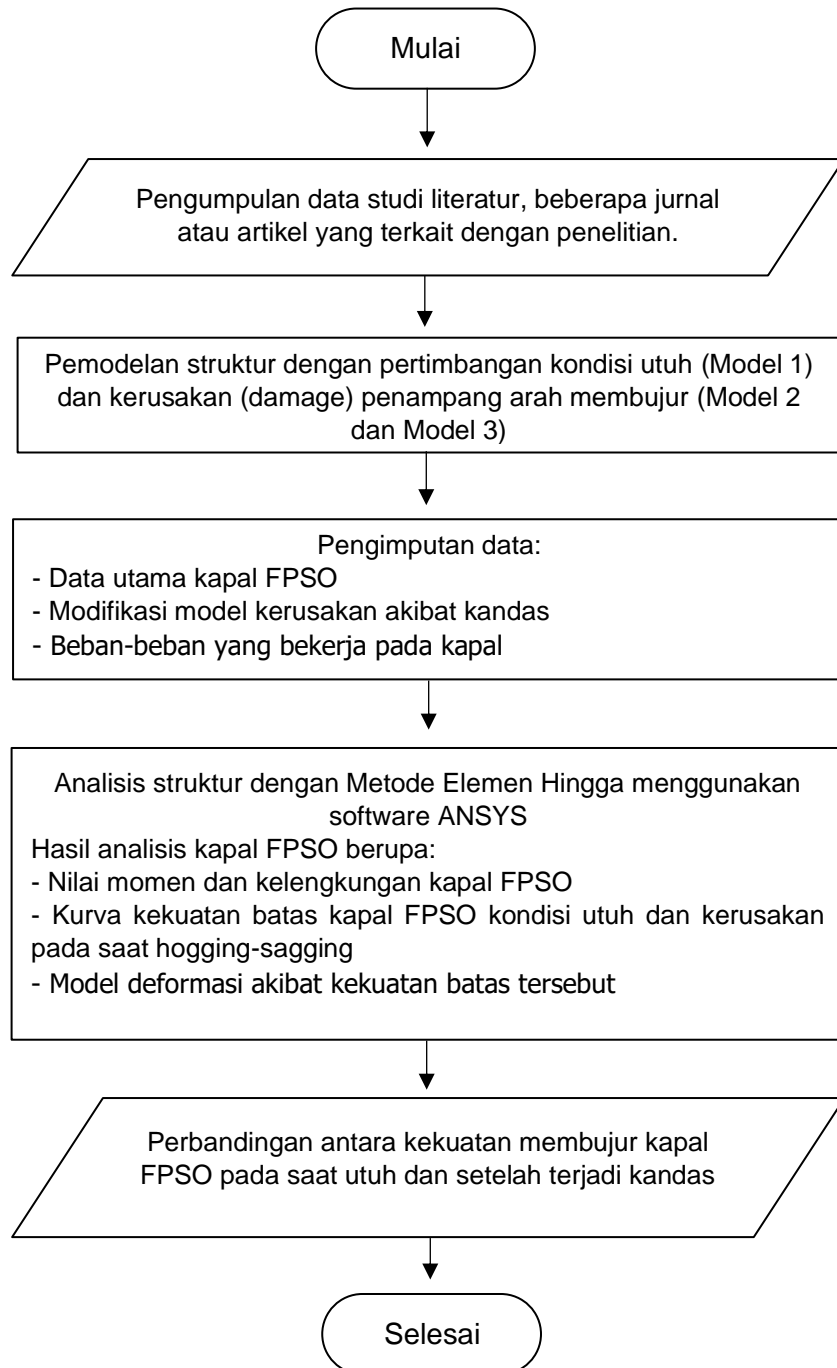
Keakuratan nilai kekuatan-batas struktur dapat diperoleh dengan meningkatkan jumlah tahapan pembebanan. Metode NLFEA menggunakan analisa statis yaitu dengan menggunakan metode *arc length* untuk mendapatkan nilai batas *buckling* dan *post buckling* pada struktur.

5) Kesimpulan

Pada tahap ini akan diberikan kesimpulan mengenai hasil analisis kekuatan membujur FPSO pasca *grounding* dengan mempertimbangkan momen lengkung maksimum yang dialami oleh badan kapal sebagai satu kesatuan pada arah membujur dengan memahami prosedur untuk membuat kurva beban sepanjang kapal (*curvature*) pada kondisi *sagging* maupun *hogging*, dapat menghitung momen inersia dan tegangan maksimum pada struktur membujur kapal baik kondisi *sagging* maupun *hogging*, serta mendapatkan hasil defleksi maksimum pada kondisi *sagging* maupun *hogging* terhadap kekuatan membujur kapal dengan menggunakan metode NLFEA.

6) Diagram Alir

Adapun alur penelitian atau diagram alir dalam penelitian analisis kekuatan membujur FPSO pasca *grounding* dapat dilihat pada gambar 20.



Gambar 20 Diagram Alir