

SKRIPSI

PENGARUH BANGUNAN ATAS PADA FPSO TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL

Disusun dan diajukan oleh:

**MUHAMMAD AZKA BINTANG AMFFA
D081 19 009**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PENGARUH BANGUNAN ATAS PADA FPSO TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL

Disusun dan diajukan oleh

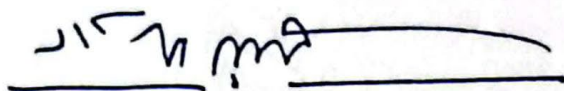
MUHAMMAD AZKA BINTANG AMFFA
D081 19 1009

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana pada Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 26 Juli 2023.....
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


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


Ir. Juswan, ST., MT.
NIP. 19621231 198903 1031

Ketua Program Studi,


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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Muhammad Azka Bintang Amffa
NIM : D081191009
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul "Pengaruh Bangunan Atas pada FPSO Terhadap Kekuatan Membujur Kapal" Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.


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

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

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

Gowa, 21 Juli 2023

Yang Menyatakan,



Muhammad Azka Bintang Amffa

ABSTRAK

MUHAMMAD AZKA BINTANG AMFFA. *Pengaruh Bangunan Atas pada FPSO Terhadap Kekuatan Membujur Kapal* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Juswan**)

Dalam perancangan dan pembuatan suatu kapal salah satu aspek terpenting yaitu perancangan strukturnya. Konstruksi kapal harus mampu menahan beban-beban yang bekerja pada kapal baik pada kondisi normal maupun ekstrem. Dalam perkembangan teknologi konstruksi kapal, desain dan material menjadi hal yang sangat dipertimbangkan oleh perusahaan galangan kapal dalam perancangan dan pembuatan kapal baru. Salah satunya yaitu kekuatan pada geladak kapal. Pada penelitian ini dilakukan analisa menggunakan metode NFLEA (*Non Linear Finite Element Analysis*) untuk mengetahui pengaruh bangunan atas pada FPSO terhadap kekuatan membujurnya dengan memasukkan data profil FPSO pada aplikasi ANSYS. Analisis dilakukan pada *midship* FPSO dengan bangunan atas dan tanpa bangunan atas saat kondisi *hogging* dan *sagging* dengan penambahan beban secara bertahap berdasar aturan yang berlaku untuk mendapatkan hasil analisis berupa kurva hubungan antara *bending moment* dengan *curvature* dan bentuk deformasi yang diakibatkan oleh beban yang bekerja pada struktur FPSO. Tegangan Izin yang digunakan pada objek penelitian ini yaitu kelas baja AH36 dengan tegangan luluh 355 N/mm^2 memiliki tegangan izin sebesar 243 N/mm^2 . Hasil Penelitian menunjukkan bahwa kekuatan batas momen lentur vertikal FPSO dipengaruhi oleh bangunan atas kapal. Struktur kapal dengan bangunan atas memiliki kekuatan struktur 10,48% dan 17.6% lebih besar pada kondisi *hogging* dan *sagging* secara berturut-turut dibanding struktur kapal tanpa bangunan atas.

Kata Kunci: bangunan atas, FPSO, kekuatan, membujur, NLFEA.

ABSTRACT

MUHAMMAD AZKA BINTANG AMFFA. *Effect of Top Side on FPSO on The Longitudinal Strength of The Ship* (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Juswan**)

In the design and manufacture of a ship one of the most important aspects is the design of the structure. Ship construction must be able to withstand the loads acting on the ship in both normal and extreme conditions. In the development of ship construction technology, design and materials are highly considered by shipbuilding companies in the design and manufacture of new ships. One of them is the strength on the ship's deck. In this study, an analysis was carried out using the NFLEA (Non-Linear Finite Element Analysis) method to determine the effect of the superstructure on the FPSO on its longitudinal strength by entering the FPSO profile data into the ANSYS application. The analysis was carried out on midship FPSOs with superstructures and without superstructures during hogging and sagging conditions with gradual addition of load based on the regulation to obtain the results of the analysis in the form of a relationship curve between bending moment and curvature and the shape of the deformation caused by loads acting on the FPSO structure. The allowable stress used for AH36 steel class with a yield stress of 355 N/mm^2 and yield stress of 243 N/mm^2 . The results show that the ultimate strength of the FPSO vertical bending moment is affected by the superstructure of the ship. The ship with superstructure has the ultimate strength 10.48% and 17.6% greater under hogging and sagging condition respectively than without superstructure.

Keywords: FPSO, longitudinal, strenght, NLFEA, topside

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah.....	3
1.3 Tujuan penelitian/perancangan.....	3
1.4 Manfaat penelitian/perancangan.....	4
1.5 Ruang lingkup/Asumsi perancangan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pengertian FPSO.....	5
2.2 Desain Struktur <i>Topside</i> FPSO.....	6
2.3 Tegangan yang Bekerja.....	8
2.4 Tegangan Normal.....	9
2.5 Tegangan Tarik (<i>Tensile Stress</i>).....	10
2.6 Tegangan Tekan (<i>Compressive Stress</i>).....	11
2.7 Tegangan Geser (<i>Shear</i>).....	12
2.8 Tegangan Lentur (<i>Bending Stress</i>).....	12
2.9 Tegangan Luluh (<i>Crushing/Bearing Stress</i>).....	13
2.10 Tegangan Izin Dasar.....	13
2.11 Regangan.....	13
2.12 Deformasi Material.....	16
2.13 Kekuatan Batas (<i>Ultimate Strength</i>).....	17
2.14 <i>Nodal Constrained</i>	18
2.15 Beban-Beban yang Bekerja.....	20
2.16 Beban Geladak Cuaca (<i>Load on Weather Decks</i>).....	21
2.17 Beban Luar Sisi Kapal (<i>Load on the Ship's Side</i>).....	21
2.18 Beban Luar Alas Kapal (<i>External Load on the Ship's Bottom</i>).....	22
2.19 Beban Geladak Muatan Kapal (<i>Load on Cargo Decks</i>).....	22
2.20 Beban Alas Dalam Kapal (<i>External Load on The Ship's Bottom</i>).....	22
2.21 Pembebanan <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	23
2.22 Metode <i>Non Linear Finite Element Analysis</i>	25
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	30
3.1 Jenis Penelitian.....	30
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	30
3.3 Penyajian Data.....	30
3.4 Analisa Data.....	33
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1 Objek Penelitian.....	35
4.2 Perhitungan Momen Lentur – Batas Vertikal.....	36
4.3 Tegangan Izin.....	38
4.4 Kekuatan Batas Momen Vertikal.....	38

4.5 Perbandingan Kekuatan Batas FPSO Dengan Menggunakan Metode NLFEA.....	48
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Floating Production Storage and Offloading System (FPSO)</i>	5
Gambar 2.2 <i>Layout Topsides Kapal FPSO</i>	6
Gambar 2.3 Tegangan-Regangan	10
Gambar 2.4 Tegangan Tarik	11
Gambar 2.5 Tegangan Tekan	11
Gambar 2.6 Hubungan antara tegangan dan regangan (Timoshenko, 1930)....	14
Gambar 2.7 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan (DNV GL, 2017b)	17
Gambar 2.8 <i>Box Girder</i> Tanpa Elemen di Tengah Batang	19
Gambar 2.9 Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal.....	23
(Shama, 2013)	23
Gambar 2.10 Faktor distribusi K_M (DNV GL, 2017a).....	24
Gambar 2.11 Momen lentur vertikal akibat gelombang (Bachman, 1991).....	25
Gambar 2.12 Kondisi Syarat Batas Untuk Kontrol Kelengkungan (Hasil Olahan, 2023).....	28
Gambar 2.13 FPSO Model 2 Kondisi <i>Meshing</i> (hasil olahan, 2023).....	29
Gambar 3.1. <i>Midship</i> Kapal FPSO SANTOS (SAMPANG) PTY.LTD, 2018	32
Gambar 3.2 Diagram Alir.....	34
Gambar 4.1 Model 1	35
Gambar 4.2 Model 2.....	35
Gambar 4.3 Grafik Momen kelengkungan FPSO model 1.....	39
Gambar 4.4 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Sagging</i> Model 1 pada Kondisi <i>Elastik</i>	40
Gambar 4.5 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Sagging</i> Model 1 pada kondisi <i>Ultimate-Strength</i>	40
Gambar 4.6 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Sagging</i> Model 1 pada Kondisi <i>Collapse</i>	41
Gambar 4.7 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Hogging</i> Model 1 pada Kondisi <i>Elastik</i>	41
Gambar 4.8 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Hogging</i> Model 1 pada Kondisi <i>Ultimate-Strength</i>	42
Gambar 4.9 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Hogging</i> Model 1 pada Kondisi <i>Collapse</i>	42
Gambar 4.10 Grafik Momen Kelengkungan FPSO Model 2	44
Gambar 4.11 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Sagging</i> Model 2 pada Kondisi <i>Elastik</i>	44
Gambar 4.12 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Sagging</i> Model 2 pada Kondisi <i>Ultimate-Strength</i>	45
Gambar 4.13 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Sagging</i> Model 2 pada Kondisi <i>Collapse</i>	45
Gambar 4.14 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Hogging</i> Model 2 pada Kondisi <i>Elastik</i>	46
Gambar 4.15 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Hogging</i> Model 2 pada Kondisi <i>Ultimate-Strength</i>	46
Gambar 4.16 Deformasi Kekuatan-Batas <i>Hogging</i> Model 2 pada Kondisi <i>Collapse</i>	47
Gambar 4.17 Grafik momen kelengkungan kondisi utuh FPSO (Hasil Olahan, 2023)	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Modulus Young</i> pada Material	16
Tabel 3.1 Konfigurasi Ukuran <i>Stiffener</i>	31
Tabel 4.1 Formula perhitungan momen lentur-batas vertikal	36
Tabel 4.2 Momen Lentur-Batas Vertikal <i>Sagging</i> Dan <i>Hogging</i> FPSO.....	37
Tabel 4.3 Tegangan Izin Kerja Material FPSO	38
Tabel 4.4 Kekuatan Batas FPSO Model 1	39
Tabel 4.5 Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah Z FPSO Model 1 Akibat Kekuatan Batas	43
Tabel 4.6 Kekuatan Batas FPSO Model 2	43
Tabel 4.7 Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah Z Model 2 Akibat Kekuatan Batas	47
Tabel 4.8 Kekuatan-batas FPSO model 1 dan model 2 (Hasil Olahan, 2023) ...	48

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
B	Lebar kapal	m
b_x	gaya apung	N
C	koefisien momen lentur	
C_b	koefisien blok kapal	
D	tinggi kapal	m
E	modulus elastisitas	N/mm ²
F_x	gaya geser arah sumbu x	N
I	Momen inersia	m ⁴
I_{min}	momen inersia ijin	m ⁴
K_M	faktor distribusi	
L	panjang kapal	m
M	momen lentur	Nmm
M_{US}	kekuatan batas momen lentur <i>sagging</i>	Nmm
M_{UH}	kekuatan batas momen lentur <i>hogging</i>	Nmm
M_{sw}	momen lentur pada air tenang	Nmm
M_w	momen lentur akibat gelombang	Nmm
M_t	momen lentur- batas total	Nmm
S	modulus penampang	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
σ	tegangan lentur	N/mm ²
σ_p	tegangan lentur ijin	N/mm ²
σ_{max}	tegangan lentur maksimum	N/mm ²

KATA PENGANTAR

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah سبحانه و تعالی atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Salawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad ﷺ. Skripsi ini ditulis sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

The prayers and trust from Papa Aco and Bunda Anie Cantik is the best support that always strengthens my little heart for every single stage of research and writing of this thesis. Thank you for always being my 'Pelukku Untuk Pelikmu – Fiersa Besari'. I love you both more than words in every universe. I mean it.

Keberhasilan skripsi ini, tak luput pula berkat bantuan dari berbagai pihak yang diterima penulis, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan secara tulus dan ikhlas kepada yang terhormat:

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.
2. Bapak **Ir. Juswan, ST. MT.** selaku dosen pembimbing pendamping sekaligus penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Program Studi Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. **Dosen–Dosen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
5. **Staf Tata Usaha Program Studi Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.

6. *My Personal Prudential, Antariksa Amffa for always believing in me* serta menjadi sumber asupan afirmatif dalam menyelesaikan studi di Universitas Hasanuddin. *My Little Champ, Quanta Amffa, I am not good enough for being your role model but I am sure that I am your best Pal.*
7. **My Perky Café-hopping & Explore Mates**, that accepted me for who I am and still fighting for the Bachelor Degree in their last name sekaligus menjadi tempat pelarian sejenak dari penatnya pengerjaan skripsi ini. Rekan-rekan **OSAREL 2019** yang sama-sama berjuang dan saling membantu dalam menyelesaikan studi.
8. Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terima kasih yang sebesar besarnya untuk segala sumbangsih selama proses penyelesaian skripsi ini.

There is no ivory that is not cracked, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan sebagai bahan untuk memperbaiki penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

وَالسَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

Gowa, Juli 2023

Muhammad Azka Bintang Amffa

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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

Teknologi eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas semakin meningkat dengan seiring meningkatnya kebutuhan minyak dan gas. Sehingga teknologi pengeboran pada laut dangkal saat ini mulai bergeser ke pengeboran laut dalam, yakni dengan menggunakan bangunan terapung (*floating*)

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) pada dasarnya adalah sebuah fasilitas terapung yang dioperasikan disuatu ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang fungsinya untuk menerima, memproses, menyimpan dan selanjutnya menyalurkan minyak dan gas bumi ke pasaran. Banyak fasilitas produksi yang terdapat di atas geladak FPSO. Fasilitas-fasilitas tersebut terdiri dari beberapa fasilitas pemrosesan dan pendukung yang disusun dalam beberapa *topside module*, di antaranya adalah *gas processing module*, *utility module*, *compression module*, *living quarter module*, dan *power generator module*.

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) dalam operasinya mendapatkan pengaruh signifikan dari beban lingkungan dan operasionalnya. Hal demikian juga akan mempengaruhi komponen-komponen struktur yang ada di atasnya, termasuk struktur *topside* yang berfungsi sebagai pemrosesan minyak dan gas. Konstruksi *topside* FPSO haruslah kuat menahan beban-beban yang terjadi pada saat kondisi operasi

Dalam perancangan dan pembuatan suatu kapal salah satu aspek terpenting yaitu perancangan strukturnya. Konstruksi kapal harus mampu menahan beban-beban yang bekerja pada kapal baik pada kondisi normal maupun ekstrem. Permasalahan yang sering terjadi pada kapal adalah kerusakan yang disebabkan oleh tubrukan, kandas, korosi, dan lain sebagainya. Dalam perkembangan teknologi konstruksi kapal, desain dan material menjadi hal yang

sangat dipertimbangkan oleh perusahaan galangan kapal dalam perancangan dan pembuatan kapal baru. Salah satunya yaitu kekuatan pada geladak kapal. FPSO memiliki konstruksi tipe membujur pada bagian *deck* yang diperkuat oleh pembujur geladak (*deck longitudinal*).

Sejumlah insiden kecelakaan kapal yang terjadi disebabkan oleh kekuatan batas pada bagian struktur kapal, hal tersebut meunjukkan bahwa perlu adanya pengawasan yang lebih, khususnya terhadap bagian-bagian yang berpotensi mengalami kerusakan yang diakibatkan oleh beban kapal itu sendiri atau beban yang datang dari luar. Permasalahan yang selalu terjadi pada bangunan apung atau struktur kapal adalah kerusakan yang dapat menyebabkan struktur tersebut mengalami kegagalan. Kerusakan bangunan laut terutama terjadi akibat kelelahan (*fatigue*), baik pada komponen struktur utama maupun sekunder dan tersier.

Unit lepas pantai yang menua dapat mengalami kerusakan struktur yang terkait dengan berbagai jenis kerusakan yang ditimbulkan, termasuk elemen yang dibelokkan, penyok, robekan, retakan, kehilangan material dan perforasi. Masing-masing dapat mempengaruhi kekuatan struktur secara berbeda, dan harus dianalisis dengan teknik tertentu.

Penilaian integritas anjungan lepas pantai dapat digunakan untuk memastikan kesesuaian struktur dengan tujuan kapal tersebut, mengingat kondisi operasi yang berkaitan dengan lingkungan laut yang parah, dapat menyebabkan kerusakan akibat kelelahan dan beban yang ekstrem. Seringkali, struktur FPSO diperlukan untuk akomodasi pada kondisi operasional yang baru, oleh karena itu beban dek juga meningkat. Bangunan apung cenderung mengalami kelelahan karena beban gelombang yang bersifat siklis yang terjadi pada struktur.

Perhitungan kerusakan kelelahan FPSO juga penting karena alasan ini. Untuk penilaian kerusakan kelelahan, para insinyur menggunakan pendekatan elemen hingga untuk menetapkan hubungan yang tepat antara titik pusat tegangan yang dihitung dan kapasitas kerusakan akibat kelelahan.

Finite Element Method atau metode elemen hingga dapat menjadi metode yang ampuh untuk melakukan analisis kekuatan lambung kapal setelah terjadi kerusakan. Banyak peneliti telah melakukan penelitian tentang perhitungan kekuatan *longitudinal* residu atau kekuatan *longitudinal* kapal dalam kondisi utuh atau rusak dengan menggunakan analisis FEM nonlinear. (Vu Van T, et. Al, 2018) Metode elemen hingga nonlinier (NFEM) memungkinkan pemodelan struktur

secara rinci dan telah dikenal sejak lama. Namun, kekuatan pemrosesan yang tersedia saat itu tidak memungkinkan metode ini digunakan secara luas.

Penyelesaian dari metode elemen hingga umumnya menggunakan metode matriks. Metode matriks cara kekakuan dikembangkan dengan anggapan struktur bersifat elastik-linier. Prinsip superposisi digunakan supaya terbentuk persamaan keseimbangan aksi yang selaras perpindahan titik kumpul. Solusi persamaan simultan yaitu perpindahan titik kumpul.

Analisis kekuatan struktur pada FPSO dan bangunan apung sejenisnya telah banyak dilakukan sebelumnya. Arifin, (2015) Mengkaji ketidakstabilan FPSO tertambat dalam kondisi alami kerusakan pada kondisi *mooring line* yang berbeda menggunakan kajian numerik. Muis-Alie et al., (2018) kekuatan kapal dengan mempertimbangkan modulus penampang dalam pengaruh lentur membujur. Prakoso et al., (2019) Menganalisis Umur kelelahan sambungan *bracket topside module* FPSO menggunakan *fracture mechanics*. Muis-Alie et al., (2020) Membahas efek tabrakan kerusakan pada kekuatan *ultimate* kapal FPSO. Ozgur (2020) Membahas penilaian kelelahan *longitudinal side shell* lambung FPSO menggunakan metode komponen stokastik dan spektral penuh.

Berdasarkan latar belakang di atas serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan FPSO dan analisa kekuatan, maka fokus penelitian ini adalah “Pengaruh Bangunan Atas pada FPSO terhadap Kekuatan Membujur Kapal” serta perbandingan hasil analisis dengan menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) pada *software* ANSYS.

1.2 Rumusan masalah

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

- a. Bagaimana pengaruh bangunan atas pada FPSO terhadap kekuatan membujur kapal?
- b. Bagaimana perbandingan kekuatan membujur FPSO dengan dan tanpa bangunan atas?

1.3 Tujuan penelitian/perancangan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Mengetahui pengaruh bangunan atas pada FPSO terhadap kekuatan membujur (memanjang) kapal.

- b. Mengetahui perbandingan kekuatan membujur FPSO dengan dan tanpa bangunan atas.

1.4 Manfaat penelitian/perancangan

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

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

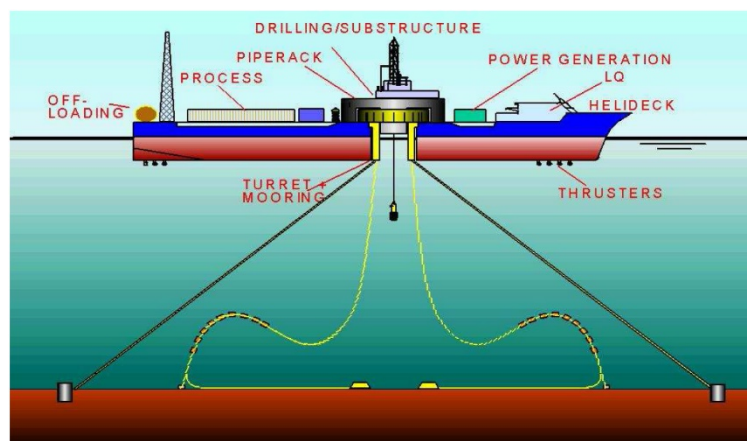
1.5 Ruang lingkup/Asumsi perancangan

- a. Agar penelitian dapat terarah sesuai dengan kerangka yang direncanakan, maka penelitian dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut:
- b. Beban yang bekerja hanya momen lentur vertikal longitudinal (*hogging* dan *sagging*).
- c. Analisa dilakukan pada penampang tengah dari FPSO
- d. Ketidaktersempurnaan awal, tegangan sisa pengelasan, cacat pengelasan, korosi dan *crack base* diabaikan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian FPSO

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*/pabrik produksi minyak dan gas seperti yang terlihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 *Floating Production Storage and Offloading System* (FPSO)

FPSO terdiri dari kapal jenis tanker besar yang ditambatkan ke lautan. FPSO dirancang untuk memproses dan menghentikan produksi dari sumur bawah laut di dekatnya dan untuk secara berkala mengisi oli yang tersimpan ke tanker ulang-alik yang lebih kecil. *Tanker* ulang-alik kemudian mengangkut minyak ke fasilitas darat untuk diproses lebih lanjut. Sebuah FPSO mungkin cocok untuk lahan

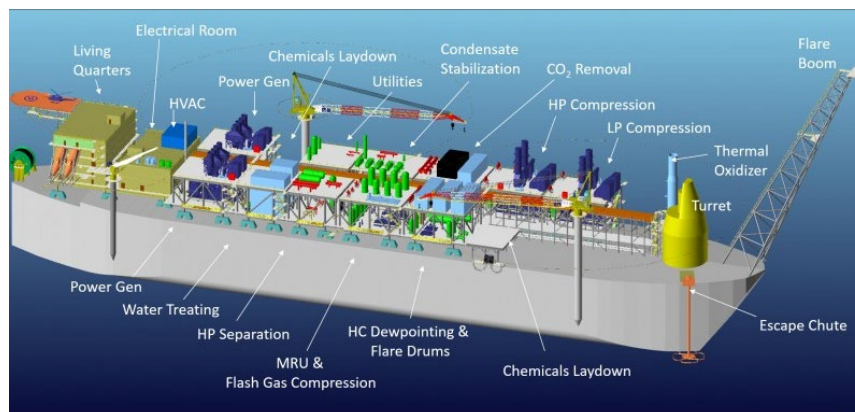
ekonomi sedikit yang terletak di daerah perairan dalam yang terpencil di mana infrastruktur pipa tidak ada. Saat ini, tidak ada FPSO yang disetujui untuk digunakan di Teluk Meksiko. Namun, ada lebih dari 70 sistem ini yang digunakan di tempat lain di dunia.

2.2 Desain Struktur *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 2.2 juga bergantung dari lambung yang mengalami gerak dan akselerasi. Hasil ini berasal dari analisa hidrodinamika.



Gambar 2.2 Layout *Topsides* Kapal FPSO

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 dek tempat tinggal kru di haluan kapal (Hughes, 2010).

Faktor yang mempengaruhi muatan dek utama 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. Pemindahan 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 di 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 juga mempengaruhi ukuran fasilitas karena tidak hanya mengalirkan minyak mentah ke pipa dan kapal tanker yang berbeda, tetapi juga tingkat pemisahan di pengolah minyak untuk mencapai spesifikasi minyak mentah yang berbeda untuk setiap rute. Dalam kasus minyak mentah yang berat, kental atau licin, suhu kedatangan cairan yang rendah mungkin memerlukan fasilitas pemanas ekstensif yang melibatkan, antara lain, unit pemulihan panas limbah pada penggerak turbin gas. Profil produksi memerlukan satu atau dua pemisah minyak mentah dan kompresi gas. Pertimbangan hilangnya pendapatan yang timbul dari pemadaman berlarut-larut

dari satu arus produksi 100% terhadap biaya tambahan yang terkait dengan penyediaan dua aliran 50%. Jika sebuah aliran produksi tunggal dipilih maka pemilihan peralatan hemat yang bijaksana di dalam pemisah harus dilakukan agar dapat memastikan setinggi mungkin ketersediaan sistem. Fasilitas pemisahan uji berukuran yang sesuai dapat dimanfaatkan untuk memberi tingkat cadangan serta juga pengelolaan sumur yang lebih efisien.

Apabila FPSO digunakan di lapangan dengan masa kerja singkat, seperti, lima sampai tujuh tahun, pemilik harus memutuskan apakah akan merancang fasilitas produksi untuk kehidupan lapangan tersebut atau untuk membuat ketentuan mengenai pemindahan FPSO yang mungkin dilakukan ke sumur lain; di lokasi lain. Dalam kasus tersebut, peluang pemasaran potensial yang dirasakan dapat menentukan konfigurasi fasilitas, tingkat fleksibilitas yang ada untuk memproses berbagai jenis cairan, tingkat produksi dan ketentuan ruang dan berat untuk penambahan modul atau peralatan sedikit demi sedikit. FPSO dilengkapi dengan peralatan *hydroprocessing* di atas dek dan fasilitas penyimpanan hidrokarbon di bawah dek. Kapal juga bisa dilengkapi dengan sistem tambat yang memungkinkannya tinggal di tempat jika perlu.

2.3 Tegangan yang Bekerja

Tegangan didefinisikan sebagai tahapan terhadap gaya-gaya luar. Ini diukur dalam bentuk gaya per satuan luas. Dalam praktek tegangan sering diberikan dua pengertian: (1) gaya per satuan luas, (2) tegangan total gaya adalah gaya total pada suatu bidang

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

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:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

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:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right]} \quad (2.2)$$

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.

2.4 Tegangan Normal

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

Tegangan atau tekanan merupakan besaran gaya per satuan luas penampang. Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan bentuk dan ukuran benda bergantung pada arah dan letak gaya luar yang diberikan. Tegangan menunjukkan kekuatan gaya yang menyebabkan perubahan bentuk benda. Secara matematis dituliskan pada Persamaan 2.3:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

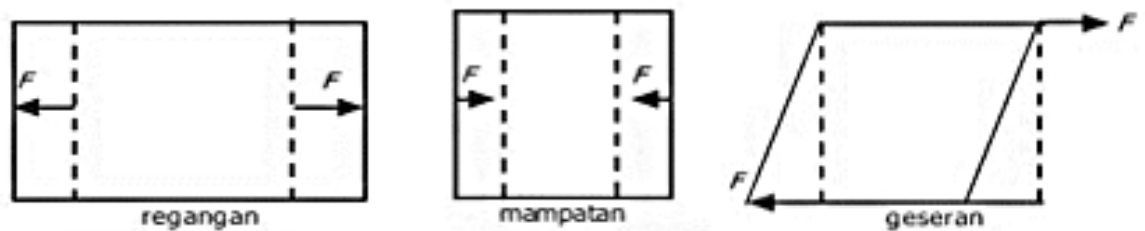
Dimana :

σ = tegangan (N/mm²)

F = gaya (N)

A = luas penampang (mm^2)

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$. Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Tegangan-Regangan

2.5 Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

Tegangan tarik yaitu tegangan yang timbul akibat gaya tarik. Apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang, dan akibatnya batang ini cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbunya. Tegangan Tarik (σ_{tr}) terjadi akibat bekerjanya gaya Tarik (F_{tr}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio/Perbandingan antara perpanjangan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tarik ϵ secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 2.4 dan dapat dilihat pada Gambar 2.4.

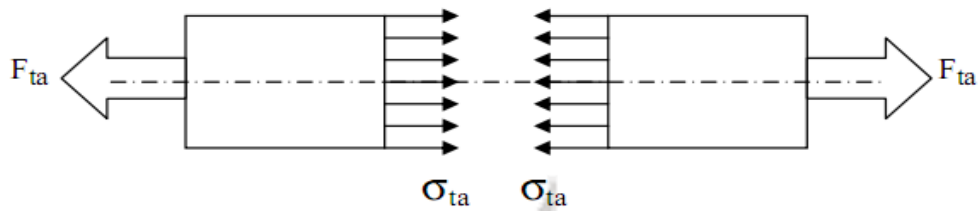
$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (2.4)$$

Dimana :

σ_{tr} = tegangan tarik (N/mm^2)

F = gaya tarik (N)

A = Luas penampang (mm^2)

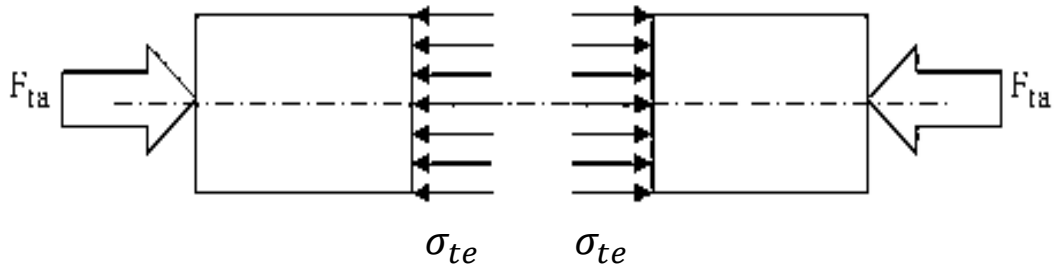


Gambar 2.4 Tegangan Tarik

2.6 Tegangan Tekan (*Compressive Stress*)

Jika batang gaya dikenakan pada ujung-ujung batang dalam arah menuju ke batang, sehingga batang dalam kondisi tertekan, maka terjadi tegangan tekan, batang. Tegangan tekan (σ_{te}) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan (F_{ta}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan.

Rasio/Perbandingan antara perpendekan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan ϵ_{ta} secara matematik dapat dilihat pada Gambar 2.5 :



Gambar 2.5 Tegangan Tekan

selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.5 :

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (2.5)$$

Dimana :

σ_{te} = tegangan tekan (N/mm²)

F_{ta} = gaya tekan (N)

A = Luas penampang (mm²)

2.7 Tegangan Geser (*Shear*)

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

Tegangan geser (τ) timbul akibat kerja dari dua gaya geser (F_V) yang saling berlawanan arah (aksi–reaksi) terhadap suatu bidang geser, pada satuan luas bidang penampang tahanan elemen struktur (A). Sehingga bidang penampang tersebut mengalami regangan geser searah bekerjanya gaya. Jika besaran gaya geser (S) dikerjakan pada batang akan menimbulkan tegangan geser (τ). Tegangan geser (τ), yaitu tegangan yang timbul akibat gaya geser atau gaya lintang. Ciri dari gaya geser atau gaya lintang adalah melintang batang atau tegak lurus batang. Secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 2.6 :

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.6)$$

Dimana :

- τ = tegangan geser (N/mm^2)
- P = gaya geser atau gaya lintang (N)
- A = Luas penampang (mm^2)

2.8 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.

2.9 Tegangan Luluh (*Crushing/Bearing Stress*)

Tegangan luluh merupakan tegangan yang timbul akibat terkonsentrasi/terpusatnya gaya tekan pada suatu daerah kontak yang sangat kecil, diantara suatu elemen struktur yang sedang bekerja sama dalam meneruskan tegangan. Tegangan jenis ini umumnya terjadi pada elemen/komponen struktur yang berfungsi sebagai penyambung.

2.10 Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut diatur dalam AISC (*American Petroleum Institute Recommended Practice 2A*, 1989). 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.

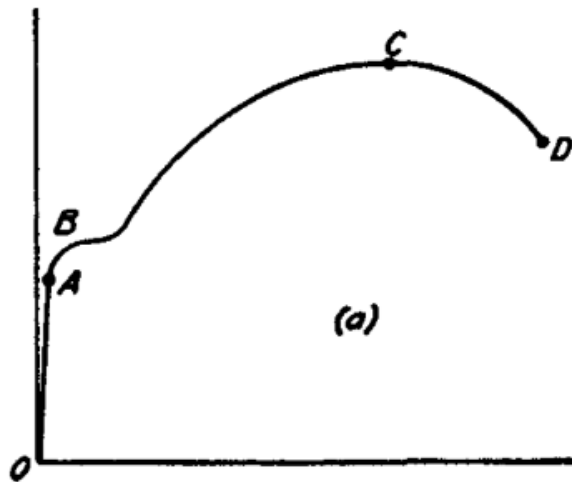
2.11 Regangan

Sesuai dengan bunyi hukum Hooke bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangannya. Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada Persamaan 2.7 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.7)$$

Dimana :

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



Gambar 2.6 Hubungan antara tegangan dan regangan (Timoshenko, 1930)

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.6 (Timoshenko, 1930), menunjukkan diagram untuk batas elastis baja struktural. Pada gambar tersebut, elongasi diplot sepanjang sumbu horizontal dan tegangan yang sesuai diberikan oleh koordinat kurva OABCD yang pada akhirnya material mencapai batas elastis (*elastic limit*). Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan, sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Yaitu bahan secara tiba-tiba mulur yang disebut titik mulur (*yield point*), tetapi bahan segera memperlihatkan lagi kemampuan menahan kenaikan tegangan, tetapi pemanjangan sekarang naik dengan laju yang lebih cepat dari tegangan sampai mencapai titik F_u yaitu tegangan maksimum batas kekuatan bahan. Tegangan ini disebut tegangan batas (*ultimate stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. Diluar titik F_u , pemanjangan akan berlanjut, tetapi secara perlahan tegangan berkurang, sampai akhirnya batang patah.

1. Daerah Linear (*elastic limit*)

Bila sebuah bahan diberi beban sampai pada titik A, kemudian bebannya dihilangkan, maka bahan tersebut akan kembali ke kondisi semula (tepatnya hampir kembali ke kondisi semula) yaitu regangan “nol” pada titik O. Tetapi bila beban ditarik sampai melewati titik A, hukum Hooke tidak lagi berlaku dan terdapat perubahan permanen dari bahan tersebut.

2. Titik Luluh (batas proporsional)

Titik dimana suatu bahan apabila diberi suatu bahan memasuki fase peralihan deformasi elastis ke plastis. Yaitu titik sampai di mana penerapan

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

3. Deformasi plastis (*plastic deformation*)

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

4. Titik Putus

Merupakan besar tegangan di mana bahan yang diuji putus atau patah. Regangan merupakan ukuran mengenai seberapa jauh batang tersebut berubah bentuk. Tegangan diberikan pada material dari arah luar, sedangkan regangan adalah tanggapan material terhadap tegangan. Pada daerah elastis, besarnya tegangan berbanding lurus dengan regangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan benda tersebut disebut modulus elastisitas atau *Modulus Young*. Pengukuran *Modulus Young* dapat dilakukan dengan menggunakan gelombang akustik, karena kecepatan jalannya bergantung pada *Modulus Young*. Secara matematis dirumuskan pada Persamaan 2.8 dan 2.9 :

$$E = \frac{F L}{A \Delta L} \quad (2.8)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

Dimana :

E = Modulus Young (N/mm²)

F = gaya (N)

A = Luas Penampang (mm²)

L = panjang mula-mula (mm)

ΔL = pertambahan panjang/pendek (mm)

Nilai *Modulus Young* hanya bergantung pada jenis benda (komposisi benda), tidak bergantung pada ukuran atau bentuk benda. Nilai *Modulus Young* beberapa jenis bahan dapat kalian lihat pada Tabel 2.1 Satuan SI untuk E adalah *pascal* (Pa) atau N/mm².

Tabel 2.1 Modulus Young pada Material

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

2.12 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 (torsion).

Ketika deformasi terjadi gaya internal antar-molekul muncul melawan beban atau gaya kerja yang diberikan, jika gaya yang diberikan tidak melebihi kekuatan internal antar-molekul material maka memungkinkan material tersebut dapat mencapai keadaan setimbang baru dan kembali ke kondisi semula ketika beban atau gaya kerja yang diberikan dihapuskan. Sebaliknya jika beban atau gaya kerja yang diberikan melebihi kemampuan gaya internal antar-molekul material maka dapat menyebabkan deformasi permanen dari material (kegagalan struktur). Adapun deformasi yang timbul pada material dapat dihitung dengan Persamaan 2.10 berikut :

$$\delta l = \epsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.10)$$

Dimana:

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

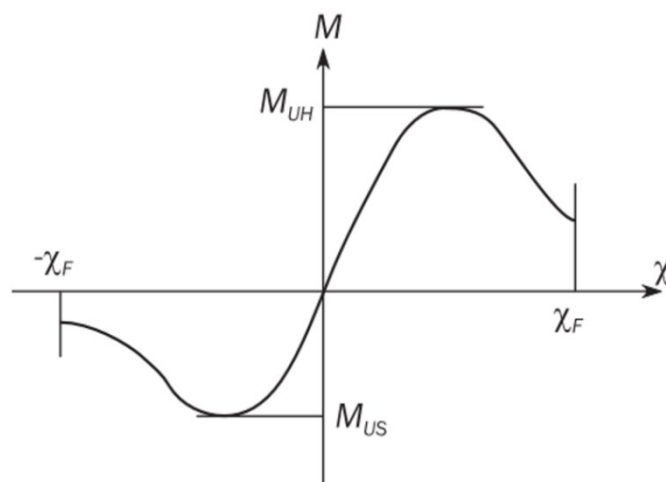
2.13 Kekuatan Batas (*Ultimate Strength*)

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

Kekuatan-batas kapal tanker (MU) harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode buckling dan harus memenuhi kriteria seperti Persamaan 2.11 dibawah ini (DNV GL, 2017b).

$$M_t \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (2.11)$$

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



Gambar 2.7 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan (DNV GL, 2017b)

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.7 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 :

$$\sigma = \frac{M \times z}{I} \quad (2.12)$$

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 :

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{S} \quad (2.13)$$

dimana S adalah modulus penampang.

Modulus penampang (S) seperti pada Persamaan 3, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut :

$$S_d = \frac{I}{z_d}, \text{ untuk bagian } \textit{deck} \quad (2.14)$$

$$S_b = \frac{I}{z_b}, \text{ untuk bagian } \textit{bottom} \quad (2.15)$$

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 2.16 dan 2.17 sebagai berikut :

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud}, \text{ untuk } \textit{deck} \quad (2.16)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub}, \text{ untuk } \textit{bottom} \quad (2.17)$$

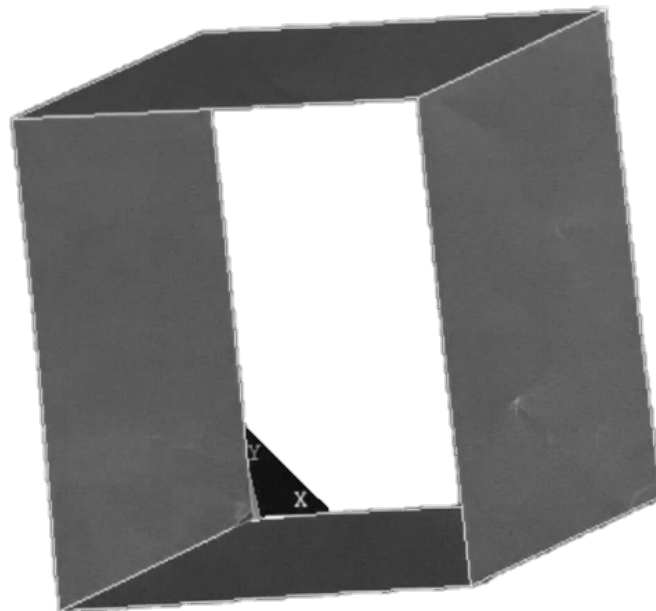
dimana M_{US} dan M_{UH} adalah kekuatan-batas momen lentur untuk *sagging* dan *hogging* dan σ_{ud} dan σ_{ub} adalah tegangan tekan batas untuk *deck* dan *bottom* kapal.

2.14 Nodal Constrained

Ada dua jenis *nodal constraints* : *single-point* dan *multi-point*. *Single-point constraint* membatasi satu atau beberapa DOF dari Gerakan tertentu (misalnya nol perpindahan ke segala arah, nol Gerakan vertikal tetapi bebas bergerak secara horizontal, dll) pada sebuah titik. Sebuah node tidak dapat memiliki *single-point*

constrained sementara pada saat yang sama didefinisikan sebagai bagian dari satu set *multipoint constrained*. Untuk Batasan *single-point*, nilai yang ditentukan bisa nol atau bukan nol. Nol kendala perpindahan juga dikenal sebagai kendala homogen, sementara bukan nol kendala dikenal sebagai Gerakan yang ditentukan atau kendala nonhomogen. (Yang, 2017)

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 2.8 *Box Girder* Tanpa Elemen di Tengah Batang

Gambar 2.8 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)

2.15 Beban-Beban yang Bekerja

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

Fasilitas produksi biasanya terletak pada dek produksi dan pada umumnya diposisikan 2.5 m di atas dek utama. Hal ini bertujuan untuk meminimalisir *green water* (kejadian dimana geladak pada haluan kapal tersentuh oleh permukaan air laut) dan untuk meminimalisir efek yang terjadi ledakan atau api yang mengenai *module* agar tidak banyak memengaruhi lambung. *Topside Module* merupakan struktur yang berada di atas FPSO Terdapat beberapa module di atas *deck* FPSO, diantaranya adalah *export compressors module*, *gas processing module*, *gas cooling module*, *utility module*, *oil separation module*, dan lain-lain. Untuk kapal FSO beban yang terdapat pada bagian dek kapal hanya beban geladak cuaca.

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

2.16 Beban Geladak Cuaca (*Load on Weather Decks*)

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak dibelakang 0,15 L dari garis tegak haluan (FP) (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.18.

$$P_D = P_o \frac{20 \times T}{(10 + z - T) \times H} \times C_D \quad (2.18)$$

Dimana satuannya adalah (N/mm²)

2.17 Beban Luar Sisi Kapal (*Load on the Ship's Side*)

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang timbul karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Beban luar sisi kapal dibagi atas dua beban yaitu:

- a. Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (P_{S_1})
- b. Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (P_{S_2})

$$P_{S_1} = 10 \times (T - z) + P_o \times C_f \left(1 + \frac{z}{T}\right) \quad (2.19)$$

$$P_{S_2} = P_o \times C_f \times \frac{20}{10 + z - T} \quad (2.20)$$

Dimana:

P_D = Beban geladak cuaca (N/mm²)

P_{S_1} = Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (N/mm²)

P_{S_2} = Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (N/mm²)

P_o = *Basic external dynamic load* (N/mm²)

C_f = Faktor distribusi = C_D

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

T = Sarat kapal (m)

h_{db} = Tinggi *double bottom* (m)

H = Tinggi gelombang (m)

2.18 Beban Luar Alas Kapal (*External Load on the Ship's Bottom*)

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Beban luar alas kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.21.

$$P_B = 10 \times T + P_o \times C_f \quad (2.21)$$

Dimana:

P_B = Beban luar alas kapal (N/mm²)

P_o = *Basic external dynamic load* (N/mm²)

C_f = Faktor distribusi = C_D

T = Sarat kapal (m)

2.19 Beban Geladak Muatan Kapal (*Load on Cargo Decks*)

Beban geladak muatan merupakan beban yang ditimbulkan karena adanya muatan pada geladak (Biro Klasifikasi Indonesia, 2017). Beban geladak muatan ini dapat dihitung dengan Persamaan 2.22.

$$P_L = P_C(1 + a_v) \quad (2.22)$$

Dimana:

P_L = Beban geladak muatan (N/mm²)

P_C = Beban statik kapal (N/mm²)

a_v = Faktor distribusi = C_D

T = Sarat kapal (m)

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

Beban alas dalam kapal merupakan beban yang terjadi karena adanya tekanan beban dari dalam kapal (Biro Klasifikasi Indonesia, 2017). Beban alas dalam kapal ini dapat dihitung dengan Persamaan 2.23.

$$P_i = 9,81 \times \left(\frac{G}{V}\right) \times h \times (1 + a_v) \quad (2.23)$$

Dimana:

G = Massa cargo di ruang palka (Ton)

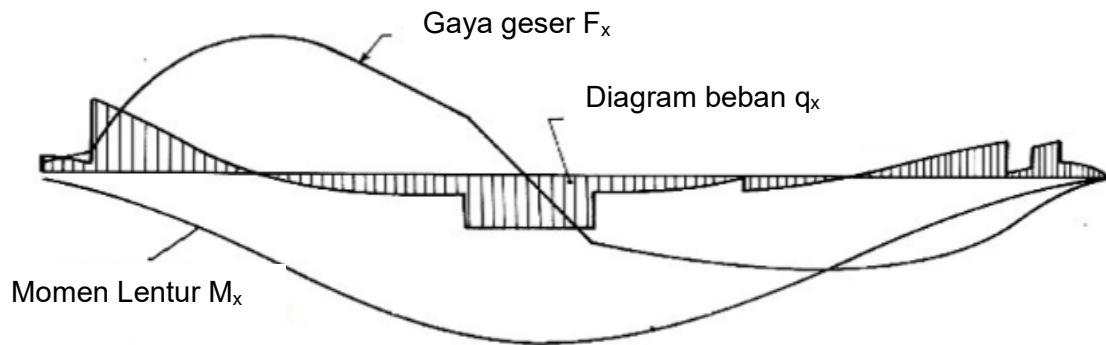
V = Volume Ruang (m^3) (Tidak termasuk palka)

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

a_v = Faktor distribusi = C_D

2.21 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 2.9 (Shama, 2013).



Gambar 2.9 Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal (Shama, 2013)

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

$$q_x = b_x - w_x \quad (2.24)$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal adalah

$$F_x = \int_0^x (b_x - w_x) dx \quad (2.25)$$

$$M_x = \int_0^x F_x dx \quad (2.26)$$

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

$$M_{SW} = -0,05168K_M CL^2 B(C_b + 0,7) kN-m, \text{ kondisi } \textit{sagging} \quad (2.27)$$

$$M_{SW} = +0,01K_M CL^2 B(11,97 - 1,9C_b) kN-m, \text{ kondisi } \textit{hogging} \quad (2.28)$$

Dimana :

K_M = Faktor distribusi seperti pada Gambar 2.10

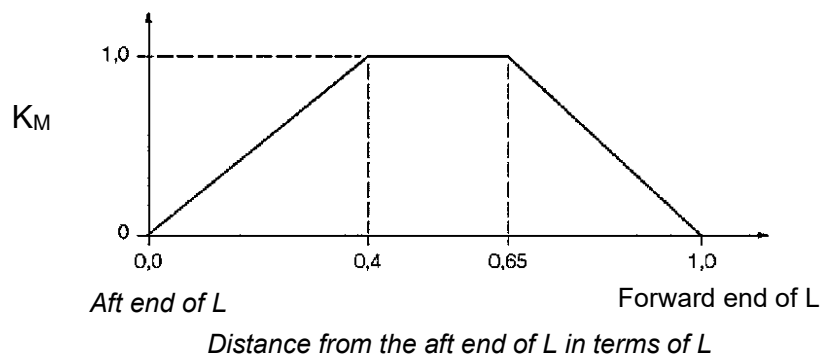
L, B = lebar dan panjang kapal dalam satuan meter

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

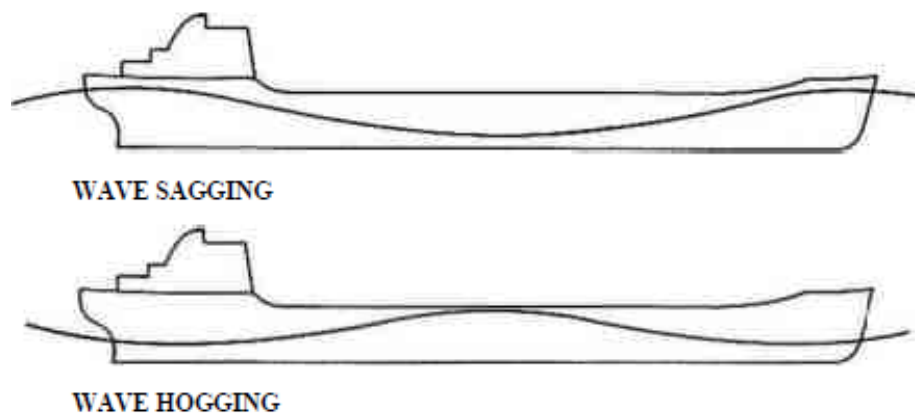
= 10,75 untuk $300 \leq L \leq 350$ m

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



Gambar 2.10 Faktor distribusi K_M (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 dibawah ini.



Gambar 2.11 Momen lentur vertikal akibat gelombang (Bachman, 1991)

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

$$M_W = -0,11 K_M C L^2 B (C_b + 0,7) k N \cdot m, \text{ kondisi } \textit{sagging} \quad (2.29)$$

$$M_W = +0,19 K_M C L^2 B C_b k N \cdot m, \text{ kondisi } \textit{hogging} \quad (2.30)$$

dimana, C dan K_M seperti pada Persamaan 2.27 dan 2.28

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).

$$M_t = M_{SW} + 1,2 M_W \quad (2.31)$$

2.22 Metode Non Linear Finite Element Analysis

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

Menghitung dan membandingkan kekuatan-batas struktur kapal dengan menggunakan metode teori balok, metode *presumed stress distribution*, NLFEA,

ISUM dan ISFEM. Penelitian ini akan menggunakan metode NLFEA untuk menghitung kekuatan-batas *longitudinal* struktur FPSO baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat kandas dan tubrukan.

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

Secara potensial, hasil yang paling akurat mengenai penilaian ultimate strength dapat diperoleh dengan menggunakan analisis NLFEA dari keseluruhan model struktural yang didiskritkan, yang memungkinkan simulasi dan evaluasi respon struktural *non-linier* untuk berbagai tingkat pembebanan. Namun, kualitas hasil yang diperoleh sangat bergantung pada kepatutan teknik idealisasi struktural yang digunakan (geometri, sifat material, ketidaksempurnaan struktural awal); kesetiaan *diskritisasi* (digunakan jenis elemen hingga, kepadatan *mesh*); dan sejauh mana model yang dianalisis (model struktural lengkap atau parsial). Secara umum, dapat disimpulkan bahwa sejumlah besar waktu, pengetahuan dan pengalaman masih diperlukan untuk menyelesaikan seluruh prosedur analisis NLFEM secara sukses (terutama untuk pra/pasca pemrosesan).

Oleh karena itu, pemanfaatan NLFEM dalam praktik analisis kekuatan ultimate bangunan atas FPSO saat ini sebagian besar dikurangi menjadi analisis model parsial untuk tujuan verifikasi metode analisis alternatif, atau untuk analisis langka dari model lengkap dan terperinci untuk merekonstruksi keadaan dan mengidentifikasi sebab-sebab keruntuhan struktural yang nyata terjadi selama eksploitasi struktur-struktur tertentu.

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

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

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

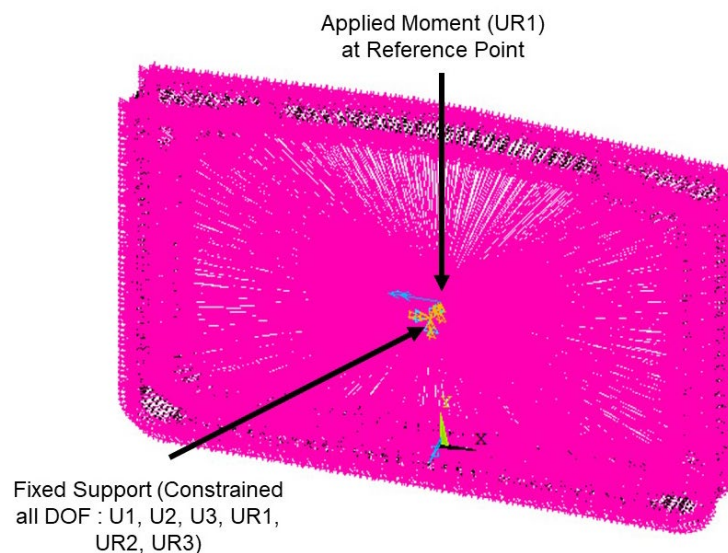
Pembebanan yang diaplikasikan pada metode NLFEA menggunakan proses peningkatan pembebanan. Dua jenis kontrol beban yang digunakan untuk mendapatkan nilai kekuatan-batas momen lentur kapal tanker yaitu kontrol kelengkungan dan kontrol momen.

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 yang lainnya di-*full constrain*. Ujung model yang menggunakan *rigid link*, diberikan momen lentur. Reaksi pada ujung model yang di-*constrain* akan mencapai titik batas kekuatan dari struktur.

4) Pembebanan dan Kondisi Syarat Batas

Pembebanan dan kondisi syarat batas yang diaplikasikan pada model elemen hingga sangat tergantung pada jenis proses peningkatan beban yang digunakan. Kontrol kelengkungan menggunakan kondisi syarat batas dimana kedua ujung model diberikan rigid link dengan pembebanan seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Kondisi Syarat Batas Untuk Kontrol Kelengkungan (Hasil Olahan, 2023)

5) Ketidaksempurnaan Geometrik

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

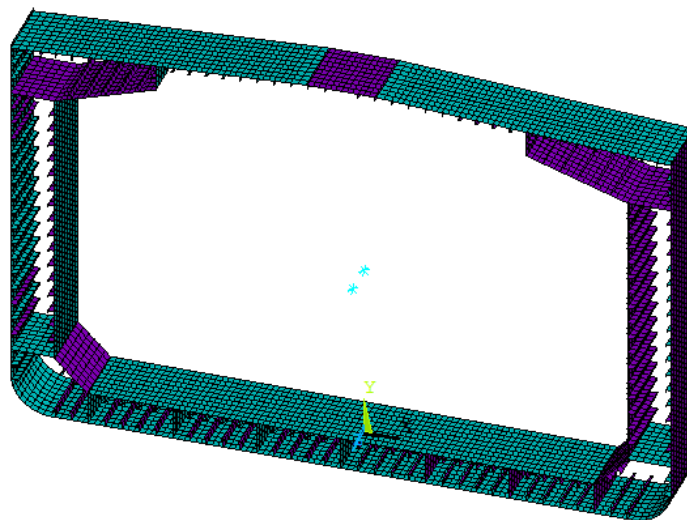
6) Spesifikasi Material

Kurva tegangan regangan dari material yang digunakan pada model elemen hingga harus tersedia. Kurva tegangan regangan sangat menentukan nilai kekuatan-batas dari struktur kapal.

7) *Meshing*

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

Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar sebaiknya di-*meshing* dengan ukuran yang lebih kecil untuk dapat memperlihatkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin kecil nilai *meshing* maka perangkat komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi yang tinggi. Dalam penelitian ini, ukuran *meshing* yang digunakan sebesar 350 mm dengan bentuk *quadmapped* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 FPSO Model 2 Kondisi *Meshing* (hasil olahan, 2023)

8) Tipe Elemen

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