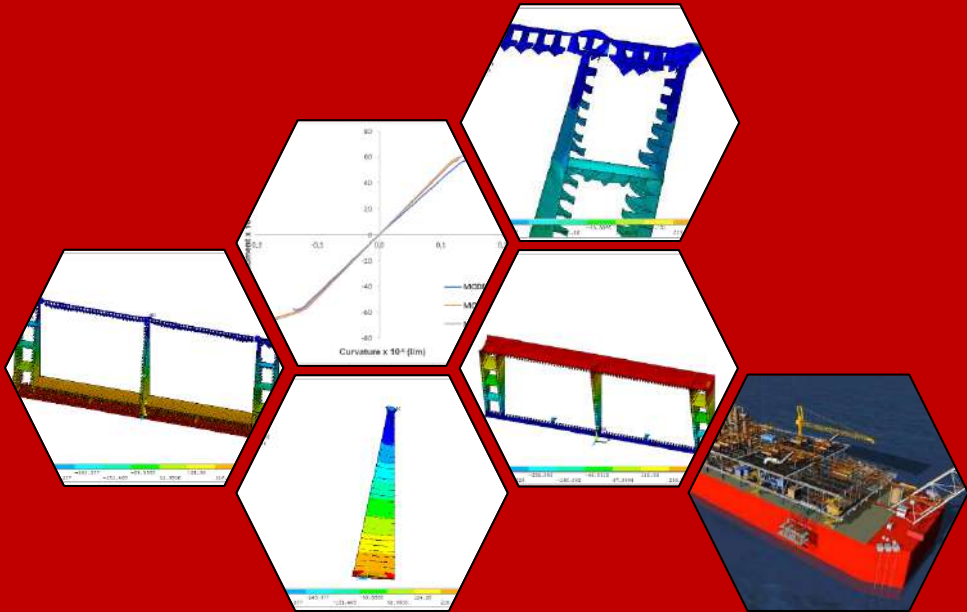


**SIMULASI BENTUK PENAMPANG SINGLE DAN DOUBLE BOTTOM
TERHADAP KEKUATAN KAPAL FPSO**



**SRINESWATI
D081 20 1053**



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

**SIMULASI BENTUK PENAMPANG *SINGLE* DAN *DOUBLE BOTTOM*
TERHADAP KEKUATAN KAPAL FPSO**

SRINESWATI

D081 20 1053



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

**SIMULASI BENTUK PENAMPANG *SINGLE* DAN *DOUBLE BOTTOM*
TERHADAP KEKUATAN KAPAL FPSO**

SRINESWATI

D081 20 1053

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**

SKRIPSI
SIMULASI BENTUK PENAMPANG *SINGLE* DAN *DOUBLE BOTTOM*
TERHADAP KEKUATAN KAPAL FPSO

SRINESWATI
D081 20 1053

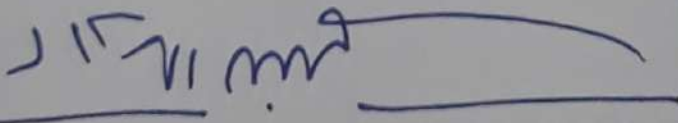
Skripsi,

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Sarjana Pada Tanggal 12 Juli 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA

Mengesahkan:

Pembimbing Utama



Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alie, ST., 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 berjudul "**Simulasi Bentuk Kapal Single dan Double Bottom Terhadap Kekuatan Kapal Fpso**" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Bapak Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., 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 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, 9 Juli 2024



SEPULUH RIBU RUPAH
10000
METERAN
POS
C1CA4ALX283028638
SRINESWATI
D081201053

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dan atas kehendakNya lah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat diatasi. Salawat serta salam penulis panjatkan kehadiran Nabi Muhammad SAW. Penyusunan skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“SIMULASI BENTUK PENAMPANG *SINGLE* DAN *DOUBLE BOTTOM* TERHADAP KEKUATAN KAPAL FPSO”

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Bambang Irawan Rauf** dan Ibu **Nurwahidah** serta kedua Adik **Muhammad Fajar** dan **Muhammad Agum** merupakan dukungan yang selalu menguatkan hati untuk setiap tahapan penulisan skripsi ini, serta keberhasilan penulis sampai tahap Penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Keberhasilan penyusunan skripsi ini, tak luput pula berkat bantuan dari berbagai pihak yang diterima penulis, sehingga penyusunan 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 **Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alie, ST., M.T., Ph. D** selaku dosen pembimbing pendamping yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.
2. Bapak **Ir. Juswan ST., MT.**, selaku dosen pembimbing pendamping yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.

3. **Dosen–Dosen Departemen Teknik Kelautan dan Staf Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan** yang telah membantu pengurusan berkas selama dalam proses perkuliahan.
4. **Teman-teman Mahasiswa khususnya Teknik Kelautan 2020 (Dredger) serta Naval 2020, dan Teman- teman Labo OSAREL 2020** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya 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.
5. **Teman-teman Mahasiswa KKNT Pengembangan Produk Lokal Wilayah Pangkep 2** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka. Tak lupa pula penulis sampaikan banyak terimakasih atas motivasi dan dukungannya
6. Para Sahabat, **D007, Dilla** dan **Gyna** yang telah memberikan waktu menemani dikala susah dan senang dan tidak henti-hentinya membantu serta memberi semangat dan motivasi.
7. Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terima kasih yang sebesar-besarnya untuk segala sumbangsih selama proses penyelesaian penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan sebagai bahan untuk menutupi kekurangan dari penulisan Penyusunan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Gowa, 9 Juli 2024



SRINESWATI
D081201053

ABSTRAK

Srineswati. **Simulasi Bentuk Penampang *Single* dan *Double Bottom* Terhadap Kekuatan Kapal FPSO.** (dibimbing oleh Muhammad Zubair Muis Alie, dan Juswan)

Perancangan dan konstruksi kapal berusaha untuk didesain menahan beban agar kapal layak beroperasi selama pelayaran. Untuk mengevaluasi kekuatan struktur kapal yang sangat kompleks, metode elemen hingga nonlinier (FE) digunakan. Salah satunya bagian dari konstruksi kapal adalah double bottom. Berdasarkan regulasi oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan International Association of Classification Societies (IACS), double bottom ini harus dipertimbangkan karena merupakan bagian dari konstruksi kapal. Oleh karena itu pengaruh single dan double bottom ini harus di analisis terhadap kekuatan kapal khususnya pada arah membujur. Tujuan dari penelitian untuk mengetahui pengaruh bentuk penampang single dan double bottom terhadap kekuatan kapal FPSO dalam arah membujur. Dalam analisis ini pengaruh tersebut didasarkan pada regulasi BKI dan IACS. Objek penelitian pada kapal FPSO dilakukan pada satu jarak gading dalam kondisi hogging dan sagging. Aplikasi *Multiple Point Constrained* (MPC) dipasang pada salah satu sisi penampang kapal FPSO dan sisi yang lain dikekang. Gaya putar diberikan pada salah satu pada sisi penampang tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan batas momen lentur vertical kapal FPSO dipengaruhi oleh penambahan double bottom menurut BKI dan IACS. Kapasitas momen lentur kapal FPSO pada kondisi awal adalah $5,48 \times 10^{13}$ Nmm saat mengalami *hogging* dan $-5,57 \times 10^{13}$ Nmm saat *sagging*. Sedangkan, kapasitas momen lentur kapal FPSO BKI adalah $5,60 \times 10^{13}$ Nmm saat mengalami *hogging* dan $-5,66 \times 10^{13}$ Nmm saat *sagging*. Dan kapasitas momen lentur kapal FPSO IACS adalah $5,75 \times 10^{13}$ Nmm saat mengalami *hogging* dan $-5,77 \times 10^{13}$ Nmm saat *sagging*. Perbandingan antara ketiga kapal FPSO dengan metode NLFEA tersebut menunjukkan bahwa kapasitas momen lentur vertikal kapal FPSO menurut IACS lebih besar dari pada menurut BKI dengan rasio perbandingan yaitu 2,67% pada kondisi *hogging* dan 1,94% pada kondisi *sagging*. Pengaruh perbedaan tinggi double bottom menyebabkan posisi sumbu netral pada kapal FPSO berbeda. Hal ini juga berefek pada posisi sumbu nertal, inersia dan modulus penampang.

Kata Kunci: FPSO, Penampang, *Single* dan *Double Bottom*, NLFEA, Kekuatan Membujur

ABSTRACT

Srineswati. **Simulation of Single and Double Bottom Cross-Section Shapes to the Ultimate Strength of FPSO.** (Supervised by PMuhammad Zubair Muis Alie, and Juswan)

Ship designed and construction is to gained to withstand the load action on the ship in order the ship is save during voyage. To evaluate the ultimate strength of ship structure which very complexity the Non Linear Finite Element Analysis is used. One of the ship construction is single and double bottom. According to Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) and the International Association of Classification Societies (IACS), the double bottom must be considered because it is one of the ship's construction. Therefore, the influence of single and double bottom must be analysed to the ultimate strength especially on the longitudinal direction. The objective of the present study is to know in the influence of single and double bottom shape construction to the FPSO under longitudinal direction. In this analysis, the effect is based on the BKI and IACS regulation. The Object of the study is conducted on the one frame shape of FPSO under hogging and sagging condition. The application Multiple Point Constrained (MPC) is attacked at one side of the FPSO cross section and the other side is fixed. The rotation force is given on the one side of the cross section. The allowable stress of the material is HS36 is 490 N/mm^2 and the yield stress is 355 N/mm^2 . The obtained result shows that the ultimate vertical bending moment capacity of FPSO is influenced by the additional double bottom according to BKI and IACS. The ultimate vertical bending moment capacity for initial condition is $5,48 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ for hogging and $-5,57 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ for sagging. Meanwhile, The ultimate vertical bending moment capacity of the BKI FPSO is $5,60 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ for hogging and $-5,66 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ for sagging. And The ultimate vertical bending moment capacity of the IACS FPSO is $5,75 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ for hogging and $-5,77 \times 10^{13} \text{ Nmm}$ for sagging. The comparison of the three model of FPSO with NLFEA method show that The ultimate vertical bending moment capacity of the IACS FPSO ship is greater than that of the BKI with ratio of 2,67% in hogging conditions and 1,94% in sagging respectively. The influence of the double bottom high cause the neutral axis on the FPSO is change this also effect to the inertia and modulus of cross section.

Key Words: *FPSO, Cross Section, Single and Double Bottom, NLFEA, Longitudinal Strength*

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iv
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II. METODOLOGI PENELITIAN	3
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	3
2.2 Jenis Penelitian	3
2.3 Metode Penentuan Sampel	3
2.4 Sumber Data	5
2.5 Konstruksi Kapal pada Struktur <i>Topside</i> FPSO	9
2.6 Konstruksi Kapal pada Struktur Lambung FPSO	11
2.7 Konstruksi <i>Single Bottom</i>	14
2.8 Konstruksi <i>Double Bottom</i>	15
2.9 Tinggi Dasar Ganda	17
2.10 Momen Lentur dan Gaya Geser	19
2.11 Deformasi Material	23
2.12 Hubungan Tegangan dan Regangan	24
2.13 Kekuatan Batas Kapal FPSO	29
2.14 Pembebanan <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	31
2.15 Analisis Data	33

2.16 Diagram Alir.....	34
BAB III. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
3.1 Objek Penelitian.....	36
3.2 Perhitungan Momen Lentur-Batas Vertikal.....	37
3.3 Tegangan Izin.....	39
3.4 Kekuatan Batas Momen Vertikal.....	39
3.5 Perbandingan Kekuatan Batas FPSO Dengan Menggunakan Metode NLFEA	49
BAB IV. KESIMPULAN.....	52
4.1 Kesimpulan.....	52
DAFTAR PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN.....	55

DAFTAR TABEL

1. Spesifikasi Material	4
2. Konfigurasi Ukuran <i>Stiffener</i>	6
3. Parameter Desain Lambung Utama dan Dependensinya	12
4. Formula Momen Lentur-Batas Vertikal pada FPSO	37
5. Momen Lentur-Batas Vertikal <i>Sagging</i> dan <i>Hogging</i> FPSO	39
6. Tegangan Izin Kerja Material FPSO	39
7. Kekuatan Batas FPSO Model Kondisi Utuh	40
8. Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah Z FPSO Model Kondisi awal Akibat Kekuatan Batas	42
9. Kekuatan Batas FPSO BKI	43
10. Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah Z FPSO Model BKI Akibat Kekuatan Batas	45
11. Kekuatan Batas FPSO IACS	46
12. Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah Z FPSO Model IACS Akibat Kekuatan Batas	48
13. Kekuatan Batas FPSO Model Kondisi Utuh, FPSO BKI, dan FPSO IACS	49

DAFTAR GAMBAR

1. Setengah <i>Midship</i> Kapal FPSO	6
2. General Arrangement.....	7
3. Penampang Atas Kapal Arah Membujur	8
4. Konstruksi Kapal FPSO	9
5. <i>Midship</i> Kapal	14
6. Konstruksi <i>Single Bottom</i>	15
7. Konstruksi <i>Double Bottom</i>	16
8. Dasar Berganda Kerangka Melintang	18
9. Dasar Berganda Kerangka Membujur.....	18
10. Distribusi Beban (<i>load diagram</i>), Gaya Geser (<i>shear force</i>) terhadap Momen Lentur (<i>bending moment</i>)	19
11. Perubahan Momen Lentur pada Tongkang Persegi Panjang Kondisi Air Tenang	21
12. Momen Lentur Gelombang pada Gelombang Regular	22
13. Momen Lentur Ketika Air Tenang dan Bergelombang	22
14. Tegangan-Regangan	25
15. Tegangan Tarik.....	25
16. Tegangan Tekan.....	26
17. Diagram Tegangan-Regangan Baja.....	28
18. Grafik kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan	30
19. Faktor Distribusi K_M	32
20. Momen Lentur Vertikal Akibat Gelombang	33
21. Grafik Diagram Alir.....	35
22. Kondisi Utuh.....	36
23. Model FPSO BKI.....	36
24. Model FPSO IACS	37
25. Grafik Momen Kelengkungan FPSO Model Kondisi Utuh.....	40
26. Deformasi Kekuatan-batas <i>Sagging</i> Model Kondisi awal pada Kondisi <i>Ultimate Strength</i>	41
27. Deformasi Kekuatan-batas <i>Hogging</i> Model Kondisi awal pada Kondisi <i>Ultimate Strength</i>	42
28. Grafik Momen Kelengkungan FPSO BKI	43
29. Deformasi Kekuatan-batas <i>Sagging</i> Model FPSO BKI pada Kondisi <i>Ultimate</i>	

<i>Strenght</i>	44
30. Deformasi Kekuatan-batas <i>Hogging</i> Model FPSO BKI pada Kondisi <i>Ultimate Strenght</i>	45
31. Grafik Momen Kelengkungan FPSO IACS	46
32. Deformasi Kekuatan-batas <i>Sagging</i> Model FPSO IACS pada Kondisi <i>Ultimate Strenght</i>	47
33. Deformasi Kekuatan-batas <i>Hogging</i> Model FPSO IACS pada Kondisi <i>Ultimate Strenght</i>	48
34. Grafik Momen Kelengkungan Model Kondisi awal FPSO, FPSO BKI, dan FPSO IACS	51

DAFTAR LAMPIRAN

1. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Kapal FPSO BKI menggunakan Metode NLFEA Kondisi *Sagging* dan *Hogging* 55
2. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Kapal FPSO BKI menggunakan Metode NLFEA Kondisi *Sagging* dan *Hogging* 61
3. Tabel Perhitungan Kekuatan Batas Kapal FPSO BKI menggunakan Metode NLFEA Kondisi *Sagging* dan *Hogging* 64

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
Hdb	high double bottom	m
B	lebar kapal	m
L	panjang kapal	m
b_x	gaya apung	N
w_x	berat beban	
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>	
NLFEA	<i>Non-Linier Finite Element Analysis</i>	
ABS	<i>American Bureau of Shipping</i>	
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>	
BKI	Badan Klasifikasi Indonesia	
IACS	<i>International Association of Classification Societies</i>	
MPC	<i>Multi Point Constrained</i>	
APDL	<i>Ansys Parametric Design Language</i>	
ISUM	<i>Idealized Structural Unit Method</i>	
ISFEM	<i>Intelligent Supersize Finite Element Method</i>	
R_{eH}	titik luluh nominal minimum	
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	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>	
ΔL	pertambahan panjang	m
L	panjang mula-mula	m
ε	regangan	
P	gaya yang bekerja	N/mm^2
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

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perancangan dan konstruksi kapal berusaha untuk didesain menahan beban agar kapal layak beroperasi selama pelayaran. Ini memungkinkan untuk menghindari kegagalan yang dapat menyebabkan polusi, kehilangan total kapal, dan/atau kematian orang di atasnya. Kegagalan struktur terjadi ketika bagian atau komponen suatu struktur atau struktur itu sendiri kehilangan kapasitas untuk mengangkat beban, menyebabkan kerusakan atau deformasi yang berlebihan. Kegagalan local tidak boleh menyebabkan keruntuhan langsung atau bahkan keruntuhan seluruh system.

Untuk mengevaluasi kekuatan struktur yang sangat kompleks, metode elemen hingga *nonlinier* (FE) telah digunakan. Parameter kerusakan struktur seperti dimensi, geometri, dan lokasi kerusakan harus dipertimbangkan saat mengevaluasi kekuatan batas struktur kapal yang mengalami. Salah satunya bagian dari konstruksi kapal adalah *double bottom*.

Pada konstruksi teknik, hampir semuanya memerlukan perhitungan yang tepat agar desain yang dibuat dan digunakan benar-benar kuat dan berfungsi. Hal-hal ini berkaitan dengan gaya-gaya yang akan digunakan dalam desain bangunan. Gaya yang dipilih dan jenis material yang digunakan akan memengaruhi bagaimana bangunan akan berubah setelah diterima.

Double Bottom terdiri dari tiga bingkai *longitudinal* dan dua *stringer vertikal*. Dalam simulasi, perilaku *nonlinear* material untuk ukuran *mesh* tertentu diperiksa secara analitik. Ini terutama mencakup kurva tegangan-regangan utuh dan regangan fraktur. Struktur panel yang kaku dan gading utama adalah komponen struktur lambung ganda yang paling penting.

Sesuai dengan aturan dan pedoman baru yang dikeluarkan oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *International Association of Classification Societies* (IACS), kemajuan telah dilakukan untuk meningkatkan persyaratan *scantling* saat ini dan menetapkan metode analisis keandalan yang lebih baik dalam kondisi kerusakan.

Para ahli di bidang perkapalan dan bangunan lepas pantai sudah banyak melakukan penelitian tentang *double hull* dan *double bottom* (dasar ganda) kapal tanker dengan menggunakan metode *NonLinear Finite Element Analysis* (NLFEA). Investigasi kekuatan penumpu lambung kapal dengan alasan kerusakan oleh Muis-Alie (2018). Pengaruh konfigurasi simetris dan asimetris bentuk analisa kekuatan *buckling* dan kekuatan *fatigue* tetap pada *platform offshore* oleh Muis-Alie (2017). Analisa kekuatan sisa dari *hull girder* yang rusak secara asimetris dengan metode elemen hingga oleh Muis-Alie (2016). Analisa progresif dari unsur lokal dan kekuatan ultimasi kapal Ro-Ro oleh Muis-Alie & Latumahina (2019). Menganalisis kekuatan gider hull kapal pada kerusakan *grounding* oleh Muis-Alie (2018).

Berdasarkan latar belakang di atas, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan *double bottom* dan analisa kekuatan menjadi latar belakang dalam pengerjaan

tugas akhir ini dengan penelitian tentang Simulasi bentuk penampang *single* dan *double bottom* terhadap kekuatan kapal FPSO.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh penambahan tinggi *double bottom* terhadap penampang *single bottom* pada kekuatan kapal FPSO dengan membandingkan aturan menurut Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan Internasional *Association of Classification Societies* (IACS).

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan penelitian yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan tinggi *double bottom* terhadap penampang *single bottom* pada kekuatan kapal FPSO dengan membandingkan aturan menurut Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan International *Association of Classification Societies* (IACS).

1.4 Batasan Penelitian

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

1. Beban yang bekerja yaitu momen *vertical longitudinal* (*hogging* dan *sagging*)
2. Beban yang bekerja pada struktur diasumsikan berbentuk beban pusat dan distribusi.
3. Ketidaksempurnaan awal material, cacat pengelasan, korosi dan crack base diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari 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. Bagi peneliti, sebagai informasi dalam hal menentukan kebijakan dalam hal regulasi/peraturan pada galangan kapal untuk membuat perencanaan struktur kapal FPSO.

BAB II. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di *Ocean Structure Analysis Research Laboratory* (OSAREL) Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa dengan waktu penelitian dilaksanakan dari bulan November 2023 sampai dengan bulan Mei 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 pengaruh penambahan *double bottom* pada simulasi bentuk penampang *single* dan *double bottom* terhadap kekuatan kapal FPSO.

2.3 Metode Penentuan Sampel

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. Tujuan dari penelitian untuk mengetahui pengaruh bentuk penampang *single* dan *double bottom* terhadap kekuatan kapal FPSO dalam arah membujur. Perhitungan kekuatan-batas struktur dengan metode NLFEA perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

2.3.1 Tipe Metode NLFEA

Kuat momen lentur kapal dalam kondisi awal dan rusak dapat dianalisis dengan menggunakan tiga metode NLFEA yang berbeda, yaitu:

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

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

2.3.2 Algoritma iterative solution

Ada tiga jenis algoritma solusi iteratif yang dapat digunakan dengan metode NLFEA: algoritma *Newton-Raphson*, algoritma *quasi-Newton-Raphson*, dan algoritma Risk. Algoritma N-R dan *quasi-N-R* dapat digunakan dalam analisis dinamis statis dan implisit. Algoritme risk hanya dapat digunakan dalam analisis statis. Analisis dinamis eksplisit tidak menggunakan algoritma solusi iterative.

2.3.3 Proses Peningkatan Beban

Beban yang diterapkan dengan metode NLFEA menggunakan proses penambahan beban. Dua jenis kendali beban digunakan untuk menentukan batas kekuatan momen lentur kapal FPSO: kendali kelengkungan dan kendali momen.

Pengendalian kelengkungan dicapai melalui *rigid link* pada kedua ujung model elemen hingga. *Rigid link* dihubungkan ke titik acuan pada sumbu netral. Kenaikan nilai kelengkungan ditentukan dengan menggunakan laju percepatan dan laju redaman. Sebuah momen diterapkan pada kedua ujung titik acuan.

Kontrol momen dicapai melalui *rigid link* pada salah satu ujung model elemen hingga dan ujung yang lainnya di-*full constrain*. Ujung-ujung model yang menggunakan *rigid link* mengalami momen lentur. Gaya reaksi pada akhir model tertahan mencapai batas kekuatan struktur.

2.3.4 Spesifikasi Material

Spesifikasi material kapal adalah kriteria yang harus dipenuhi oleh material yang digunakan dalam konstruksi kapal untuk memastikan kekuatan, ketahanan, dan kualitas struktur yang dibangun. Misalnya, kapal ikan dengan spesifikasi HS36 menggunakan fiberglass reinforced plastic (FRP) dengan ukuran scantling yang sesuai, seperti keel plate dengan ketebalan 4 mm, bottom plate dengan ketebalan 3 mm, dan shell plate dengan ketebalan 2 mm. Material ini dipilih karena keunggulannya yang lebih ringan, tahan terhadap cuaca, dan perawatan yang lebih mudah.

Kurva tegangan-regangan untuk bahan yang digunakan dalam model elemen hingga harus tersedia kurva tegangan-regangan menentukan nilai kekuatan batas struktur kapal. Untuk menentukan kurva tegangan-regangan untuk material yang digunakan dalam model elemen hingga. Kurva tegangan-regangan menentukan nilai kekuatan akhir struktur kapal. Dapat diperhatikan pada Tabel 1 Spesifikasi material kapal FPSO yang diteliti.

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

2.3.5 Ukuran dan kualitas Mesh

Ukuran dan kualitas *mesh* sangat penting untuk membandingkan hasil perhitungan metode NLFEA dan FEA linier. Sebelum melakukan analisis skala besar menggunakan teknik NLFEA, Anda harus melakukan studi konvergensi jaringan.

Bagian model yang diperkirakan akan mengalami beban tinggi harus disambungkan pada ukuran yang lebih kecil untuk menunjukkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin rendah nilai *mesh*, maka peralatan komputer yang digunakan harus semakin tinggi. Pada penelitian ini digunakan ukuran mesh 300 mm hingga 370 mm pada *geometri quadmap*.

2.3.6 Tipe Elemen

Semua pelat yang digunakan pada penelitian ini menggunakan tipe *SHELL* 181 (*quadilateral elements*). *SHELL* 181 adalah elemen material yang tepat untuk menganalisis struktur *shell* yang tipis hingga sedang. Elemen ini diterapkan dengan 4 node dengan 6 derajat kebebasan disetiap *node*, translasi arah x, y, dan z, serta rotasi x, y, dan z.

SHELL 181 sangat cocok untuk linear, rotasi besar, dan/atau aplikasi nonlinear strain besar. Perubahan ketebalan *shell* dicatat pada nonlinear analisis. Terdapat efek pengikut (beban kekakuan) dari tekanan terdistribusi.

SHELL 181 dapat digunakan untuk aplikasi berlapis untuk pemodelan *shell* komposit atau konstruksi berlapis. Akurasi dalam pemodelan *shell* komposit diatur oleh teori shear-deformation orde pertama (biasanya disebut sebagai teori *shell Mindlin-Reissner*).

2.4 Sumber data

Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder merupakan data yang diperoleh secara tidak langsung melalui media perantara, artinya data tersebut dicatat atau dikumpulkan oleh pihak lain dan kemudian digunakan oleh peneliti. Sumber-sumber data sekunder dapat mencakup berbagai bentuk, seperti studi literatur dari buku-buku, skripsi, artikel ilmiah, dan sumber informasi dari internet.

2.4.1 Data Kapal

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

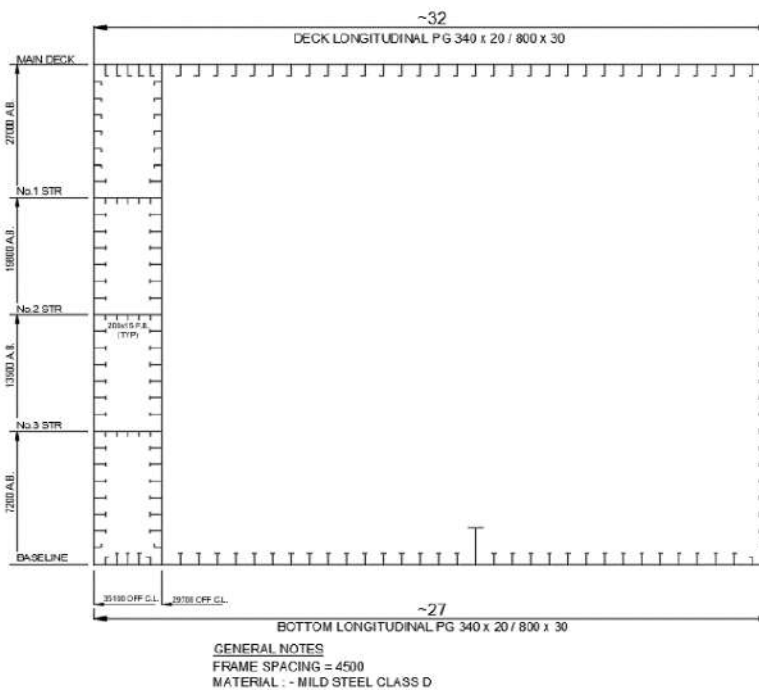
1. Main Dimension
 - a. Panjang kapal, L : 256,5 m
 - b. Lebar kapal, B : 70,2 m
 - c. Tinggi kapal, D : 20,7 m
 - d. Koefisien Blok Kapal, C_b : 0,83
2. Material
 - a. Type of material : HS36

- b. Elastic modulus : 210000 N/mm²
 c. Density : $7,07 \times 10^{-5}$ N/mm³
 d. Yield strength : 355 N/mm²
 e. Poisson ration : 0.3

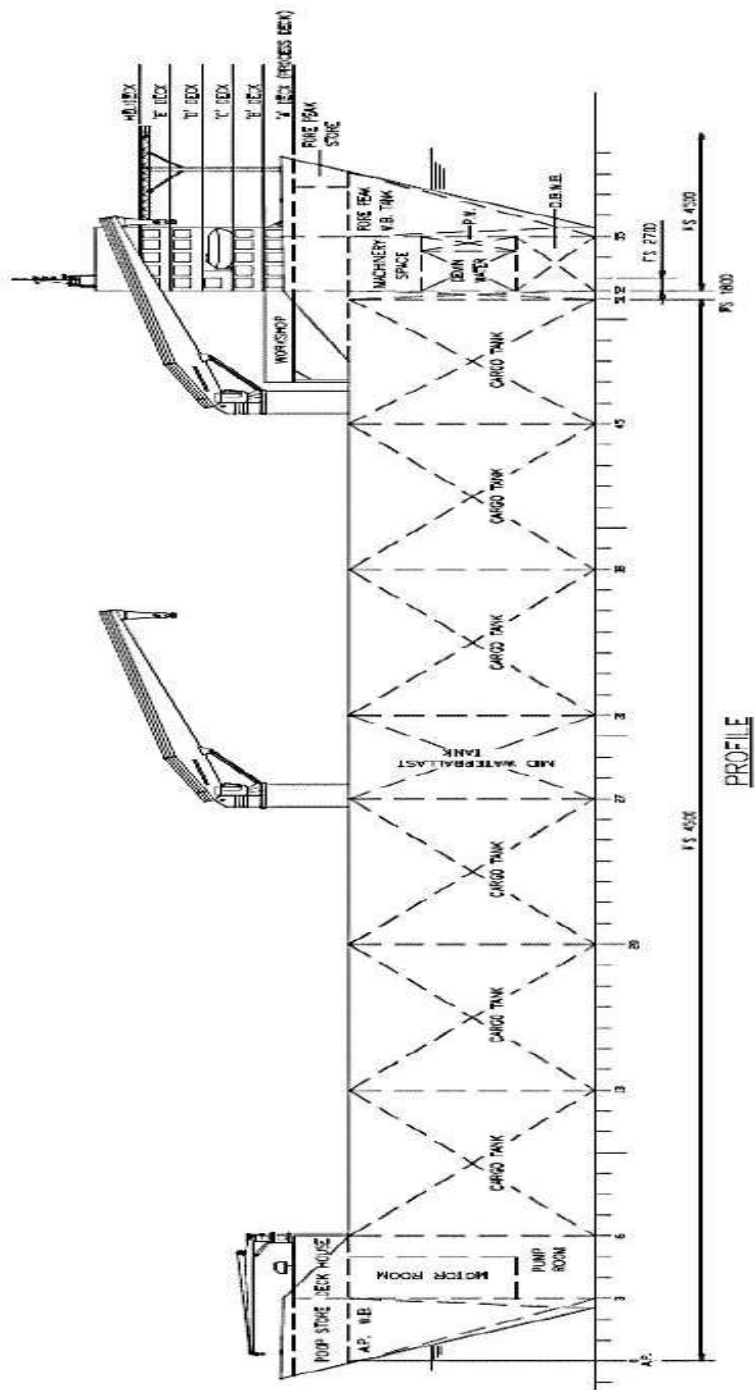
Tabel 2 Konfigurasi ukuran stiffener

LONGITUDINAL NO.	SIDE SHELL & LONGITUDINAL BULKHEADS (mm)
39-41	600×15 / 200×30 F.B.
42-45	550×15 / 150×25 F.B.
50-53	550×15 / 150×25 F.B.
54-57	450×15 / 150×25 F.B.
58-61	400×15 / 150×25 F.B.
62-64	400×14 O.B.P.
65-67	370×13 O.B.P.

Sumber: PT. Irvine Engineering, 2018

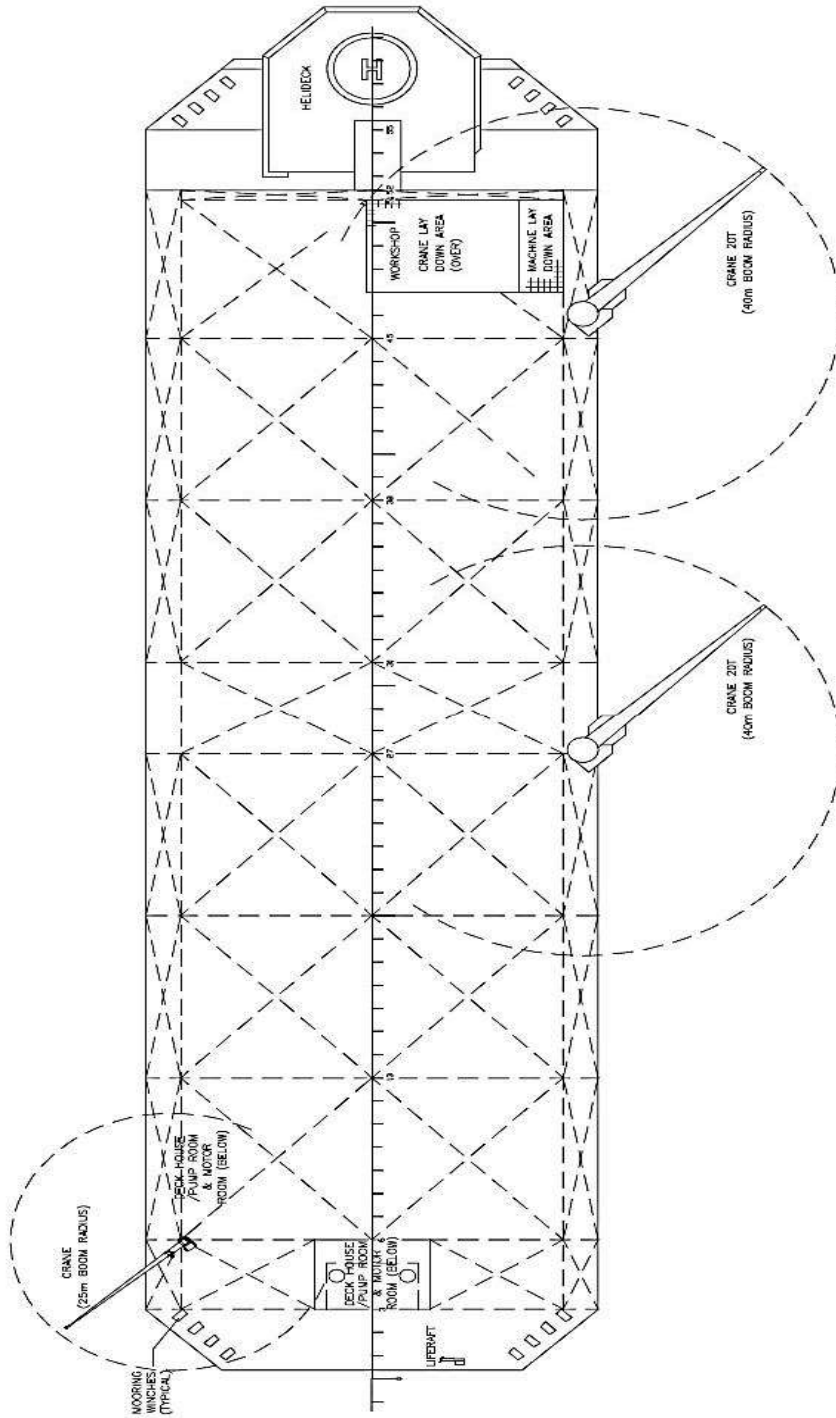
**Gambar 1** Setengah Midship Kapal FPSO

Sumber: PT. Irvine Engineering, 2018



Gambar 2 General Arrangement

Sumber: PT. Irvine Engineering, 2018



Gambar 3 Penampang Atas Kapal Arah Membujur

Sumber: PT. Irvine Engineering, 2018

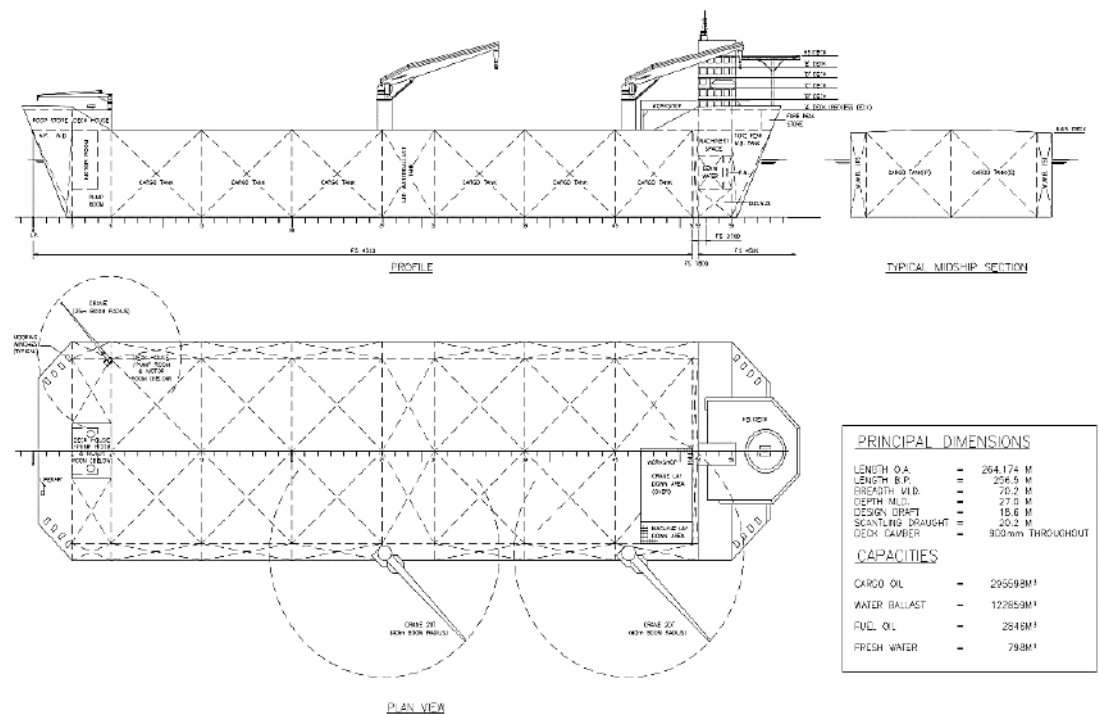
Dapat diperhatikan, Gambar 1 menunjukkan setengah midship kapal FPSO dan Gambar 2 Konfigurasi penampang pada arah membujur kapal FPSO pada Tabel 2 menunjukkan konfigurasi ukuran stiffener Kapal FPSO. Gambar 3 menunjukkan general arrangement Kapal FPSO dan dapat dilihat pada Gambar 1, Gambar 2, Gambar 3 dan Tabel 2 Untuk konfigurasi ukuran *stiffener*.

2.5 Konstruksi Kapal pada Struktur Topside FPSO

Konstruksi kapal pada struktur *topside* yang direncanakan dengan tujuan memusatkan pembebanan pada struktur lambung FPSO. Untuk merencanakan pembebanan dengan benar yang perlu diketahui:

1. Bagian struktur utama *topsides*.
2. Pusat gravitasi dan berat unit utama.
3. Berat, pusat gravitasi dan inersia sisa bagian atas (dan struktur serta peralatan yang lebih kecil).

Beban *topside* yang diterapkan pada lambung seperti ditunjukkan Gambar 4 juga bergantung pada lambung yang mengalami gerak dan akselerasi. Hasil ini diperoleh dari analisa hidrodinamika.



Gambar 4 Konstruksi kapal FPSO
Sumber: PT. Irvine Engineering, 2018

Ruang awak kapal dan rumah geladak terletak di bagian buritan kapal. Selain itu, terdapat area *helipad* terletak di belakang lokasi. Terdapat dua *crane* di area

pemuatan untuk membantu produksi dan penyimpanan. Kontrol fasilitas diwakili oleh blok di bagian atas *deck* utama. Menara suar terletak di Haluan kapal disebareng *deck* awak.

Faktor-faktor yang mempengaruhi beban *deck* utama yang harus ditanggung oleh suatu kapal FPSO dalam bentuk fasilitas produksi adalah:

1. Jumlah sistem utama
2. Karakteristik reservoir
3. Pilihan jalur ekspor
4. Satu atau dua sistem produksi
5. Kemungkinan transfer ke bidang lain

Sistem utama yang memiliki dampak signifikan terhadap ukuran dan konfigurasi unit produksi FPSO adalah pemisahan minyak, pemrosesan gas (dehidrasi dan kompresi), dan kemampuan mengeksport, memproses, dan mengolah air terproduksi, termasuk *reinjeksi*, *scrubbing*, dan Injeksi air laut. Ekspor minyak mentah dengan kapal atau pipa penyalur untuk pembangkit listrik melalui pipa distribusi, yaitu ukuran dan jumlah unit.

Sebagaimana disebutkan di atas, karakteristik *reservoir* di lapangan mempunyai dampak yang besar, dan perancangan fasilitas harus memahami dengan baik profil produksi minyak, gas dan air yang diproduksi. Potensi durasi tinggi atau puncak, serta potensi dan waktu pengembangan sumur dimasa depan dapat memperluas jangkauan tekanan *reservoir* dan dukungan tekanan *reservoir* selama produksi puncak untuk menentukan jumlah injeksi air dan gas, rasio minyak terhadap gas dan setiap kebutuhan gas angkat dan suhu saluran masuk cairan ke FPSO. Dukungan injeksi air mungkin diperlukan pada pada waktunya untuk injeksi ulang. Dalam hal ini peralatan pengalihan air laut seperti peralatan aerasi harus berukuran tepat.

Tingkat akurasi dalam data *reservoir* dan prediksi kinerja diharapkan dapat meminimalkan potensi keterlambatan perubahan proyek dan dampaknya terhadap jadwal dan anggaran proyek, serta mengurangi risiko kendala produksi akibat kondisi sistem atau peralatan terbuat dari apa awalnya tidak direncanakan. FPSO juga dapat digunakan di area dengan keandalan penyimpanan rendah sebagai sistem produksi jangka pendek dan mempersiapkan sistem produksi jangka panjang yang optimal.

Pemilihan sistem ekspor minyak tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran bangunan karena tidak hanya mengarahkan minyak ke berbagai pipa dan tangki, tetapi juga mempengaruhi derajat pemisahan minyak untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar minyak yang berbeda untuk setiap rute. Jika kasus minyak mentah yang berat, licin, atau kental, suhu masuk cairan yang rendah akan memerlukan beberapa titik pendinginan, termasuk namun tidak terbatas pada pemanfaatan limbah panas dari unit pemulihan panas. Harus ada satu atau dua pemisah minyak mentah dan kompresor gas. Pertimbangkan hilangnya pendapatan karena penurunan satu aliran produksi menjadi 100% dalam jangka waktu yang lama hingga biaya tambahan yang terkait dengan penurunan dua aliran produksi sebesar 50%. Jika satu aliran produksi dipilih, peralatan pemisah yang hemat biaya harus dipilih secara cermat untuk

memastikan ketersediaan sistem. Fasilitas isolasi pengujian dapat digunakan untuk memberikan tingkat *redundansi* dan pengendalian yang lebih baik.

Jika FPSO akan digunakan di lapangan untuk jangka waktu singkat, misalnya 5 sampai 7 tahun, maka pemilik harus memutuskan apakah akan merancang fasilitas produksi untuk umur lapangan atau mempersiapkan FPSO untuk direlokasi. tempat Bagus di tempat lain Dalam kasus ini, peluang komersial dapat ditentukan oleh konfigurasi bangunan, tingkat fleksibilitas yang tersedia untuk menangani berbagai jenis air, kecepatan produksi, dan kebutuhan ruang dan berat untuk penambahan suku cadang atau peralatan tambahan. FPSO adalah unit pemrosesan air di atas dek dengan fasilitas penyimpanan hidrokarbon di bawahnya. Kapal juga dapat dilengkapi dengan sistem retensi agar tetap berada di tempatnya jika diperlukan.

2.6 Konstruksi Kapal pada Struktur Lambung FPSO

Karena kedalaman air, sensitivitas sistem tambak dan *system* angkat FPSO terhadap perubahan frekuensi gelombang yang mempengaruhi geometri lambung FPSO dapat dioptimalkan untuk mengatasinya dengan mengubah panjang, lebar, tinggi, sarat air dan distribusi massa pada penampakan struktur terapung. Panjang lambung FPSO dapat disesuaikan dengan panjang gelombang tetap untuk menghindari panjang gelombang pada kisaran respons *heave* dan *pitching* puncak, sehingga mengurangi pergerakan vertikal bagian atas dan beban dinamis terkait.

Salah satu penyebab lemahnya kekuatan struktur bangunan terapung seringkali disebabkan oleh kurangnya ketahanan struktur terhadap beban yang tinggi dan/atau runtuhnya material. Misalnya, korosi yang terus menerus mengurangi ukuran keseluruhan dan membuat balok penyangga lambung kapal lebih rentan terhadap tekuk dan patah bila terkena tekanan. Beban yang berat dapat menyebabkan komponen struktur runtuh dan struktur tidak kembali ke bentuk semula. Oleh karena itu, pertimbangan jangka panjang diperlukan untuk memperkirakan kerusakan material saat merancang struktur.

Selain itu, bentuk lambung kapal dapat disesuaikan untuk mengontrol sikap *rolling* dan *pitching*, sehingga mengurangi persyaratan desain untuk *bend stiffener rise*, terutama dalam situasi kondisi melintang. Optimalisasi ini mengurangi kebutuhan akan persyaratan desain peralatan pemrosesan *topside* khusus, seperti katup untuk pemisahan. Optimalisasi geometri lambung kapal yang disebutkan di atas dapat memberikan manfaat bagi kinerja FPSO dalam jangka panjang, namun hal ini harus dievaluasi secara cermat terhadap biaya produksi dan biaya *life-of-field* (LOF).

Untuk perancangan FPSO yang dibangun untuk pembuatan ukuran lambung kapal ditentukan oleh kebutuhan penyimpanan minyak. Hal ini juga dipengaruhi oleh waktu siklus pada saat pembongkarang kapal FPSO, yang meliputi:

1. Waktu pemuatan lapangan
2. Waktu berlayar dari pelabuhan (termasuk penundaan cuaca dalam perjalanan)
3. Durasi debit pelabuhan
4. Waktu menghubungkan atau memutuskan FPSO

5. Menunggu waktu cuaca untuk mengatasi cuaca ekstrem. Hal ini tergantung pada tinggi gelombang dan kecepatan angin untuk koneksi dan pemutusan. Sambungan dan pemutusan tergantung pada tinggi gelombang dan kecepatan angin.

Dimensi lambung FPSO harus memberikan daya apung yang baik untuk memastikan bahwa desain lambung cukup untuk bekerja dengan baik untuk operasi lepas pantai. Secara umum, berdasarkan pengalaman desain dan data yang memadai, fitur lambung yang ada dapat dirancang tidak hanya untuk memberikan performa mesin yang baik dengan waktu produksi yang minimal, namun juga menyediakan instalasi mesin yang efisien dan efektif (desain separator, turbin angin, dll). Pemeriksaan rinci terhadap kondisi operasi tidak diperlukan pada tahap desain awal.

Tujuan utama desain lambung pada FPSO adalah:

1. Keandalan

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

2. Kinerja

Kinerja diukur berdasarkan waktu operasional penuh FPSO, yang mencakup *uptime* sistem produksi dan ekspor, serta nilai ekonomis *downtime* akibat cuaca buruk. Desain lambung (tergantung pada ukuran lambung) harus menyediakan platform yang stabil untuk struktur dan penyimpanan bantalan yang cukup untuk menutupi jarak jelajah kapal guna meminimalkan waktu henti.

3. Fleksibilitas untuk ekspansi

Desain lambung kapal harus menyadari kebutuhan masa depan akan ekspansi yang efisien, yang mungkin memerlukan *slot riser* tambahan dan komponen lainnya.

4. Desain untuk operasi

Desain lambung kapal juga harus mempertimbangkan pengamatan khusus dan persyaratan pemeliharaan FPSO agar dapat digunakan dalam jangka waktu lama. Bentuk lambung FPSO harus dioptimalkan untuk menciptakan desain yang paling ekonomis dalam batasan desain pada Tabel 3

Tabel 3 Parameter desain lambung utama dan dependensinya

<i>Parameter</i>	<i>Function of</i>
<i>Hull steel weight</i>	<i>Length/depth ratio and size of hull</i>

<i>Deck space</i>	<i>Length and breadth</i>
<i>Stability</i>	<i>Breadth/length</i>
<i>Sea-keeping (Primary pitch)</i>	<i>Breadth/depth</i>
<i>Green water on deck</i>	<i>Freeboard</i>
<i>Bottom slamming forward</i>	<i>Ballast capacity</i>
<i>Bow wave impact</i>	<i>Bow fineness</i>

Sumber: Paik,2007

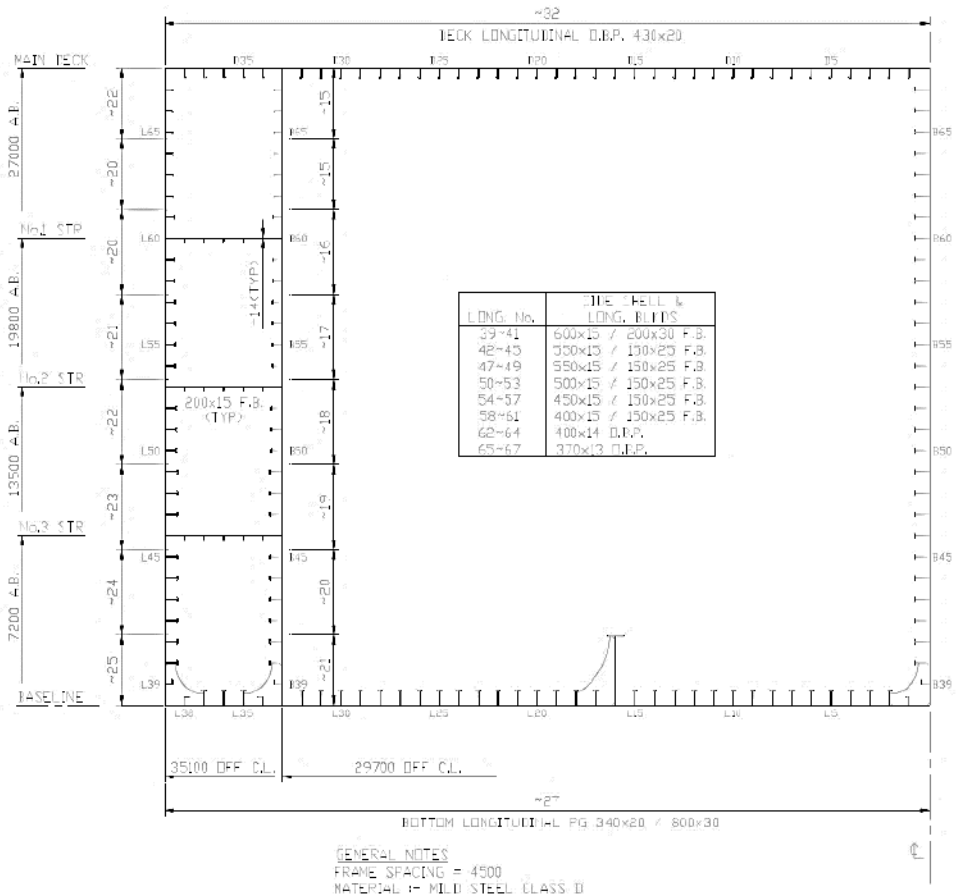
Berat keseluruhan FPSO merupakan fungsi dari berat baja berat dan berat mati muatan minyak. Secara umum, berat lambung baja dikurangi *topside* adalah 13 hingga 16 persen perpindahan dan bobot mati adalah 75 persen.

Lambung harus memiliki volume yang besar untuk menampung minyak mentah, dan tangki pemberat terpisah diperlukan untuk mencapai ruang pemberat dan mencegah pergerakan berlebihan. Kapasitas beban adalah perpindahan 35%.

Tentu saja, panjang lambung FPSO adalah dimensi yang paling mahal, yang harus dikurangi sebanyak mungkin, namun hal ini konsisten dengan pencapaian ruang *deck* yang benar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Jarak harus diminimalkan untuk menghindari stabilitas yang berlebihan, yang dapat mengakibatkan pemuatan tambatan yang berlebihan dan rotasi yang cepat, dan dalam batasan yang ditentukan oleh stabilitas dan jarak *deck*, titik kritis harus mencapai keseimbangan antara meminimalkan gelombang dan meminimalkan berat baja lambung.

Lambung kapal FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) adalah bagian penting dari kapal ini, yang dirancang untuk memenuhi berbagai fungsi produksi, penyimpanan, dan pengolahan minyak dan gas. Lambung kapal ini harus memperhitungkan beban yang lebih berat dibandingkan dengan kapal tanker konvensional, terutama karena penyiangan di lingkungan yang ekstrem dan penghindaran cuaca yang sulit. Lambung FPSO berbentuk balok, yang mendistorsi bidang vertikal (distribusi berat dan daya dorong), sehingga menimbulkan gelombang. Untuk memperoleh nilai tegangan rata-rata atap dan lantai, harus diperhitungkan nilai maksimum kedua jenis tulangan tersebut. Untuk FPSO, kondisi pembebanan utama adalah beban maksimum tangki penyimpanan minyak mentah dan gelombang yang mempengaruhi panjang dan pusat kapal.



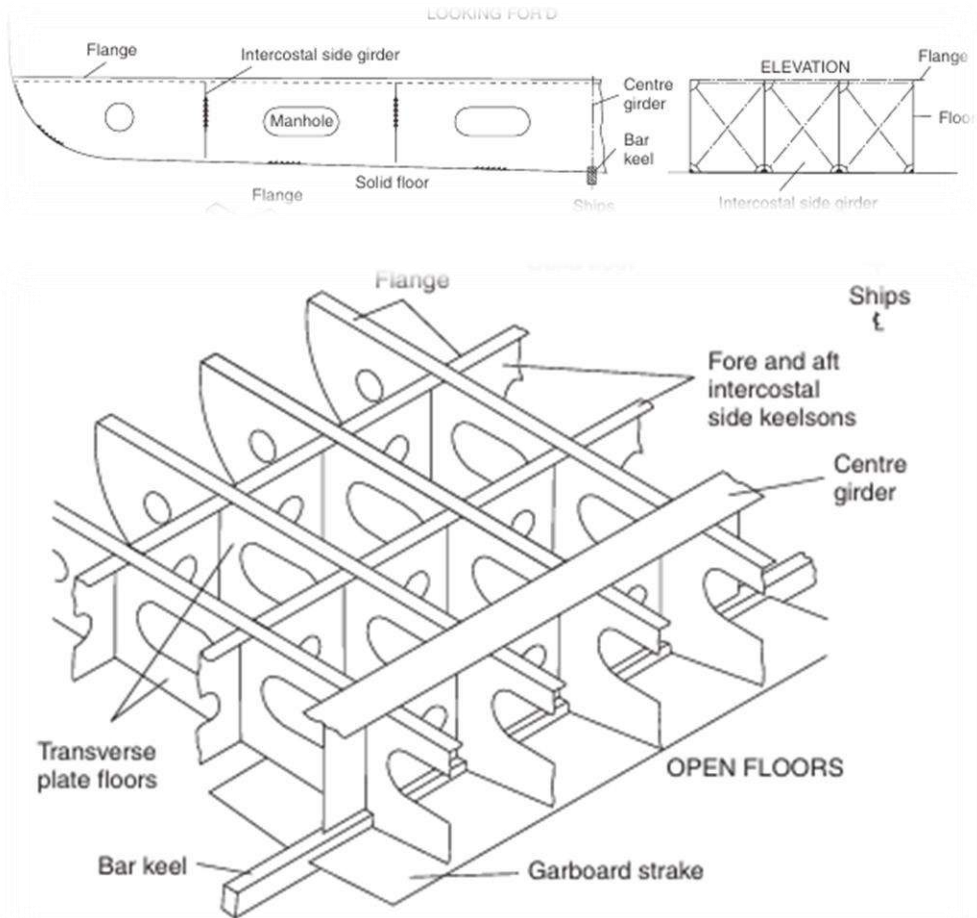
Gambar 5 Midship Kapal

Sumber: PT. Irvine Engineering, 2018

2.7 Konstruksi Single Bottom

Untuk kapal-kapal kecil yang mempunyai alas tunggal maka pelat vertikal wrang terbuka (open floor) dipasang pada tiap jarak gading dan diperkuat pada sisi atasnya. Penumpu tengah (centre line girder) dipasang dan satu penumpu samping (side girder) dipasang pada tiap sisi centre line, untuk lebar kapal yang kurang dari 10 m. Untuk lebar kapal antara 10 dan 17 m maka dua penumpu samping (side girders) dipasang.

Penumpu tengah (kontinyu) dan penumpu samping (intercostal) diperkuat pada sisi atas dan diperpanjang sejauh mungkin ke haluan dan buritan. Struktur alas tunggal ditunjukkan pada Gambar 6. Profil 3-D dari struktur ditunjukkan untuk menggambarkan elemen struktur yang kontinyu dan intercostal. Plafon papan kayu dapat dipasang di atas floor jika muatan diangkut, tetapi bagian ini tidak dipandang sebagai proteksi jika pelat alas kapal mengalami kerusakan.



Gambar 6 Konstruksi *Single Bottom*

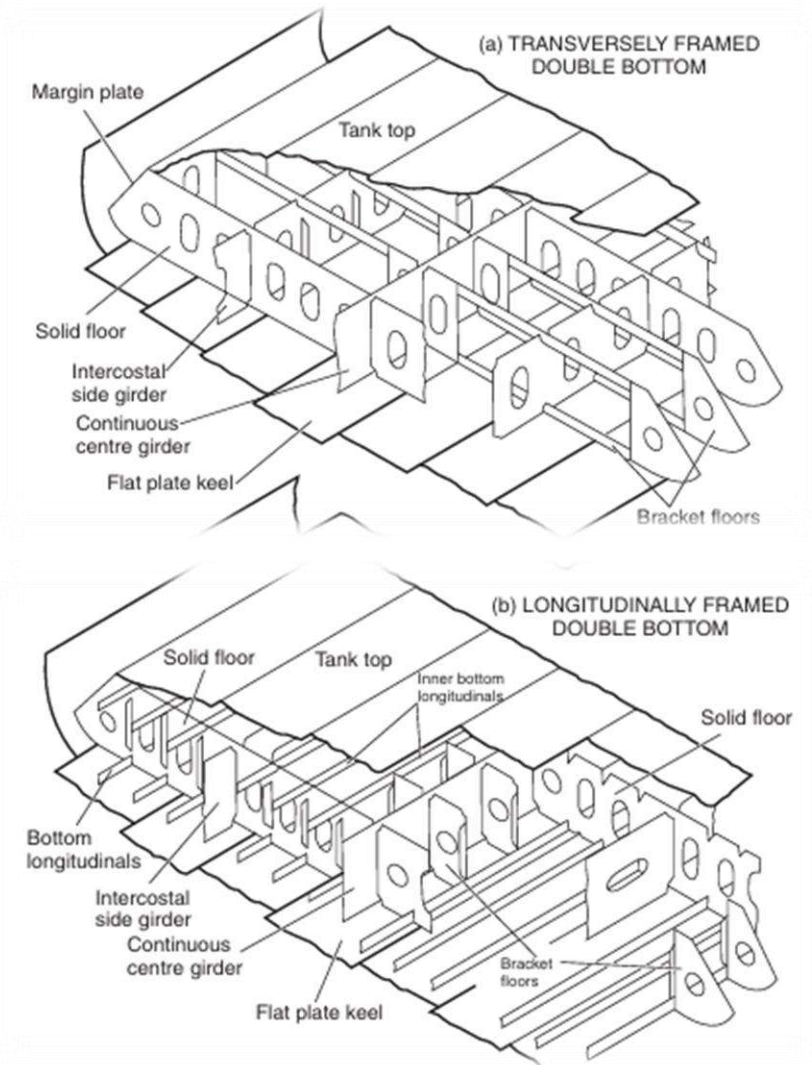
2.8 Konstruksi *Double Bottom*

Alas dalam (*inner bottom*) atau pelat atas tangki (*tank top*) dapat dipasang pada suatu ketinggian di atas pelat kulit dan membentuk kedap air sampai ke bilga (*bilges*). Struktur ini menyediakan cadangan keamanan terhadap kondisi kerusakan pelat alas ketika ruangan pada alas ganda kemasukan air (*flooded*). Ruangan ini dipakai untuk mengangkut bahan bakar minyak dan air tawar untuk kebutuhan kapal serta menyediakan kapasitas air *ballast*. Tinggi minimum alas ganda tergantung dari persyaratan-persyaratan biro klasifikasi tentang ketinggian penumpu tengah.

Alas ganda menjadi lebih tinggi untuk memenuhi kapasitas bahan bakar minyak, air tawar dan air *ballast* yang ditempatkan pada bagian dasar kapal. Juga tangki dasar air *ballast* digunakan untuk tujuan pengetriman kapal bagian haluan dan buritan. Jika perlu maka ketinggian alas ganda dapat dipertinggi pada daerah-daerah ini. Di ruangan kamar mesin ketinggian alas ganda juga ditingkatkan untuk menyediakan kapasitas untuk bahan bakar dan minyak pelumas. Peningkatan ketinggian pelat alas dalam (*inner bottom*) selalu dilakukan secara kenaikan yang

gradual (*gradual taper*) dalam arah memanjang dan tidak diijinkan *diskontinyu* setempat untuk struktur ini.

Alas ganda dapat ditempatkan gading memanjang atau melintang pada Gambar 7, tetapi untuk panjang kapal yang melebihi 120 m maka dipertimbangkan untuk menggunakan sistim gading memanjang. Hal ini dimaksud bahwa kapal-kapal yang panjang mengalami kecenderungan pelat alas dalam dan pelat alas mengalami deformasi (*buckling*) jika digunakan sistim gading melintang. Deformasi *buckling* ini terjadi sebagai akibat lenturan memanjang kapal dan dapat dihindari dengan menggunakan pelat yang diperkuat secara memanjang. Alas ganda di dalam daerah kamar mesin yang berdekatan dengan ceruk buritan diharuskan untuk menggunakan sistim gading melintang.



Gambar 7 Konstruksi *Double Bottom*

2.9 Tinggi Dasar Ganda (*Double Bottom*)

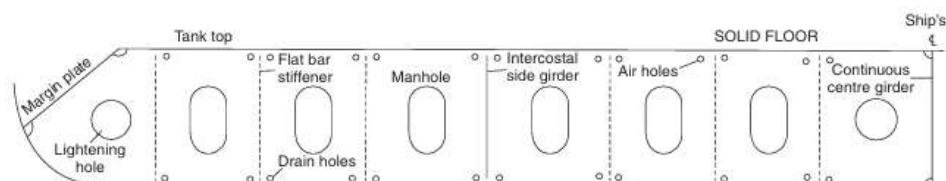
Tinggi dasar ganda kapal (*Double Bottom*) adalah sebuah konstruksi yang dirancang untuk meningkatkan keamanan dan ketahanan kapal. Ini dilakukan dengan menambahkan lapisan kedua di bawah lambung kapal, yang terletak di antara keel plate dan bottom plate. Tujuan dari tinggi dasar ganda ini adalah untuk memastikan bahwa kapal dapat menahan beban yang lebih besar dan mengurangi risiko kerusakan akibat kebocoran atau kerusakan pada bagian bawah kapal.

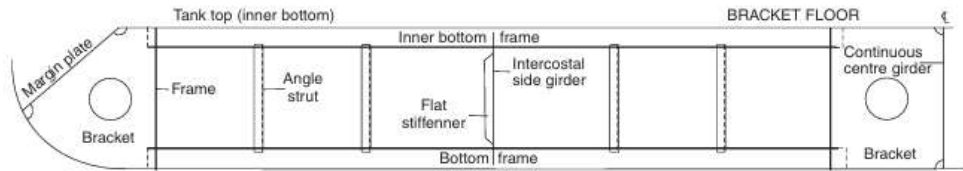
Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) menentukan aturan bahwa kapal dengan panjang (L) lebih dari 50 m diharuskan menggunakan alas ganda.

1. Pengertian Dasar Ganda

Dasar Ganda ialah bagian dari konstruksi kapal yang dibatas,
 Bagian bawah, Oleh kulit kapal bagian bawah (*bottom shell plating*)
 Bagian atas, Oleh plat dasar dalam (*inner bottom plating*)
 Bagian samping, Oleh lempeng samping (*Margin Plate*)
 Bagian depan, Oleh sekat kedap air terdepan / sekat pelanggaran (*collision bulkhead*)
2. Fungsi Dasar Ganda
 - a. Bila kapal kandas dan mengalami kebocoran, masih ada dasar yang kedap air.
 - b. Sebagai ruangan muatan cair, air tawar, bahan bakar, *ballast*.
 - c. Membantu stabilitas kapal
 - d. Menambah kekuatan melintang kapal
3. Konstruksi Dasar Ganda
 - a. System konstruksi kerangka melintang dengan *wrang-wrang* penuh dan *wrang-wrang* terbuka.
 - b. System konstruksi kerangka membujur dengan *wrang-wrang* penuh dan *wrang-wrang* terbuka.
4. Dasar Ganda Kerangka Melintang
 - a. Dilengkapi dengan *wrang-wrang* penuh pada setiap gading dibawah kamar mesin.
 - b. Jarak antara *wrang* penuh tidak lebih dari 3.05 m diselingi *wrang* terbuka
 - c. *Wrang* penuh yang terbentang melintang dari penyanggah tengah sampai lempeng samping pada setiap sisinya diberi lubang peringan.
 - d. Pada *system* kerangka melintang, penyanggah tengah dan lempeng samping tidak terputus.

Dari ciri-ciri di atas lihat Gambar 8 berikut ini.



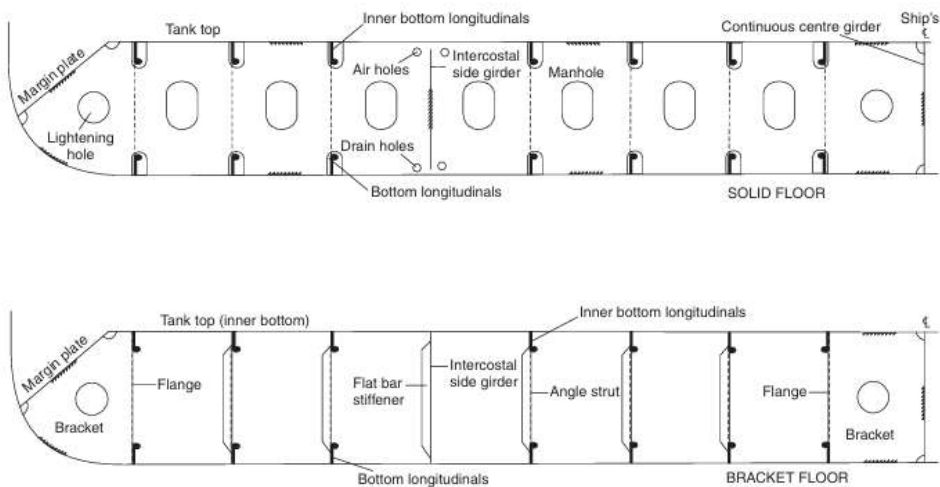


Gambar 8 Dasar Berganda Kerangka Melintang

5. Sistem Kerangka Membujur

- Wrang* penuh dipasang dibawah gading–gading kamar mesin, kursi ketel, dinding kedap air dan pada ujung bracket deep tank.
- Penyanggah tengah diberi *bracket* dengan jarak 1.25 meter.
- Bila jarak antara sebuah *wrang* dengan *wrang* lainnya sampai 12 atau lebih jarak gading, dipasang penguat tegak paling sedikit 100 mm untuk memperkuat longitudinal.
- Kapal–kapal yang lebarnya sampai 14–21 m, *longitudinals* terputus pada *wrang* kedap air dan sebagai gantinya diberi *bracket*.
- Jarak antara *wrang* yang satu dengan lainnya tidak lebih 3.7 m, kecuali kapal tersebut diperuntukkan bagi pengangkutan barang– barang berat atau biji–bijian tambang.

Dari ciri-ciri di atas lihat Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9 Dasar Berganda Kerangka Membujur

6. Aturan Mengenai Tinggi Dasar Ganda (*Double Bottom*)

- Menurut BKI

Apabila diperlukan dasar ganda untuk dipasang, dasar bagian dalam harus dilanjurkan ke sisi kapal sedemikian rupa untuk melindungi bagian bawah

terhadap pergantian lambung kapal, perlindungan semacam itu akan dianggap memuaskan jika dasar bagian dalam tidak lebih rendah pada bagian manapun selain bidang yang sejajar dengan garis lunas dan yang terletak tidak kurang dari jarak *vertical* h diukur dari garis lunas, sebagaimana dihitung berdasarkan Persamaan 1:

$$h_{db} = \frac{B}{20} \quad (1)$$

Dimana:

Hdb = Tinggi Double bottom(m)

B = Lebar Kapal(m)

b. Menurut IACS

Untuk pengangkut curah, dasar ganda harus dipasang memanjang dari sekat tabrakan ke sekat puncak buritan, sejauh hal ini dapat dilakukan dan kompatibel dengan desain dan pengerjaan kapal yang tepat. Untuk kapal FPSO minyak, *double bottom* harus dipasang untuk melindungi wilayah kargo dan ruang pompa.

Jika *double bottom* perlu dipasang, *inner bottom* harus dilanjutkan ke sisi kapal sedemikian rupa untuk melindungi *bottom* dari pergantian bilga di area dimana ruang *hopper* atau *double side* yang tidak disediakan.

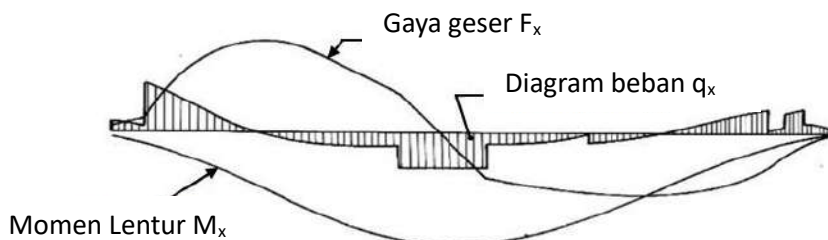
Jika tidak ditentukan, ketinggian *double bottom* tidak kurang dari yang lebih rendah sesuai Persamaan 2 untuk FPSO :

Jika tidak ditentukan, ketinggian *double bottom* tidak boleh kurang dari yang lebih rendah sesuai Persamaan 2 untuk oil FPSO:

$$h_{db} = \frac{B}{15} \quad (2)$$

2.10 Momen Lentur dan Gaya Geser

Kekuatan longitudinal lambung kapal dievaluasi berdasarkan momen lentur dan gaya geser yang bekerja pada kapal. Adapun momen lentur dan gaya geser pada kapal dapat dilihat pada Gambar 10 berikut ini.



Gambar 10 Distribusi beban (*load diagram*), gaya geser (*shear force*), terhadap momen lentur (*bending moment*).

Sumber: Shama, 2013

Adapun distribusi beban kapal dapat dihitung dengan Persamaan berikut.

$$q_x = b_x - w_x \quad (3)$$

Dimana:

b_x = gaya apung (N)

w_x = berat beban

q_x = diagram beban

Adapun rumus distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal dapat dihitung dengan Persamaan 4 dan 5 berikut ini:

$$F_x = \int_x^0 (b_x - w_x) d_x \quad (4)$$

$$M_x = \int_x^0 F_x d_x \quad (5)$$

Dimana:

F_x = Gaya Geser (N)

M_x = Momen Lentur (Nmm)

d_x = Berat

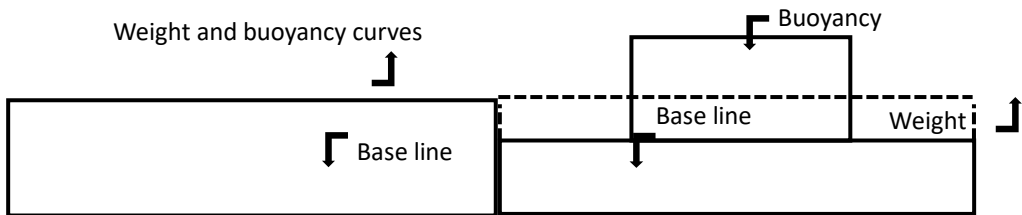
Distribusi gaya geser dan momen lentur adalah kriteria penting yang harus dipenuhi untuk memastikan kekuatan dan ketahanan struktur. Gaya geser adalah gaya yang bekerja sepanjang arah horizontal pada struktur. Momen lentur adalah gaya yang bekerja sepanjang arah vertikal dan horizontal, yang dapat menyebabkan deformasi atau kerusakan pada struktur. Oleh karena itu, perencanaan struktur harus mempertimbangkan distribusi gaya geser dan momen lentur untuk memastikan keamanan dan kinerja yang optimal dalam berbagai kondisi operasi

Hal ini selanjutnya diilustrasikan pada Gambar 11 untuk sebuah kapal yang berada pada kondisi air tenang (misalnya di pelabuhan). Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 11(a), tongkang yang diturunkan dari penampang konstan dan kerapatan, yang mengapung di air akan memiliki berat dan daya apung yang merata sepanjang tongkang. Hal ini ditunjukkan oleh kurva berat dan daya apung, terlihat pada Gambar 11(b). Jika tongkang dimuat di tengah (Gambar 11(c)), distribusi berat akan berubah dan kurva yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 11(d). Perbedaan antara kurva berat dan daya apung menghasilkan distribusi momen lentur sepanjang kapal. Momen lentur ini dikenal sebagai momen lentur air tenang, M_s , seperti yang terlihat pada tongkang yang dimuat pada Gambar 11(e).



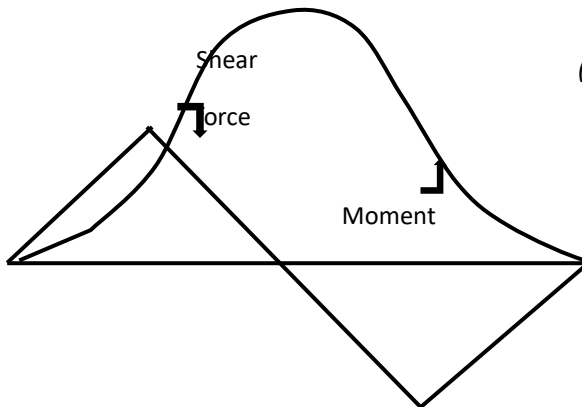
(a) Tongkang persegi Panjang yang dibongkar (*Rectangular barge-unloaded*)

(b) Tongkang setengah dimuat (*Barge – half loaded*)



(c) Kurva berat dan daya apung tongkang yang dibongkar (*Weight and buoyancy curves of unloaded barge*)

(d) Kurva berat dan daya apung tongkang bermuatan (*Weight and buoyancy curves of loaded barge*)



(e) Gaya geser dan kurva momen lentur tongkang bermuatan (*Still water shear force and bending moment curves of loaded barge*)

Gambar 11 Perubahan Momen Lentur pada Tongkang Persegi Panjang Kondisi Air Tenang.

Sumber: Shama, 2013

Untuk kapal pada kondisi bergelombang, momen lentur dipisahkan menjadi dua istilah, yaitu: momen lentur air tenang (M_{sw}), dan momen lentur akibat gelombang (M_w).

Kombinasi beban statis dan beban dinamis untuk menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur-batas vertikal kapal dapat dihitung dengan penjumlahan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 6

$$m = m_{sw} + 1,2m_w \quad (6)$$

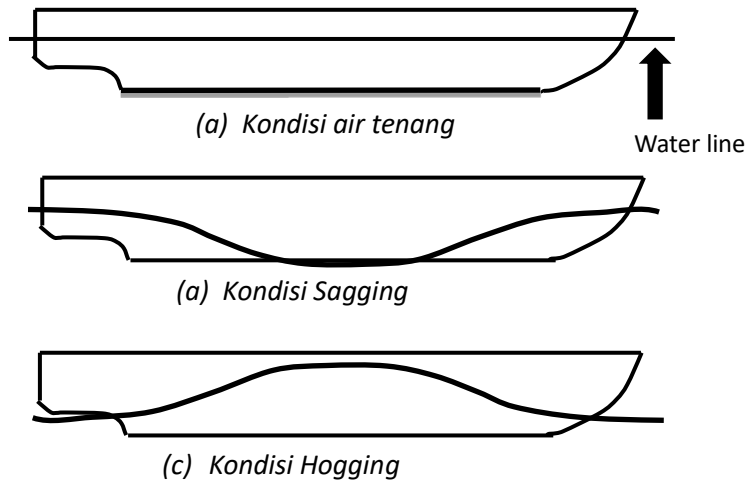
Dimana :

M = Momen lentur batas (Nmm)

M_{sw} = Momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang (Nmm)

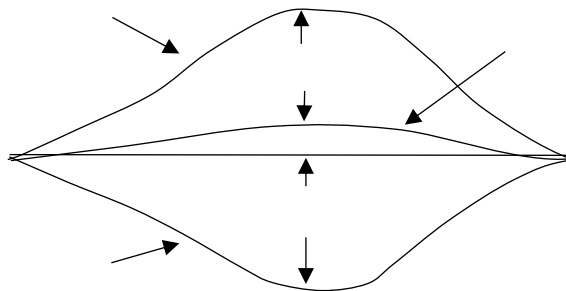
M_w = Momen lentur-batas vertikal pada kondisi air gelombang (Nmm)

Gambar 12 mengilustrasikan kapal pada gelombang sama dengan panjangnya. Gambar 12(a) menunjukkan kondisi air tenang dimana hanya momen lentur yang bekerja pada kapal adalah momen lentur kondisi air tenang itu sendiri. Gambar 12(b) menunjukkan kondisi dimana gelombang berongga berada di tengah kapal. Hal ini menghasilkan distribusi daya apung di dekat ujung kapal dan dengan demikian kapal mengalami kondisi *sagging*. Pada kondisi *sagging*, dek pada kapal mengalami tekan sedangkan bagian bawahnya mengalami tarik (*tension*). Gambar 12(c) menunjukkan puncak gelombang berada di tengah kapal.



Gambar 12 Momen Lentur Gelombang pada Gelombang Regular.
 Sumber: Shama,2013

Hal ini menunjukkan gaya apung lebih besar pada bagian tengah kapal dibandingkan diujung kapal sehingga menghasilkan kondisi *hogging*. *Hogging* berarti kapal melengkung pada bagian tengah seperti pada Gambar 13.



Gambar 13 Momen Lentur Ketika Air Tenang dan Bergelombang.
 Sumber: Tupper, 2014

Adapun besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang (M_s) untuk panjang kapal lebih dari 90 meter, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 7 untuk kondisi *sagging*, dan Persamaan 8, untuk kondisi *hogging*.

$$M_s = -0,05168 K_m CL^2 B (C_b + 0,7) \quad (7)$$

$$M_s = -0,01 K_m CL^2 B (11,97 - 1,96 C_b) \quad (8)$$

Dimana :

M_{sw} = Momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang (Nmm)

Adapun besaran momen lentur-batas vertikal akibat gelombang (M_w) untuk panjang kapal lebih dari 90 meter, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 9, untuk kondisi *sagging*, dan Persamaan 10, untuk kondisi *hogging*.

$$M_w = -0,11 K_m CL^2 B (C_b + 0,7) \quad (9)$$

$$M_w = -0,19 K_m CL^2 B C_b \quad (10)$$

Dimana:

M_w = Momen lentur-batas vertikal pada kondisi air gelombang (Nmm)

K_M = Faktor distribusi

B = Lebar kapal (mm)

L = Panjang Kapal (mm)

C_b = Koefisien blok ($\geq 0,6$)

C = $10,75 - ((300 - L) / 100)1,5$ untuk $90.000 \leq L \leq 300.000$ mm

= $10,75$ untuk $300.000 \leq L \leq 350.000$ m

= $10,75 - ((L - 350) / 150)1,5$ untuk $350 \leq L \leq 500.000$ mm

2.11 Deformasi Material

Deformasi material merupakan perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah material karena sebuah gaya kerja yang diterapkan padanya. Dalam hal ini deformasi material yang dimaksud timbul akibat gaya kerja berupa kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan lipatan atau memutar (*torsi*).

Ketika deformasi terjadi gaya internal antar-molekul muncul melawan beban atau gaya kerja yang diberikan, jika gaya yang diberikan tidak melebihi kekuatan internal antar-molekul material maka memungkinkan material tersebut dapat mencapai keadaan setimbang baru dan kembali ke kondisi semula ketika beban atau gaya kerja yang diberikan dihapuskan. Sebaliknya jika beban atau gaya kerja yang diberikan melebihi kemampuan gaya internal antar-molekul material maka dapat

menyebabkan deformasi permanen dari material (kegagalan struktur). Adapun deformasi yang timbul pada material dapat dihitung dengan Persamaan 11 berikut:

$$\delta l = \varepsilon \cdot l = \frac{\sigma \cdot l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (11)$$

Dengan:

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

ε = Regangan yang timbul pada material

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

A = Luas penampang material (mm²)

E = Modulus elastisitas material (N/mm²)

l = Panjang material (mm)

δl = Deformasi material (mm)

2.12 Hubungan Tegangan dan Regangan

Hubungan tegangan dan regangan yang terjadi pada analisis struktur dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. 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 batangnya 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 tampang. Sehingga besar tegangan yang dialami batang prismatik tersebut masing - masing sebesar $\sigma = \frac{F}{A}$ dan $\tau = \frac{F_v}{A}$. 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 12:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (12)$$

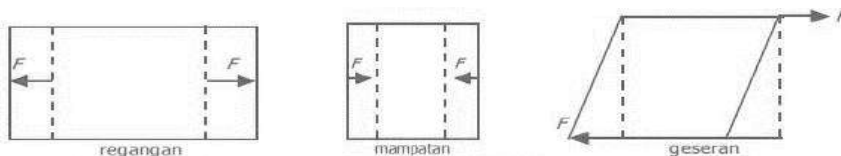
Dengan:

σ = tegangan (N/mm²)

F = gaya (N)

A = luas penampang (mm²)

Satuan SI untuk tegangan adalah *pascal* (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm². Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 14:



Gambar 14 Tegangan-Regangan

2. 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_{ta}) terjadi akibat bekerjanya gaya Tarik (F_{ta}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio/Perbandingan antara perpanjangan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan Tarik ϵ_{ta} secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 13 dan dapat dilihat pada Gambar 15:

Rumus:

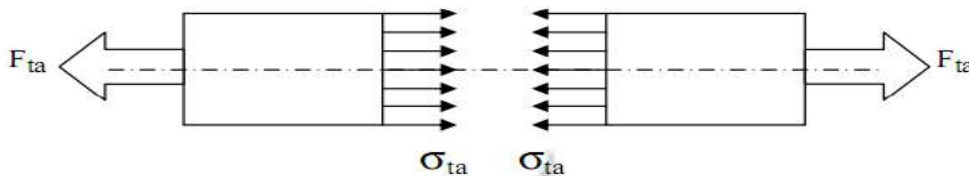
$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \tag{13}$$

Dengan:

σ_{tr} = tegangan tarik (N/mm²)

F = gaya tarik (N)

A = Luas penampang (mm²)



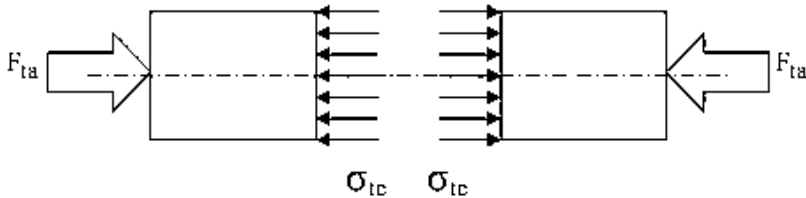
Gambar 15 Tegangan Tarik.

3. 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, sehinggabendanya mengalami perpindahan.

Rasio/Perbandingan antara perpindahan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan ε_{ta} secara matematik dapat dilihat pada Gambar 16:



Gambar 2.16 Tegangan Tekan

selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.14:

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (14)$$

4. 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 di distribusikan 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. Persamaan 15:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (15)$$

Dengan:

τ = tegangan geser (N/mm^2)

P = gaya geser atau gaya lintang (N)

A = Luas penampang (mm^2)

5. 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.

6. Tegangan Luluh (*Crushing/Bearing Stress*)

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.

7. Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut bersumber pada ABS 2024. 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.

8. Regangan

Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada Persamaan 16:

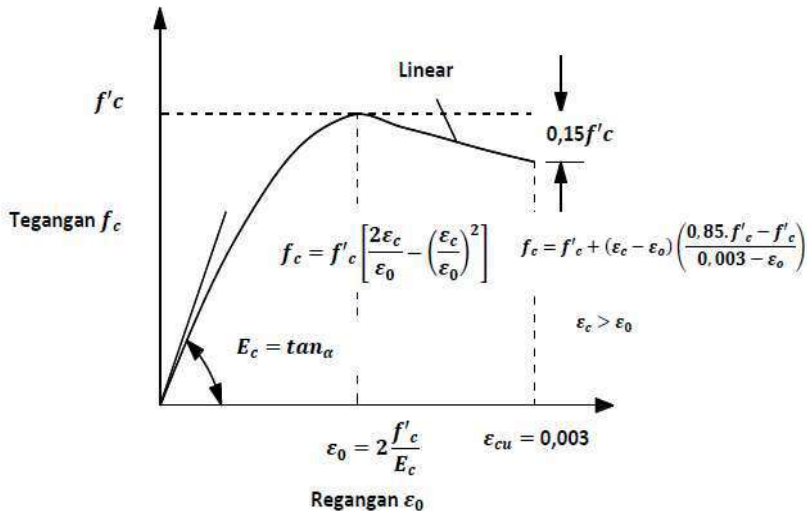
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (16)$$

Dengan:

- ε = regangan
- ΔL = pertambahan panjang (mm)
- L = panjang mula-mula (mm)

Seperti yang terlihat pada Gambar 17, batas elastis (*elastic limit*) bahan tercapai. Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan, sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Yaitu bahan secara tiba-tiba mulur yang disebut titik mulur (*yield point*), tetapi bahan segera memperlihatkan lagi kemampuan menahan kenaikan tegangan, tetapi pemanjangan sekarang naik dengan laju yang

lebih cepat dari tegangan sampai mencapai titik F yaitu tegangan maksimum batas kekuatan bahan.



Gambar 17 Diagram Tegangan–Regangan Baja

Tegangan ini disebut tegangan batas (*ultimate stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. Diluar titik F, 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 beban memasuki fase peralihan deformasi elastis ke plastis. Yaitu titik sampai di mana penerapan hukum Hook 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 Strenght* (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 kecepatannya bergantung pada *modulus Young*. Secara matematis dirumuskan pada Persamaan 17 dan Persamaan 18:

$$E = \frac{F.L}{A.\Delta L} \quad (17)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (18)$$

Dengan:

E = modulus Young (N/mm²)

F = gaya (N)

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.

2.13 Kekuatan Batas Kapal FPSO (Ultimate Strenght)

Kekuatan-batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total (Huges & Paik, 2010). Perhitungan kekuatan-batas kapal FPSO 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.

Momen Kekuatan-batas kapal FPSO (M_u) harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria seperti Persamaan 19 dibawah ini (DNV GL, 2017b).

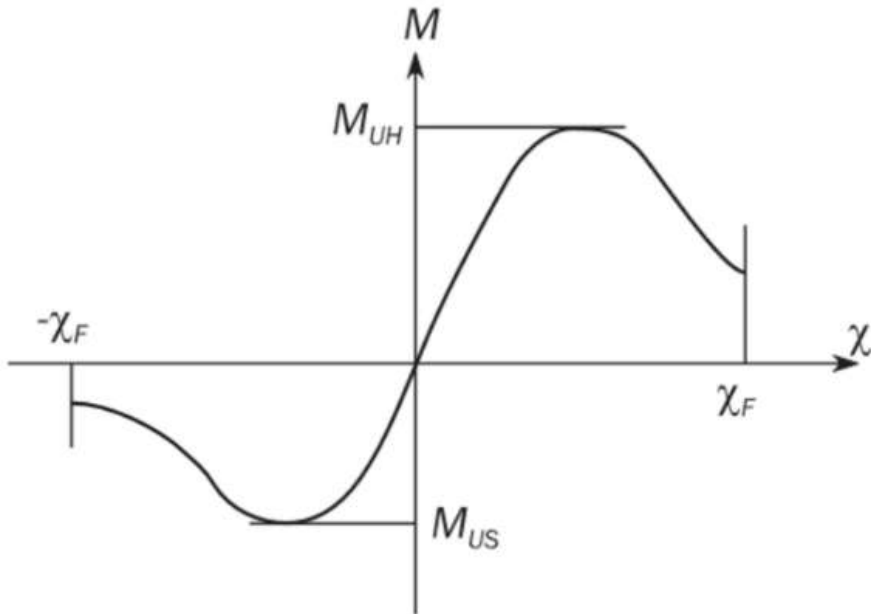
$$M_t \leq \frac{M_u}{\gamma_R} \quad (19)$$

Dimana:

M_t = momen lentur-batas total vertikal (Nmm)

γ_R = faktor keamanan untuk kekuatan-batas lentur vertikal (1,1 untuk kondisi *sagging* dan 1,21 untuk kondisi *hogging*).

Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan

Sumber: DNV GL, 2017b

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 18. 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 Persamaan 20:

$$\sigma = \frac{M \times Z}{I} \quad (20)$$

Dimana :

M = momen lentur (Nmm)

I = momen inersia (m^4)

Z = jarak dari sumbu netral dari penampang balok ke lokasi tegangan lentur pada arah tinggi dari balok (m)

σ = Tegangan Lentur (N/mm^2)

Tegangan lentur maksimum (σ_{max}) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 21 sebagai berikut:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad (21)$$

Dimana :

S = modulus penampang (m^3)

Modulus penampang (S) seperti pada Persamaan 22, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu Persamaan 22 dan Persamaan 23:

$$S_d = \frac{I}{Z_d} \quad , \text{ untuk bagian } \textit{deck} \quad (22)$$

$$S_b = \frac{I}{Z_b} \quad , \text{ untuk bagian } \textit{bottom} \quad (23)$$

Dimana :

S_d = modulus penampang vertikal pada bagian *deck* (m^3)

S_b = modulus penampang vertikal pada bagian *bottom* (m^3)

Z_d = jarak dari sumbu netral dari potongan penampang kapal ke *deck* (m)

Z_b = jarak dari sumbu netral dari potongan penampang kapal ke *bottom* (m)

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 24 dan Persamaan 25 sebagai berikut:

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud} \quad , \text{ untuk } \textit{deck} \quad (24)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub} \quad , \text{ untuk } \textit{bottom} \quad (25)$$

Dimana :

M_{US} = Kekuatan momen baas lentur untuk *sagging* (Nmm)

M_{UH} = Kekuatan momen lentur untuk *hogging* (Nmm)

σ_{ud} =Tegangan tekan batas untuk *deck* (N/mm^2)

σ_{ub} =Tegangan tekan batas untuk *bottom* (N/mm^2)

2.14 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 10.

Berat dan gaya apung diasumsikan sebagai w_x dan b_x , maka distribusi beban dapat dilihat pada persamaan 3.

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal dapat dilihat pada persamaan 4 dan 5.

DNVGL (2017a), memberikan formula besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang (M_{SW}) untuk panjang kapal lebih dari 90 m, pada Persamaan 26 dan Persamaan 27:

$$M_{SW} = -0,05168K_M CL^2 B(C_b + 0,1)kn.m \text{ kondisi sagging} \quad (26)$$

$$M_{SW} = +0,01K_M CL^2 B(11,97 - 1,9C_b)kn.m \text{ kondisi Hogging} \quad (27)$$

Dengan,

K_M = Faktor distribusi seperti pada Gambar 19

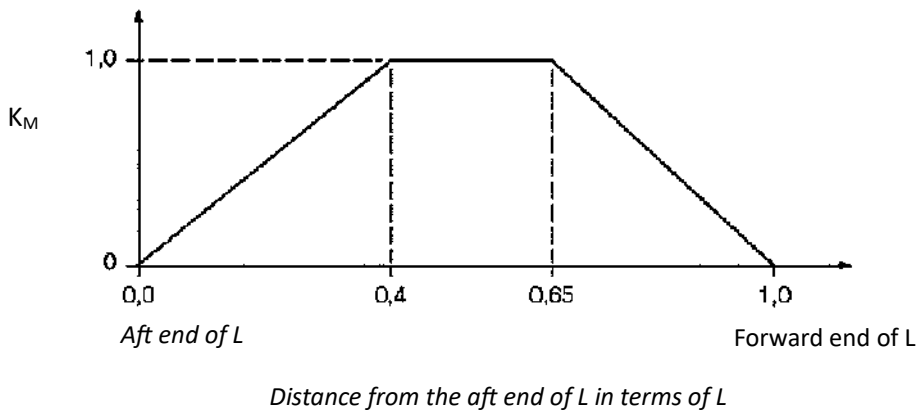
L, B = lebar dan panjang kapal dalam satuan meter

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

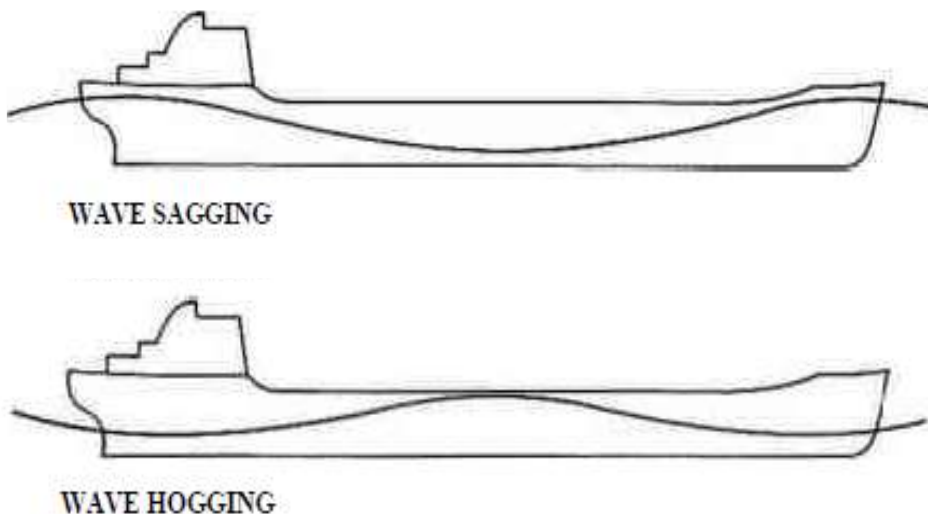
= $10,75 - [(L - 350)/150]^{1,5}$ untuk $350 \leq L \leq 500$ m



Gambar 19 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 20.



Gambar 20 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, pada Persamaan 28 dan 29:

$$M_w = -0,11K_M CL^2 B(C_b + 0,7) kn.m \text{ kondisi sagging} \quad (28)$$

$$M_w = +0,19K_M CL^2 BC_b kn.m \text{ kondisi Hogging} \quad (29)$$

Dimana, C dan K_M seperti pada Persamaan 28 dan 29. Kombinasi beban statis dan dinamis (M_t) untuk menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur-batas vertikal dihitung dengan penjumlahan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang (DNV GL, 2017b).

$$M_t = M_{sw} + M_w \quad (30)$$

2.15 Analisis Data

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam menganalisis data pada penelitian ini adalah:

1. Tahapan Pertama

Kegiatan penelitian dilakukan dengan pengambilan data dari berbagai sumber dalam bentuk jurnal atau artiker-artikel maupun buku-buku yang berhubungan dengan penelitian ini, yang ada dilabo ataupun dari sumber-sumber lainnya.

2. Tahap 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 ketebalan plat, ketebalan *stiffener*, properties material dan jenis *profil stiffner*.
- b. Menghitung tinggi dasar ganda (*double bottom*) menurut aturan BKI dan IACS
- c. Mengidentifikasi beban-beban yang bekerja pada struktur kapal FPSO
- d. Mengidentifikasi gaya-gaya yang bekerja pada kapal FPSO yang menyebabkan kapal FPSO mencapai kekuatan batasnya.

3. Tahapan Ketiga

Kegiatan pada tahap ini ditekankan pada pemodelan dan analisis penampang serta pengolahan data meliputi analisa struktur penampang *single* dan *double bottom* kapal FPSO berupa tegangan dan kekuatan batas yang terjadi pada kapal FPSO akibat beban yang bekerja pada struktur kapal FPSO dengan menggunakan 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 struktur kapal FPSO. Selain itu juga diperoleh perbandingan analisis kekuatan batas tinggi dasar ganda menurut aturan BKI dan IACS.

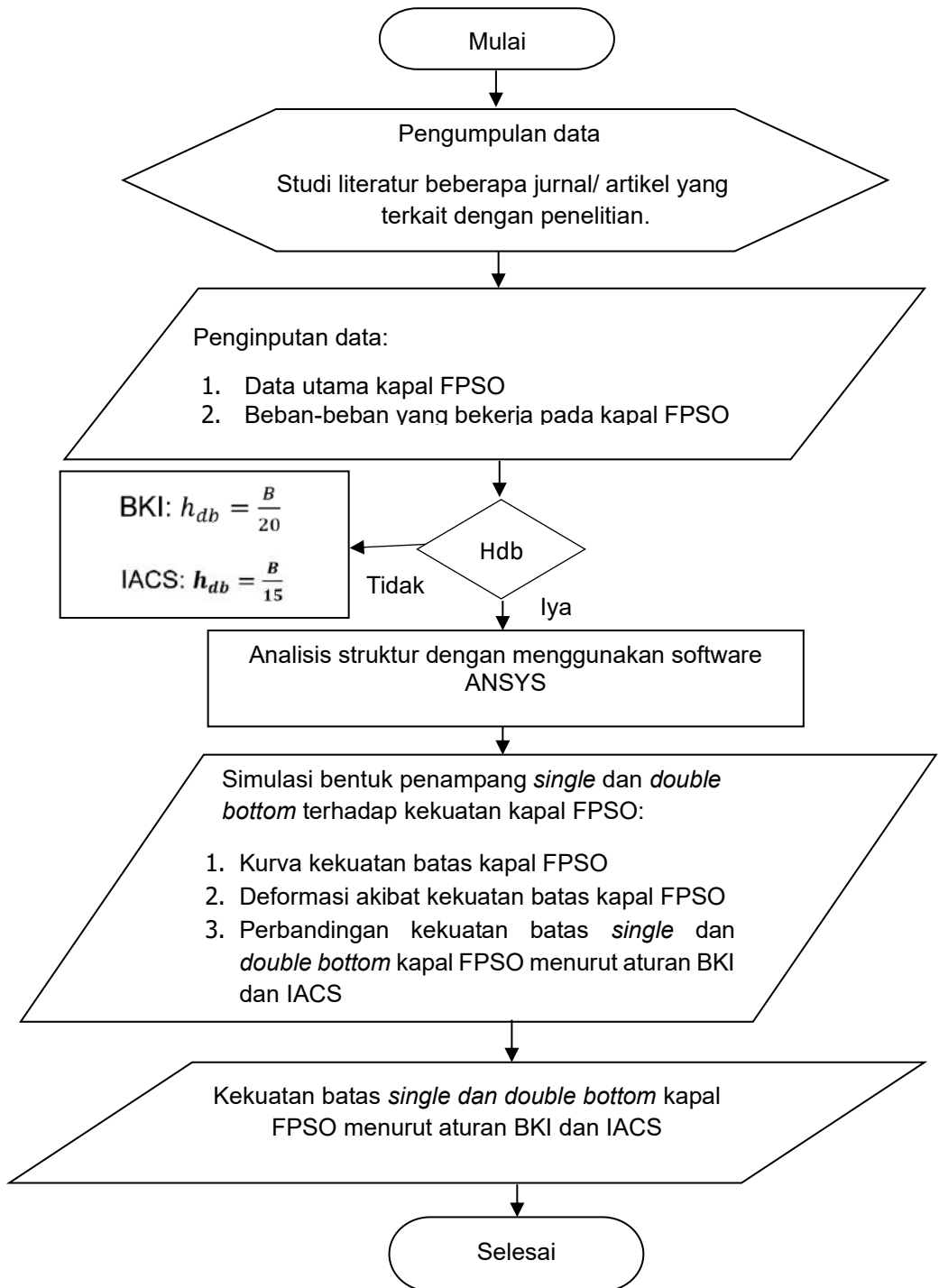
5. Kesimpulan

Kesimpulan mengenai hasil perbandingan analisis pengaruh tinggi dasar ganda pada *single* dan *double bottom* kapal FPSO dengan membandingkannya menurut aturan BKI dan IACS dengan menggunakan metode NLFEA yaitu:

- a. Pengaruh perbedaan tinggi dasar ganda menyebabkan posisi sumbu netral pada kapal. Hal ini disebabkan karena pengaruh tinggi *double bottom* yang berbeda-beda sehingga dipengaruhi oleh posisi sumbu nertal, inersia penampang dan modulus penampang.
- b. Diperoleh nilai tegangan yang terjadi pada bagian *deck* dan *bottom* menurut aturan BKI dan IACS.

2.16 Diagram Alir

Alur penelitian atau diagram alir dalam penelitian simulasi bentuk penampang *single* dan *double bottom* terhadap kekuatan kapal FPSO yaitu:



Gambar 21 Diagram Alir

Sumber: Data Olahan,2024