

# **SKRIPSI**

## **ANALISIS PELAT BERPENEGAR DENGAN MEMPERTIMBANGKAN TEBAL PELAT IKUTAN DALAM PENGARUH BEBAN AKSIAL SATU ARAH PADA KAPAL FPSO**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**RATI AHMAD  
D081 19 1047**



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

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI****ANALISIS PELAT BERPENEGAR DENGAN MEMPERTIMBANGKAN  
TEBAL PELAT IKUTAN DALAM PENGARUH BEBAN AKSIAL SATU  
ARAH PADA KAPAL FPSO**

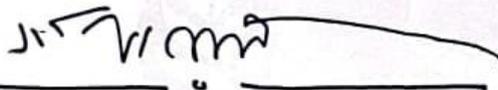
Disusun dan diajukan oleh

**RATI AHMAD  
D081 19 1047**

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 14. Agustus. 2023  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



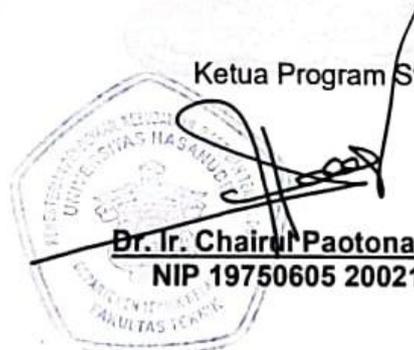
**Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph. D.**  
NIP. 19760606 200501 1003

Pembimbing Pendamping,



**Dr. Eng. Firman Husain, ST, MT.**  
NIP. 19730423 200812 1001

Ketua Program Studi,



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

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Rati Ahmad  
NIM : D081191047  
Program Studi : Teknik Kelautan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul "Analisis Pelat Berpenegar dengan Mempertimbangkan Tebal Pelat Ikutan dalam Pengaruh Beban Aksial Satu Arah pada Kapal FPSO " Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

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

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

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

Gowa, 31 Juli 2023

Yang Menyatakan



## ABSTRAK

**Rati Ahmad.** *Analisis Pelat Berpenegar dengan Mempertimbangkan Pelat Ikutan dalam Pengaruh Beban Aksial Satu Arah pada Kapal FPSO* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Firman Husain**)

*Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) merupakan bangunan pengeboran dan penyimpanan minyak lepas pantai yang bersifat *portable*, dalam artian dapat berpindah-pindah. Konfigurasi material dan kekuatan struktur yang digunakan merupakan aspek yang penting dalam struktur FPSO. Elemen pelat dan pelat yang kaku berfungsi sebagai unit dasar lambung struktur. Struktur pelat lokal pertama-tama mengalami kegagalan lekuk lokal yang dibebani beban eksternal saat lambung kapal mengalami *collapse*. Penelitian ini dimaksudkan untuk menganalisa pelat berpenegar dengan mempertimbangkan tebal pelat ikutan pada kapal FPSO dalam bentuk deformasi dan defleksi pelat berpenegar yang terjadi pada area *bottom* pada kondisi tekan dan tarik. Pada penelitian ini pelat ikutan bervariasi sesuai dengan data FPSO dan aturan BKI. Pelat yang dimodelkan adalah pelat berpenegar pada area *bottom* kapal FPSO yaitu *Stiffener* model T (*Tee-Bar*). Tumpuan sederhana diterapkan pada model dan analisis menggunakan Metode Elemen Hingga Non-Linier (NLFEM). Hasil yang diperoleh dengan metode NLFEM pada kondisi tarik dan tekan, pada pelat berpenegar model 1 defleksi yang terjadi yaitu masing-masing sebesar 1,75 mm dan -1.75 mm. Sedangkan untuk model 2 defleksi yang terjadi yaitu masing-masing sebesar 1.8 mm dan -1.8 mm pada kondisi tarik dan tekan.

Kata Kunci: *FPSO*, Pelat Berpenegar, Defleksi, NLFEM

## ABSTRACT

**Rati Ahmad.** *Stiffened Plate Analysis by Considering Follow-up Plates in the Effect of One-Way Axial Load on FPSO Vessels* (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Firman Husain**)

*Floating Production Storage and Offloading (FPSO) is the portable offshore structure. The material configuration used is the most important aspect in the FPSO structure design criteria. Plates and Stiffened plates experience local buckling due to the external load when the hull girder collapsed. The objective of the present study is to analyze the stiffened plates taking the attached plate thickness into consideration on the FPSO in terms of plate deformation and deflection located of the bottom area under tension and compression stages. In this study the attached plate thickness is varied according to FPSO data and BKI Rule. The stiffened plate elements located at the bottom area are modelled by Tee-Bar element. The simply supported condition is applied to the model and the Non-Linear Finite Element Method (NLFEM) is used for the analysis. The result obtained by NLFEM shows that under tension and compression the stiffened plate of model-1, the deflections are 1.75 mm and -1,75 mm, respectively. While for model-2 the deflections are 1.8 mm and under tension and compressions, verpectively.*

*Keywords: FPSO, Stiffened plate, Deflection, NLFEA*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT .....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....	x
KATA PENGANTAR .....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah .....	2
1.3 Tujuan penelitian.....	2
1.4 Manfaat penelitian.....	2
1.5 Ruang lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 FPSO ( <i>Floating Production Storage and Offloading</i> ).....	4
2.2 Struktur Lambung pada FPSO .....	5
2.3 Struktur <i>Topsides</i> pada FPSO .....	6
2.4 Pelat .....	7
2.5 Penegar/ <i>Stiffener</i> .....	7
2.6 Kolom dan Balok.....	9
2.7 Balok Baja.....	10
2.8 Defenisi Defleksi .....	10
2.9 Tebal Pelat Menurut Aturan BKI.....	13
2.10 Jenis-Jenis Tumpuan.....	13
2.11 Beban Aksial.....	15
2.12 Beban Lengkung Longitudinal (Tarik dan Tekan).....	16
2.13 Tegangan Geser ( <i>Shear Stress</i> ).....	18
2.14 Tegangan Luluh ( <i>Yield Stress</i> ).....	18
2.15 Tegangan Izin Dasar .....	18
2.16 Tekuk Lokal .....	19
2.17 Tegangan .....	20
2.18 Regangan.....	22
2.19 Deformasi Material.....	24
2.20 Elastisitas .....	25
2.21 Metode Elemen Hingga .....	26
2.22 Metode <i>Non-Linear Finite Element Analysis</i> (NLFEA).....	27
2.23 <i>Meshing</i> .....	29
2.24 Tipe Elemen .....	29
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	31
3.1 Jenis Penelitian.....	31
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian .....	31
3.3 Penyajian Data .....	31
3.4 Analisa Data .....	35
3.4 Diagram Alir .....	37
BAB 4 Hasil dan pembahasan .....	38
4.1 Pemodelan Struktur .....	38

5.2 Variasi Model Pelat Berpenegar.....	38
5.3 Hasil <i>Run Analysis</i> Pada ANSYS.....	41
4.3.1. Hasil analisis dan Defleksi .....	41
4.3.2 Hasil Analisa Pelat.....	45
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	47
DAFTAR PUSTAKA.....	48

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> <i>Floating Production Storage and Offloading (FPSO)</i> .....	5
<b>Gambar 2.2</b> Integrasi model <i>Topside</i> .....	6
<b>Gambar 2.3</b> Ilustrasi <i>stiffener</i> pada pelat .....	8
<b>Gambar 2.4</b> (a) Balok sebelum terjadi deformasi, (b) Balok dalam konfigurasi terdeformasi .....	11
<b>Gambar 2.5</b> Tumpuan Sendi .....	14
<b>Gambar 2.6</b> Tumpuan Rol .....	15
<b>Gambar 2.7</b> Tumpuan Jepit .....	15
<b>Gambar 2.8</b> Tegangan Tarik .....	17
<b>Gambar 2.9</b> Tegangan Tekan .....	17
<b>Gambar 2.10</b> Ilustrasi tekuk lokal yang terjadi pada <i>web</i> dan <i>flange</i> .....	20
<b>Gambar 2.11</b> Tegangan-Regangan .....	21
<b>Gambar 2.12</b> Hubungan antara tegangan dan regangan .....	22
<b>Gambar 2.13</b> Pelat Berpenegar Kondisi <i>Meshing</i> .....	29
<b>Gambar 3.1</b> <i>General Arrangement</i> .....	32
<b>Gambar 3.2</b> Penampang Atas Kapal Arah Membujur .....	33
<b>Gambar 3.3</b> Setengah <i>midship</i> Kapal FPSO .....	34
<b>Gambar 3.4</b> Model pelat berpenegar .....	35
<b>Gambar 3.5</b> Diagram Alir Penelitian .....	37
<b>Gambar 4.1</b> Setengah <i>Midship</i> Kapal FPSO .....	38
<b>Gambar 4.2</b> Pemodelan Pelat Berpenegar .....	39
<b>Gambar 4.3</b> Tumpuan pada Model .....	39
<b>Gambar 4.4</b> Pembebanan Kondisi Tekan .....	40
<b>Gambar 4.5</b> Pembebanan Kondisi Tarik .....	41
<b>Gambar 4.6</b> Deformasi Model 1 <i>Tee-Bar</i> pada kondisi tekan .....	41
<b>Gambar 4.7</b> Deformasi model 1 pada kondisi Tarik .....	42
<b>Gambar 4.8</b> Grafik Defleksi model 1 <i>Tee-Bar</i> .....	43
<b>Gambar 4.9</b> Deformasi Model 2 pada Kondisi Tekan .....	43
<b>Gambar 4.10</b> Deformasi Model 2 pada Kondisi Tarik .....	44
<b>Gambar 4.11</b> Grafik Defleksi Model 2 <i>Tee-Bar</i> .....	45
<b>Gambar 4.12</b> Grafik Perbandingan Defleksi Model 1 dan Model 2 .....	46

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Modulus <i>Young</i> pada Material .....	24
<b>Tabel 3.2</b> Dimensi Pelat Berpenegar .....	35
<b>Tabel 4.1</b> Dimensi Pelat Berpenegar .....	40
<b>Tabel 4.2</b> Nilai Defleksi dan Defleksi Izin .....	45

## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
B	Lebar kapal	m
A	Luas Penampang	mm <sup>2</sup>
A	Jarak antar gading	mm
F	Gaya	N
C <sub>b</sub>	Koefisien blok kapal	
E	Modulus elastisitas	N/mm <sup>2</sup>
L	Panjang kapal	m
M	Momen Lentur	Nmm
t <sub>b</sub>	Tebal Pelat Alas	mm
W	Beban	N
ΔL	Pertambahan Panjang	mm
Σ	Tegangan lentur	N/mm <sup>2</sup>
σ <sub>p</sub>	Tegangan lentur ijin	N/mm <sup>2</sup>
σ <sub>max</sub>	Tegangan lentur maksimum	N/mm <sup>2</sup>
σ <sub>te</sub>	Tegangan Tekan	N/mm <sup>2</sup>
σ <sub>ta</sub>	Tegangan Tarik	N/mm <sup>2</sup>

## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakaatuh.*

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya 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. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“ANALISIS PELAT BERPENEGAR DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KETEBALAN PELAT IKUTAN DALAM PENGARUH BEBAN AKSIAL SATU ARAH PADA KAPAL FPSO”

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Ahmad** dan Ibu **Hayati** merupakan dukungan yang selalu menguatkan hati untuk setiap tahapan penelitian dan penulisan skripsi ini, serta keberhasilan penulis sampai tahap skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

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

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama serta selaku penasehat akademis (PA) sekaligus kapala labo OSAREL yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini
2. Bapak **Dr. Eng. Firman Husain, ST., MT.** selaku dosen pembimbing pendamping yang ditengah-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 Departemen Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. **Dosen–Dosen Departemen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.

5. **Staf Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Saudara **Andika Sarifuddin** yang selalu menemani serta memberikan semangat, motivasi, waktu, dukungan dan bantuannya kepada penulis.
7. **Teman-teman Mahasiswa khususnya Teknik Kelautan 2019, Teman-teman Labo OSAREL** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka.
8. Teman-teman tercinta **Puput, Geby, Caca, Deapati, Santa, Andri, Wiwi, Gita, Yayan, Gruusel** yang selalu menemani, memotivasi, memberikan hiburan dan kenangan indah yang tak terlupakan.
9. Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terima kasih yang sebesar-besarnya untuk segala sumbangsih selama proses penyelesaian skripsi ini.

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

*Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.*

Gowa, 5 Agustus 2023



**Rati Ahmad**

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Setiap perancangan dan pembuatan kapal dari suatu galangan kapal, terdapat proses yang mencakup berbagai aspek baik secara teknis, ekonomis dan eksploitasi. Salah satu aspek teknis yang turut mempengaruhi tingkat keamanan kapal adalah kekuatan dari struktur konstruksi kapal tersebut. Konstruksi kapal harus mampu menahan beban-beban yang bekerja pada kapal baik pada kondisi normal maupun ekstrem. Kegagalan struktur mengacu pada hilangnya kapasitas pengangkutan beban pada suatu komponen atau anggota dalam suatu struktur atau struktur itu sendiri. Kegagalan struktur dimulai ketika material ditekan hingga batas kekuatannya, sehingga menyebabkan fraktur atau deformasi yang berlebihan.

FPSO ( *Floating Production Storage and Offloading* ) merupakan bangunan pengeboran dan penyimpanan minyak lepas pantai yang bersifat *portable*, dalam artian dapat berpindah-pindah. Konfigurasi material dan kekuatan struktur yang digunakan merupakan aspek yang penting dalam struktur 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*). Permasalahan yang biasa terjadi pada bangunan lepas pantai yaitu kerusakan yang dapat menyebabkan struktur tersebut gagal.

Elemen pelat dan pelat yang kaku berfungsi sebagai unit dasar lambung struktur. Struktur pelat lokal pertama-tama mengalami kegagalan lekuk lokal yang dibebani beban eksternal saat lambung kapal mengalami *collapse*. Ketika lambung kapal mengalami momen lentur vertikal, struktur dek atau pelat bawah terutama menunjukkan tekuk atau menghasilkan perilaku. Dengan demikian, sangat penting untuk menganalisis daya dukung batas dari struktur pelat yang terkena beban tekan untuk desain struktur kapal yang aman (Lei Ao et al, 2020).

Deformasi pada balok secara sangat mudah dapat dijelaskan berdasarkan defleksi balok dari posisinya sebelum mengalami pembebanan. Defleksi diukur dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah terjadi deformasi. Konfigurasi

yang diasumsikan dengan deformasi permukaan netral dikenal sebagai kurva elastis dari balok.

Dalam menganalisis berbagai macam struktur dalam Ilmu keteknikan, terdapat begitu banyak *software* yang digunakan. Serta memerlukan perhitungan-perhitungan yang baik agar desain yang dibangun dan saat diaplikasikan benar-benar kuat dan berfungsi.

Analisis pelat berpenegar telah banyak dilakukan sebelumnya. Muis Alie dan Suci.,(2022), Analisis kekuatan pelat berpenegar dengan menggunakan metode elemen hingga. Rajmi.,(2021) Optimasi beban terhadap lendutan pada balok. Safitri et al.,(2018) Analisis kekuatan variasi pelat berpenegar pada dasar kapal fpso dengan kapasitas 370.000 BOPD.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka fokus penelitian ini adalah berkaitan dengan pengaruh tebal pelat ikutan terhadap pelat berpenegar. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, kapal yang menjadi objek penelitian adalah kapal FPSO dengan perbandingan hasil analisis *Non Linear Finite Elemen* (NLFEA) menggunakan software ANSYS.

## **1.2 Rumusan masalah**

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

1. Bagaimana pengaruh variasi ketebalan pelat ikutan terhadap beban aksial satu arah pada pelat berpenegar?
2. Bagaimana perbandingan kekuatan bentuk pelat berpenegar terhadap gaya aksial satu arah?

## **1.3 Tujuan penelitian**

Tujuan dari penelitian yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi ketebalan pelat ikutan terhadap beban aksial satu arah pada pelat berpenegar.
2. Mengetahui perbandingan kekuatan bentuk pelat berpenegar terhadap gaya aksial satu arah.

## **1.4 Manfaat penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Pada bidang akademis, penelitian ini bermanfaat untuk menambah wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan khususnya pada bidang maritime.
2. Pada bidang industri, penelitian ini dapat memberikan kontribusi sebagai bahan pertimbangan dalam perancangan kapal.
3. Bagi peneliti, memberikan pengetahuan cara menganalisis pelat berpenegar dengan mempertimbangkan tebal pelat ikutan dalam pengaruh beban aksial satu arah dan sebagai tugas akhir sarjana Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

### **1.5 Ruang lingkup**

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

1. Analisis dilakukan pada pelat berpenegar untuk mengetahui deformasi yang terjadi dalam pengaruh beban aksial satu arah
2. Hanya mempertimbangkan tebal pelat ikutan dalam pengaruh beban aksial satu arah
3. Analisis dilakukan dengan metode elemen hingga

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 FPSO ( *Floating Production Storage and Offloading* )

FPSO ( *Floating Production Storage and Offloading* ) adalah sebuah fasilitas di atas bangunan terapung yang dioperasikan di suatu ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang berfungsi untuk menerima, memproses, menyimpan, dan menyalurkan hidrokarbon yang secara permanen ditambatkan di tempatnya beroperasi dan dapat dipindahkan dari suatu tempat ke tempat lain. FPSO 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 penggunaan konversi kapal tanker menjadi FPSO.

FPSO umumnya berbentuk kapal *floaters* dengan persediaan penyimpanan dan pembongkaran minyak secara bersamaan. FPSO mungkin dirancang untuk penegringan agar mereka selalu menghadapi cuaca, meminimalkan gerakan memutar dan mengangkat. Di lingkungan yang tidak berbahaya seperti Afrika Barat dan Asia Tenggara, FPSO dapat disebarkan tertambat untuk menghadapi satu arah setiap saat. Beberapa FPSO untuk Brasil telah dirancang untuk semi-*weathervane* dengan menggunakan tambatan menyebar dengan tambatan kendur, memberi kapal pilihan beberapa penyedot yang terbatas (Kaster et al, 1997).

FPSO memiliki area yang luas untuk memasang dek di bagian atas lambung kapal. Namun, banyak lambung FPSO adalah konversi sehingga struktur yang terdapat pada dek tidak dirancang untuk keperluan produksi. Hal ini perlu diperiksa dengan seksama sebelum melakukan konversi ke kapal tanker *surplus* untuk konversi.

Ada empat persyaratan utama yang menjadi dasar pengukuran FPSO yaitu:

1. Penyediaan kapasitas menyimpan minyak yang kompatibel dengan pengaturan tingkat produksi dan pembongkaran, yaitu waktu perputaran kapal tanker.
2. Penyediaan tata letak yang aman untuk *topside* dari proses produksi, akomodasi dan utilitas.

3. Penyediaan kapasitas produksi dan *ballast* untuk mengurangi efek gerakan pada proses produksi dan sistem riser.
4. Penyediaan ruang untuk *turret* pada haluan, buritan atau internal dan jumlah kapasitas penyimpanan pada lambung.

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. dibawah ini :



**Gambar 2.1** *Floating Production Storage and Offloading (FPSO)*  
(<http://www.corrosion-doctors.org>, 2010)

## 2.2 Struktur Lambung pada FPSO

Terdapat perbedaan mencolok dalam pengaturan lambung kapal pada FPSO yang baru dibangun dan kapal tanker yang dikonversi. Konfigurasi keseluruhan untuk kapal tanker didorong oleh kebutuhan untuk mengangkut volume kargo besar dengan biaya rendah. Tanker telah berevolusi hingga mencapai rasio luas sekitar 6,1 yang memberikan ketahanan terhadap gerak maju.

FPSO tidak diharuskan untuk bergerak maju, akibatnya resistensi tidak menjadi masalah. Namun, dalam mode *weathervaning*, rasio kelangsingan lambung (rasio panjang terhadap balok) berfungsi untuk menyajikan daerah beban

lingkungan yang ada dan membantu gerakan alami pada pembebanan. Rasio kelangsingan yang rendah menghasilkan gerakan yang lebih baik dan perilaku tambat di atas lambung yang lebih pendek dan lebih besar. Lambung yang lebih pendek akan menghemat penghematan baja dan pengurangan biaya yang mungkin terjadi. Rentang perbandingan perbandingan luas lempeng ke lambung adalah prospek yang berbeda karena FPSO, tidak seperti kapal tanker, tidak dibatasi oleh draft maksimum, sehingga rasio 2:1 dapat dioptimalkan. Hal ini membantu desain struktur dan *seakeeping* dengan meningkatkan *freeboard*.

### 2.3 Struktur *Topsides* pada FPSO

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

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

Beban *topsides* yang ditransmisikan ke lambung juga tergantung dari lambung yang akan mengalami gerak dan akselerasi. Hasil ini berasal dari analisis hidrodinamika.



**Gambar 2.2** Integrasi model *Topside*

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 tempat kru dan *deck house* diposisikan di buritan kapal. Selain itu, area helipad terletak di belakang tempat tersebut. Terdapat dua derek 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. Ini menjamin tempat utama ditempatkan sejauh mungkin dari produksi gas beracun dipancarkan dari menara *flare*.

## 2.4 Pelat

Pelat adalah elemen horisontal utama yang menyalurkan beban hidup maupun beban mati ke kerangka pendukung vertikal dari suatu sistem struktur.

Segi statika, kondisi tepi (*boundary condition*) pelat dibagi menjadi tumpuan bebas (*free*), bertumpu sederhana (*simply supported*), dan jepit. Pelat menerima beban yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan pelat. Berdasarkan kemampuannya untuk menyalurkan gaya akibat beban, pelat lantai dibedakan menjadi pelat satu arah dan dua arah. Pelat satu arah adalah pelat yang ditumpu hanya pada kedua sisi yang berlawanan, sedangkan pelat dua arah adalah pelat yang ditumpu keempat sisinya sehingga terdapat aksi dari pelat dua arah.

Kulit kapal merupakan permukaan kapal yang terbuat dari pelat-pelat baja, kayu atau aluminium yang disambung menjadi lajur yang terdapat pada badan kapal biasa disebut dengan kulit kapal atau disebut juga *ship shell*. Kegunaan kulit kapal :

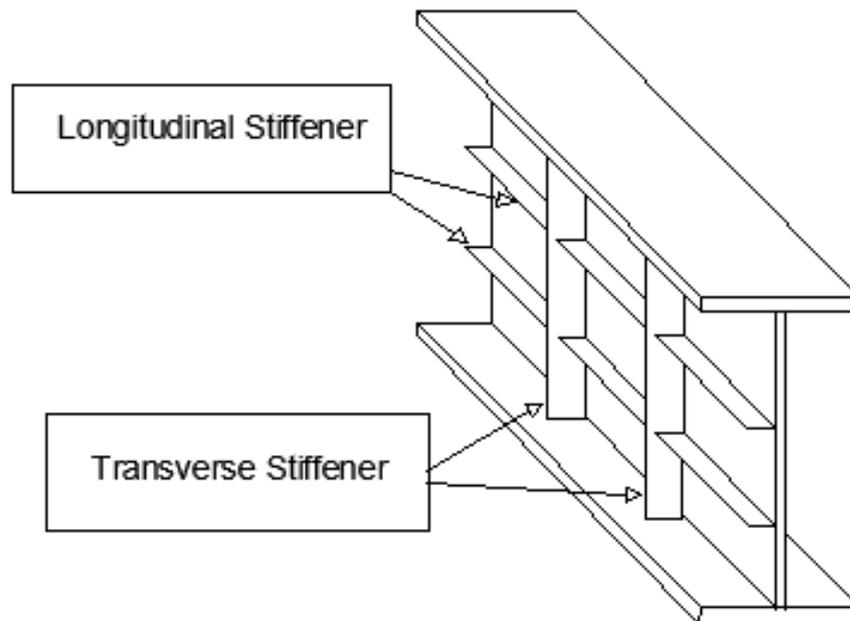
1. Untuk memberikan kekuatan struktur membujur kapal.
2. Menerima beban dari kapal dan muatannya.
3. Merupakan penutup kedap air dari dasar hingga bagian atas kapal.
4. Lajur kulit kapal diberi nama dengan abjad a,b,c,d dan seterusnya mulai dengan lajur dasar.
5. Sambungan pelat diberi nama dengan angka 1,2,3 dan seterusnya dari depen ke belakang.

Bahan modern yang kerap digunakan dalam pembuatan kapal kecil yang banyak ditemukan dalam pelayaran pedalaman adalah serat kaca atau yang dikenal sebagai *fiber-glass*, yang proses pembuatannya tidak sulit, tetapi dibutuhkan cetakan kulit lambung kapal.

## 2.5 Penegar/*Stiffener*

*Stiffener* adalah bantalan pengaku (pelat) yang digunakan pada titik tumpuan suatu balok ketika balok tidak memiliki kemampuan pada badan profil untuk mendukung reaksi akhir atau beban terpusat. Suatu pelat berpenegar memiliki kekakuan yang disebabkan oleh penegar.

*Stiffener* pada pelat terdiri dari dua bagian yaitu *longitudinal stiffener* dan *transverse stiffener* seperti yang terlihat pada Gambar 2.3. Batas untuk kondisi ini antara lain leleh lokal pada *web* (*web local yielding*), *web crippling* dan tekuk lokal *web*. Tekuk lokal *web* dapat terjadi bila balok diberi gaya tekan terpusat dan pergerakan lateral antara *flange* tekan dan *flange* tarik yang terbebani, tetap sejajar saat terjadi tekuk pada *web* (Aghayere and Vigil, 2009).



**Gambar 2.3** Ilustrasi *stiffener* pada pelat  
(<https://berlianarswendokonstruksikapal1>, 2016)

*Stiffener* dibuat untuk membantu badan balok menciptakan garis-garis nodal selama tekuk pelat badan dan untuk menerima gaya-gaya tekan yang ditransmisikan dari badan balok. Pada *flens* tekan, pengelasan pengaku memberikan stabilitas kepada pengaku dan menjaganya agar tetap tegak lurus terhadap badan balok (Salmon & Johnson, 1986). Dua macam parameter stabilitas balok pelat berdingding penuh adalah rasio  $h/t_w$  serta  $a/h$ . Jika kedua parameter ini diambil serendah mungkin maka tekuk yang diakibatkan oleh geser dapat dihindari. Jika pengaku vertikal yang dipasang setiap jarak  $a$  sedemikian rupa sehingga nilai  $a/h$  cukup kecil maka akan timbul aksi medan tarik yang dapat meningkatkan kuat geser nominal dari balok pelat berdingding penuh. Dimensi

pengaku vertikal harus direncanakan sedemikian hingga mampu menahan gaya tekan yang timbul akibat aksi medan tarik (Salmon & Johnson, 1986).

Ada dua tipe dasar struktur yang digunakan dalam desain dan konstruksi penumpuh lambung kapal:

1. Panel *Stiffener*: merupakan elemen struktur utama yang digunakan dalam pembangunan kapal penumpuh lambung dan rakitan struktur internal dan umumnya mengalami lateral dan dalam panel.
2. Gading: kerangka melintang geladak balok, frame samping dan lantai bawah atau membujur terdiri dari gelagar geladak, sekat vertikal kaku dan bawah gelagar memanjang.

Suatu pelat berpenegar memiliki kekakuan yang disebabkan oleh penegar. Penegar pada pelat berfungsi sebagai penguat sehingga momen inersia struktur yang berpenegar akan menjadi lebih besar. Hal ini akan mempengaruhi besar lenturan dan konsentrasi tegangan pada pelat sisi. Selain itu, dimensi penegar yang digunakan adalah salah satunya fungsi dari jarak penegar. Variasi jarak penegar akan mengakibatkan perbedaan ukuran dimensi penegar yang digunakan pada tiap-tiap jarak gading (Putranto & Imron, 2012).

## 2.6 Kolom dan Balok

Balok merupakan bagian struktural sebuah bangunan yang kaku dan dirancang untuk menanggung dan mentransfer beban menuju elemen-elemen kolom penopang. Selain itu ring balok juga berfungsi sebagai pengikat kolom-kolom agar apabila terjadi pergerakan kolom-kolom tersebut tetap dapat mempertahankan bentuk dan posisinya seperti semula. *Ring* balok terbuat dari bahan yang sama dengan kolomnya sehingga hubungan *ring* balok dengan kolom yang bersifat kaku tidak dapat berubah bentuk. Pola gaya yang tidak seragam dapat mengakibatkan balok melengkung atau defleksi yang harus di tahan oleh kekuatan internal material.

Balok terbagi dari beberapa macam, antara lain:

1. Balok kayu  
Balok kayu merupakan balok yang menopang papan atau dek structural. Balok dapat ditopang oleh balok induk, tiang, atau dinding penopang beban.
2. Balok baja

Balok baja menopang dek baja atau papan beton pracetak. Balok dapat ditopang oleh balok induk (*girder*), kolom, atau dinding penopang beban.

### 3. Balok beton

Pelat beton yang di cor di tempat dikategorikan menurut bentangan dan bentuk cetakannya.

## 2.7 Balok Baja

Balok induk, balok, kolom baja struktural digunakan untuk membangun rangka bermacam-macam struktur mencakup bangunan satu lantai sampai gedung pencakar langit. Karena baja struktural sulit dikerjakan lokasi (*on-site*) maka biasanya dipotong, dibentuk, dan dilubangi dalam pabrik sesuai spesifikasi desain. Hasilnya berupa konstruksi rangka struktural yang relatif cepat dan akurat. Baja struktural dapat dibiarkan terekspos pada konstruksi tahan api yang tidak terlindungi, tapi karena baja dapat kehilangan kekuatan secara drastik karena api, pelapis anti api dibutuhkan untuk memenuhi kualifikasi sebagai konstruksi tahan api. Balok baja berbentuk *wide flange* (*W*) yang lebih efisien secara struktural telah menggantikan bentuk klasik *I-beam* (*S*). Balok juga dapat berbentuk *channel* (*C*), *tube structural* (Agus Setiawan, 2008).

## 2.8 Defenisi Defleksi

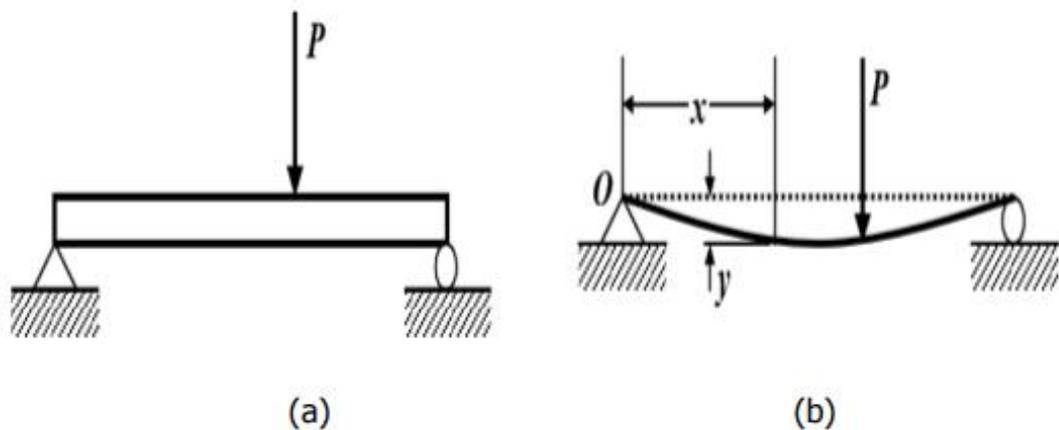
Sebuah balok lurus mula-mula akan mengalami defleksi ketika dibebani dan porosnya menekuk dalam suatu kurva yang dikenal sebagai kurva elastis atau kurva defleksi. Saat merancang balok, perancang tidak hanya memperhatikan tegangan yang dihasilkan, oleh beban yang bekerja pada balok tetapi juga defleksi balok akibat pembebanan. Defleksi suatu titik pada balok adalah jarak antar posisi sebelum dan setelah pembebanan. Kemiringan pada bagian manapun pada balok yang dibelokkan didefinisikan sebagai sudut dalam radian yang bersinggungan pada bagian tersebut dengan sumbu asli balok. Deformasi pada balok secara sangat mudah dapat dijelaskan berdasarkan defleksi balok dari posisinya sebelum mengalami pembebanan. Dari pertimbangan estetika dan lainnya, defleksi balok dibawah beban yang dikenakan dibatasi pada rasio bentang tertentu. Perbandingan defleksi maksimum balok terhadap bentangnya disebut kekakuan balok (Singh, 1979).

Untuk teori batas lendutan yang diizinkan:

$$\delta_{izin} \leq \frac{L}{240} \text{ untuk } deck \quad (2.1)$$

$$\delta_{izin} \leq \frac{L}{360} \text{ untuk } bottom \quad (2.2)$$

Deformasi pada balok secara sangat mudah dapat dijelaskan berdasarkan defleksi balok dari posisinya sebelum mengalami pembebanan. Defleksi diukur dari permukaan netral setelah terjadi deformasi. Konfigurasi yang diasumsikan dengan deformasi permukaan netral dikenal sebagai kurva elastis dari balok. Gambar 2.4 (a) memperlihatkan balok pada posisi awal sebelum terjadi deformasi dan Gambar 2.4 (b) adalah balok dalam konfigurasi terdeformasi yang diasumsikan akibat aksi pembebanan



**Gambar 2.4** (a) Balok sebelum terjadi deformasi, (b) Balok dalam konfigurasi terdeformasi

Jarak perpindahan  $y$  didefinisikan sebagai defleksi balok. Dalam penerapan, kadang kita harus menentukan defleksi pada setiap nilai  $x$  disepanjang balok. Hubungan ini dapat ditulis dalam bentuk persamaan yang sering disebut persamaan defleksi kurva (atau kurva elastis) dari balok. Dimana disyaratkan batas izin deformasi maksimum yaitu  $\frac{L}{360}$ .

Sistem struktur yang diletakkan horizontal dan yang terutama di peruntukkan memikul beban lateral, yaitu beban yang bekerja tegak lurus sumbu aksial batang (Hariandja, 1996). Beban semacam ini khususnya muncul sebagai beban gravitasi, seperti misalnya bobot sendiri, beban hidup vertikal, beban keran (*crane*) dan lain-lain. Contoh sistem balok dapat di kemukakan antara lain, balok lantai gedung, gelagar jembatan, balok penyangga keran, dan sebagainya. Sumbu sebuah batang akan terdeteksi dari kedudukannya semula bila benda dibawah

pengaruh gaya terpakai. Dengan kata lain suatu batang akan mengalami pembebanan *transversal* baik itu beban terpusat maupun terbagi merata akan mengalami defleksi. Kekuatan mengenai karakteristik deformasi dari bangunan struktur adalah paling penting untuk mempelajari getaran mesin seperti juga bangunan-bangunan stasioner dan penerbangan. Dalam menjalankan fungsinya, balok meneruskan pengaruh beban gravitasi keperletakan terutama dengan mengandalakan aksi lentur, yang berkaitan dengan gaya berupa momen lentur dan geser. Kalaupun timbul aksi normal, itu terutama di timbulkan oleh beban luar yang relatif kecil, misalnya akibat gaya gesek rem kendaraan pada gelagar jembatan, atau misalnya akibat perletakan yang di buat miring.

Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi yaitu :

1. Kekakuan batang

Merupakan kemampuan suatu benda menerima beban tanpa menyebabkan perubahan bentuk atau defleksi. Semakin kaku suatu batang maka lendutan batang yang akan terjadi pada batang akan semakin kecil

2. Besarnya kecil gaya yang diberikan

Besar-kecilnya gaya yang diberikan pada batang berbanding lurus dengan besarnya defleksi yang terjadi. Dengan kata lain semakin besar beban yang dialami batang maka defleksi yang terjadi pun semakin besar.

3. Jenis tumpuan yang diberikan

Jumlah reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Jika karena itu besarnya defleksi pada penggunaan tumpuan yang berbeda-beda tidaklah sama. Semakin banyak reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban maka defleksi yang terjadi pada tumpuan rol lebih besar dari tumpuan pin (pasak) dan defleksi yang terjadi pada tumpuan pin lebih besar dari tumpuan jepit.

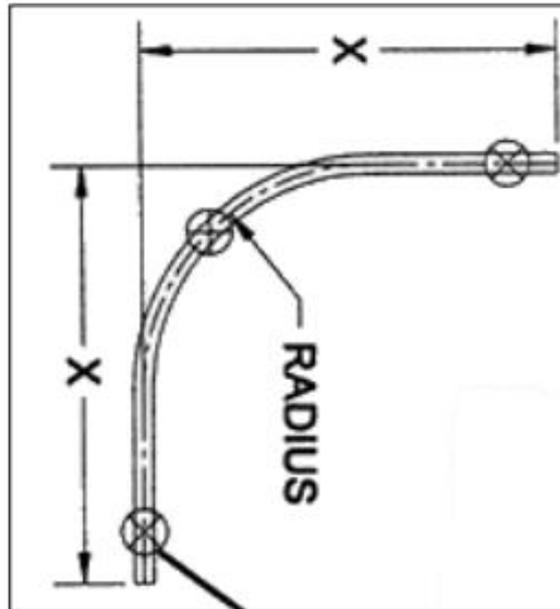
4. Jenis beban yang terjadi pada batang

Beban terdistribusi merata dengan beban titik, keduanya memiliki kurva defleksi yang berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata slope yang terjadi pada bagian batang yang paling dekat lebih besar dari slope titik. Ini karena sepanjang batang mengalami beban sedangkan pada beban titik hanya terjadi pada beban titik tertentu saja (Hariandja, 1996).

5. Bentuk batang

Bentuk batang yang memiliki radius dengan bentuk batang yang tidak memiliki radius cenderung sulit untuk terdefleksi dari pada bentuk batang yang

tidak memiliki radius. Hal ini dikarenakan radius pada bentuk batang berguna untuk mendistribusikan beban, sedangkan untuk batang yang tidak memiliki radius bebannya terpusat. Ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut.



**Gambar 2.5** Bentuk batang yang beradius

## 2.9 Tebal Pelat Menurut Aturan BKI

Pelat kapal adalah pelat yang umumnya diperuntukkan untuk bahan pembuatan konstruksi kapal atau *body* kapal. Pelat kapal merupakan material baja yang dicirikan juga dari segi ukuran yang mana mempunyai ukuran khusus dan lebih Panjang serta lebih lebar. Selain itu pelat kapal juga bisa digunakan untuk bahan pembuatan komponen dan alat industri dan lainnya.

Pelat alas adalah pelat dasar yang terletak antara pelat lunas dengan pelat bilga yang tebalnya menurut BKI Vol II, 2023 untuk kapal dengan panjang  $L \geq 90$  m yaitu tebal pelat alas tidak boleh kurang dari:

$$t_B = 1,21 \cdot a \cdot \sqrt{P_B \cdot k} + t_k \quad [\text{mm}] \quad (2.3)$$

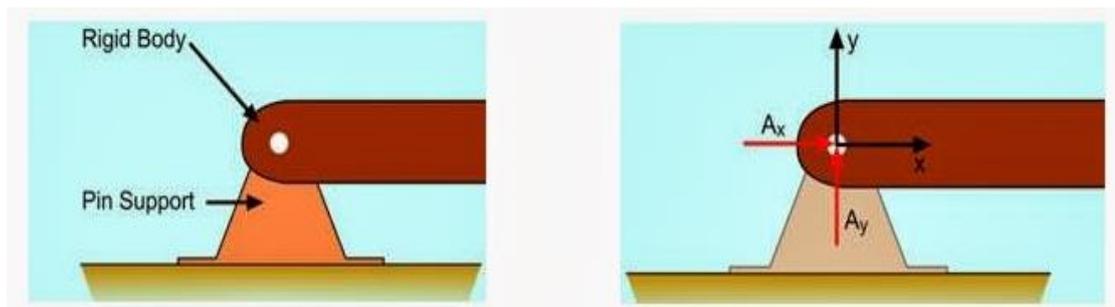
## 2.10 Jenis-Jenis Tumpuan

Dalam sebuah perhitungan struktur kita mengenal istilah tumpuan. Tumpuan adalah tempat bersandarnya konstruksi dan tempat bekerjanya reaksi. Jenis tumpuan yang digunakan berpengaruh terhadap jenis konstruksi. Dalam merencanakan pelat perlu dipertimbangkan tidak hanya pembebanan saja, tetapi juga jenis perletakan dan jenis penghubung di tempat tumpuan. Kekakuan

hubungan antara pelat dan tumpuan akan menentukan besar momen lentur yang terjadi pada pelat. Untuk merencanakan pelat beton bertulang, disamping harus memperhatikan beban dan ukuran pelat juga perlu diperhatikan jenis tumpuan tepi. Jenis tumpuan yang sering digunakan dalam bangunan adalah tumpuan sendi, rol, dan jepit (Setiawan, 2015).

### 1. Tumpuan Sendi

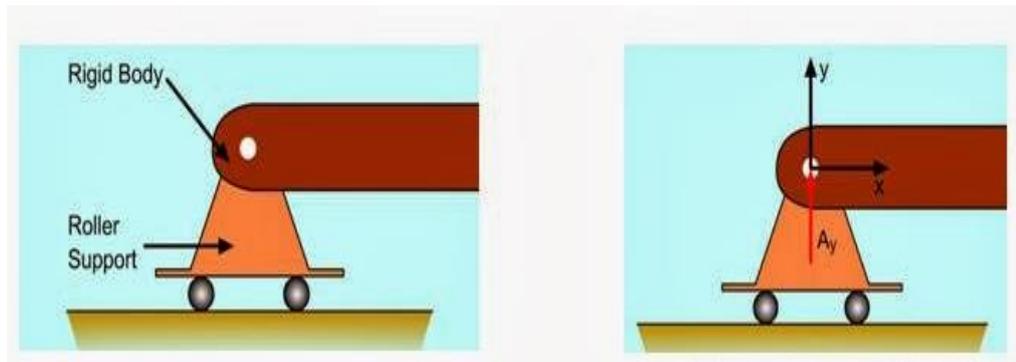
Jenis tumpuan ini hanya dapat berotasi, namun tak dapat bertranslasi dalam arah vertikal maupun horizontal. Sendi (*engsel*) merupakan tumpuan yang dapat menerima gaya reaksi vertikal dan gaya reaksi horizontal. Atau dalam bahasa sederhananya, tumpuan sendi dapat melakukan perlawanan gaya secara vertikal dan horizontal ( $R_v$  dan  $R_h$ ) namun tidak dapat melakukan perlawanan momen yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 dibawah ini.



**Gambar 2.6** Tumpuan Sendi  
(<https://sipil017.blogspot.com>, 2018)

### 2. Tumpuan Rol

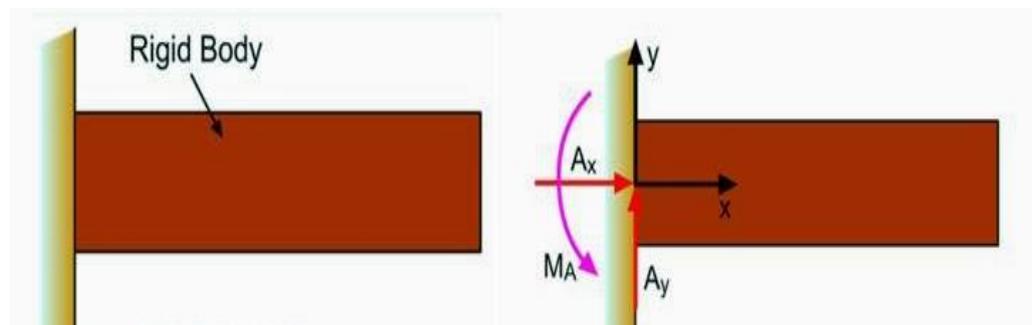
Jenis tumpuan ini bebas berotasi dan bertranslasi sepanjang permukaan rol ini berada. tumpuan rol hanya mampu menyalurkan gaya vertikal yang memiliki arah tegak lurus terhadap bidang permukaan. Atau dalam bahasa sederhananya, Rol hanya mampu melakukan perlawanan gaya vertikal ( $R_v$ ), dan tidak melakukan perlawanan gaya horizontal dan momen. Tumpuan sendi tidak dapat menahan momen atau meneruskan momen. Gaya Reaksi sendi ini dapat diproyeksikan pada arah vertikal dan horizontal. Dengan demikian tumpuan sendi hanya mempunyai dua gaya reaksi yaitu reaksi vertikal  $R_v$  dan reaksi horisontal  $R_h$  yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 dibawah ini.



**Gambar 2.7** Tumpuan Rol  
(<https://sipil017.blogspot.com>, 2018)

### 3. Tumpuan Jepit

Tumpuan jenis ini dapat menahan gaya dalam arah vertikal ( $R_v$ ), horizontal ( $R_h$ ), serta momen ( $M_x$ ). Jenis tumpuan jepit tidak mengalami rotasi dan translasi, sehingga sering disebut tumpuan kaku (*rigid*). Tumpuan Jepit ini membuat balok dalam keadaan kaku, justru karenanya dapat meneruskan gaya tarik dan tekan dengan sembarang arah disamping itu juga dapat meneruskan momen. Dengan demikian tumpuan jepit ini dapat menahan Gaya Vertikal, Gaya Horizontal dan Momen yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 dibawah ini.



**Gambar 2.8** Tumpuan Jepit

(<https://sipil017.blogspot.com>, 2018)

#### 2.11 Beban Aksial

Apabila sepasang gaya tekan aksial mendorong suatu batang, akibatnya batang ini cenderung untuk mempendek atau menekan batang tersebut. menghasilkan tegangan pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbunya.

Momen lentur suatu komponen struktur harus mampu memikul beban aksial (tarik/tekan) serta momen lentur. Apabila besarnya gaya aksial yang bekerja cukup kecil dibandingkan momen lentur yang bekerja, maka efek dari gaya aksial tersebut dapat diabaikan dan komponen struktur tersebut dapat didesain sebagai komponen balok lentur. Namun apabila komponen struktur memikul beban aksial dan momen lentur yang tidak dapat diabaikan salah satunya, maka komponen struktur tersebut dinamakan balok-kolom (*beam-column*). Apabila sebuah balok dibebani oleh beberapa buah gaya atau kopel maka akan tercipta sejumlah tegangan dan regangan internal.

## 2.12 Beban Lengkung Longitudinal (Tarik dan Tekan)

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 ( $\sigma_{ta}$ ) terjadi akibat bekerjanya gaya tarik ( $F_{ta}$ ) pada satuan luas penampang ( $A$ ) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio/perbandingan antara perpanjangan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tarik  $\varepsilon_{ta}$  secara matematik dapat ditulis:

Rumus :

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

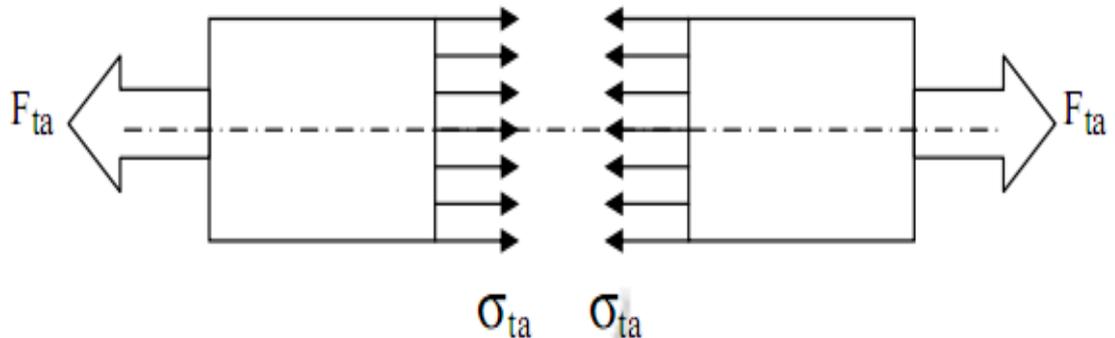
Dengan

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

F = gaya tarik (N)

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

Gaya tarik aksial yang menghasilkan tegangan tarik dapat dilihat pada Gambar 2.9 dibawah ini:



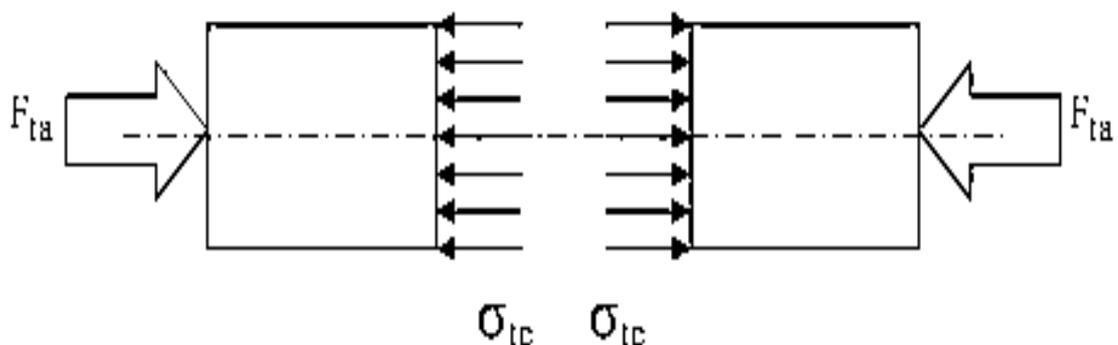
Tegangan tekan (*Compressive Stress*) Jika batang gaya dikenakan pada

**Gambar 2.9** Tegangan Tarik

ujung-ujung batang dalam arah menuju ke batang, sehingga batang dalam kondisi tertekan, maka terjadi tegangan tekan, batang, Tegangan tekan ( $\sigma_{te}$ ) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan ( $F_{ta}$ ) pada satuan luas penampang ( $A$ ) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan yang terlihat pada Gambar 2.10. Rasio/perbandingan antara perpendekan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tekan  $\varepsilon_{ta}$  secara matematik dapat ditulis :

Selanjutnya dapat dinyatakan dengan rumus:

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



**Gambar 2.10** Tegangan Tekan

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

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

Tegangan geser ( $\tau$ ) timbul akibat kerja dari dua gaya geser ( $S$ ) 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 ( $\tau$ ). Tegangan geser ( $\tau$ ), yaitu tegangan yang timbul akibat gaya geser atau gaya lintang. Ciri dari gaya geser atau gaya lintang adalah melintang batang atau tegak lurus batang.

Rumus :

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

Dimana :

$\tau$  = tegangan geser ( $\text{N/mm}^2$ )

$F$  = gaya geser atau gaya lintang (N)

$A$  = Luas penampang ( $\text{mm}^2$ )

### 2.14 Tegangan Luluh (*Yield 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.

### 2.15 Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut bersumber pada AISC dan API. Untuk jenis struktur dan jenis pembebanan yang tidak dibahas dalam spesifikasi ini,

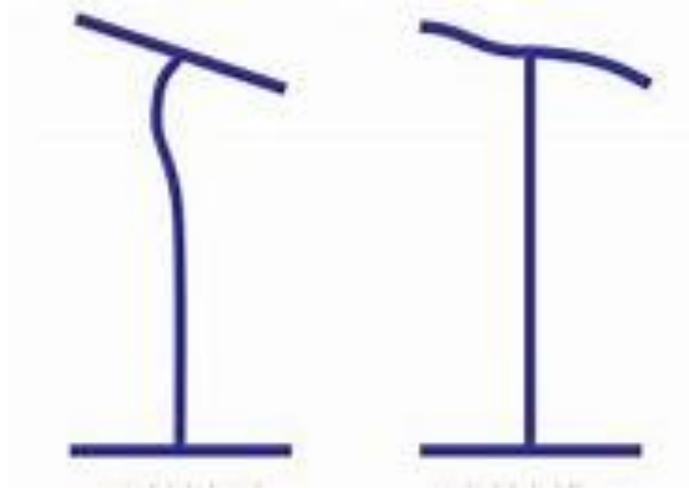
maka harus dilakukan analisa rasional dengan faktor keamanan yang digunakan pada spesifikasi ini. Apabila tegangan yang terjadi diakibatkan oleh gaya lateral dan gaya vertikal akibat kondisi lingkungan, maka tegangan izin dasar di atas dapat dinaikkan dengan sepertiganya. Ukuran struktur yang dihitung dengan kriteria tegangan izin tambah ini harus tidak boleh lebih kecil dari yang dihitung dengan tegangan izin dasar (tanpa kenaikan sepertiganya) apabila beban yang bekerja adalah gabungan bobot mati dan hidup.

## 2.16 Tekuk Lokal

Salah satu kegagalan struktur baja adalah kegagalan tekuk (*buckling*). Pada umumnya, tekuk diakibatkan oleh gaya aksial, atau gaya yang bekerja pada sumbu utama penampang struktur. Tekuk pada profil baja terbagi menjadi 2 jenis, yaitu tekuk global dan tekuk lokal. Tekuk merupakan suatu proses dimana suatu struktur tidak mampu mempertahankan bentuk aslinya, sehingga terjadilah perubahan bentuk dalam rangka menemukan keseimbangan baru.

Tekuk merupakan fenomena instabilitas yang terjadi pada batang langsing, pelat dan cangkang yang tipis. Konsekuensi tekuk pada dasarnya adalah masalah geometrik dasar, dimana terjadi lendutan besar akan mengubah bentuk struktur. Pada fenomena tekuk, struktur secara keseluruhan belum tentu gagal. Struktur dapat saja kembali seperti semula. Hal ini dikarenakan proses terjadinya *buckling* adalah pada daerah elastis. Sehingga ketika beban tekan yang terjadi dihilangkan, struktur akan kembali seperti semula (Triono, 2007).

Tekuk yang terjadi pada elemen-elemen pelat profil. Untuk IWF, elemen-elemennya ada tiga: sayap atas (*top flange*), sayap bawah (*bottom flange*), dan pelat badan (*web*) seperti yang terlihat pada Gambar 2.11. Pada saat menerima momen lentur positif, seluruh *top flange* akan mengalami tegangan tekan, seluruh *bottom flange* akan mengalami tegangan tarik, sementara sebagian pelat badan akan mengalami tekan dan sebagian lainnya tarik.



**Gambar 2.11** Ilustrasi tekuk lokal yang terjadi pada *web* dan *flange*

Bentuk profil baja yang cenderung langsing/tipis lebih mudah untuk mengalami kegagalan tekuk. Local Buckling biasanya terjadi pada: balok tinggi (balok girder, biasanya pada jembatan), balok yang tidak diberi *stiffener plate*, balok yang mengalami beban terpusat yang sangat besar, contohnya balok crane, balok transfer, dll. Untuk mencegah tekuk lokal pada daerah tekan ini akibat gaya lateral, harus memasang sebuah pengaku vertikal (*stiffener*). *Stiffener* dipasang di sepanjang *web* untuk mencegah tekuk lokal pada *web* akibat gaya geser dan mencegah tekuk lokal pada *flange* (pelat sayap).

## 2.17 Tegangan

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 didefinisikan sebagai tahapan terhadap gaya-gaya luar. Ini diukur dalam bentuk gaya per satuan luas. Dalam praktek tegangan sering diberikan dua pengertian: (1) gaya per satuan luas, (2) tegangan total gaya adalah gaya total pada suatu bidang (Zainuri, 2008).

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

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 2.7:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

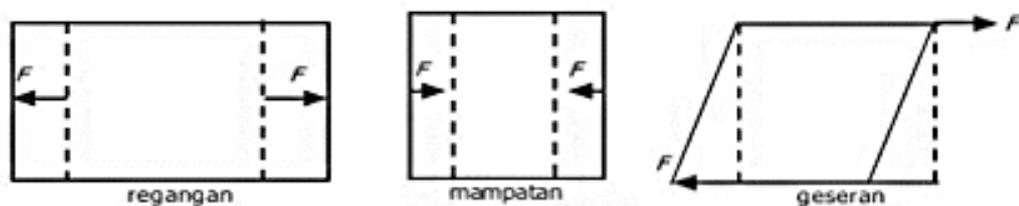
Dimana :

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

F = gaya (N)

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

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm<sup>2</sup>. Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12 berikut.



**Gambar 2.12** Tegangan-Regangan

(<http://fisikazone.com>, 2012)

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 ini dituliskan dengan bentuk sebagai berikut :

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right]} \quad (2.8)$$

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

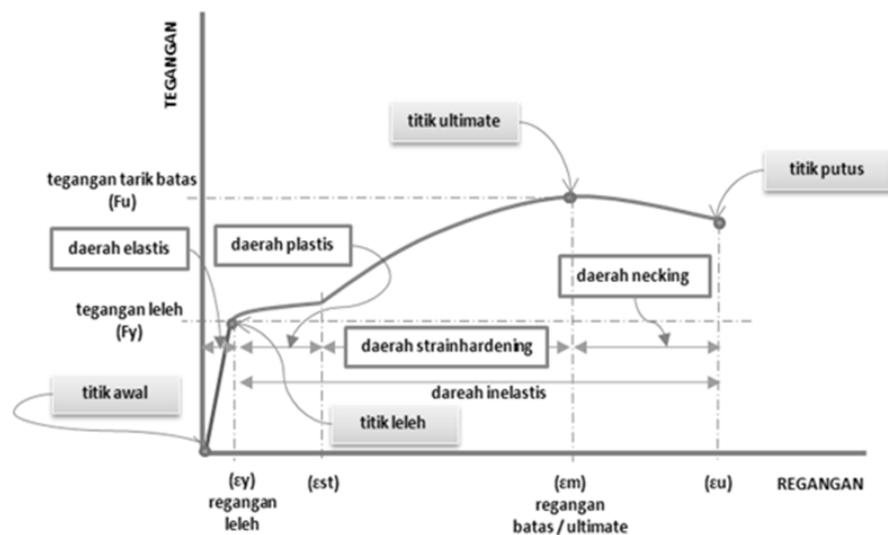
## 2.18 Regangan

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 2.9

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.9)$$

Dimana :

- $\varepsilon$  = Regangan
- $\Delta L$  = Pertambahan panjang (m)
- $L$  = Panjang mula-mula (m)



**Gambar 2.13** Hubungan antara tegangan dan regangan

(<https://docplayer.info>, 2016)

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.13, batas elastis (*elastic limit*) bahan tercapai. Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan,

sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Yaitu bahan secara tiba-tiba mulur yang disebut titik mulur (*yield point*), tetapi bahan segera memperlihatkan lagi kemampuan menahan kenaikan tegangan, tetapi pemanjangan sekarang naik dengan laju yang lebih cepat dari tegangan sampai mencapai titik  $F_u$  yaitu tegangan maksimum batas kekuatan bahan. Tegangan ini disebut tegangan batas (*ultimate stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. 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 2.10 dan 2.11:

$$E = \frac{F L}{A \Delta L} \quad (2.10)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.11)$$

Dimana :

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

F = gaya (N)

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

L = panjang mula-mula (mm)

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

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/mm<sup>2</sup>.

**Tabel 2.1** *Modulus Young* pada Material

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

### 2.19 Deformasi Material

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

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

material maka dapat menyebabkan deformasi permanen dari material (kegagalan struktur). Adapun deformasi yang timbul pada material dapat dihitung dengan Persamaan 2.12 berikut:

$$\delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.12)$$

Dimana:

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

$\varepsilon$  = Regangan yang timbul pada material

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

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

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

l = Panjang material (mm)

$\delta l$  = Deformasi material (mm)

## 2.20 Elastisitas

Elastisitas adalah sifat benda yang setelah diberi gaya dan kemudian gaya dihilangkan tetap dapat kembali ke bentuk semula. Apabila batas elastisitas tercapai dalam konstanta Young atau Modulus Young, maka benda akan mencapai batas deformasi yang berarti tidak dapat kembali ke bentuk semula (disebut plastis). Elastisitas benda kemudian dinyatakan dalam tegangan, regangan, dan menjadi dasar fenomena benda yang disebut pegas sebagaimana Hukum Hooke.

Sesuai Hukum Hooke, tegangan sebanding dengan regangan. Hal ini berlaku di dalam batas elastis. Perbandingan tegangan satuan  $\sigma$  untuk regangan satuan  $\varepsilon$  dari setiap bahan yang diberikan dari hasil eksperimen, memberikan suatu ukuran kekuatannya, yaitu elastisitas E, yaitu :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

(2.13)

Dalam istilah teknik, regangan adalah ubah bentukan. Jika ubah bentukan total (total deformation) yang dihasilkan suatu batang dinyatakan dengan  $\Delta$  (delta), dan panjang batang adalah L, maka ubah bentukan persatuan panjang yang dinyatakan dengan  $\varepsilon$ , maka :

$$E = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.14)$$

Sehingga dapat dirumuskan suatu persamaan untuk menentukan bentuk total  $\Delta L$  suatu bahan yang mengalami beban aksial P, yaitu :

$$\begin{aligned}\Delta L &= \varepsilon \cdot L \\ &= \frac{\sigma}{E} \cdot L \\ &= \frac{F}{A} \cdot \frac{1}{E} \cdot L \\ \Delta L &= \frac{FL}{AE}\end{aligned}\tag{2.15}$$

Dimana :

$\Delta L$  = ubah bentukan aksial total panjang (mm);

F = beban aksial total (N) ;

L = panjang batang (mm);

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

E = modulus elastisitas bahan (N/mm<sup>2</sup>);

$\varepsilon$  = ubah bentukan atau regangan.

## 2.21 Metode Elemen Hingga

Konsep dasar yang melandasi metode elemen hingga adalah prinsip diskretisasi, yaitu membagi suatu benda menjadi elemen-elemen yang berukuran lebih kecil supaya lebih mudah pengelolaannya. Misalnya suatu bidang yang tidak beraturan (kontinum) didiskretisasi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil (Elemen Hingga) yang bentuknya lebih teratur dari bentuk semula. Persamaan Metode Elemen Hingga pada suatu masalah tertentu menghasilkan suatu sistem persamaan aljabar serentak dalam penyelesaiannya. Pendekatan nilai hasil metode ini ialah terletak pada sejumlah daerah terbagi (diksret) pada titik-titik dalam suatu rangkaian kesatuan. Oleh karena itu, pada penyelesaian metode ini benda diasumsikan dibagi-bagi dalam suatu sistem ekuivalen pada unit-unit kecil berhingga (Elemen-elemen Hingga) yang saling berhubungan pada titik-titik hubung pada dua atau lebih elemen yang dikenal dengan istilah titik nodal atau *nodes*. Daerah permukaan yang dibatasi oleh garis-garis batas permukaan disebut dengan istilah *diskretisasi*.

Metode Elemen Hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan, dan sifat-sifat dari material yang sangat rumit. Metode ini juga digunakan untuk menghitung gaya dalam suatu struktur. Keuntungan dari Metode

Elemen Hingga adalah bahwa apa yang tidak dapat diselesaikan dengan penyelesaian analitis dapat dipecahkan dengan Metode Elemen Hingga (Muis Alie & Suci, 2022).

## 2.22 Metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA)

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

Pembentukan model Elemen Hingga (FEM) presisi tinggi dapat memperoleh tegangan struktural dan perhitungan deformasi secara mendalam, menganalisis secara efektif faktor-faktor pengaruh kegagalan structural, dan memandu desain struktur dan optimalisasi proses pengelasan. Penelitian ini akan menggunakan metode NLFEA untuk menghitung kekuatan-batas longitudinal struktur kapal tanker baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat kandas dan tubrukan. Perhitungan kekuatan-batas struktur dengan metode NLFEA perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

### 1. Tipe metode NLFEA

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

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

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

### 2. Algoritma *iterative solution*

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

#### 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. *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*.

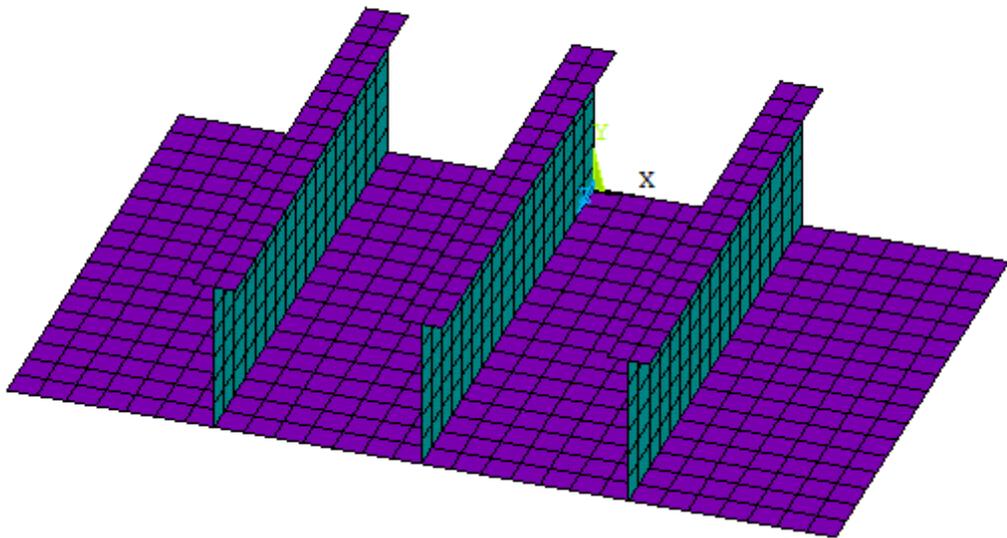
Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar sebaiknya di-*meshing* dengan ukuran yang lebih kecil untuk dapat memperlihatkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin kecil nilai *meshing* maka perangkat komputer yang digunakan harus memiliki

spesifikasi yang tinggi. Dalam penelitian ini, ukuran *meshing* yang digunakan sebesar 200 mm dengan bentuk *quadmapped*.

### 2.23 Meshing

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

Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar sebaiknya di-*meshing* dengan ukuran yang lebih kecil untuk dapat memperlihatkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin kecil nilai *meshing* maka perangkat komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi yang tinggi dan memerlukan waktu yang lebih lama. Dalam penelitian ini, ukuran *meshing* yang digunakan sebesar 200 mm dengan bentuk *quadmapped* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 berikut.



**Gambar 2.14** Pelat Berpenegar Kondisi *Meshing*

### 2.24 Tipe Elemen

Semua pelat yang digunakan pada penelitian ini menggunakan tipe *Shell 181 (quadrilateral 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 pengikat (beban kekakuan) dari tekanan terdistribusi.

SHELL181 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*).