

SKRIPSI

OPTIMASI BEBAN TERHADAP LENDUTAN PADA BALOK

Disusun dan diajukan oleh

ASTIKA RAJMI

D081 17 1002



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2021

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

OPTIMASI BEBAN TERHADAP LENDUTAN PADA BALOK

Disusun dan diajukan oleh

ASTIKA RAJMI

D081171002

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas Universitas Hasanuddin

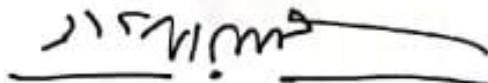
Pada tanggal 1 Oktober 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

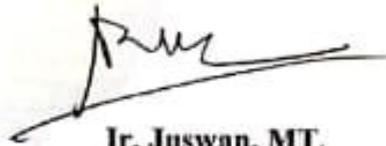
Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Muh. Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D.

NIP.197606062005011003



Ir. Juswan, MT.

NIP.196212311989031031

Mengetahui,

Ketua Program Studi



Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.

NIP.197506052002121003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Astika Rajmi
NIM : D081171002
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“OPTIMASI BEBAN TERHADAP LENDUTAN PADA BALOK”

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

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

Gowa, 10 September 2021

Yang Menyatakan,



Astika Rajmi

ABSTRAK

ASTIKA RAJMI. *Optimasi Beban Terhadap Lendutan Pada Balok* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Juswan**)

Salah satu elemen yang mendukung kekuatan membujur kapal adalah pelat berpenegar. Pelat berpenegar ini berfungsi untuk menahan beban yang bekerja dalam arah aksial dan lentur. Masalah dari penelitian ini adalah berapa besar lendutan pada kondisi pembebanan optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tegangan dan deformasi yang terjadi pada pelat berpenegar kapal FPSO pada kondisi pembebanan maksimum yang diterima oleh pelat berpenegar di area *bottom* dan *deck*. Beban yang bekerja pada pelat berpenegar adalah aksial dan lentur. Pelat berpenegar terdiri atas dua tipe yaitu *Angle-Bar* dan *Tee-Bar*. Kondisi batas diasumsikan jepit pada sisi-sisi pelat berpenegar. Pelat berpenegar dianalisis dengan menggunakan metode numerik. Berdasarkan hasil yang diperoleh dengan menggunakan metode numerik bahwa tegangan dan deformasi dengan jarak gading 4500 mm pada kondisi tumpuan jepit masing-masing untuk model *Tee-Bar* sebesar 16,4 N/mm² dan 3,0714 mm. Sementara untuk model *Angle-Bar* tegangan dan deformasi sebesar 11,51 N/mm² dan 3,186 mm.

Kata kunci: FPSO, Pelat Berpenegar, metode numerik, tegangan, deformasi

ABSTRACT

ASTIKA RAJMI. *Load Optimazation against Deflection in Beam (supervised by Muhammad Zubair Muis Alie and Juswan)*

One of the element which support longitudinal strenght of ship is stiffened plate. This stiffened plate functioned to resist the loads acting in axial and bending. The problem of this research is to know the maximum deflection due to the optimum load condition. The objective of the present study is to know the stress and deformation apply on the stiffened plate of the FPSO under maximum loading condition received by stiffened plate at the bottom and deck area. The stiffened plate have two types namely Angle-Bar and Tee-Bar. The boundary condition are assumed to be fixed along the side of the stiffened plate. Those stiffened plates are analyzed by adopting the numerical method. According to the results show that the stresses and deformations with the frame-space 4500 mm considering fixed support are obtained of 16,4 N/mm² and 3,0714 mm respectively for Tee-Bar. In case of Angle-Bar, the stress and deformations are 11,51 N/mm² and 3,186 mm, respectively.

Keywords: FPSO, Stiffened Plate, numerical method, stress, deformation

PRAKATA

Assalamu 'alaikum 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. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“OPTIMASI BEBAN TERHADAP LENDUTAN PADA ELEMEN BALOK”

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Zainal** dan Ibu **Agustina** 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, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama 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 **Ir. Juswan, 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. Charul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. Bapak **Ir. Juswan, MT.** selaku penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga saya dapat menyelesaikan studi
5. **Dosen–Dosen Departemen Teknik Kelautan dan Staf Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
6. **Staf Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Kakak tercinta **Ns. Rani Astuti, S.Kep.** dan Adik tersayang **Desi Tisnawati** yang tak henti-hentinya memberikan kasih sayang, dukungan dan doa kepada penulis.
8. Saudara **Muhammad Rizqullah Zahran** untuk motivasi, waktu, dukungan dan bantuannya kepada penulis.
9. **Teman-teman Mahasiswa khususnya Teknik Kelautan 2017, Teman-teman Labo OSAREL** 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.
10. **Para sahabat**, Tri Utari. Hs, Windi Widianingrum, S.T., Diasrini Wulan B. Shinta, S. Ked, Andi Nuryani Sarni, S.Pt., Eka Novianty Lestari, Amd.Keb., Erna Sari, Andi Besse Firda Inayah dan Diana. Yang telah memberikan semangat dan motivasi

11. 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, 10 September 2021

Astika Rajmi

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR NOTASI.....	xiii
DAFTAR ISTILAH	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	2
1.5. Manfaat Penelitian	2
1.6. Sistematika Penulisan	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. <i>Floating Production Storage and Offloading (FPSO)</i> dan <i>Floating Storage and Offloading (FSO)</i>	4
2.2. Pengertian Kolom dan Balok.....	4
2.3. Balok Baja.....	6
2.4. Definisi Defleksi.....	6
2.5. Definisi Defleksi pada Balok.....	7
2.6. Jenis- Jenis Tumpuan.....	11
2.7. Tegangan.....	13
2.8. Regangan	14
2.9. Tegangan Tarik (<i>Tensile Stress</i>)	17
2.10. Tegangan Tekan (<i>Compressive Stress</i>)	18
2.11. Tegangan Geser (<i>Shear Stress</i>)	18

2.12. Tegangan Lentur (<i>Bending Stress</i>)	19
2.13. Tegangan Luluh (<i>Yield Stress</i>)	19
2.14. Tegangan Izin Dasar	19
2.15. Modulus Elastisitas (<i>Modulus Young</i>)	20
2.16. Deformasi Material	21
2.17. Teori Optimasi	22
2.18. Metode Untuk Analisa Kekuatan.....	24
BAB 3 METODE PENELITIAN	28
3.1. Jenis Penelitian	28
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian	28
3.3. Penyajian Data	28
3.4. Analisa Data.....	32
3.5. Diagram Alir	33
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1. Pemodelan Struktur.....	34
4.2. Variasi Model Pelat Berpenegar.....	35
4.3. Hasil Gaya dan Defleksi	38
4.4. Tegangan Regangan yang Bekerja pada Pelat Berpenegar.....	42
BAB 5 PENUTUP	48
5.1. Kesimpulan	48
5.2. Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN.....	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Keadaan balok sebelum dan sesudah terjadi deformasi	8
Gambar 2.2 Titik Berat dari Beberapa Bidang.....	10
Gambar 2.3 Pembebanan Terpusat	11
Gambar 2.4 Pembebanan Merata	11
Gambar 2.5 Pembebanan Bervariasi <i>Uniform</i>	11
Gambar 2.6 Tumpuan Sendi	12
Gambar 2.7 Tumpuan Rol.....	12
Gambar 2.8 Tumpuan Jepit.....	13
Gambar 2.9 Jenis-Jenis Tegangan.....	14
Gambar 2.10 Diagram Tegangan – Regangan Baja.....	15
Gambar 2.11 Tegangan Tarik	17
Gambar 2.12 Tegangan Tekan	18
Gambar 3. 1 <i>General Arrangement</i>	29
Gambar 3. 2 Penampang Atas Kapal Arah Membujur	30
Gambar 3.3 Setengah midship Kapal FPSO	31
Gambar 3. 4 Diagram Alir	33
Gambar 4.1 Setengah Midship Kapal FPSO.....	34
Gambar 4. 2 Model Pelat Berpenegar	35
Gambar 4. 3 Model <i>Tee-Bar</i>	36
Gambar 4. 4 Model <i>Angle-Bar</i>	36
Gambar 4.5 Model <i>Tee-Bar</i> Kondisi Tumpuan Jepit.....	37
Gambar 4.6 Model <i>Angle-Bar</i> Kondisi Tumpuan Jepit	37
Gambar 4. 7 Kurva Gaya-Defleksi <i>Tee-Bar</i>	39
Gambar 4. 8 Deformasi pada titik A kondisi <i>Hogging Sagging</i> model <i>Tee-Bar</i> ..	39
Gambar 4. 9 Deformasi pada titik B kondisi <i>Hogging Sagging</i> model <i>Tee-Bar</i> ..	40
Gambar 4. 10 Deformasi pada titik C kondisi <i>Hogging Sagging</i> model <i>Tee-Bar</i>	40
Gambar 4. 11 Kurva Gaya-Defleksi <i>Angle-Bar</i>	41
Gambar 4. 12 Deformasi pada titik A kondisi <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	41
Gambar 4. 13 Deformasi pada titik B kondisi <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	42
Gambar 4. 14 Deformasi pada titik C kondisi <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	42

Gambar 4. 15 Kurva Tegangan-Regangan Pelat Berpenegar <i>Tee-Bar</i>	43
Gambar 4. 16 Distribusi Tegangan di titik A kondisi <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	44
Gambar 4. 17 Distribusi Tegangan di titik B kondisi <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	44
Gambar 4. 18 Distribusi Tegangan di Titik C kondisi <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	45
Gambar 4. 19 Kurva Tegangan-Regangan Pelat Berpenegar <i>Angle-Bar</i>	45
Gambar 4. 20 Distribusi Tegangan di Titik A Kondisi <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	46
Gambar 4. 21 Distribusi Tegangan di Titik B Kondisi <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	47
Gambar 4. 22 Distribusi Tegangan di Titik C Kondisi <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Modulus Young</i> pada Material	17
Tabel 3.1 Konfigurasi ukuran <i>stiffener</i>	31
Tabel 4.1 Dimensi pelat berpenegar.....	35
Tabel 4. 2 Rekapitulasi Gaya-Defleksi pelat berpenegar Kapal FPSO.....	38
Tabel 4. 3 Rekapitulasi Tegangan Regangan yang bekerja pelat berpenegar.....	43

DAFTAR NOTASI

B	= Lebar Kapal	(mm)
L	= Panjang Kapal	(mm)
D	= Tinggi Kapal	(mm)
C _b	= Koefisien Blok	
A	= Luas Penampang	(mm ²)
w	= Beban	(N)
ΔL	= Pertambahan Panjang	(mm)
I	= Inersia Penampang	(mm ⁴)
M	= Momen Lentur	(Nmm)
F	= Gaya	(N)
F _{tr}	= Gaya Tarik	(N)
E	= Modulus elastisitas (modulus young)	(N/mm ²)
σ	= Tegangan	(N/mm ²)
ε	= Regangan	
σ _{te}	= Tegangan Tekan	(N/mm ²)
σ _{ta}	= Tegangan Tarik	(N/mm ²)

DAFTAR ISTILAH

<i>ANSYS</i>	: <i>Software</i> yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
Defleksi	: Perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertical yang diberikan pada balok atau batang
Deformasi	: Perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah objek karena pengaruh gaya
<i>Mesh</i>	: Membagi Struktur menjadi bagian-bagian kecil
Modulus Elastisitas	: Sebuah ukuran yang digunakan untuk merepresentasikan kekakuan suatu bahan.
Modulus Geser	: Satu dari beberapa kuantitas untuk pengukuran kekakuan suatu bahan
Momen	: Sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi.
<i>Run</i>	: Menjalankan program untuk menghitung hasil analisis
<i>Software</i>	: Istilah khusus untuk data yang diformat dan disimpan secara digital, termasuk program komputer, dokumentasinya dan berbagai informasi yang bisa dibaca dan bisa ditulis oleh komputer.
<i>Tensile Strength</i>	: Tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah bahan ketika diregangkan atau ditarik, sebelum bahan tersebut patah

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Karena upaya keseluruhan untuk mempromosikan keselamatan maritim dan perlindungan lingkungan, Teknik perkapalan bertujuan untuk merancang kapal struktur yang cukup kuat dan mampu menahan beban yang diharapkan. Ini memungkinkan untuk mencegah kegagalan yang mungkin terjadi dan menyebabkan polusi, total kehilangan kapal dan/atau nyawa di atas kapal. Kegagalan struktur mengacu pada hilangnya kapasitas pengangkutan beban suatu komponen atau anggota dalam suatu struktur atau struktur itu sendiri. Kegagalan Struktur dimulai ketika material ditekankan hingga batas kekuatannya, sehingga menyebabkan fraktur atau deformasi yang berlebihan. Didesain dengan sistem yang baik, kegagalan lokal tidak boleh menyebabkan langsung atau bahkan keruntuhan progresif dari seluruh struktur [1].

Metode elemen hingga *nonlinier* (FE) telah digunakan untuk menganalisis kekuatan struktur yang sangat rumit seperti itu dapat memprediksi secara terperinci perilaku keruntuhan yang kompleks dari panel yang kaku dan tidak kaku [2].

Parameter kerusakan struktur seperti dimensi, geometri dan lokasi kerusakan harus dipertimbangkan untuk mengevaluasi kekuatan batas struktur kapal yang mengalami kerusakan akibat tubrukan guna memastikan penyebab kapal yang mengalami *Collapse* total apakah diakibatkan oleh kehilangan daya apung, kehilangan stabilitas atau kegagalan struktur kapal [3].

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.

Pada konstruksi teknik, hampir dipastikan semuanya memerlukan perhitungan-perhitungan yang baik agar desain yang dibangun dan saat diaplikasikan benar-benar kuat dan berfungsi. Hal-hal tersebut berkaitan dengan gaya-gaya yang menjadi tanggungan desain konstruksi tersebut. Saat menerima

gaya, konstruksi akan mengalami defleksi sesuai dengan gaya yang diterima dan jenis material yang digunakan untuk konstruksi tersebut.

Salah satu aspek terpenting pada desain dan evaluasi struktur FPSO adalah kekuatan batas struktur balok pada kondisi pembebanan optimal. Dianjurkan menggunakan metode *Non Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) sesuai dengan standar DNV [4].

Berdasarkan latar belakang diatas, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan lendutan pada balok menjadi latar belakang dalam pengerjaan tugas akhir ini dengan penelitian tentang Optimasi Beban Terhadap Lendutan pada Elemen Balok.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah berapa lendutan yang terjadi pada elemen balok saat kondisi pembebanan optimal.

1.3. Batasan Masalah

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

1. Balok yang dianalisa dari balok penegar kapal FPSO
2. Beban yang bekerja pada balok diasumsikan berbentuk beban distribusi.
3. Jenis balok yang diujikan yaitu balok penegar *Angle-Bar* dan *Tee-Bar*.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui lendutan yang terjadi pada elemen balok saat kondisi pembebanan optimal

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai bahan informasi yang bermanfaat bagi pihak yang ingin melakukan penelitian mengenai balok penegar serta memberikan masukan yang positif.

1.6. Sistematika Penulisan

Untuk mendapatkan alur penulisan yang jelas dan sistematis sekaligus

memungkinkan pembaca dapat menginterpretasikan hasil tulisan secara tepat, maka tugas akhir ini disusun menjadi beberapa bagian, yaitu:

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang permasalahan atau alasan yang mendasari penulis dalam melakukan penelitian mengenai optimasi beban terhadap lendutan pada elemen balok. Selain itu berisi juga mengenai perumusan masalah yang dianalisis, batasan masalah penelitian yang tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini karena keterbatasan alat bantu dan membatasi agar penelitian lebih spesifik juga dalam bab ini terdapat tujuan dari penelitian dan manfaat penelitian yang dapat diambil dari penelitian ini serta sistematika penulisan skripsi.

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi kajian pustaka yang mendukung permasalahan yang dihadapi berupa teori-teori dasar mengenai Gambaran umum kapal FSO (*Floating Storage and Offloading*) dan kapal FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), mengenai konstruksi kapal FPSO, teori tentang balok, defleksi dan tegangan serta teori lainnya yang berkaitan untuk menyelesaikan dan membahas permasalahan penelitian.

BAB III Metode Penelitian

Bab ini berisi jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, objek penelitian yaitu balok atau pelat berpenegar pada kapal FPSO, jenis dan sumber data dimana penelitian ini bersifat kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta penampilan dari hasilnya dengan melakukan investigasi untuk mendapatkan nilai lendutan yang terjadi pada saat pembebanan optimal serta kerangka alur pemikiran.

BAB IV Pembahasan

Bab ini berisi pembahasan tentang investigasi nilai lendutan yang diperoleh saat pembebanan optimal dan investigasi tegangan yang bekerja pada model.

KESIMPULAN

Bab ini merupakan penutup dari keseluruhan dari isi penelitian yang mencakup kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dibahas pada bab-bab sebelumnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Floating Production Storage and Offloading (FPSO) dan Floating Storage and Offloading (FSO)*

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 konversi kapal tanker menjadi FPSO [5].

FPSO merupakan bangunan pengeboran dan penyimpanan minyak lepas pantai yang bersifat portabel, dalam artian dapat berpindah-pindah. Adapun hasil pemisahan dari produk pengeboran adalah crude oil, air dan gas. Sebuah kapal yang hanya digunakan untuk menyimpan minyak disebut sebagai *Floating Storage and Offloading (FSO)*.

FPSO memiliki karakteristik berbeda dengan FSO, walaupun demikian FPSO dapat dibangun dengan konversi FSO, adapun ciri umum FPSO adalah konstruksi gading-gading lebih kuat daripada kapal dengan ukuran yang sama, disebabkan adanya beban di atas *deck* yang sangat besar berupa *equipment*/pabrik produksi minyak dan gas.

Lambung FPSO berfungsi seperti balok dan deformasi di bidang vertikal (distribusi bobot dan *bouyancy* yang tidak merata) dan pembuatan gelombang. Hal ini diperlukan untuk mempertimbangkan nilai ekstrem dari kedua jenis penguatan untuk mendapatkan tegangan tarik dan tegangan tarik maksimum pada dek dan bagian bawah. Untuk FPSO, kondisi segel ekstrem akan menjadi beban penuh dalam tangki penyimpanan minyak mentah ditambah dengan gelombang yang mana panjang kapal dengan palangnya ditengah kapal. Kondisi *Hogging* yang ekstrem akan menjadi kondisi pemberat ditambah dengan gelombang kira-kira panjang kapal dengan puncaknya di atas kapal.

2.2. **Pengertian Kolom dan Balok**

Balok adalah bagian dari 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 bersatu padu mempertahankan bentuk dan posisinya semula. *Ring* balok dibuat dari bahan yang sama dengan kolomnya sehingga hubungan ring balok dengan kolom yang bersifat kaku tidak mudah berubah bentuk. Pola gaya yang tidak seragam dapat mengakibatkan balok melengkung atau defleksi yang harus ditahan oleh kekuatan internal material.

Beberapa jenis balok antara lain :

1. Balok sederhana bertumpu pada kolom diujung-ujungnya, dengan satu ujung bebas berotasi dan tidak memiliki momen tahan. Seperti struktur statis lainnya, nilai dari semua reaksi, pergeseran dan momen untuk balok sederhana adalah tidak tergantung bentuk penampang dan materialnya.
2. Kantilever adalah balok yang diproyeksikan atau struktur kaku lainnya didukung hanya pada satu ujung tetap
3. Balok teritisan adalah balok sederhana yang memanjang melewati salah satu kolom tumpuannya.
4. Balok dengan ujung-ujung tetap (dikaitkan kuat) menahan translasi dan rotasi
5. Bentangan tersuspensi adalah balok sederhana yang ditopang oleh teritisan dari dua bentang dengan konstruksi sambungan *pin* pada momen nol.
6. Balok *kontinu* memanjang secara menerus melewati lebih dari dua kolom tumpuan untuk menghasilkan kekakuan yang lebih besar dan momen yang lebih kecil dari serangkaian balok tidak menerus dengan panjang dan beban yang sama.

Balok terbagi dari beberapa macam, yaitu :

1. Balok kayu
Balok kayu menopang papan atau dek struktural. 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 dicor di tempat dikategorikan menurut bentangan dan bentuk cetakannya.

2.3. 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* [6].

2.4. Definisi 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. 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 [7].

Dari hubungan

$$\frac{E}{R} = \frac{M}{I} \quad (2.1)$$

Diperoleh

$$\frac{I}{R} = \frac{M}{EI} \quad (2.2)$$

Hasil kali EI dikenal sebagai kekuatan lentur, R adalah jari-jari kelengkungan dan M momen lentur yang menyebabkan defleksi balok.

Persamaan umum untuk defleksi adalah:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad (2.3)$$

Setelah mengintegrasikannya kita mendapatkan kemiringan $\frac{dy}{dx}$ dan dengan mengintegrasikan dua kali kita mendapatkan y, defleksi. Persamaan diatas dikenal sebagai persamaan lentur diferensial.

Persamaan umum untuk defleksi dengan tumpuan jepit-jepit adalah:

$$f = \frac{wL^4}{384EI} \quad (2.4)$$

Dengan:

f = Lendutan

w = Beban (N)

L = panjang (mm)

E = Modulus Elastisitas (N/mm²)

I = Inersia (mm⁴)

Untuk teori batas lendutan yang diizinkan :

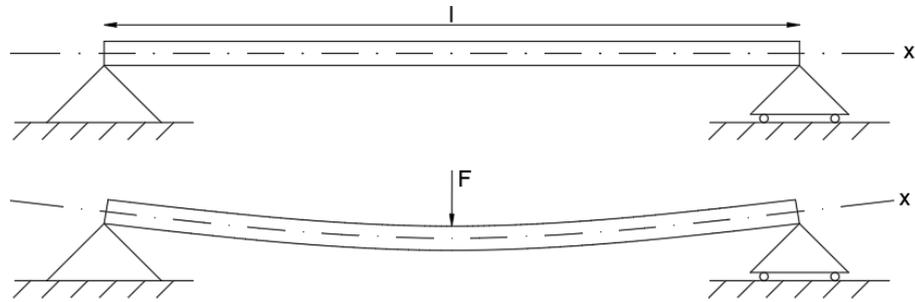
$$\delta_{izin} \leq \frac{L}{240} \text{ untuk } deck \quad (2.5)$$

$$\delta_{izin} \leq \frac{L}{360} \text{ untuk } bottom \quad (2.6)$$

2.5. Definisi Defleksi pada Balok

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.

Gambar 2.1 memperlihatkan balok pada posisi awal sebelum terjadi deformasi dan balok dalam konfigurasi terdeformasi yang diasumsikan akibat aksi pembebanan.



Gambar 2.1 Keadaan balok sebelum dan sesudah terjadi deformasi

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.

Menurut E. P. Papov [8], pada semua konstruksi teknik, bagian bagian pelengkap suatu bangunan haruslah diberi ukuran-ukuran fisik tertentu yang harus diukur dengan tepat agar dapat menahan gaya-gaya yang akan diberikan padanya. Misalnya bagian dari suatu struktur komposit haruslah cukup tegar untuk tidak melentur melebihi batas yang diizinkan dibawah kondisi pembebanan yang diberikan. Kemampuan untuk menentukan maksimum yang dapat diterima oleh suatu konstruksi sangatlah penting. Dalam aplikasi keteknikan, kebutuhan tersebut haruslah disesuaikan dengan pertimbangan ekonomis dan pertimbangan teknis. Dari segi teknis seperti kekuatan (*strength*), kekakuan (*stiffenes*), dan kestabilan (*stability*).

Pemilihan atau desain suatu batang/struktur sangat tergantung pada segi teknis di atas yaitu kekuatan, kekakuan dan kestabilan. Pada kreteria kekuatan desain *beam*/struktur haruslah cukup kuat untuk menahan gaya geser dan momen lentur, sedangkan pada kriteria kekakuan, desain haruslah cukup kaku untuk

menahan lendutan yang terjadi agar batang tidak melendut melebihi batas yang telah diizinkan [8]. Sistem struktur yang diletakkan horizontal dan yang terutama di peruntukan memikul beban lateral, yaitu beban yang bekerja tegak lurus sumbu aksial struktur [9]. Beban semacam ini khususnya muncul sebagai beban gravitasi, seperti misalnya bobot sendiri, beban hidup vertikal, beban *crane* dan lain-lain. Sumbu sebuah struktur akan terdeteksi dari kedudukannya semula bila benda dibawah pengaruh terpakai. Dengan kata lain suatu struktur akan mengalami pembebanan transversal baik itu beban terpusat maupun terbagi merata akan mengalami defleksi.

Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi yaitu:

1. Kekakuan struktur

Semakin kaku suatu struktur maka lendutan yang akan terjadi pada struktur akan semakin kecil.

2. Besarnya kecil gaya yang diberikan

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

3. Jenis tumpuan yang diberikan

Jumlah reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Maka 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 akan semakin kecil. Sejalan dengan hal tersebut maka defleksi yang terjadi pada tumpuan rol lebih besar dari tumpuan sendi dan defleksi yang terjadi pada tumpuan sendi lebih besar dari tumpuan jepit.

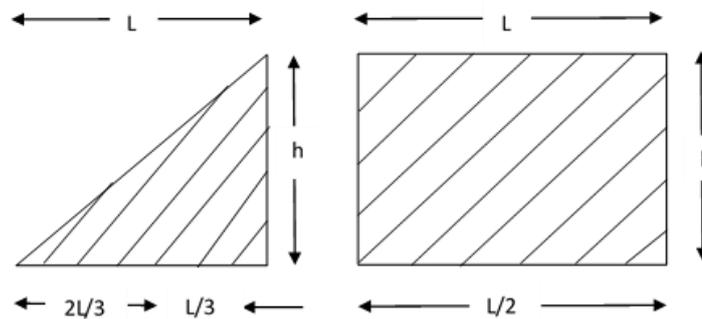
4. Jenis beban yang diberikan pada struktur

Beban terdistribusi merata dengan beban titik, keduanya memiliki kurva defleksi yang berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata *slope* yang terjadi pada bagian struktur 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 [9].

a. Titik Berat

Berat sebuah benda adalah gaya yang paling sering kita jumpai. Titik berat adalah titik kedudukan dalam suatu benda dimana gaya berat secara efektif bekerja. Perhatikan titik berat tidak selalu bekerja didalam benda tetapi dapat saja bekerja di luar benda.

Dapat juga dinyatakan bahwa titik berat atau pusat berat benda sebagai titik yang terhadap gaya-gaya berat yang bekerja pada semua partikel benda itu menghasilkan momen resultan nol. Karena itulah benda yang ditumpu pada titik beratnya akan berada dalam kesetimbangan statik. Titik berat dari beberapa bidang dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Titik Berat dari Beberapa Bidang

b. Jenis-jenis Tumpuan

Menurut E. P. Papov [8], dalam menganalisa batang/struktur digunakan kaidah diagramatik untuk tumpuan balok/struktur tersebut dan pembebanan yang disebabkan oleh macam-macam tumpuan, dan berbagai variasi dari beban.

c. Jenis-jenis Pembebanan

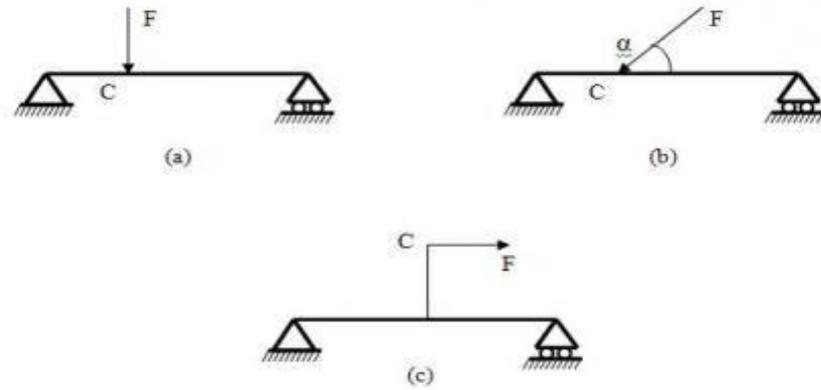
Salah satu faktor yang mempengaruhi defleksi pada struktur adalah jenis beban yang diberikan kepada struktur. Adapun jenis pembebanan sebagai berikut:

1. Beban terpusat

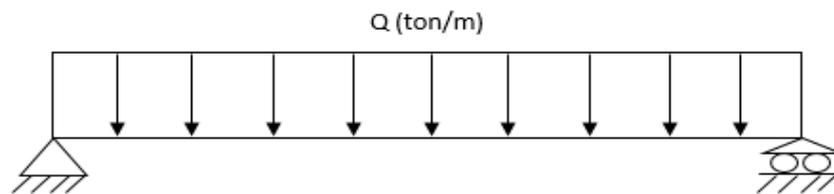
Titik kerja pada struktur dapat dianggap berupa titik karena luas kontakannya kecil. Pada Gambar 2.3 dapat dilihat beberapa jenis letak pembebanan terpusat.

2. Beban terbagi merata

Disebut beban terbagi merata karena sepanjang batang dinyatakan dalam Q (ton/m atau kN/m) seperti yang terlihat pada Gambar 2.4



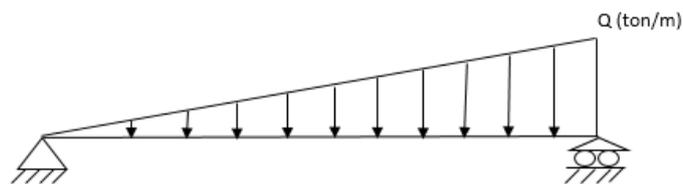
Gambar 2.3 Pembebanan Terpusat



Gambar 2.4 Pembebanan Merata

3. Beban bervariasi *uniform*

Disebut beban bervariasi *uniform* karena beban sepanjang batang besarnya tidak merata yang dapat dilihat pada Gambar 2.5



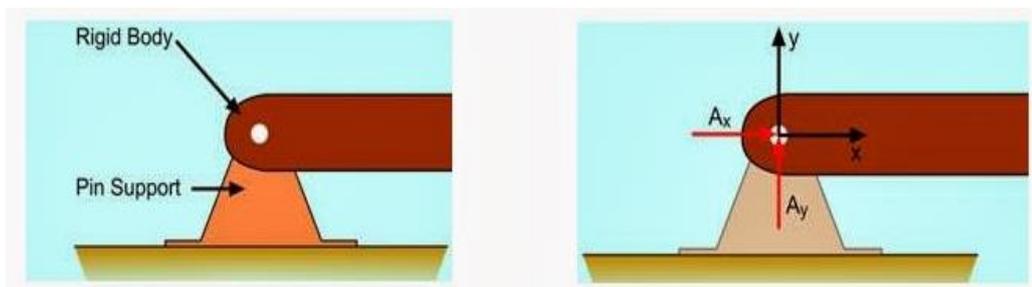
Gambar 2.5 Pembebanan Bervariasi *Uniform*

2.6. 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. Jenis tumpuan yang sering digunakan dalam bangunan adalah tumpuan sendi, rol, dan jepit [10].

1. Tumpuan Sendi

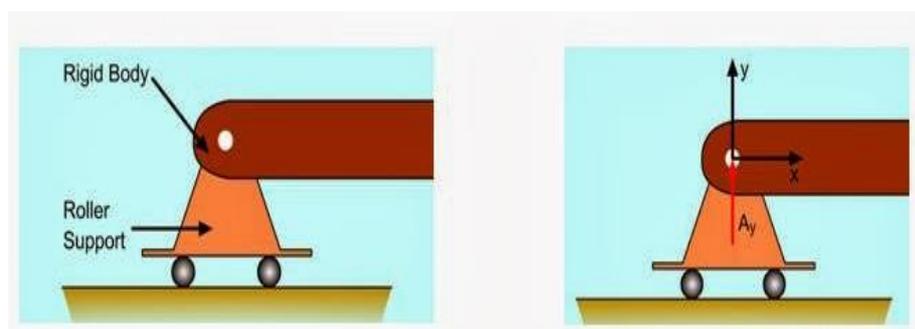
Jenis tumpuan ini hanya dapat berotasi, namun tak dapat bertranslasi dalam arah vertikal maupun horizontal. Tumpuan sendi dapat memberikan reaksi dalam arah horizontal maupun vertikal. Atau dalam bahasa sederhana nya, tumpuan sendi dapat melakukan perlawanan gaya secara vertikal dan horizontal (R_v dan R_h) namun tidak dapat melakukan perlawanan momen yang ditunjukkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Tumpuan Sendi

2. Tumpuan Rol

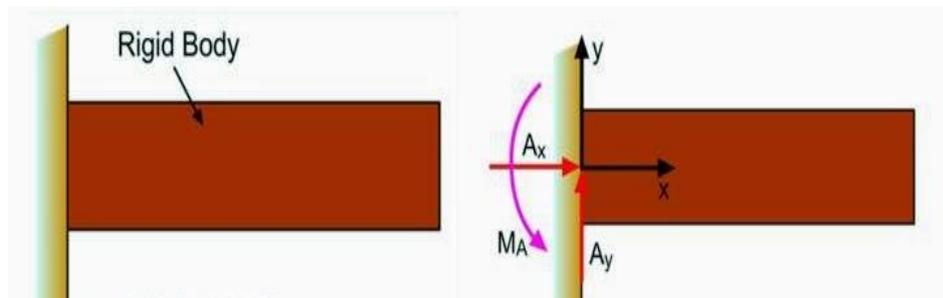
Jenis tumpuan ini bebas berotasi dan bertranslasi sepanjang permukaan rol ini berada. tumpuan rol hanya mampu menyalurkan gaya vertikal yang memiliki arah tegak lurus terhadap bidang permukaan. Atau dalam bahasa sederhananya, Rol hanya mampu melakukan perlawanan gaya vertikal (R_v), dan tidak melakukan 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 horizontal R_h yang ditunjukkan pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Tumpuan Rol

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.



Gambar 2.8 Tumpuan Jepit

2.7. 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 atau tekanan merupakan besaran gaya per satuan luas tampang. Sehingga besar tegangan yang dialami batang prismatik tersebut masing-masing sebesar T/A dan P/A [11]. 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:

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

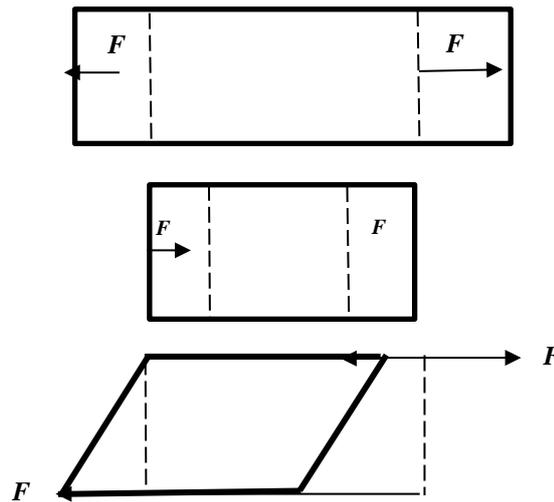
Dengan:

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 2.9 :



Gambar 2.9 Jenis-Jenis Tegangan

2.8. Regangan

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

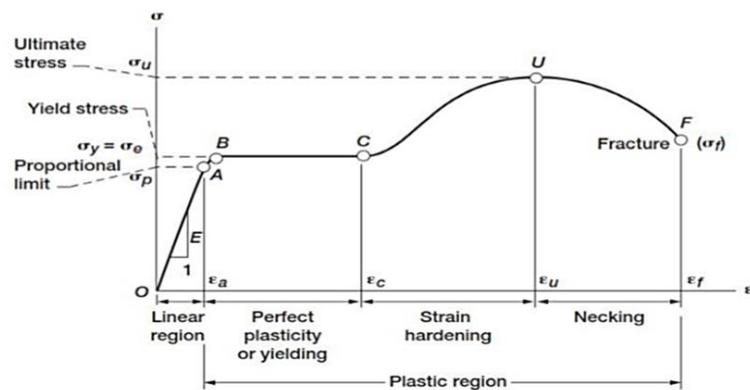
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.8)$$

Dengan:

ε = regangan

ΔL = pertambahan panjang (mm)

L = panjang mula-mula (mm)



Gambar 2.10 Diagram Tegangan – Regangan Baja

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.10, batas elastis (*elastic limit*) bahan tercapai (titik B). Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan, sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Yaitu bahan secara tiba-tiba mulur (pada titik C) 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. 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 “no!” 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 Hook masih bisa ditolerir. Dalam praktker, 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 kecepatan jalannya bergantung pada *Modulus Young*. Secara matematis dirumuskan:

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

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

Dengan:

E = modulus Young (N/mm²)

F = gaya (N)

L = panjang mula-mula (mm)

ΔL = pertambahan panjang/pendek (mm)

A = luas penampang (mm²)

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

Tabel 2.1 *Modulus Young* pada Material

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

2.9. 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:

Rumus :

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

(2.11)

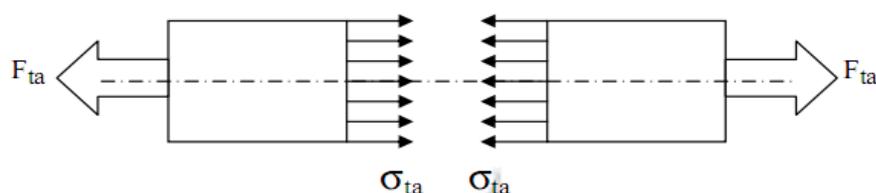
Dengan

σ_{tr} = tegangan tarik (kg/cm² atau kg/mm²)

F = gaya tarik (N)

A = Luas penampang (mm²)

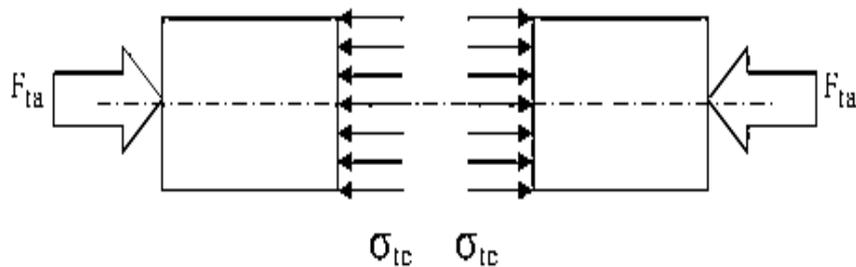
Gaya tarik aksial yang menghasilkan tegangan tarik dapat dilihat pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Tegangan Tarik

2.10. Tegangan Tekan (*Compressive Stress*)

Jika batang gaya dikenakan pada ujung-ujung batang dalam arah menuju ke batang, sehingga batang dalam kondisi tertekan, maka terjadi tegangan tekan, batang, Tegangan tekan (σ_{te}) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan (F_{ta}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan yang terlihat pada Gambar 2.12. Rasio/Perbandingan antara perpendekan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan ϵ_{ta} secara matematik dapat ditulis :



Gambar 2.12 Tegangan Tekan

Selanjutnya dapat dinyatakan dengan rumus:

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (2.12)$$

2.11. 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 (τ) dalam satuan (N/mm^2). Tegangan geser terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser didistribusikan pada sebuah luas penampang melintang yang paralel (tangensial) dengan gaya geser tersebut.

Tegangan geser (τ) timbul akibat kerja dari dua gaya geser (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 (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.

Rumus :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.13)$$

Dimana :

τ = tegangan geser (N/mm²)

F = gaya geser atau gaya lintang (N)

A = Luas penampang (mm²)

2.12. Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

Tegangan lentur memiliki nilai terbesar di atas dan di bawah balok. Tegangan lentur tersebut bekerja secara tegak lurus terhadap penampang melintang dan berada dalam arah longitudinal dari balok. Merupakan gaya yang bekerja pada jarak tertentu (L) dari tumpuan benda dengan arah kerja tegak lurus sumbu benda. Sehingga mengakibatkan benda melentur/melengkung di sepanjang sumbunya.

2.13. 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.

2.14. Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut bersumber pada AISC [12] dan API [13]. 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.

2.15. Modulus Elastisitas (*Modulus Young*)

Teori elastisitas merupakan cabang yang penting dari fisika matematis, yang mengkaji hubungan antara gaya, tegangan, dan regangan dalam benda elastis. Elastisitas adalah sifat benda yang mengalami perubahan bentuk atau deformasi secara tidak permanen. Bila suatu pejal dibebani gaya luar, benda tersebut akan berubah bentuk/berdeformasi, sehingga timbul tegangan dan regangan dalam. Perubahan ini tergantung pada konfigurasi geometris benda tersebut dan pada sifat mekanis bendanya. Dalam pembahasan sifat elastis pada benda perlu diasumsikan bahwa benda-benda tersebut mempunyai sifat-sifat berikut:

1. Homogen artinya setiap bagian benda mempunyai kerapatan sama
2. *Isotropic* artinya pada setiap titik pada benda mempunyai sifat-sifat fisis yang sama ke segala arah.

Dalam teori elastisitas pembahasan dibatasi hanya pada bahan yang elastis *linier*, yaitu keadaan dimana hubungan tegangan dan regangan bersifat *linier*, dan perubahan bentuk serta tegangan akan hilang apabila gaya luar dihilangkan. Selain itu, teori elastisitas menganggap bahwa bersifat homogen dan isotropis. Dengan demikian, sifat mekanis bahan sama segala arah. Walaupun bahan-bahan structural tidak tepat memenuhi semua anggapan ini, tapi pengujian menunjukkan bahwa teori elastisitas memberikan hasil dengan ketepatan yang tinggi, asalkan tegangan masih dibawah titik leleh (*yield point*). Teori pelat klasik yang merumuskan dan menyelesaikan masalah pelat berdasarkan analisis matematis yang eksak, merupakan penerangan khusus yang penting dari teori elastisitas. Oleh karena itu, pengertian menyeluruh tentang konsep dasarnya, notasi, definisi, dan lainnya, sangat penting.

Besarnya penambahan panjang yang dialami oleh setiap benda ketika meregang adalah berbeda antara satu dengan yang lainnya, tergantung dari elastisitas bahannya, dan elastisitas yang dimiliki oleh tiap-tiap benda tergantung dari jenis bahan apakah benda itu terbuat. Sebagai suatu contoh, sebuah karet gelang akan lebih mudah teregang daripada besi pegas yang biasanya dipakai untuk

melatih otot dada. Sementara untuk merenggangkan sebuah besi pegas, maka dibutuhkan ratusan kali lipat dari tenaga yang akan dikeluarkan untuk merenggangkan sebuah karet gelang. Ketika diberi gaya tarik, karet ataupun pegas akan meregang, dan mengakibatkan penambahan panjang baik pada karet gelang ataupun besi pegas. Besarnya penambahan yang terjadi pada setiap keadaan tergantung pada elastisitas bahannya dan seberapa besar gaya yang bekerja padanya. Semakin elastis sebuah benda, maka semakin mudah benda tersebut untuk dipanjangkan atau dipendekan. Semakin besar gaya yang bekerja pada suatu benda, maka semakin besar pula tegangan dan regangan yang terjadi pada benda itu, sehingga semakin besar pula pemanjangan atau pemendekan dari benda tersebut. Jika gaya yang bekerja berupa gaya tekan, maka benda akan mengalami pemendekan, sedangkan jika gaya yang bekerja berupa beban tarik, maka benda akan mengalami perpanjangan.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa regangan (ε) yang terjadi pada suatu benda berbanding lurus dengan tegangannya (σ) dan berbanding terbalik terhadap ke-elastisitasnya. Ini dinyatakan dengan rumus :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \text{ atau } \sigma = E \times \varepsilon \quad (2.14)$$

Rumus ini dikenal sebagai hukum Hooke. Dalam rumus ini, (E) adalah parameter modulus elastisitas atau *Modulus Young*. Modulus ini adalah sebuah konstanta bahan yang memiliki nilai tertentu untuk bahan tertentu. Seperti yang diuraikan diatas, tiap bahan mempunyai modulus elastisitas (E) tersendiri yang memberi Gambaran mengenai perilaku bahan itu bila mengalami beban tekan atau beban tarik. Bila nilai E semakin kecil, maka akan semakin mudah bagi bahan untuk mengalami perpanjangan atau perpendekan.

2.16. 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 berikut

$$\delta l = \varepsilon.l = \frac{\sigma.l}{E} = \frac{PI}{AE} \quad (2.15)$$

Dimana:

σ = Tegangan yang timbul pada material (N/m²)

ε = Regangan yang timbul pada material

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

A = Luas penampang material (m²)

E = Modulus elastisitas material (N/mm²)

l = Panjang material (m)

δl = Deformasi material (m)

Dengan Catatan:

1. Rumus di atas dapat juga digunakan untuk tekanan
2. Untuk sebagian besar material, modulus elastisitas untuk kompresi sama dengan tarikan.
3. Terkadang dalam perhitungan, tegangan regangan tarik diberi tanda positif, dan tegangan, regangan tekan/kompresi diberi tanda negatif.

2.17. Teori Optimasi

Suatu perencanaan terdiri atas empat langkah yaitu [14]:

1. Perumusan syarat-syarat fungsional, yaitu mencari dan merumuskan syarat-syarat fungsional yang dalam beberapa kasus tidak terlihat secara nyata.
2. Perencanaan dasar, misalnya pemilihan topologi, tipe struktur dan material.
3. Proses optimasi, yaitu untuk memperoleh kemungkinan perencanaan terbaik dengan kriteria, pertimbangan dan batas-batas yang ada.

4. Pendetailan, setelah seluruh penyajian optimasi, hasil yang didapat harus diperiksa dan dimodifikasi jika perlu.

Secara umum masalah optimasi ada tiga jenis, yaitu :

1. Optimasi bentuk

Optimasi bentuk adalah masalah optimasi untuk mendapatkan bentuk dan ukuran serta tata letak penampang.

2. Optimasi topologi.

Optimasi topologi adalah masalah optimasi yang bersangkutan dengan tata ruang yang tidak berubah dalam deformasi dwikontinu (yaitu ruang yang dapat ditekuk, dilipat, disusut, direntangkan, dan dipilin tetapi tidak diperkenankan untuk dipotong, dirobek, ditusuk atau dilekatkan).

3. Optimasi geometri

Optimasi geometri adalah masalah optimasi untuk menghasilkan energi terendah.

Dalam metode optimasi terdapat tiga besaran utama, yaitu:

- a. Variabel desain
- b. Fungsi kendala
- c. Fungsi sasaran

Penyelesaian masalah optimasi dapat dipakai dua cara yaitu:

1. Metode analisis

Metode ini menggunakan dasar teori matematika yang dibuat oleh Maxwell pada tahun 1890 dan Michell pada tahun 1904 dan memberikan hasil eksak namun hanya dapat digunakan untuk masalah optimasi yang sederhana saja karena pada beberapa masalah yang lebih kompleks pengolahan matematikanya sangat tidak sederhana.

2. Metode Numerik

Metode optimasi numerik berkembang sejak ditemukannya komputer sebagai alat bantu hitung. *Dynamic programming, integer programming, steepest descent, sequential unconstraint minimization technique, gradient projection,* dan *penalty function* merupakan metode optimasi numerik yang sering dipakai untuk menyelesaikan masalah optimasi di bidang sipil. Dalam metode ini nilai yang akan dicari didekati dengan cara iterasi dan proses iterasi dihentikan

apabila nilai yang dicari sudah cukup dekat dengan titik optimal yang sesungguhnya [14].

2.18. Metode Untuk Analisa Kekuatan

Metode yang biasa digunakan dalam menyelesaikan masalah tentang kekuatan, yakni Metode NLFEM.

Finite Element Method (FEM) atau biasanya disebut *Finite Element Analysis* (FEA), adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*), seperti analisa tegangan pada struktur, frekuensi pribadi dan mode *shape*-nya, perpindahan panas, elektromagnetis, dan aliran fluida.

Metode ini digunakan pada masalah-masalah rekayasa dimana *exact solution/analytical solution* tidak dapat menyelesaikannya. Inti dari FEM adalah membagi suatu benda yang akan dianalisa, menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang tiap elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut.

Proses pembagian benda menjadi beberapa bagian disebut *meshing*. Permodelan *finite element analysis* untuk kekuatan batas kapal *hull girder* meliputi properti material, tipe element, ukuran *mesh*, panjang model dan kondisi batas. Kemudian pengaruh tegangan sisa pengelasan dan defleksi awal.

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

NLFEM dalam praktik analisis kekuatan *ultimate girder* lambung saat ini sebagian besar dikurangi menjadi analisis model parsial untuk tujuan verifikasi metode analisis alternatif, atau untuk analisis langka dari model lengkap dan terperinci untuk merekonstruksi keadaan dan mengidentifikasi sebab-sebab keruntuhan struktural yang nyata terjadi selama eksploitasi struktur tertentu. Di sisi lain, analisis NLFEM sering digunakan untuk derivasi dan verifikasi berbagai formulasi sederhana dari respons elasto-plastik dari komponen struktural yang dikenakan dengan berbagai jenis muatan murni atau gabungan [15].

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

a. Tipe metode NLFEA

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

- 1) Analisa statis
- 2) Analisa quasi-statis
- 3) Analisa dinamis

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

b. Algoritma *iterative solution*

Tiga jenis algoritma *iterative solution* yang dapat digunakan pada metode NLFEA adalah algoritma Newton-Raphson, algoritma quasi Newton-Raphson dan algoritma resiko. Algoritma N-R dan quasi N-R dapat digunakan pada analisa statis dan analisa dinamis implisit. Algoritma resiko hanya dapat digunakan pada analisa statis. Analisa dinamis eksplisit tidak menggunakan algoritma *iterative solution*.

c. Metode *arc-length*

Metode *arc-length* cocok untuk solusi kesetimbangan statis *nonlinier* masalah tidak stabil. Penerapan metode busur-panjang melibatkan penelusuran jalur yang kompleks dalam respon beban-perpindahan ke dalam sistem *buckling/post buckling*. Metode *arc-length* menggunakan metode *Crisfield* untuk mencegah fluktuasi ukuran langkah selama iterasi

ekuilibrium. Diasumsikan bahwa semua besaran beban dapat dikontrol oleh parameter skalar tunggal (yaitu, *total load factor*).

d. 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.

e. Pembebanan dan Kondisi Batas atau 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*.

f. Ketidaktepatan Geometrik

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

g. 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.

h. 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*.

i. SHELL 181

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*).