

SKRIPSI

ANALISIS PELAT BERPENEGAR DENGAN MEMPERTIMBANGKAN TEBAL PELAT PENEGAR DALAM PENGARUH BEBAN AKSIAL SATU ARAH PADA KAPAL FPSO

Disusun dan diajukan oleh:

**NUR FATIMA DWI PUTRI
D081 19 1043**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

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

Disusun dan diajukan oleh

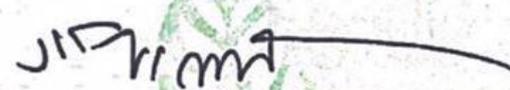
**NUR FATIMA DWI PUTRI
D081 19 1043**

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
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping


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


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

Ketua Program Studi,



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Nur Fatima Dwi Putri
NIM : D081191043
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul "Analisis Pelat Berpenegar dengan Mempertimbangkan Tebal Pelat Penegar 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,



Nur Fatima Dwi Putri

ABSTRAK

Nur Fatima Dwi Putri. *Analisis Pelat Berpenegar dengan Mempertimbangkan Pelat Penegar dalam Pengaruh Beban Aksial Satu Arah pada Kapal FPSO* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Firman Husain**)

Konfigurasi material yang digunakan merupakan aspek terpenting dalam kriteria desain struktur FPSO. Pelat dan pelat penegar yang dikakukan mengalami tekuk lokal akibat beban eksternal saat runtuhnya lambung. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh flens dan ketebalan badan terhadap kekuatan batas pada FPSO dalam hal deformasi pelat yang terletak dari area *bottom* dan *deck* pada kondisi tekan. Pada penelitian ini, ketebalan pelat yang dilekatkan bervariasi sesuai dengan data FPSO dan aturan BKI. Elemen pelat kaku yang terletak di area *bottom* dan *deck* dimodelkan dengan elemen *Tee-Bar* dan *Angle-Bar*. Kondisi yang didukung sederhana diterapkan pada model dan Metode Elemen Hingga non-linier digunakan untuk analisis. Hasil yang diperoleh dengan NLFEM menunjukkan bahwa di bawah tegangan dan kompresi, pelat yang dikakukan dari model *Tee-Bar*, deformasi adalah 1,75 mm dan 1,8 mm. Sedangkan untuk model *Angle-Bar* deformasi adalah 12,4 mm dan 13 mm di bawah tekan.

Kata Kunci: *Angle-Bar*, deformasi, FPSO, pelat, *Tee-Bar*

ABSTRACT

Nur Fatima Dwi Putri. *Strengthened Plate Analysis by Considering the Stiffener Plate in the Effect of One Way Axial Load on FPSO Vessels (supervised by Muhammad Zubair Muis Alie and Firman Husain).*

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 effect of flange and web thickness to the ultimate strength on the FPSO in terms of plate deformation located of the bottom and deck area under compression stages. In this study, the attached plate thickness is varied according to FPSO data and BKI Rule. The stiffened plates element located at the bottom and deck area are modelled by Tee-Bar and Angle-Bar element. The simply supported condition is applied to the model and the non-linear Finite Element Method is used for the analysis. The result obtained by NLFEM shows that under tension and compression, the stiffened plate of Tee-Bar model, the deformations are 1,75 mm and 1,8 mm respectively. While for Angle-Bar model the deformation are 12,4 mm and 13 mm under compressing respectively.

Keywords: Angle-Bar, deformation, FPSO, plate, Tee-Bar

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan.....	4
1.4 Manfaat Penelitian/perancangan.....	4
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pelat	5
2.2 <i>Stiffener</i>	6
2.3 kolom dan Balok	8
2.4 Balok Baja.....	9
2.5 Definisi Defleksi	9
2.6 Defleksi pada Balok	12
2.7 Tebal Pelat Menurut Aturan BKI.....	14
2.8 Tegangan	14
2.9 Regangan	16
2.12 Tegangan Izin Dasar	18
2.13 Tegangan Luluh.....	19
2.14 Tegangan Geser.....	19
2.15 Kapal <i>FPSO</i>	19
2.16 Struktur Lambung Kapal <i>FPSO</i>	21
2.16 Jenis – Jenis Tumpuan	21
2.17 Deformasi	23
2.18 Elastisitas	24
2.19 <i>Finite Element Method</i>	25
2.20 Beban Aksial.....	27
2.21 Beban Lengkung Longitudinal.....	27
2.22 Metode Elemen Hingga	28
2.23 Metode <i>NLFEA</i>	29
2.24 Tekuk Lokal	32
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	34
3.1 Lokasi Penelitian.....	34
3.2 Jenis Penelitian.....	34
3.3 Penyajian Data	34
3.4 Analisa Data	36
3.5 Diagram Alir.....	37
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Objek Penelitian.....	38
4.2 Variasi Model Pelat Berpenegar.....	39
4.3 Hasil Run <i>Analysis</i> pada <i>software</i> ANSYS.....	42
BAB 5 penutup	47
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA.....

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh Pelat	6
Gambar 2.2 Contoh <i>Stiffener</i> pada Pelat	7
Gambar 2.3 Balok Baja.....	9
Gambar 2.4 Keadaan Balok Sebelum dan Sesudah Deformasi	12
Gambar 2.5 Tegangan - Regangan	15
Gambar 2.6 Hubungan antara Tegangan dan Regangan	16
Gambar 2.7 Ilustrasi Kapal FPSO.....	20
Gambar 2.8 Tumpuan Rol	22
Gambar 2.9 Tumpuan Sendi.....	22
Gambar 2.10 Tumpuan Jepit	23
Gambar 2.11 Tegangan Tarik.....	28
Gambar 2.12 Tegangan Tekan.....	28
Gambar 2.13 Ilustrasi Tekuk local pada <i>Web</i> dan <i>Flange</i>	33
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian	35
Gambar 3.2 Setengah Midship Kapal FPSO.....	36
Gambar 3.3 Model Pelat Berpenegar.....	37
Gambar 4.1 Setengah <i>Midship</i> Kapal FPSO.....	38
Gambar 4.2 Model <i>Tee-Bar</i> (Analisis Data, 2023).....	39
Gambar 4.3 Model <i>Angle-Bar</i> (Analisis Data, 2023).....	40
Gambar 4.4 Dimensi Model Penelitian (Analisis Data, 2023)	40
Gambar 4.6 Kondisi Batas Model <i>Angle-Bar</i>	41
Gambar 4.7 Pembebanan pada Model <i>Tee-Bar</i>	42
Gambar 4.8 Pembebanan pada Model <i>Angle-Bar</i>	42
Gambar 4.9 Deformasi pada Model 1 <i>Tee-Bar</i> (Analisis Data, 2023).....	43
Gambar 4.10 Deformasi pada Model 1 <i>Angle-Bar</i> (Analisis Data, 2023).....	44
Gambar 4.11 Deformasi Model 2 <i>Tee-Bar</i>	44
Gambar 4.12 Deformasi Model 2 <i>Angle-Bar</i>	45
Gambar 4.13 Perbandingan Deformasi Pelat Berpenegar Model 1 dan Model 2 <i>Angle-Bar</i> (Analisis Data, 2023).....	46
Gambar 4.14 Perbandingan Deformasi Pelat Berpenegar Model 1 dan Model 2 <i>Tee-Bar</i> (Analisis Data, 2023).....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Modulus <i>Young</i> pada Material.....	18
Tabel 3.1 Ukuran <i>Stiffener</i>	35
Tabel 4.1 Dimensi Pelat Berpenegar	39

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
B	Lebar Kapal
L	Panjang Kapal
D	Tinggi Kapal
Cb	Koefisien Blok
A	Luas Penampang
w	Beban
ΔL	Pertambahan Panjang
I	Inersia Penampang
M	Momen Lentur
F	Gaya
F _{tr}	Gaya Tarik
E	Modulus elastisitas (modulus young)
σ	Tegangan
ε	Regangan

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, puji dan syukur kehadiran ALLAH SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dan atas kehendak-Nya lah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat diatasi. Selawat 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 TEBAL
PELAT PENEGAR DALAM PENGARUH BEBAN AKSIAL SATU ARAH PADA
KAPAL FPSO”

Keberhasilan penyusunan skripsi ini tidak luput dari bantuan, bimbingan serta doa dari berbagai pihak sehingga skripsi ini terselesaikan dengan baik. Untuk itu dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan secara tulus dan ikhlas kepada yang terhormat:

1. Kedua orangtua Bapak **Akhmad Yani Siri** dan Ibu **Jumriah Djaria** yang selalu memberikan doa, dukungan dan semangat serta membantu dan membimbing.
2. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing I sekaligus kepala 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.
3. Bapak **Dr. Eng. Firman Husain, S.T., MT.** selaku dosen pembimbing II yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan 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. Saudari saya **Nur Restu Paradita** dan **Nur Safira Azzahrah** yang selalu mendoakan, menghibur dan membantu selama kuliah.
7. Mahasiswa **Teknik Kelautan 2019** yang selalu memberi motivasi, dukungan dan bantuan serta pengalaman kita lalui bersama dalam suka dan duka.
8. Teman-teman **KKN UNHAS GEL 109 Limbong** yang telah memberikan pengalaman yang berharga dalam masa pengabdian KKN.
9. Teman-teman **Labo OSAREL 2019** yang selalu membantu, menginspirasi, dan berdiskusi serta berbagi ilmu selama penulis berada di Labo OSAREL.
10. Teman-teman yaitu **Caca, Rati, Santa, Dea, Geboy, Sry, Amma, Nurul, dan Lala** yang selalu membantu, memberi dukungan dan semangat serta menghibur selama masa perkuliahan ini.
11. Kepada **Raihan Firdaus Sutopo** yang senantiasa meluangkan waktu mendengarkan keluh kesah penulis, memberi dukungan, motivasi, serta menemani penulis menyelesaikan penelitian ini.
12. 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, 31 Juli 2023

Nur Fatima Dwi Putri

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pelat adalah bagian yang sangat penting dalam pembuatan kapal dan struktur lepas pantai. Elemen pelat dan pelat yang kaku berfungsi sebagai unit dasar lambung struktur. Struktur pelat lokal mengalami kegagalan tekuk lokal yang dibebani beban eksternal saat lambung kapal mengalami *collapse*. Ketika lambung kapal mengalami momen lentur vertical, struktur dek dan pelat bawah mengalami beban Tarik dan tekan. Struktur dek atau pelat bawah 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 (Leo Ao *et al.*, 2020).

Stiffener merupakan 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. 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 Virgil 2009).

Pemodelan pelat berpenegar horizontal dan vertikal dengan elemen kulit dapat menghasilkan keseluruhan model elemen kulit, yang dapat memprediksi tekanan primer dan sekunder, dan bahkan tekanan tersier pada beberapa area yang diminati (Servis *et al.*, 2003).

Sistem *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) telah menjadi metode utama yang digunakan pada daerah produksi minyak dan gas lepas pantai di seluruh dunia termasuk FPSO milik Husky Oil (Madura) Ltd yang beroperasi di laut Jawa dengan kapasitas sebesar 370.000 BOPD (Husky Oil, 2017). Pembangunan pertama dan FPSO Laut Utara juga diperkenalkan pada tahun itu (Ronalds and Lim, 1999). Laut Utara dan Brazil saat ini merupakan pasar utama FPSO. Terlepas dari kehadiran mereka di daerah penghasil minyak lepas pantai dunia, tidak ada satu pun FPSO di Teluk Meksiko pada tahun 2004. Pemerintah AS baru saja menyetujui penggunaannya di Teluk Meksiko, namun pada tahun 2004 tidak ada perusahaan minyak yang membuat proposal untuk memasangnya.

Selama kapal berlayar, kecelakaan bisa saja dapat terjadi. Untuk mencegah kecelakaan yang mungkin terjadi dan menyebabkan polusi laut, total kehilangan kapal atau nyawa yang ada di atas kapal, Departemen Teknik Kelautan bertujuan

untuk merancang struktur yang cukup kuat dan mampu menahan beban. Oleh karena itu, sangat penting untuk menganalisis struktur pelat yang terkena beban untuk desain struktur kapal yang aman. 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.

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 (Badran, Saddek dan Leheta, 2013).

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 (Xu & Soares, 2013).

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 (Paik *et. al*, 1998).

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.

Penilaian integritas anjungan lepas pantai dapat digunakan untuk memastikan kesesuaian struktur dengan tujuan kapal tersebut, mengingat kondisi operasi yang berkaitan dengan lingkungan laut yang parah, dapat menyebabkan kerusakan akibat kelelahan dan beban yang ekstrem. Seringkali, struktur FPSO diperlukan untuk akomodasi pada kondisi operasional yang baru, oleh karena itu

beban dek juga meningkat. Bangunan apung cenderung mengalami kelelahan karena beban gelombang yang bersifat siklis yang terjadi pada struktur.

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

Finite Element Method atau metode elemen hingga dapat menjadi metode yang ampuh untuk melakukan analisis kekuatan lambung kapal setelah terjadi kerusakan. Banyak peneliti telah melakukan penelitian tentang perhitungan kekuatan *longitudinal* residu atau kekuatan *longitudinal* kapal dalam kondisi utuh atau rusak dengan menggunakan analisis FEM nonlinear. (Vu Van T, et. Al, 2018) Metode elemen hingga nonlinier (NFEM) memungkinkan pemodelan struktur secara rinci dan telah dikenal sejak lama. Namun, kekuatan pemrosesan yang tersedia saat itu tidak memungkinkan metode ini digunakan secara luas.

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

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.

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:

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

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Tujuan dari penelitian yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

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

1.4 Manfaat Penelitian/perancangan

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. Untuk peneliti, dapat memberikan pengetahuan cara menganalisis pelat berpenegar dengan mempertimbangkan tebal pelat penegar dalam pengaruh beban aksial satu arah dan sebagai tugas akhir Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan

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

1. Analisis dilakukan pada pelat berpenegar.
2. Hanya mempertimbangkan tebal pelat penegar dalam pengaruh beban aksial satu arah.
3. Analisis dilakukan dengan metode elemen hingga.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pelat

Pelat kapal merupakan pelat yang umumnya diperuntukkan untuk bahan pembuatan konstruksi kapal atau bodi kapal disamping. Plat 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 (Rasyidin, 2019).

Pelat baja untuk kapal mempunyai kelebihan pada tingkat ketahanan terhadap korosi air laut. Selain mempunyai kekuatan tarik yang lebih baik, pelat kapal mempunyai kadar karbon sebagai pelindung dari korosi (Rasyidin 2019).

Pelat atau *slab* adalah elemen bidang tipis yang menahan beban – beban transversal melalui aksi lentur ke masing-masing tumpuan. Hal ini terjadi karena pelat atau *slab* merupakan elemen struktur penahan beban vertical yang rata dan dapat dibuat dengan luasan yang cukup besar. Beban yang bekerja pada pelat umumnya diperhitungkan terhadap beban gravitasi (beban mati atau beban hidup). Beban tersebut mengakibatkan terjadi momen lentur seperti pada model balok (Timoshenko and Hindarko, 1992).

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.

Berdasarkan aksi strukturalnya, pelat dibedakan menjadi empat (Szilard, 1989).

1. Pelat kaku; merupakan pelat tipis yang memiliki ketegaran lentur (flexural rigidity), dan memikul beban dengan aksi dua dimensi, terutama dengan momen dalam (lentur dan puntir) dan gaya geser transversal, yang umumnya sama dengan balok pelat yang dimaksud dalam bidang tekuk adalah pelat kaku, kecuali jika dinyatakan lain.
2. Membrane; merupakan pelat tipis tanpa ketegaran lentur dan memikul beban lateral dengan gaya geser aksial dan gaya geser terpusat. Aksi pemikul beban ini dapat didekati dengan jaringan kabel yang tegang karena ketebalannya yang sangat tipis membuat daya tahan momennya dapat diabaikan.

3. Pelat fleksibel; merupakan gabungan pelat kaku dan membran dan memikul beban luar dengan gabungan aksi momen dalam, gaya geser transversal dan gaya geser terpusat, serta gaya aksial struktur ini sering dipakai dalam industri ruang angkasa karena perbandingan berat dengan bebannya menguntungkan.
4. Pelat tebal; merupakan pelat yang kondisi tegangan dalamnya menyerupai kondisi tiga dimensi.

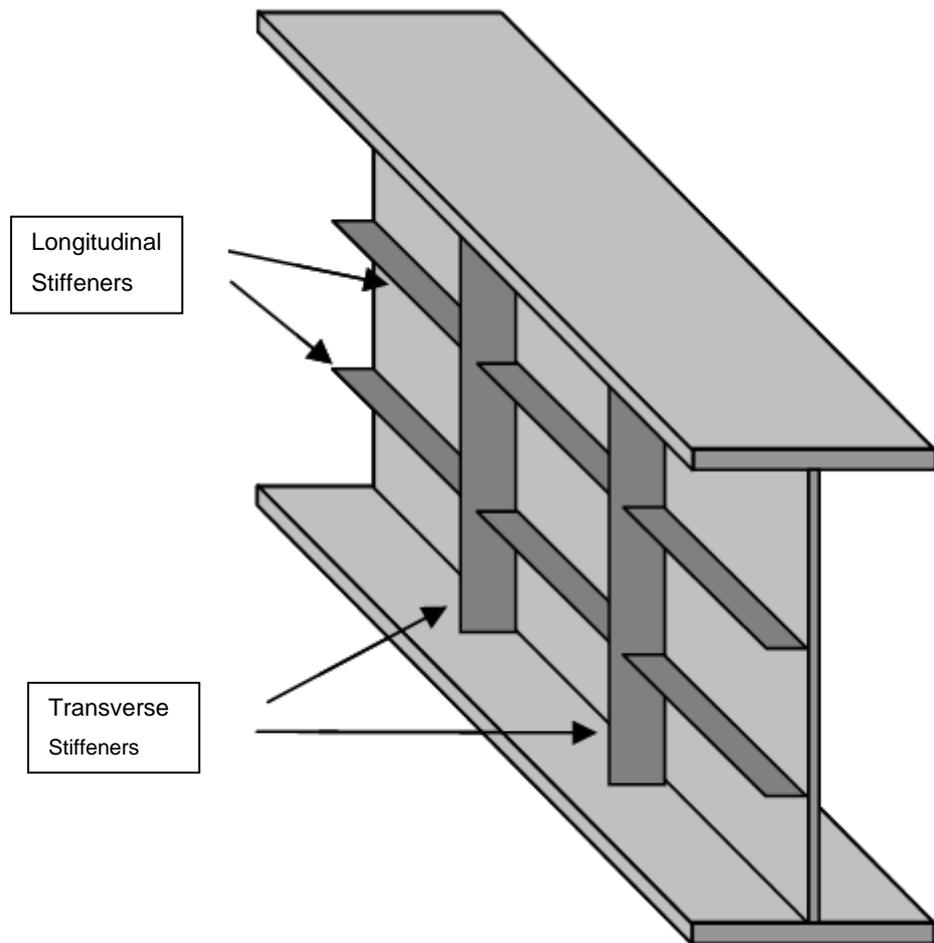


Gambar 2.1 Contoh Pelat

(sumber: <https://www.google.com/imgres?imgurl=http%>)

2.2 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. *Stiffener* pada pelat terdiri dari dua bagian yaitu *Longitudinal stiffeners* dan *transverse stiffeners* seperti yang terlihat pada Gambar 2.2. batas untuk kondisi ini antara lain leleh lokal pada web (*web local yielding*), *web crippling* dan 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 Virgil, 2009).



Gambar 2.2 Contoh *Stiffener* pada Pelat

(<https://www.structuralguide.com/plate-girder/>, 2016)

Stiffener dibuat untuk membantu badan balok menciptakan gari-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 (John *et al*, 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 and imron, 2012).

2.3 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 kolo 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.

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 teristisan 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.

2.4 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* (Setiawan, 2008).



Gambar 2.3 Balok Baja

(sumber: <http://id.yzpipes.com/structural-steel/steel-beams.html>)

2.5 Definisi Defleksi

Defleksi adalah perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertikal yang diberikan pada balok atau batang. 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. 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 (Singh, 1979). 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).

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:

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

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

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

$$\delta_{izin} \leq \frac{L}{240} \text{ untuk } bottom \quad (2.6)$$

Sistem struktur yang diletakkan horizontal dan yang terutama di peruntukkan memikul beban lateral, yaitu beban yang bekerja tegak lurus sumbu aksial batang (Binsar 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 relative 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 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.

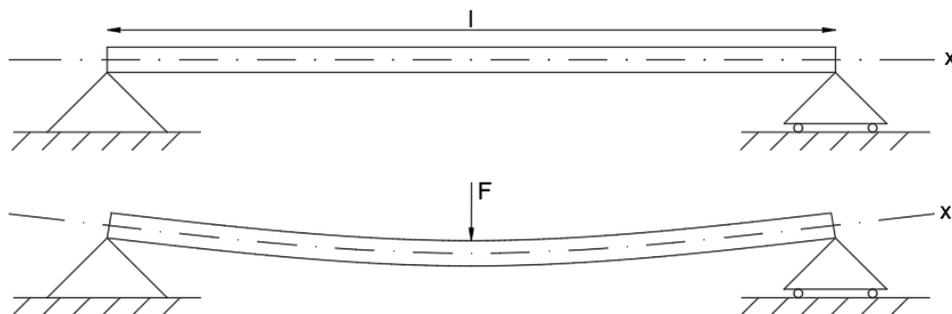
4. Jenis beban yang diberikan pada struktur

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 (Hariandja, 1996).

2.6 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 2.3 memperlihatkan balok pada posisi awal sebelum terjadi deformasi dan balok dalam konfigurasi terdeformasi yang diasumsikan akibat aksi pembebanan.



Gambar 2.4 Keadaan Balok Sebelum dan Sesudah 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, 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*) (Papov, 1993).

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 belebihi batas yang telah diizinkan (Papov, 1993).

Sistem struktur yang diletakkan horizontal dan yang terutama di peruntukan memikul beban lateral, yaitu beban yang bekerja tegak lurus sumbu aksial struktur (Hariandja, 1996). 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 batang

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 batangnya maka defleksi yang terjadi pun semakin kecil

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).

2.7 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 industry 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 tidak boleh kurang dari:

$$t_B = 1,21 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{P_B}{\sigma_{pl}}} + t_k \quad [\text{mm}] \quad (2.7)$$

2.8 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 A M, 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:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

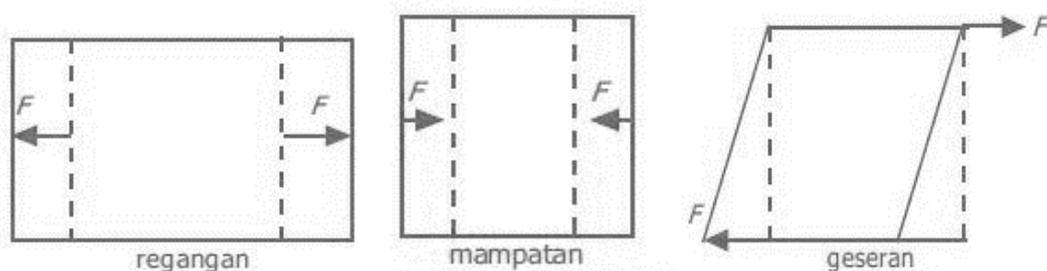
Dimana :

σ = tegangan (N/mm²)

F = gaya (N)

A = luas penampang (mm²)

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm². Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.5 Tegangan - Regangan

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:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right]} \quad (2.10)$$

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, 2020).

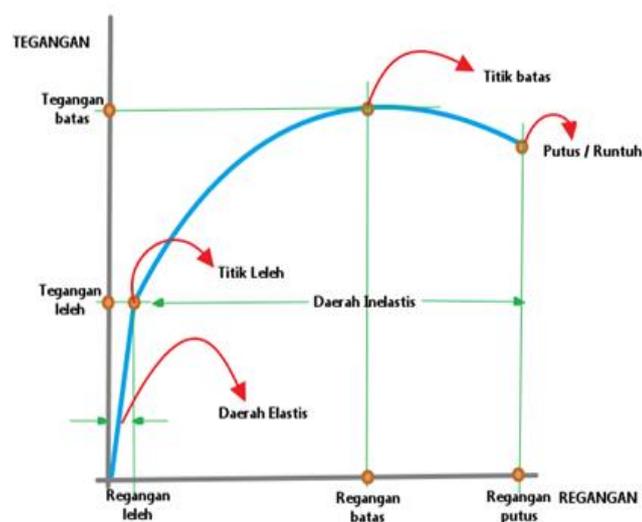
2.9 Regangan

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.11)$$

Dimana :

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



Gambar 2.6 Hubungan antara Tegangan dan Regangan

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.6, 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:

$$E = \frac{F L}{A \Delta L} \quad (2.12)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

Dimana :

E = *Modulus Young* (N/mm²)

F = gaya (N)

A = Luas Penampang (mm²)

L = panjang mula-mula (mm)

ΔL = pertambahan panjang/pendek (mm)

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

Tabel 2.1 Modulus *Young* pada Material

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

2.10 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.

2.11 Tegangan Luluh

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

2.12 Tegangan Geser

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 :

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Dimana :

τ = tegangan geser (N/mm^2)

F = gaya geser atau gaya lintang (N)

A = Luas penampang (mm^2)

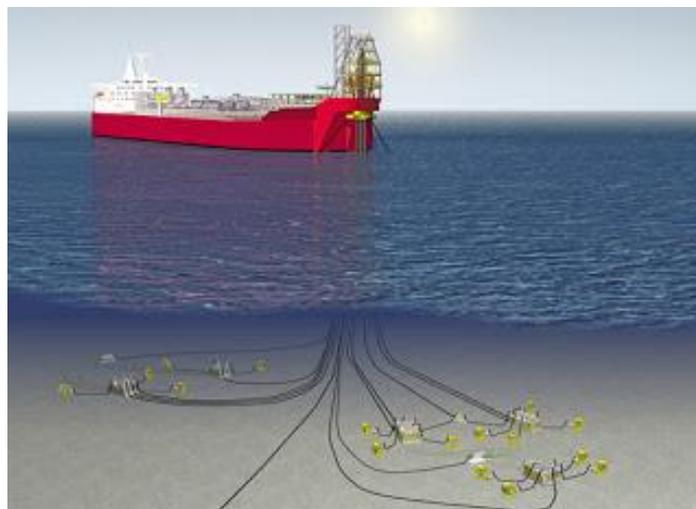
2.13 Kapal FPSO

FPSO merupakan bangunan pengeboran dan penyimpanan minyak lepas pantai yang bersifat portable. 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 (Paik J, 2007).

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.

FPSO umumnya berbentuk kapal floaters dengan persediaan penyimpanan dan pembongkaran minyak secara bersamaan. FPSO mungkin dirancang untuk pengeringan 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.



Gambar 2.7 Ilustrasi Kapal FPSO

(Sumber: <https://www.panmaritime.net/uncategorized/perusahaan-galangan-kapal-brasfels-raih-proyek-fpsa-dari-modec/>, 2022)

Lambung FPSO berfungsi seperti balok dan deformasi di bidang vertical (distribusi bobot dan *buoyancy* 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 tangka penyimpanan minyak mentah ditambah dengan gelombang yang mana panjang kapal dengan dengan palangnya ditengah kapal.

2.14 Struktur Lambung Kapal 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.

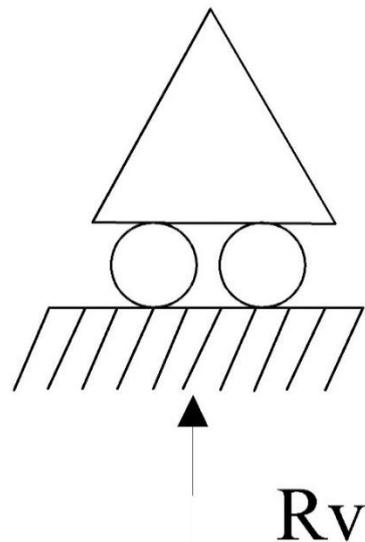
FPSO tidak diharuskan untuk bergerak maju, akibatnya resistensi tidak menjadi masalah. Namun, dalam mode *weathervaning*, rasio kelangsingan lambung (rasio panjang terhadap balok) berfungsi untuk menyajikan daerah beban lingkungan yang ada dan membantu gerakan alami pada pembebanan. Rasio kelangsingan 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*.

2.15 Jenis – Jenis Tumpuan

Untuk merencanakan pelat beton bertulang, disamping harus memperhatikan beban dan ukuran pelat juga perlu diperhatikan jenis tumpuan tepi.

1. Tumpuan Rol

Rol merupakan tumpuan yang hanyadapat menerima gaya reaksi vertikal. Alat ini mampu melawan gaya-gaya dalam suatu garis aksi yang spesifik. Penghubung yang terlihat pada gambar dibawah ini dapat melawan gaya hanya dalam arah AB rol. Pada Gambar 2.7 hanya dapat melawan beban vertical. Sedang rol-rol hanya dapat melawan suatu tegak lurus pada bidang cp.

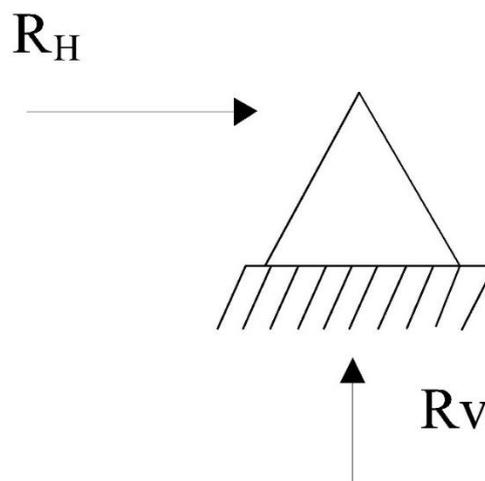


Gambar 2.8 Tumpuan Rol

(sumber: <http://www.primamoo.com/2018/04/mengenal-struktur-statis-tak-tentukan.html> , 2018)

2. Tumpuan Sendi

Sendi (engsel) merupakan tumpuan yang dapat menerima gaya reaksi vertikal dan gaya reaksi horizontal. Tumpuan yang berpasak mampu melawan gaya yang bekerja dalam setiap arah dari bidang. Jadi pada umumnya reaksi pada suatu tumpuan seperti ini mempunyai dua komponen yang satu dalam arah horizontal dan yang lainnya dalam arah vertical. Tidak seperti pada perbandingan tumpuan rol atau penghubung, maka perbandingan antara komponen-komponen reaksi pada tumpuan yang terpasak tidaklah tetap seperti yang terlihat pada Gambar 2.9. Untuk menentukan kedua komponen ini, dua buah komponen statika harus digunakan.

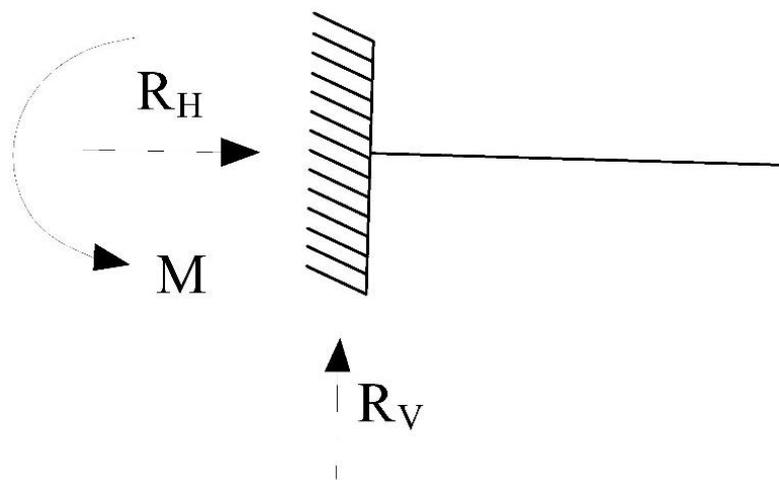


Gambar 2.9 Tumpuan Sendi

(sumber: <http://www.primamoo.com/2018/04/mengenal-struktur-statis-tak-tentu-dan.html> , 2018)

3. Tumpuan Jepit

Jepit merupakan tumpuan yang dapat menerima gaya reaksi vertical, gaya reaksi horizontal dan momen akibat jepitan dua penampang. Tumpuan jepit ini mampu melawan gaya dalam setiap arah dan juga mampu melawan suatu kopel atau momen seperti yang terlihat pada Gambar 2.10. Secara fisik, tumpuan ini diperoleh dengan membangun sebuah balok ke dalam suatu dinding batu bata. Mengecornya ke dalam beton atau mengelas ke dalam bangunan utama. Suatu komponen gaya dan sebuah momen.



Gambar 2.10 Tumpuan Jepit
(sumber: <https://www.teknikpemesinan.com/2020/01> , 2020)

2.16 Deformasi

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:

$$\delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.26)$$

Dimana:

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

2.17 Elastisitas

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 pertambahan 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 pertambahan panjang baik pada karet gelang ataupun besi pegas. Besarnya pertambahan 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-elastisitasannya. Ini dinyatakan dengan rumus :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \text{ atau } \sigma = E \times \varepsilon \quad (2.27)$$

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.

2.18 *Finite Element Method*

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, perpindahan panas, elektromagnet, 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*.

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).

Secara potensial, hasil yang paling akurat mengenai penilaian *ultimate strength* dapat diperoleh dengan menggunakan analisis NLFEM dari keseluruhan model struktur yang didiskritkan, yang memungkinkan simulasi dan evaluasi respon struktur *non-linear* untuk berbagai tingkat pembebanan. Namun, kualitas hasil yang diperoleh sangat bergantung pada kepatutan teknik idealisasi struktur yang digunakan (geometri, sifat material, ketidaksempurnaan struktural awal); kuakuratan diskritisasi (digunakan jenis elemen hingga, kepadatan *mesh*); dan sejauh mana model yang dianalisis (model struktur 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).

Sebagian besar struktur laut dan lepas pantai menunjukkan perilaku nonlinier sebelum mencapai kapasitas dukung beban maksimumnya (kekuatan tertinggi) setelah itu terjadi keruntuhan progresif dan kegagalan total. Ketika menganalisis berbagai struktur, termasuk struktur laut dan lepas pantai, biasanya untuk memplot hubungan antara beban dominan yang bekerja pada struktur dan ukuran defleksi struktur yang dipilih dengan tepat (misalnya, gaya tekan pada panel yang berpenegar yang diplot terhadap perpindahan aksial rata-rata dari tepi panel yang dibebani ke arah beban yang diterapkan). Kurva ini biasanya disebut kurva *load-displacement* ($P-\Delta$) or *load-shortening curves* (Kitarović & Andrić, 2014).

2.19 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 kompone 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 dna regangan internal.

2.20 Beban Lengkung Longitudinal

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 :

$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (2.28)$$

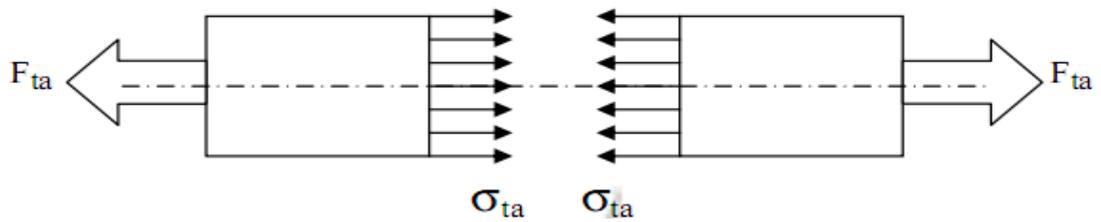
Dengan

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

F_{tr} = gaya tarik (N)

A = Luas penampang (mm²)

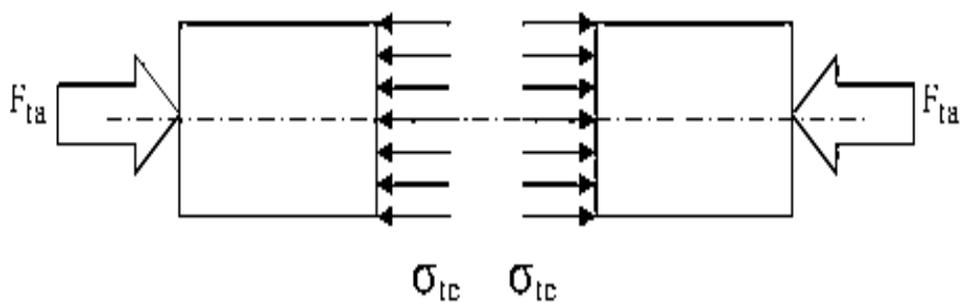
Gaya tarik aksial yang menghasilkan tegangan tarik dapat dilihat pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Tegangan Tarik

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} . Selanjutnya dapat dinyatakan dengan rumus:

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (2.29)$$



Gambar 2.12 Tegangan Tekan

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 budag yang tidak beraturan (kontinum) didiskretisasi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil (Elemen Hingga) yang bentuknya lebih teratur dari bentuk semula.

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 NLFEM

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-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 (Kitarovic & Andric, 2014).

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 (pemotongan, *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.

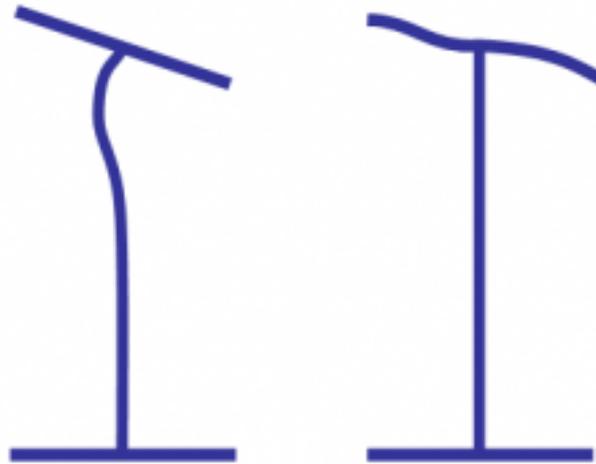
SHELL 181 sangat cocok untuk linear, rotasi besar, dan/atau aplikasi nonlinear strain besar. Perubahan ketebalan *shell* dicatat pada nonlinear analisis. Terdapat efek pengikat (beban kekakuan) dari tekanan terdistribusi.

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

2.23 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. 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). 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 2.13 Ilustrasi Tekuk lokal pada *Web* dan *Flange*

(sumber: Olivia et al, 2016)

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).