

SKRIPSI

**ANALISIS RESPON KONSTRUKSI *CELLAR DECK* PADA STRUKTUR *JACKET*
AKIBAT PENGARUH BEBAN INSTALASI**

Disusun dan diajukan oleh

FITRI RAMADANI RAHIM

D081171313



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2021**

**ANALISIS RESPON KONSTRUKSI *CELLAR DECK* PADA STRUKTUR *JACKET*
AKIBAT PENGARUH BEBAN INSTALASI**

SKRIPSI

*Diajukan Guna Memenuhi Persyaratan Untuk Meraih Gelar Strata 1 (S1)
Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin*



OLEH:

FITRI RAMADANI RAHIM

D081171313

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2021

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS RESPON KONSTRUKSI *CELLAR DECK* PADA STRUKTUR
JACKET AKIBAT PENGARUH BEBAN INSTALASI**

Disusun dan diajukan oleh

**FITRI RAMADANI RAHIM
D081171313**


Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Studi Sarjana Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 27 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 di bawah ini ;

Nama : Fitri Ramadani Rahim
NIM : D081171313
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

“Analisis Respon Konstruksi *Cellar Deck* Pada Struktur
Jacket Akibat Pengaruh Beban Instalasi”

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, 17 September 2021

Yang Menyatakan,



Fitri Ramadani Rahim

ABSTRAK

FITRI RAMADANI RAHIM. *Analisis Respon Konstruksi Cellar Deck Pada Struktur Jacket Akibat Pengaruh Beban Instalasi* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Juswan**).

Analisis respon konstruksi *cellar deck* merupakan salah satu aspek penting dalam suatu struktur *jacket* untuk menentukan kemampuan geladak dalam menjalankan fungsinya. Terjadinya deformasi dapat mempengaruhi integritas suatu struktur. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui respon struktur berupa tegangan dan deformasi pada *cellar deck* struktur *jacket* yang disebabkan oleh beban instalasi. Analisis respon pada struktur *cellar deck* dilakukan dengan menggunakan metode *Nonlinear Finite Element Analysis (NLFEA)*. Kondisi batas yang diterapkan pada kaki *cellar deck* diasumsikan jepit. Selanjutnya, uji pembebanan disimulasikan pada kondisi beban awal, kemudian kondisi beban 100% dan 200%. Hasil analisis berupa gambar distribusi tegangan pada komponen sumbu Z, tegangan *von mises* dan deformasi. Hasil penelitian menunjukkan respon struktur akibat beban instalasi memiliki pengaruh yang kecil karena nilai tegangan dan deformasi yang dihasilkan sangat kecil dari batas tegangan luluh dan defleksi maksimal. Analisa respon struktur *cellar deck* dengan menggunakan metode NLFEA menunjukkan bahwa hasil tegangan maksimum yang bekerja setelah penambahan beban 200% dari beban instalasi awal adalah sebesar $0,617 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ dan tegangan *von mises* sebesar $0,001227 \text{ N/mm}^2$ dengan deformasi sebesar $0,797 \times 10^{-3} \text{ mm}$.

Kata kunci: Beban Instalasi, *Cellar Deck*, Respon Struktur.

ABSTRACT

FITRI RAMADANI RAHIM. *Response Analysis of Cellar Deck Construction on Jacket Structure Due to the Effect of Installation Load (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Juswan**)*

Response analysis of the cellar deck construction is one of the important aspects in a jacket structure to determine the ability of the deck to carry out its functions. The occurrence of deformation can affect the integrity of a structure. This study aims to determine structure response in the form of stress and deformation on the cellar deck of the jacket structure caused by the installation load. Response analysis on the cellar deck structure was carried out using the Nonlinear Finite Element Analysis (NLFEA) method. The boundary conditions applied to the leg of the cellar deck are assumed to be clamped. Furthermore, the loading test is simulated at the initial load conditions, followed by 100% and 200% of load condition. The results obtained expressed in term of the stress distribution on the Z-axis components, von mises stresses and deformations. The results showed that the structural response due to the installation load gave a small influence because the stress and deformation values produced were very small compared to the yield stress and maximum deflection limits. Response analysis of the cellar deck structure using the NLFEA method shows that the maximum stress acting after the addition of 200% load from the initial installation load is $0.617 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ and the von mises stress is 0.001227 N/mm^2 with a deformation of $0.797 \times 10^{-3} \text{ mm}$.

Keywords: Installation Load, Cellar Deck, Structure Response.

PRAKATA

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, puji dan syukur kehadirat 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 kehadirat Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“ANALISIS RESPON KONSTRUKSI *CELLAR DECK* PADA STRUKTUR *JACKET* AKIBAT PENGARUH BEBAN INSTALASI”

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 **Abdul Rahim** dan Ibu **Sitti Nurahmi** yang selalu memberikan doa, dukungan dan semangat serta membantu dan membimbing dari segi moril dan materiil selama berkuliah di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
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 **Ir. Juswan, 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. Bapak **Dr. Chairul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan sekaligus selaku penasehat akademik (PA) yang telah membimbing selama proses perkuliahan.
5. **Dosen–Dosen 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. Adik-adik saya **ST. Amalia Rahim** dan **M. Taufik Rahim** yang selalu mendoakan, menghibur dan membantu selama kuliah.
8. Teman-teman mahasiswa **Teknik Kelautan 2017** khususnya Mu'min, Windi, Adri, Astika, Ariska, Rachmi, Tami, Faniyang, Citra, Nju, Bela, Nusul, Dyo, Alfian, Teguh, Imam, Baso dan Rahmat yang selalu memberi motivasi, dukungan dan bantuan serta pengalaman kita lalui bersama dalam suka dan duka.
9. Teman-teman **Peer Mentor 2017** dan **PERIZCOPE CREW** atas 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. Teman-teman **KKN UNHAS GEL 105 BGMM** yang telah memberikan pengalaman yang berharga dalam masa pengabdian KKN.
11. Teman-teman **Labo OSAREL 2017** dan kak Salsabila Aski, ST yang selalu membantu, menginspirasi, dan berdiskusi serta berbagi ilmu selama penulis berada di Labo OSAREL.
12. Teman-teman yaitu **Nira S.S, Nia** dan **Nadia** yang selalu membantu, memberi dukungan dan semangat serta menghibur selama masa perkuliahan ini.
13. Teman-teman **Berina** yaitu **Bela** dan **Nju** yang selalu mendukung, memberi semangat dan bekerjasama dalam berbisnis.

14. 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, September 2021

Fitri Ramadani Rahim

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR NOTASI	xi
DAFTAR ISTILAH	xii
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	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Bangunan Lepas Pantai	4
2.2 Sistem Bangunan Lepas Pantai	4
2.3 <i>Fixed Jacket Platfrom</i>	7
2.4 <i>Topside</i>	9
2.5 Pembebanan Struktur	16
2.6 Uji Pembebanan (<i>Loading Test</i>)	19
2.7 Tegangan	19
2.8 Regangan	23
2.9 Diagram Tegangan-Regangan	24
2.10 Tegangan <i>Von Mises</i>	26
2.11 Deformasi	28
2.12 Metode NLFEA	29
BAB 3 METODE PENELITIAN	33
3.1 Jenis Penelitian	33
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	33

3.3 Penyajian Data	33
3.4 Metode Pengambilan Data.....	36
3.5 Alur Penelitian	36
3.6 Diagram Alir	38
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Objek Penelitian.....	39
4.2 Mode Kegagalan	40
4.3 Pembebanan	40
4.4 Analisis Respon Struktur	40
BAB 5 PENUTUP	54
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. <i>Jacket Platform</i>	5
Gambar 2. 2 <i>Tower Platform</i>	5
Gambar 2. 3 <i>Concrete Gravity Platform</i>	6
Gambar 2. 4 <i>Steel Gravity Platform</i>	6
Gambar 2. 5 <i>Semi-submersible</i>	7
Gambar 2. 6 Elemen struktural utama dari steel <i>Jacket platform</i>	8
Gambar 2. 7 Utilitas dan peralatan pada <i>topside platform</i>	10
Gambar 2. 8 Topside dengan multi-level deck yang terdiri dari modul	11
Gambar 2. 9 Modul <i>topside platform</i> Miller.....	12
Gambar 2. 10 <i>Integrated topsides</i> untuk instalasi <i>floatover</i> di Malaysia.....	13
Gambar 2. 11 Elemen dasar struktur geladak	14
Gambar 2. 12 Struktur grid dasar untuk <i>Jacket-based deck</i>	15
Gambar 2. 13 Gaya dan Beban yang bekerja pada struktur.....	18
Gambar 2. 14 Momen Lentur.....	20
Gambar 2. 15 Sifat Tegangan pada Balok	21
Gambar 2. 16 Gaya Geser	22
Gambar 2. 17 Kurva Tegangan-Regangan Baja Struktur	24
Gambar 2. 18 <i>Von Mises</i> Stress pada Penampang	27
Gambar 3. 1 <i>Front View Kambuna Wellhead Platform</i>	34
Gambar 3. 2 Pemodelan <i>Cellar Deck</i>	37
Gambar 4. 1 Model Konstruksi Objek Penelitian	39
Gambar 4. 2 Deformasi <i>Cellar Deck</i> dengan Beban Awal	42
Gambar 4. 3 Deformasi <i>Cellar Deck</i> dengan Penambahan Beban 100%	44
Gambar 4. 4 Deformasi <i>Cellar Deck</i> dengan Penambahan Beban 200%	45
Gambar 4. 5 Distribusi Tegangan Komponen Sumbu Z terhadap Beban Awal. ...	47
Gambar 4. 6 Distribusi Tegangan Komponen Sumbu Z terhadap Penambahan Beban 100%.	48
Gambar 4. 7 Distribusi Tegangan Komponen Sumbu Z terhadap Penambahan Beban 200%.	49
Gambar 4. 8 Distribusi Tegangan <i>Von Mises</i> terhadap Beban Awal.....	51

Gambar 4. 9 Distribusi Tegangan <i>Von Mises</i> terhadap Penambahan Beban 100%	52
Gambar 4. 10 Distribusi Tegangan <i>Von Mises</i> terhadap Penambahan Beban 200%	53

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 <i>List Equipment (Cellar Deck)</i>	35
Tabel 3. 2 <i>Deck leg and Pile Properties Summary</i>	36
Tabel 4. 1 Variasi Pembebanan Struktur	40
Tabel 4. 2 Rekapitulasi nilai deformasi	46
Tabel 4. 3 Rekapitulasi nilai tegangan	50

DAFTAR NOTASI

σ	= Tegangan	(N/mm ²)
P	= Beban	(N)
A	= Luas Penampang	(mm ²)
M	= Momen Lentur	(Nmm)
I	= Inersia Penampang	(mm ⁴)
f	= Gaya Lentur	(N)
y	= Jarak Serat dari sumbu netral	(mm)
E	= Modulus elastisitas (modulus young)	(N/mm ²)
R	= Jari-jari kelengkungan	(mm)
τ	= Tegangan Geser	(N/mm ²)
ε	= Regangan	
L	= Panjang Balok	(mm)
dl	= Pertambahan Panjang	(mm)
n	= koefisien <i>Ramberg-Osgood</i>	
σ_{max}	= Tegangan Maksimum	(N/mm ²)
σ_{yield}	= Tegangan Luluh	(N/mm ²)

DAFTAR ISTILAH

<i>ANSYS</i>	: <i>Software</i> yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
Deformasi	:Perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah objek karena pengaruh gaya
Defleksi	:Perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertikal yang diberikan pada balok atau batang
FEM	: <i>Finite Elemen Methode</i>
<i>Meshing</i>	:Membagi Struktur menjadi bagian-bagian kecil
Momen	:Sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi.
NLFEA	: <i>Nonlinear Finite Element Analysis</i>
<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.
Modulus Elastisitas	:Sebuah ukuran yang digunakan untuk merepresentasikan kekakuan suatu bahan.
<i>Yield Strength</i>	:Tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah bahan ketika diregangkan atau ditarik, sebelum bahan tersebut luluh

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi bumi berupa minyak dan gas bumi merupakan salah satu kebutuhan manusia. Di Indonesia bahan bakar minyak terutama untuk keperluan sektor rumah tangga, pengangkutan dan industri. Dengan kemajuan teknologi, kegiatan eksplorasi dan eksploitasi energi bumi dapat dilakukan di darat/laut. Anjungan Lepas Pantai (*platform*) merupakan konstruksi yang digunakan untuk eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon.

Salah satu tipe anjungan lepas pantai yang banyak digunakan adalah tipe *fixed Jacket*, yaitu struktur rangka baja yang terdiri dari kaki struktur dan rangka penunjang (*brace*) yang dikonstruksikan dengan berbagai pola perangkaan. *Jacket* berfungsi untuk melindungi *pile* agar tetap pada posisinya, menyokong geladak dan melindungi konduktor serta menyokong substruktur lainnya seperti *boat landing*, *barge bumper*, dan lain-lain.

Struktur *Jacket* memegang peranan penting pada sebuah bangunan lepas pantai karena hampir seluruh beban yang bekerja pada sebuah bangunan lepas pantai baik itu beban vertikal maupun beban horizontal didistribusikan pada struktur ini. Klasifikasi beban pada struktur *Jacket* menurut API RP 2A, yaitu: Beban Mati (*Dead Loads*), Beban Hidup (*Live Loads*), Beban Lingkungan (*Environmental Loads*), Beban Konstruksi (*Construction Loads*), Beban Pemandangan dan Pemasangan Ulang (*Removal and Reinstallation Loads*) dan Beban Dinamis (*Dynamic Loads*).

Beban vertikal yang dimaksud adalah beban yang berasal dari *topside*. *Topside* struktur lepas pantai terdiri dari beberapa geladak/*deck*, seperti *main deck*, *cellar deck*, *mezzanine deck*, *living quarter*, dan *helideck*. Dimana fungsi dari geladak-geladak tersebut yaitu untuk menyediakan ruang untuk memuat fasilitas dan peralatan pengeboran dan produksi.

Elemen-elemen utama penyusun konstruksi geladak yang berpengaruh pada keamanan suatu konstruksi adalah balok geladak dan pelat geladak. Melalui

elemen-elemen ini efek beban yang terjadi di geladak akan ditransfer hingga ke kaki *Jacket*. Efek beban yang dimaksud adalah hasil yang disebabkan oleh gaya-gaya yang berasal dari beban yang bekerja pada geladak. Efek total dari semua gaya yang bekerja tegangan yang berupa tarikan dan tekanan, dan menimbulkan deformasi berupa lendutan pada balok dan pelat.

Terjadinya deformasi dapat mempengaruhi integritas suatu struktur. Analisis respon struktur mengevaluasi kemungkinan kegagalan suatu struktur dengan mengetahui deformasi dan tegangan kerja yang terjadi pada struktur.

Oleh karena itu, analisis pengaruh beban instalasi pada *cellar deck* yang menyebabkan tegangan dan deformasi terhadap integritas struktur menjadi topik yang penting untuk diamati dan diteliti, maka dari itu penulis merencanakan suatu penelitian skripsi dengan judul yaitu “Analisis Respon Konstruksi *Cellar Deck* Pada Struktur *Jacket* Akibat Pengaruh Beban Instalasi”.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan latar belakang di atas, maka yang menjadi rumusan masalah adalah berapa besar tegangan dan deformasi yang disebabkan oleh beban instalasi yang bekerja pada *cellar deck* struktur *Jacket*.

1.3 Batasan Masalah

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

1. Metode analisis yang digunakan adalah metode elemen hingga.
2. Hanya mempertimbangkan beban transversal/lateral sehingga ketidaksempurnaan awal, tegangan sisa pengelasan, cacat pengelasan, korosi, *crack base*, dan beban aksial diabaikan (atau dianggap konstan?)
3. Analisis yang dilakukan tidak menggunakan pemodelan statistik.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui respon struktur berupa tegangan dan deformasi pada *cellar deck* struktur *Jacket* yang disebabkan oleh beban instalasi yang bekerja.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Bagi bidang akademis, khususnya dalam bidang maritim dapat menambah wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya bidang ilmu analisis struktur baja.
2. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi untuk pertimbangan dalam perancangan bangunan lepas pantai.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bangunan Lepas Pantai

Bangunan lepas pantai adalah struktur besar yang dibangun di lepas pantai digunakan untuk mendukung proses eksplorasi atau eksploitasi bahan tambang (yaitu minyak, gas alam, biji mineral, dan lain-lain) melalui sumur di dasar laut. Lepas pantai memiliki arti yaitu suatu bagian dari lautan yang permukaan dasarnya berada di bawah pasang surut terendah atau bagian lautan yang berada di luar daerah gelombang pecah (*breaker zone*) ke arah laut. Biasanya anjungan lepas pantai memiliki sebuah rig pengeboran yang berfungsi untuk menganalisis sifat geologis reservoir maupun untuk membuat lubang yang memungkinkan pengambilan cadangan minyak bumi atau gas alam dari reservoir tersebut.

Adapun klasifikasi pekerjaan pada anjungan lepas pantai yang dibagi kedalam 5 (lima) bagian, yaitu:

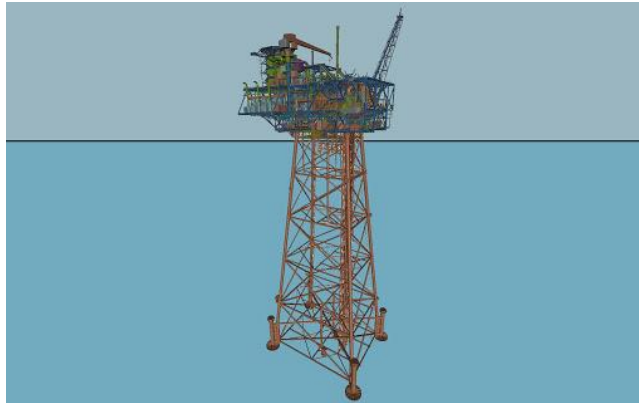
1. *Exploration*
2. *Exploratory Drilling*
3. *Development Drilling*
4. *Production Operations*
5. *Transportation*

2.2 Sistem Bangunan Lepas Pantai

Sistem bangunan lepas pantai yang ada saat ini dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis berdasarkan pertimbangan-pertimbangan yang diambil oleh engineer diantaranya faktor kedalaman laut, faktor lingkungan, faktor banyaknya jumlah cadangan minyak yang tersimpan, dan lain-lain. Konsep struktur *platform* secara umum dapat dibedakan menjadi 6 (enam) sistem berdasarkan *supporting structure* yang digunakan yaitu:

1. *Jacket* atau *template*, jenis struktur lepas pantai yang telah dibangun pada saat ini adalah struktur jenis *Jacket* atau *template*. *Jacket* dikembangkan untuk operasi di laut dangkal dan laut sedang yang dasarnya tebal, lunak dan padat. Setelah *Jacket* ditempatkan di posisi yang diinginkan tiang pancang dimasukan

melalui kaki bangunan dan dipancang dengan hammer sampai menembus lapisan tanah keras, kemudian dek dipasang dan di las. Gambar 2.1 dibawah adalah contoh *Jacket offshore structure*.



Gambar 2. 1. *Jacket Platform*

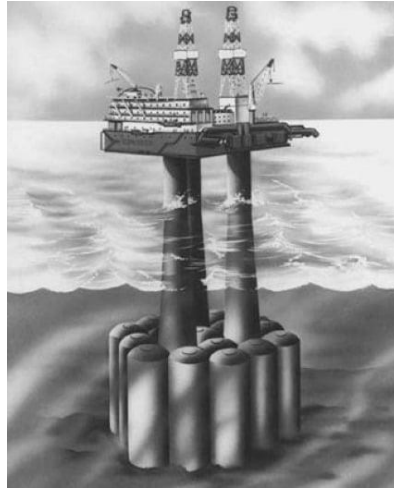
2. Tower, pada umumnya tower mempunyai daya apung (*self-bouyant*) karena *Jacket* tidak dapat menyokong beban terlalu berat, dek dipasang dan dilas diatas tower, biasanya dibangun di perairan dengan kedalaman 160 meter. Contoh *tower platform* dapat dilihat pada Gambar 2. 2.



Gambar 2. 2 *Tower Platform*

3. *Caissons Platform*, platform kecil dengan dek kecil kebutuhan untuk operasi di laut dangkal (tidak lebih dari 60m) dengan kandungan minyak yang tidak banyak. Dalam hal ini, tiang pancang dipancang sampai kedalam yang cukup untuk menyokong dek kecil.

4. *Concrete gravity platform*, platform jenis ini dipasang apabila tanah keras di dasar laut tidak jauh dari permukaan lumpur seperti pada Gambar 2.3. Pondasi struktur dibuat berbentuk lingkaran dan terbuat dari beton. Pondasi yang berat menyokong beberapa *tower* yang kemudian menyokong dek baja.



Gambar 2. 3 *Concrete Gravity Platform*

5. *Steel gravity platform* Untuk kondisi tanah dasar laut yang keras sehingga sulit untuk melakukan pemancangan tiang pancang, biasanya *platform* tipe ini dipasang. Salah satu contoh untuk *steel gravity platform* seperti Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 *Steel Gravity Platform*

6. *Hybrid gravity platform*, bagian dasar *platform* ini terbuat dari beton yang menopang rangka baja dimana dek baja diletakan.

7. Struktur tak tegar (*Compliant Platform*)

Struktur ini biasanya relatif fleksibel karena biasanya mengambang di atas permukaan laut, ringan dan mengandalkan sistem penambatan yang baik. Jadi apabila ada gaya luar bekerja pada struktur ini maka struktur ini akan ikut bergerak juga karena kekakuan struktur ini tidak besar. Contohnya pada *semisubmersible platform* (lihat Gambar 2.5), TLP, dan lain-lain. [1]



Gambar 2. 5 *Semi-submersible*

2.3 *Fixed Jacket Platform*

Struktur jaket adalah rangka ruang tubular yang dilas yang terdiri dari kaki vertikal atau kaki dengan kemiringan yang didukung oleh sistem penyangga lateral. Fungsi jaket adalah untuk mendukung fasilitas bagian atas, memberikan dukungan untuk konduktor, *riser*, dan perlengkapan lainnya, serta berfungsi sebagai *template* untuk sistem pondasi. Gambar 2. 6 menunjukkan bagian-bagian dari *fixed jacket platform*. [2]

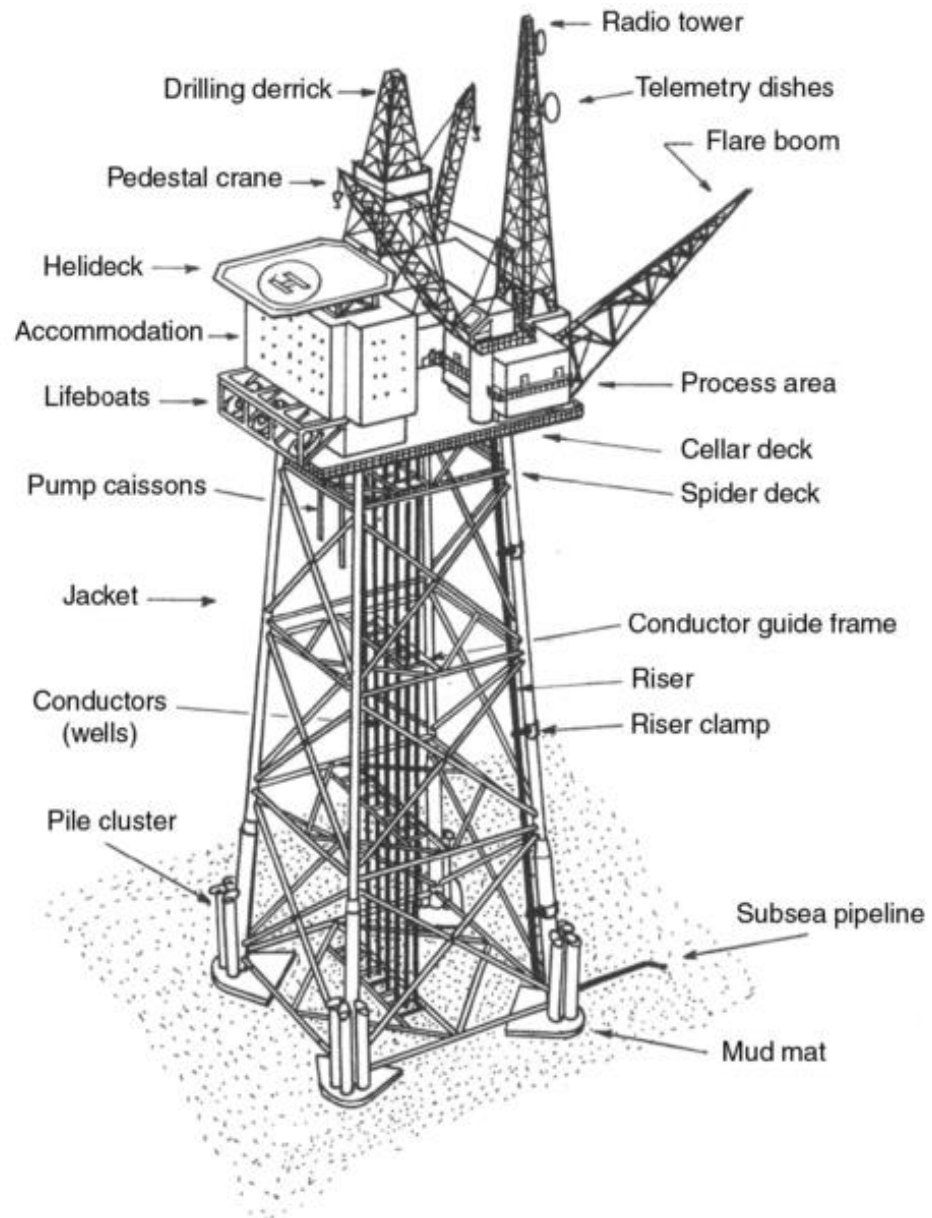
Tiga substruktur utama adalah:

1. Geladak - mendukung peralatan pengeboran dan produksi serta sistem pendukung kehidupan *platform*.

Komponen utama struktur geladak adalah:

- a. Kaki geladak
- b. Batang utama (longitudinal)
- c. Balok geladak
- d. Pelat geladak dan / atau *grating*,

e. *Skid beam* (jika rencana pengeboran menggunakan *rig tender*).



Gambar 2. 6 Elemen struktural utama dari steel *Jacket platform*. (sumber: <http://www.drillingformulas.com/piled-offshore-platform-structures-offshore-structure-series/>)

2. *Jacket* - selain memberikan dukungan untuk geladak, *Jacket* (dapat juga disebut kerangka baja atau *tower*) memberikan dukungan untuk konduktor dan substruktur lainnya seperti *boat landings*, *barge bumpers*, *risers*, *sumps*, *j-tubes*, *walkways*, *mud-mats*, etc.

3. Fondasi – Tiang pancang didorong melalui kaki jaket atau *skirt pile sleeves* untuk memancangkan *Jacket* ke dasar laut. Tiang pancang yang didorong melalui kaki *Jacket* umumnya dilas ke kaki *Jacket* di atas permukaan laut. Tiang pancang juga dapat di-*grout* ke kaki jaket untuk memberikan kekakuan dan aksi komposit. [3]

2.4 *Topside*

Seperti yang terkenal di industri minyak dan gas lepas pantai, anjungan lepas pantai terdiri dari dua bagian secara struktural bagian atas atau *topsides* dan bagian bawah atau substruktur. *Topsides* adalah struktur baja yang terdiri dari lebih dari satu *deck* yang menampung berbagai macam fasilitas untuk eksplorasi atau produksi.

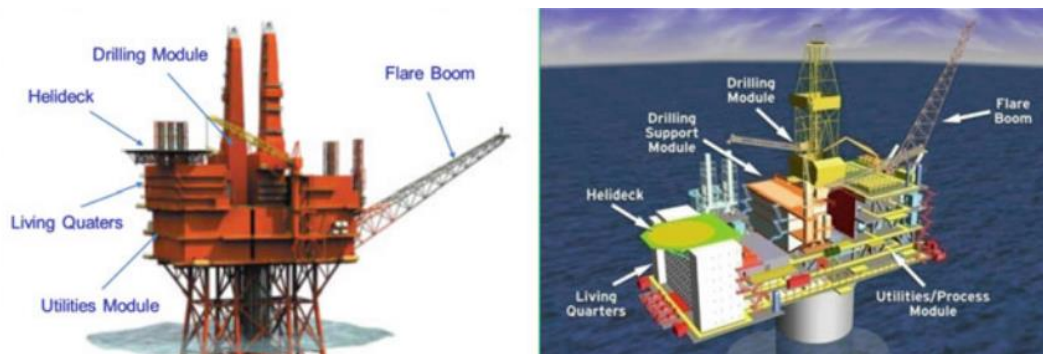
Kata *topsides* berasal dari industri pembuatan kapal. Kata tersebut digunakan untuk menunjukkan di bagian atas garis air di atas lambung kapal. Untuk anjungan lepas pantai, *topsides* tinggi di atas permukaan laut dan di luar *splash zone* menurut desain.

Topsides menampung semua fasilitas yang dibutuhkan menurut desain fungsi dan aktivitas manusia. Tata letak *topsides* bervariasi, tergantung pada konsep pengembangan lapangan, lokasi, bahkan potensi kedepannya. Misalnya, mempertimbangkan *platform* produksi dengan peralatan pemrosesan yang diperlukan seperti *production separators*, *acid gas removal*, *gas dehydration*, *gas exporting*, *control panels*, dan lain-lain. *Topsides* tersebut harus jauh lebih besar daripada *topsides platform wellhead* sederhana. Jika *platform* diawaki, bahkan *wellhead platform*, harus ada *living quarter* (geladak tempat tinggal) di atasnya. Oleh karena itu, berat dan dimensi keseluruhan dari *topsides* sebagian besar ditentukan oleh fungsi *platform*. Desain struktural *topsides* secara umum memainkan peran penting dalam optimalisasi *topsides*. Salah satu faktor penting yang berdampak kuat pada desain struktur bagian atas adalah metode integrasi *platform* yang dipilih. Pergantian metode pemasangan *topsides* dalam proses desain *platform* mengarah pada kebutuhan modifikasi desain struktur *topsides*.

Platform dapat dirancang untuk eksplorasi ladang minyak sebagai *rig* pengeboran, untuk produksi minyak dan gas sebagai *Floating Production Structure*

(FPS). Apa pun fungsi *platform* yang dirancang, tiga (3) elemen utama desain *topsides* memiliki kesamaan:

1. Menampung semua peralatan yang dibutuhkan untuk operasi
Untuk semua jenis *platform*, fungsi yang dirancang harus dipenuhi. Misalnya, anjungan pengeboran eksplorasi harus mampu menampung semua peralatan pengeboran termasuk pembangkit listrik dan *distribution system*, *drilling module*, sistem sirkulasi, serta *accomodation module*, dan lain-lain. Begitu pula dengan anjungan produksi, beberapa anjungan produksi bahkan dilengkapi dengan modul pengeboran.



Gambar 2. 7 Utilitas dan peralatan pada *topside platform*
(Sumber BP dan Exxon secara berturut-turut)

Dua contoh *topsides platform* produksi ditunjukkan pada Gambar 2.7. Di sebelah kiri adalah *platform* tetap Miller di Laut Utara; di sebelah kanan adalah GBS Hebron di lepas pantai Kanada. Dapat diperhatikan bahwa kedua *topsides* terdiri dari beberapa *module* untuk melakukan tugas-tugas tertentu seperti *drilling module*, *utilities module*, *boom flare*, tempat tinggal, dan lain-lain. Setiap modul dibuat dan kemudian diposisikan pada geladak yang ditentukan.

2. Menyediakan lingkungan hidup sehat yang aman dan berkelanjutan

Topsides sebuah *platform* tidak dirancang hanya sebagai rangka baja yang menyediakan ruang yang cukup untuk mengemas semua fasilitas yang diperlukan untuk fungsi yang diberikan. Bahkan untuk anjungan tak berawak, harus ada pengaturan bagi personel untuk mengakses dan melakukan berbagai jenis survei, perbaikan, pengumpulan data, dan lain-lain. Pemisahan sumber bahaya, akses aman

ke *helideck*, *safety boats*, standar kelayakhunian yang tinggi, dan lain-lain. Harus dipertimbangkan secara hati-hati saat merancang *topsides*.

3. Optimalisasi dimensi dan bobot

Berbeda dengan bangunan pengeboran di darat, ukuran *topsides* anjungan lepas pantai dibatasi. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimalisasi penggunaan ruang. Kombinasi pengurangan ukuran dan volume peralatan dan pengaturan fasilitas yang dipadatkan di *topsides* tidak hanya secara langsung mengarah pada pengurangan berat dan biaya, tetapi juga menguntungkan desain substruktur yang sesuai.

Struktur baja *topsides* terdiri dari banyak geladak seperti yang ditunjukkan pada *topsides* yang sudah dibuat dan diisi dengan fasilitas (lihat Gambar 2.8).



Gambar 2. 8 Topside dengan multi-level deck yang terdiri dari modul (Sumber: Anadarko Petroleum Corporation)

2.4.1 *Modular Topsides, Integrated Topsides, dan Single Lift Topsides*

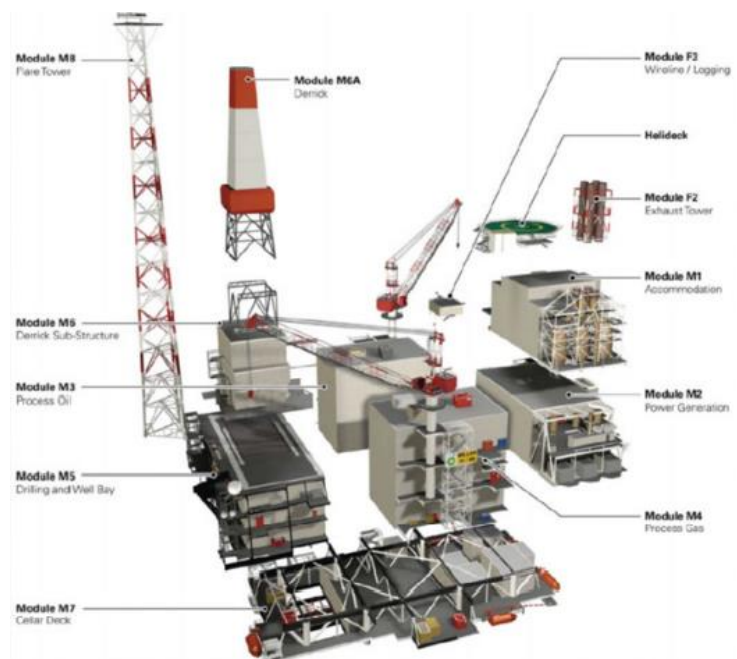
Pengertian “*module*” berarti sebuah unit yang terdiri dari penguraian elemen-elemen sebuah sistem besar. Konsep modul telah cukup sering digunakan, mesin atau produk yang rumit dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan mandiri selama desain dan produksi untuk:

1. Jadikan kompleksitas dapat dikelola
2. Memungkinkan pekerjaan paralel
3. Mengakomodasi ketidakpastian masa depan.

Ada dua pendekatan berbeda dalam konstruksi *topsides platform*, yaitu *integrated topsides* dan *modular topsides*.

1. *Modular Topsides*

Untuk *modular topsides*, biasanya pertama kali beberapa modul ditetapkan sebagai blok yang akan dibuat di darat, diangkut ke lokasi lepas pantai, dan kemudian dipasang pada MSF (*Module Supporting Frame*) substruktur yang sesuai. Contoh *platform* Miller di Laut Utara; *topsides* dipasang dengan dua belas modul seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2.9.



Gambar 2. 9 Modul *topside platform* Miller (Sumber: BP)

2. *Integrated topsides*

Berbeda dari pendekatan desain *modular topsides*, pada *integrated topsides*, semua peralatan diatur dan dipasang di geladak yang ditentukan dan dihubungkan serta dikerjakan selama proses perakitan di darat seperti yang terlihat pada Gambar 2.10. Namun, dengan pencapaian HUC peralatan *topsides* di daratan, pekerjaan HUC lepas pantai diminimalkan.



Gambar 2. 10 *Integrated topsides* untuk instalasi *floatover* di Malaysia (Proyek KBB) (Sumber: KPOC)

3. *Single Lift Topsides*

Single lift topsides adalah *topsides* yang terintegrasi, yang menekankan pengurangan berat total dari *topsides* sehingga seluruh *topsides* yang terintegrasi dapat dipasang dengan operasi pengangkatan tunggal. Karena berat baja struktural adalah sebagian besar dari total berat *topsides* (Beberapa perkiraan mengatakan kira-kira setengah dari berat total), oleh karena itu upaya utama telah dilakukan pada pengurangan berat melalui spiral optimalisasi selama desain struktur *topsides*. Juga langkah-langkahnya seperti:

1. Menempatkan alat berat di tempat yang paling kuat, langsung di balok dan rangka
2. Menggunakan baja berkekuatan tinggi bila memungkinkan
3. Menggunakan decking ringan untuk peralatan, dan lain-lain. [4]

2.4.2 **Rangka Utama Geladak**

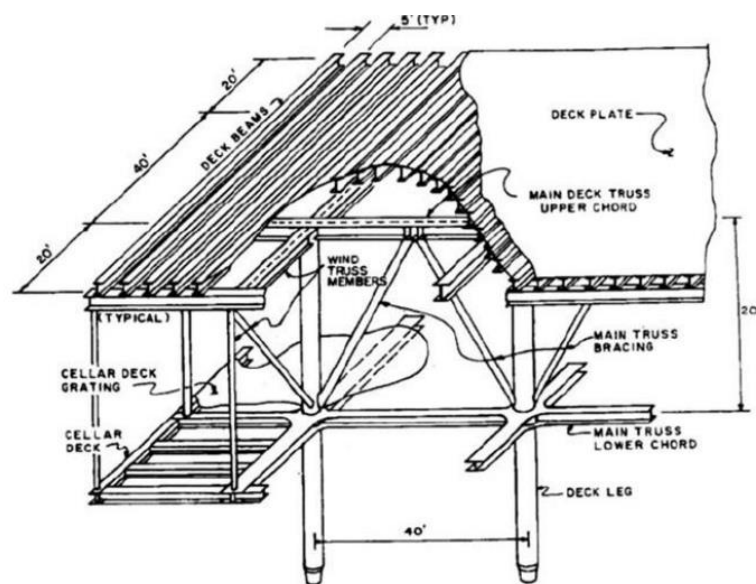
Fungsi utama geladak adalah menyediakan luasan yang sesuai di atas permukaan air dimana operasi pengeboran dan produksi dilakukan. Rangka geladak mentransfer beban dari area geladak ke kaki geladak, kemudian beban tersebut ditransfer ke kaki *jacket* dan pondasi. Transfer beban ini dapat terselesaikan dengan berbagai macam sistem struktur geladak. Sistem yang populer adalah dimana beban ditransfer melalui rantai dan balok geladak ke tiang penopang longitudinal yang terbuat dari balok tubular dan standar.

Dalam kasus sistem lantai pelat, pemilihan ukuran pelat geladak dilakukan dengan menggunakan beban dek terdistribusi batas atas dan pemilihan ketebalan pelat geladak menggunakan rumus lentur pelat.

Beban pelat geladak ditransfer ke balok geladak. Jarak balok geladak umumnya ditentukan oleh jarak *wellhead* dan balok umumnya ditempatkan pada jarak yang sama, merentangkan ruang antara rangka geladak utama (atau gelagar geladak utama). Pemilihan ukuran balok geladak dapat dilakukan dengan menggunakan rumus balok sederhana atau balok menerus.

Beberapa sistem geladak mungkin dirancang menggunakan pendekatan rancang pelat ortotropik. Pada tipe rancangan lantai (Gambar 2.11), pelat geladak, balok geladak, *chord* rangka atas (bawah) diganti dengan sistem pelat-balok terlas menerus. Pelat tersebut membawa beban langsung sepanjang bentangnya selama berfungsi sebagai *top flange* atas sistem balok/rangka geladak bersama arah transversal. Pendekatan perancangan ini untuk menghasilkan penghematan yang cukup besar dalam berat baja, tapi meningkatkan pengelasan, *fitting*, dan kebutuhan pemasangan, yang dapat menghasilkan sistem lantai geladak yang mahal.

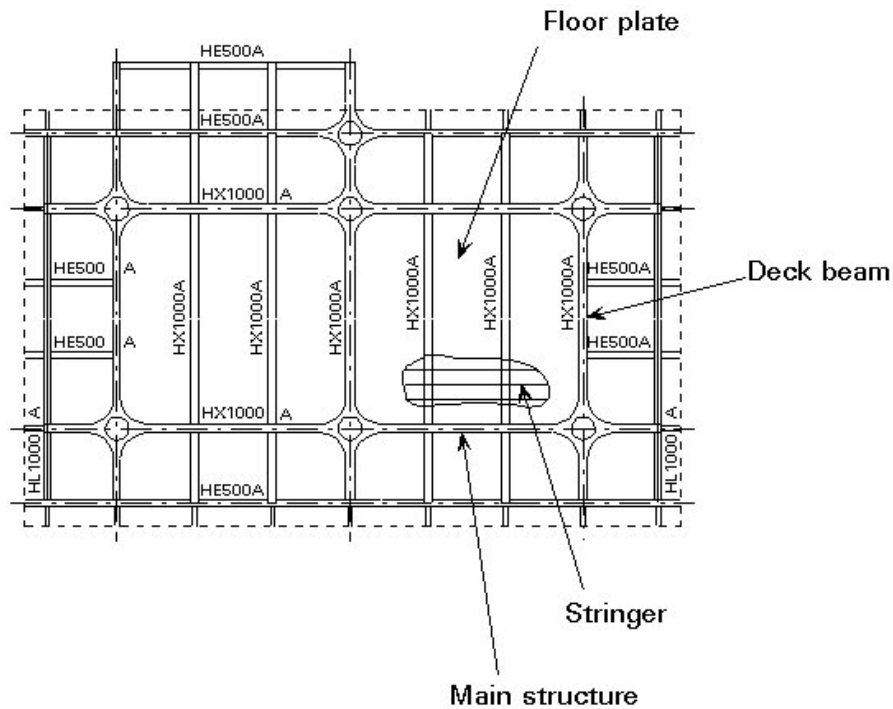
Kolom geladak, tiang penopang dan/atau *girders* juga menyediakan kekuatan pada geladak selama *erection*. Tegangan yang disebabkan selama *erection* dapat dipertimbangkan dan diperhitungkan selama pengukuran awal *member*. [4]



Gambar 2. 11 Elemen dasar struktur geladak (McClelland, 1986; Section 17) [5]

1. Sistem Struktur Geladak

Proses interaktif desain konseptual jaket dan dek menghasilkan jarak antar kolom. Untuk *platform wellhead* di Laut Utara Belanda, jarak kolom melintang biasanya 9 m untuk hingga 15 m untuk *platform* produksi. Jarak longitudinal biasanya 15 m



Gambar 2. 12 Struktur grid dasar untuk *Jacket-based deck*
(Sumber: <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg15a/11000.htm>)

Pemilihan elemen untuk konsep struktur geladak berupa pelat atau *grating* untuk sistem lantai, *truss* atau rangka portal untuk struktur utama dan konsep panel lantai yang ditumpuk atau rata. Untuk desain lantai geladak produksi, dimensi tipikal adalah:

1. Pelat lantai 1 m
2. *Stringer* (membujur) 5 m
3. Balok dek (transversal) 15 m
4. Struktur utama (longitudinal) 15 m
5. Kolom

Komponen-komponen ini diidentifikasi pada Gambar 2.12. (Struktur *grid* dasar untuk *Jacket-based deck*)

a. Pelat Lantai

Dalam praktiknya, pelat lantai berfungsi sebagai penyangga horizontal antar kolom. Perhatian khusus diperlukan untuk memastikan bahwa semua pengelasan antara pelat lantai dan struktur di bawahnya tidak membentuk titik rapuh. Kegagalan pengelasan tersebut dapat menyebabkan inisiasi retak di seluruh struktur. Begitu juga untuk tekuk pelat lantai oleh tegangan yang terjadi secara tidak sengaja.

Peralatan dan kontainer secara teratur diturunkan oleh *crane* di beberapa area dek, seperti area peletakan dan *platform* kontainer makanan. Ketebalan pelat yang ditingkatkan mungkin diperlukan di area ini karena beban terkonsentrasi yang lebih besar.

b. Balok Geladak

Balok dek yang menopang panel lantai atau memberikan dukungan langsung ke peralatan utama umumnya disediakan sebagai balok HE 800-1000, meskipun HL 1000 (lebar 400 mm) atau HX 1000 (lebar 450 mm) juga digunakan untuk beban yang lebih berat atau bentang yang lebih besar.

Sambungan utama pada balok geladak adalah dengan struktur utama. Konfigurasi sambungan sangat ditentukan oleh konsep pra fabrikasi dan ketinggian *flange*.

2.5 Pembebanan Struktur

Beban-beban yang akan ditanggung oleh suatu struktur atau elemen struktur tidak selalu dapat diramalkan dengan tepat sebelumnya. Bahkan apabila beban-beban tersebut telah diketahui dengan baik pada salah satu lokasi tertentu, distribusi bebannya dari elemen yang satu ke elemen yang lain pada keseluruhan struktur biasanya masih membutuhkan asumsi dan pendekatan. Beban-beban yang akan ditanggung oleh struktur berdasarkan API RP 2A yang didefinisikan sebagai berikut:

a. Beban Mati

Beban mati adalah bobot dari struktur anjungan itu sendiri dan peralatan

permanen serta struktur pendukung yang tidak berubah dengan mode operasi. Beban mati ini mencakup:

1. Berat struktur anjungan di udara, termasuk jika ada berat tiang pancang, *grout* dan *ballast*.
2. Berat peralatan dan perlengkapan yang dipasang secara permanen di anjungan.
3. Gaya hidrostatis yang bekerja pada struktur di bawah garis air termasuk tekanan eksternal dan daya apung.

b. Beban Hidup

Beban hidup adalah berat semua peralatan, perlengkapan dan apa saja yang dipakai atau diperlukan untuk pengoperasian anjungan yang beratnya dapat mengalami perubahan selama masa operasi anjungan berlangsung. Beban hidup ini mencakup:

1. Berat peralatan pengeboran dan produksi yang dapat ditambahkan atau dikeluarkan dari anjungan sesuai kebutuhan dan keperluan anjungan.
2. Berat geladak tempat tinggal, *heliport* dan peralatan pendukung kehidupan lainnya, peralatan keselamatan, peralatan selam dan peralatan utilitas yang dapat ditambahkan atau dipindahkan dari anjungan.
3. Berat persediaan dan cairan yang dapat dikonsumsi dalam tangki penyimpanan.
4. Gaya-gaya pada struktur yang timbul akibat pengoperasian pengeboran, penanganan material, tambat kapal dan muatan helikopter.
5. Gaya-gaya pada struktur yang timbul akibat penggunaan *crane*. Gaya ini harus dihitung berdasarkan beban angkat, gerakan angkat, dan bobot mati

c. Beban Lingkungan

Beban lingkungan adalah beban yang dibebankan pada anjungan oleh fenomena alam termasuk angin, arus, gelombang, gempa bumi, salju, es, dan gerakan bumi. Beban lingkungan juga termasuk variasi tekanan hidrostatis dan daya apung pada elemen yang disebabkan oleh perubahan permukaan air akibat gelombang dan pasang surut. Beban lingkungan harus diantisipasi dari segala arah.

d. Beban Konstruksi

Beban yang dihasilkan dari proses fabrikasi, *loadout*, transportasi dan instalasi.

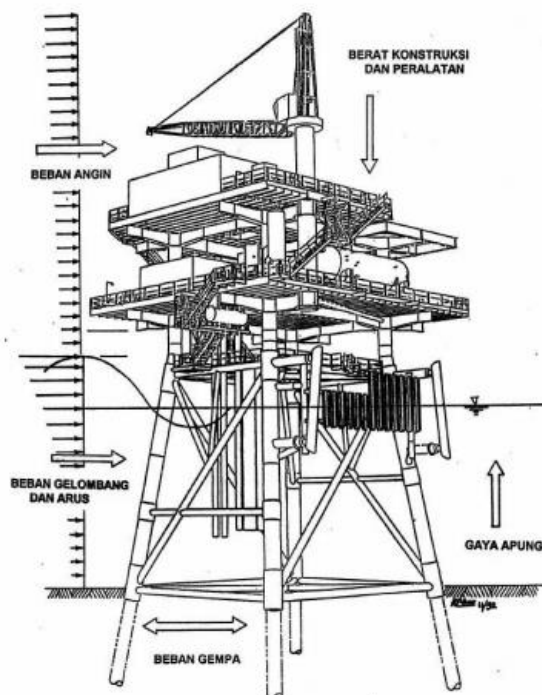
e. Beban *Removal* dan Pemasangan Ulang

Untuk anjungan yang akan direlokasi ke lokasi baru, beban akibat *removal*, *onloading*, *transportation*, *upgrading* dan *reinstallation* harus dipertimbangkan selain beban konstruksi di atas.

f. Beban Dinamis

Beban dinamis adalah beban pada anjungan yang terjadi karena respons terhadap gaya yang bersifat siklik atau karena bereaksi terhadap benturan. Gaya yang bersifat siklik tersebut adalah gelombang, angin, gempa bumi atau mesin. Dampak dapat disebabkan oleh tongkang atau kapal yang berlabuh di anjungan atau oleh operasi pengeboran. [6]

Gambar 2.13 merupakan ilustrasi dari beban yang mengenai suatu struktur jacket.



Gambar 2. 13 Gaya dan Beban yang bekerja pada struktur (Sumber: S1-7173 Perencanaan Bangunan lepas Pantai) [7]

2.6 Uji Pembebanan (*Loading Test*)

Uji pembebanan (*loading test*) adalah suatu metode pengujian yang bersifat setengah merusak atau merusak secara keseluruhan komponen-komponen bangunan yang diuji. Pengujian ini dimaksud dapat dilakukan dengan metode salah satunya metode uji beban (*loading test*).

Tujuan *loading test* pada dasarnya adalah untuk membuktikan persyaratan peraturan yang ada, yang tujuannya untuk menjamin keselamatan umum dan untuk mengetahui ketahanan struktur.

Umumnya dilaksanakan dengan maksud:

1. Menentukan grafik hubungan beban dan lendutan, terutama pada pembebanan di sekitar beban yang diharapkan.
2. Sebagai percobaan guna meyakinkan bahwa keruntuhan pondasi tidak akan terjadi sebelum beban ditentukan tercapai. Nilainya beberapa kali beban rencana. Nilai pengali tersebut dipakai sebagai faktor aman.
3. Menentukan kapasitas *ultimate* riil, mengecek hasil hitungan kapasitas tiang yang diperoleh dari rumus statis dan dinamis. [8]

2.7 Tegangan

a. Tegangan normal

Tegangan normal adalah intensitas gaya yang bekerja normal (tegak lurus) terhadap permukaan penampang yang mengalami tegangan, dan dilambangkan dengan σ (sigma). Bila gaya-gaya luar yang bekerja pada suatu batang sejajar terhadap sumbu utamanya dan potongan penampang batang tersebut konstan, tegangan internal yang dihasilkan adalah sejajar terhadap sumbu tersebut. Gaya-gaya seperti itu disebut gaya aksial, dan tegangan yang timbul dikenal sebagai tegangan aksial.

Tegangan normal dapat berbentuk:

1. Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

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.

2. Tegangan Tekan (*Compressive Stress*)

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

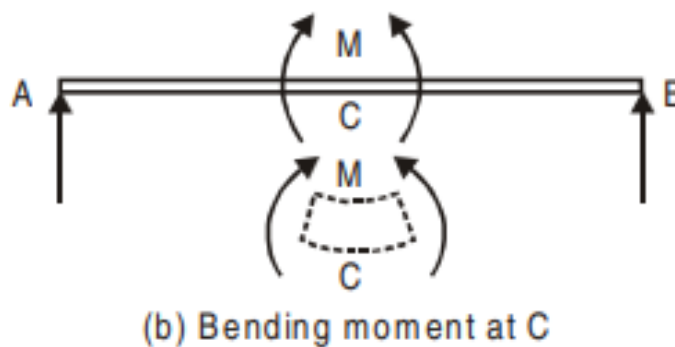
Intensitas rata-rata tegangan dapat dituliskan secara matematika sebagai:

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

Dimana σ adalah tegangan, P adalah beban/gaya yang diaplikasikan (dapat berupa gaya tarik atau gaya tekan) dan A adalah luas penampang melintang. [9]

b. Tegangan Lentur

Momen lentur pada suatu penampang balok adalah momen yang mencoba untuk membengkokkan balok dan diperoleh sebagai jumlah aljabar momen semua gaya pada penampang, yang bekerja ke kiri atau ke kanan penampang

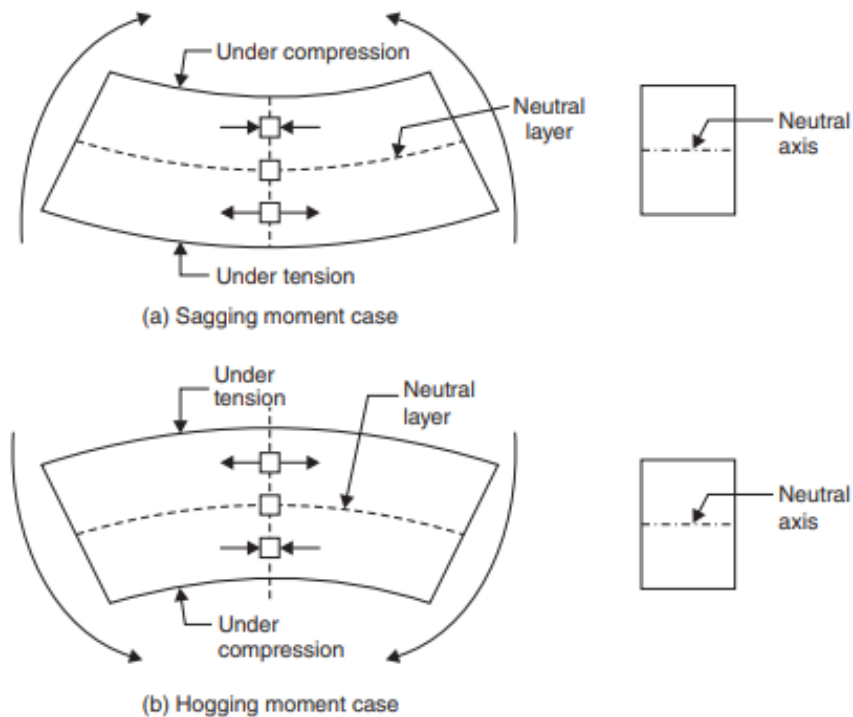


Gambar 2. 14 Momen Lentur

Balok yang dikenakan momen lentur seperti pada Gambar 2.14 dan gaya geser yang bervariasi dari bagian ke bagian. Untuk menahannya, tegangan akan berkembang pada material balok.

Karena lentur murni, balok mengalami sangging atau tergantung pada sifat momen lentur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15. Dapat dengan mudah diamati bahwa ketika balok mengalami *sagging*, serat di sisi bawah meregang

sementara serat di sisi atas tertekan. Dengan kata lain, material balok mengalami tegangan tarik di sisi bawah dan tegangan tekan di sisi atas. Dalam kasus *hogging*, sifat tegangan lentur justru berlawanan, yaitu tegangan tarik di atas dan tegangan tekan di bawah. Jadi tegangan lentur bervariasi dari tegangan tekan di satu sisi ke tegangan tarik di sisi lainnya. Oleh karena itu, di antara dua sisi tegangan lentur harus nol. Lapisan tegangan nol akibat lentur disebut *neutral layer* (lapisan netral) dan garis lapisan netral pada penampang melintang disebut *neutral axis* (sumbu netral) [Lihat Gambar 2.15] [10]



Gambar 2. 15 Sifat Tegangan pada Balok

PERSAMAAN BENDING

Ada hubungan yang jelas antara momen yang diterapkan, tegangan lentur dan deformasi lentur (radius kelengkungan). Hubungan ini dapat diturunkan dalam dua langkah:

(i) Hubungan antara tegangan lentur dan jari-jari kelengkungan.

$$\frac{f}{y} = \frac{E}{R} \quad (2.2)$$

(ii) Hubungan antara momen lentur yang diterapkan dan jari-jari kelengkungan.

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R} \quad (2.3)$$

Sehingga diperoleh, persamaan lentur sebagai berikut:

$$\frac{M}{I} = \frac{f}{y} = \frac{E}{R} \quad (2.4)$$

Dimana,

M = momen lentur penampang (Nm)

I = inersia penampang terhadap sumbu *centroid* (m⁴)

f = gaya lentur (N)

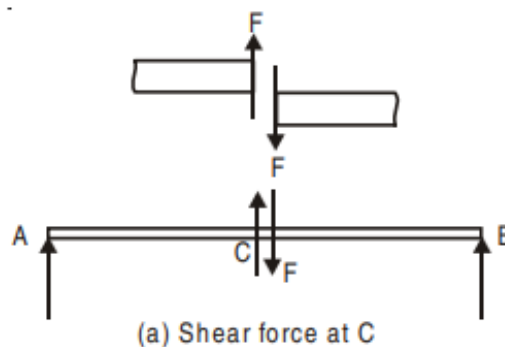
y = jarak serat dari sumbu netral (m)

E = modulus elastisitas (N/m²)

R = jari-jari kelengkungan pada penampang lentur (m)

c. Tegangan Geser

Gaya geser pada suatu penampang balok (atau bagian struktur lainnya) adalah gaya yang mencoba untuk menggeser penampang dan diperoleh sebagai jumlah aljabar dari semua gaya yang bekerja normal terhadap sumbu balok baik ke kiri atau ke kanan penampang.



Gambar 2. 16 Gaya Geser

Gaya geser seperti pada Gambar 2.16 menimbulkan tegangan geser pada balok. Dalam perancangan harus diperhatikan bahwa balok tersebut aman tidak hanya dalam lentur tetapi juga dalam geser. Tegangan geser adalah tegangan yang bekerja dalam arah tangensial terhadap permukaan bahan

Tegangan geser dapat didefinisikan sebagai resistansi per satuan luas yang dikembangkan secara tangensial area tahanan. Tegangan geser dilambangkan dengan τ . Ini direpresentasikan secara matematis sebagai;

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.5)$$

Dimana, τ adalah tegangan geser, P adalah gaya geser dan A adalah luas penampang.

d. 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.

e. Tegangan Izin

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut bersumber pada IACS [11] dan API. Tegangan izin digunakan dalam menganalisa tegangan kerja pada struktur yang diharapkan besarnya tegangan kerja harus lebih kecil dari tegangan izin bahan.

2.8 Regangan

Semua material yang diberikan beban eksternal, dapat mengalami deformasi (perpanjangan, perpendekan, perputaran adalah beberapa contoh deformasi). Batang yang dikenakan gaya tarik akan mengalami regangan sebagai reaksi dari gaya tarik yang diberikan. Jika deformasi total yang dihasilkan adalah Δl , dan jika panjang asli dari member adalah L, maka deformasi per satuan panjang diberikan oleh;

$$\text{Deformasi satuan [regangan]} = [\text{deformasi total}] / \text{Panjang}$$

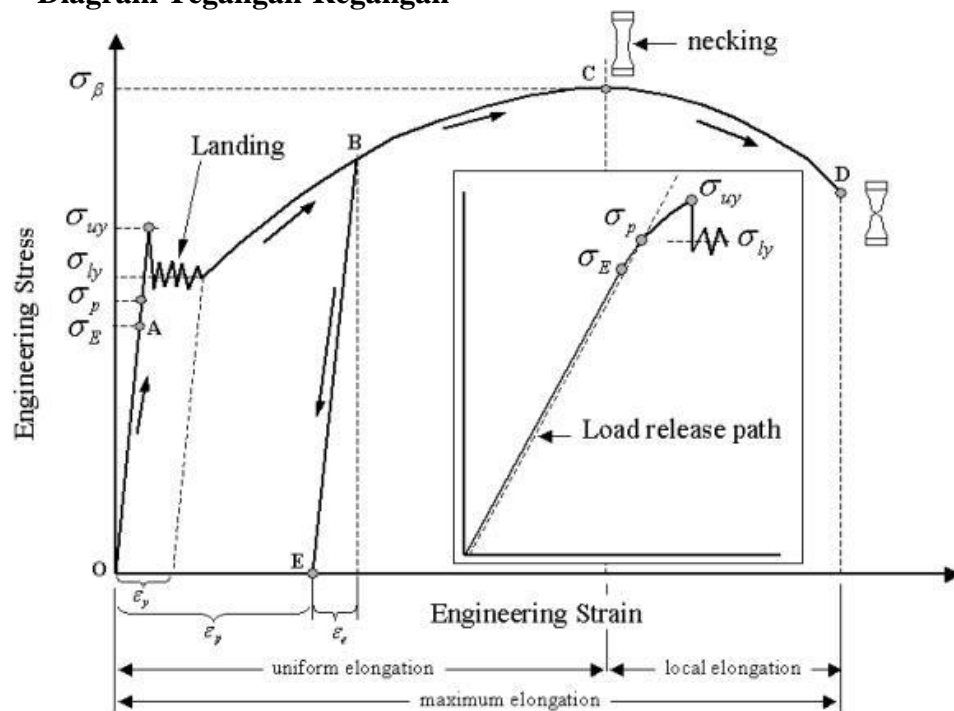
Atau

$$\text{Deformasi satuan} = [\text{perubahan dimensi}] / [\text{Dimensi asli}]$$

Regangan dapat didefinisikan sebagai perubahan dimensi ke dimensi asli yang sesuai. Regangan adalah dilambangkan oleh ε , jika L adalah panjang asli sebuah komponen dan jika dl perubahan panjang karena meregang, lalu,

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L} \quad (2.6)$$

2.9 Diagram Tegangan-Regangan



Gambar 2. 17 Kurva Tegangan-Regangan Baja Struktur
(Sumber: Salmon dan Jhon, 1986) [12]

Hasil-hasil pengujian biasanya tergantung pada benda uji. Oleh karena sangat kecil kemungkinannya menggunakan struktur yang ukurannya sama dengan ukuran benda uji, maka perlu dinyatakan hasil pengujian dalam bentuk yang dapat diterapkan pada elemen struktur yang berukuran berapapun. Cara sederhana untuk mencapai tujuan ini adalah dengan mengkonversikan hasil pengujian tersebut ke tegangan dan regangan.

Setelah melakukan uji tarik atau tekan dan menentukan tegangan dan regangan pada berbagai taraf beban, kita dapat memplot diagram tegangan dan regangan. Diagram tegangan-regangan merupakan karakteristik dari bahan yang

diuji dan memberikan informasi penting tentang besaran mekanis dan jenis perilaku bahan baja struktur, yang dikenal dengan baja lunak atau baja karbon rendah. Baja struktur adalah salah satu bahan metal yang paling banyak digunakan untuk gedung, jembatan, menara, dan jenis struktur lain.

Diagram tegangan-regangan untuk baja struktur tipikal yang mengalami tarik diperlihatkan pada Gambar 2.17. Pada diagram terlihat garis lurus dari pusat sumbu O ke titik A , yang berarti bahwa hubungan antara tegangan dan regangan pada daerah ini linier dan proporsional, dimana titik A tegangan maksimum, tidak terjadi perubahan bentuk ketika beban diberikan disebut batas elastis, jadi tegangan di A disebut limit proporsional, dan OA disebut daerah elastis.

Dengan meningkatnya tegangan hingga melewati limit proporsional, maka regangan mulai meningkat secara lebih cepat untuk setiap pertambahan tegangan. Dengan demikian kurva tegangan-regangan mempunyai kemiringan yang berangsur-angsur semakin kecil sampai pada titik B kurva tersebut menjadi horisontal. Mulai dari titik B terjadi perpanjangan yang cukup besar pada benda uji tanpa adanya pertambahan gaya tarik (dari B ke C), fenomena ini disebut luluh dari bahan, dan titik B disebut titik luluh. Di daerah antara B dan C , bahan menjadi plastis sempurna, yang berarti bahwa bahan terdeformasi tanpa adanya pertambahan beban. Sesudah mengalami regangan besar yang terjadi selama peluluhan di daerah BC , baja mulai mengalami pengerasan regang (*strain hardening*). Perpanjangan benda di daerah ini membutuhkan peningkatan beban tarik, sehingga diagram tegangan-regangan mempunyai kemiringan positif dari C ke D , dan beban pada akhirnya mencapai harga maksimum, dan tegangan di titik D disebut tegangan *ultimate*. Penarikan batang lebih lanjut akan disertai dengan pengurangan beban dan akhirnya terjadi putus/patah di suatu titik yaitu pada titik E .

Tegangan luluh dan tegangan *ultimate* dari suatu bahan disebut juga masing-masing kekuatan luluh dan kekuatan *ultimate*. Kekuatan adalah sebutan umum yang merujuk pada kapasitas suatu struktur untuk menahan beban.

Sebagai contoh kekuatan luluh dari suatu balok adalah besarnya beban yang dibutuhkan untuk terjadinya luluh di balok tersebut, dan kekuatan batas dari suatu rangka batang adalah beban maksimum yang dapat dipikulnya, yaitu beban gagal. Tetapi dalam melakukan uji tarik untuk suatu bahan, didefinisikan kapasitas pikul beban dengan tegangan di suatu benda uji, bukannya beban total yang bekerja pada benda uji. Karena itu, kekuatan bahan biasanya dinyatakan dalam tegangan.

Untuk memodelkan hubungan tegangan regangan baja dapat digunakan teori tegangan regangan *Ramberg-Osgood*, Model *Ramberg-Osgood* sebenarnya tidak ditujukan khusus untuk memodelkan baja dan bisa dipakai untuk berbagai macam material. Persamaan ini dimodifikasi sesuai kebutuhan agar mendekati kurva tegangan-regangan baja yang sering dipakai untuk struktur. Model *Ramberg-Osgood* diberikan dalam bentuk rumus berikut:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \cdot \left(\frac{\sigma}{F_{ty}} \right)^n \quad (2.7)$$

Dimana:

- ε = Regangan
- σ = Tegangan yang bekerja (N/mm²)
- E = Modulus elastis (N/mm²)
- F_{ty} = Tegangan Luluh (N/mm²)
- n = koefisien *Ramberg-Osgood*

Pada suku σ/E , berperan dalam menentukan nilai kurva pada zona elastis, sedangkan suku $0,002 (\sigma/F_{ty})^n$, berperan dalam menentukan nilai regangan pada zona plastis. Nilai K dan n adalah konstanta sesuai dengan sifat material.

2.10 Tegangan Von Mises

Von Mises stress merupakan indikator yang mengukur kegagalan material atau batas kekuatan bahan. Batasan kekuatan tersebut dapat dikatakan sebagai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur yang didapatkan dengan menganalisis resultan 3 tegangan utama (tegangan searah sumbu x, y, dan z. seperti

pada Gambar 2. 18, kegagalan diprediksi jika nilai tegangan *von mises* lebih besar dari tegangan luluh material.

Teori kegagalan ini diperkenalkan oleh Huber dan kemudian disempurnakan melalui kontribusi *von mises* dan Hencky. Teori ini menyatakan bahwa “Kegagalan diprediksi terjadi pada keadaan tegangan multiaksial bilamana energi distorsi per unit volume sama atau lebih besar dari energi distorsi per unit volume pada saat terjadinya kegagalan dalam pengujian tegangan uniaksial sederhana terhadap spesimen dari material yang sama”.

Tegangan *von mises* dapat dirumuskan [13]:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0,5[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.8)$$

Dimana:

σ_{vm} = Tegangan ekuivalen (*von mises stress*) (N/m²)

σ_x = Tegangan normal sumbu x (N/m²)

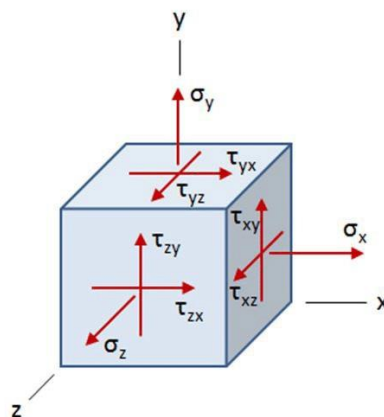
σ_y = Tegangan normal sumbu y (N/m²)

σ_z = Tegangan normal sumbu z (N/m²)

τ_{xy} = Tegangan geser bidang xy (N/m²)

τ_{yz} = Tegangan geser bidang yz (N/m²)

τ_{zx} = Tegangan geser bidang zx (N/m²)



Gambar 2. 18 *Von Mises Stress* pada Penampang

Kriteria luluh *von mises* mengisyaratkan bahwa luluh tidak tergantung pada tegangan normal atau tegangan geser tertentu, melainkan tergantung dari fungsi tiga harga tegangan normal, dan sebagainya maka kriteria tersebut tidak tergantung pada komponen tegangan hidrostatis. Semula *von mises* mengusulkan kriteria ini karena matematikanya sederhana. Setelah itu, ahli lainnya berusaha untuk memberikan arti fisik menunjukkan bahwa luluh itu terjadi bilamana energi distorsi mencapai suatu harga kritis. Energi distorsi adalah bagian energi regangan total per volume satuan yang diperlukan untuk perubahan bentuk yang berlainan dengan energi perubahan volume.

Struktur dapat dikatakan aman apabila nilai tegangan maksimumnya tidak melebihi 90% dari nilai total kekuatan luluh (*yield strength*) sesuai dengan material yang digunakan. [14]

2.11 Deformasi

Semua material padat dapat mengalami deformasi ketika dikenai beban eksternal. Kemudian hingga batas beban tertentu, suatu benda padat akan Kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan. Kembalinya benda ke bentuk semula setelah beban dihilangkan disebut perilaku elastis. Batas beban dimana material tidak lagi berperilaku elastis adalah batas elastis. Jika melebihi batas elastis, material akan mengalami deformasi permanen ketika beban dihilangkan. Material yang terdeformasi permanen dikatakan telah mengalami deformasi plastis.[15]

Kontrol defleksi. Pengontrolan defleksi selalu merupakan masalah pada desain balok. Penentuan lendutan izin balok juga merupakan masalah sulit. Biasanya digunakan kriteria objektif. Apabila suatu balok melendut sedemikian rupa sehingga mengganggu fungsi elemen gedung lainnya, misalnya defleksi mungkin saja didasarkan atas toleransi yang diperkenankan terjadi pada elemen lain itu. Akan tetapi penentuan defleksi ini sering kali bersifat subjektif. Sebagai contoh, banyak orang yang merasa tidak nyaman apabila berjalan di atas lantai yang melendut secara berlebihan.

Yang menentukan besarnya defleksi izin merupakan masalah rumit. Untuk itu sering kali digunakan petunjuk empiris. Kriteria empiris yang digunakan untuk

lantai adalah lendutan tidak boleh melebihi $\frac{l}{360}$ kali bentangnya (kriteria ini sering ditulis $\Delta_{izin} = L/360$ dimana L adalah bentang lantai. [16]

2.12 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, 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*.

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-linier* 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* [17].

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

a. Tipe metode NLFEA

Ada tiga sumber utama nonlinier dalam mekanika benda padat:

1. *Nonlinear* geometris

Nonlinier geometris terjadi pada struktur seperti balok dan *shell* yang menunjukkan perpindahan dan rotasi yang besar sehingga beban yang diterapkan dan/atau kekakuan struktur menjadi tergantung pada geometri sesaat struktur.

2. *Nonlinear* material

Nonlinier geometrik terjadi ketika perpindahan struktur besar. Jika regangan juga besar, maka nonlinier material juga dapat mempengaruhi perilaku struktur. Banyak bahan, termasuk baja, menunjukkan perilaku nonlinier yang dicirikan oleh fungsi tegangan-regangan uniaksial nonlinier.

3. *Nonlinear* kondisi batas

Kondisi batas dapat menjadi sumber nonlinier dalam kasus di mana, misalnya, dua benda bersentuhan satu sama lain atau dalam kasus di mana beban atau jalur beban bergantung pada deformasi struktur. Beban pengikat yang mengikuti translasi nodal dan rotasi struktur termasuk dalam kategori yang terakhir. Contoh dari beban pengikat ini adalah tekanan cairan yang selalu bekerja normal terhadap permukaan yang berubah bentuk.

Metode solusi NLFEA harus disesuaikan dengan jenis nonliniernya.

b. Iterasi Algoritma

Ketika matriks kekakuan bergantung pada vektor perpindahan atau vektor beban, atau keduanya, masalahnya adalah nonlinier dan akan membutuhkan algoritma iteratif untuk menyelesaikannya. Tiga algoritma iterasi utama pada

metode NLFEA adalah: algoritma Newton-Raphson, algoritma Quasi Newton-Raphson dan algoritma *Risk*. Algoritma N-R dan Quasi N-R dapat digunakan pada analisa statis dan analisa dinamis implisit. Algoritma Risk hanya dapat digunakan pada analisa statis.

d. *Incremental-Iterative Solution Process*

Dalam analisis linier, solusi dihitung secara langsung dalam satu langkah dengan menyelesaikan sistem persamaan linier. Namun, untuk melacak jalur solusi dalam analisis nonlinier, beban (atau perpindahan yang ditentukan) harus dibagi menjadi serangkaian kenaikan yang lebih kecil. Untuk setiap keseimbangan kenaikan beban, solusi ditemukan dengan melakukan beberapa iterasi, yang masing-masing secara komputasi sebanding dengan solusi sistem linier. Oleh karena itu, analisis nonlinier mungkin jauh lebih menuntut komputasi dibandingkan dengan analisis linier. Di sebagian besar program NLFEA komersial, beban ditentukan sebagai fungsi waktu.

e. *Pembebanan dan Kondisi Batas atau Syarat Batas*

Pembebanan dan kondisi syarat batas yang diaplikasikan pada model elemen hingga sangat tergantung pada kontrol beban yang digunakan. Setiap NLFEA akan memerlukan beberapa tingkat asumsi mengenai kondisi batas. Pentingnya merepresentasikan kondisi batas secara realistis dalam model elemen hingga bahkan lebih penting untuk analisis nonlinier daripada untuk analisis linier. Ketika asumsi mengenai kondisi batas perlu dibuat, asumsi tersebut harus dibuat sedemikian rupa sehingga mengarah pada respons konservatif dari struktur. Menggunakan asumsi yang valid untuk analisis untuk NLFEA harus dilakukan dengan hati-hati.

f. *Ketidaktepurnaan Geometrik*

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

g. Spesifikasi Material

Kurva tegangan-regangan dari material yang digunakan pada model elemen hingga harus tersedia. Spesifikasi material yang digunakan memberi pengaruh yang cukup besar kepada kurva tegangan-regangan yang dihasilkan.

h. Meshing

Ukuran mesh akan berdampak sangat besar terhadap waktu komputasi NLFEA. Jumlah derajat kebebasan (DOF) dalam sistem tergantung pada jenis struktur, jenis pembebanan, mode kegagalan yang diharapkan, dan jenis analisis. Ini harus memungkinkan representasi dari semua mode kegagalan yang relevan yang diselidiki. Misalnya, daerah struktur yang diharapkan memiliki beban tekan yang tinggi harus memiliki mesh yang cukup halus untuk dapat menangkap mode kegagalan tekuk utama dari semua komponen struktur di daerah tersebut. Namun, pada ukuran mesh tertentu, penyempurnaan lebih lanjut akan berdampak sangat kecil pada keakuratan hasil. Oleh karena itu, studi sensitivitas mesh harus dilakukan untuk menilai kecukupan ukuran mesh yang dipilih. Tegangan dan regangan akan selalu meningkat dengan penyempurnaan mesh lebih lanjut.