

**ANALISIS KEKUATAN KANTILEVER  
SEBAGAI PENUNPU REL *HATCH COVER***

**Skripsi**

*Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik Pada Program Studi Perkapalan  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin*



**Oleh**

**WARDI AL-QADRI**

**D031171002**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**2021**

**ANALISIS KEKUATAN KANTILEVER  
SEBAGAI PENUMPU REL *HATCH COVER***

**Skripsi**

*Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik Pada Program Studi Perkapalan  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin*



**Oleh**

**WARDI AL-QADRI**

**D031171002**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**2021**

## LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam mengikuti Seminar dan Ujian Akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Perkapalan Program Studi Strata Satu (S1) pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar

Judul Skripsi

ANALISIS KEKUATAN KANTILEVER SEBAGAI PENUMPU REL HATCH COVER

UNIVERSITAS HASANUDDIN

Disusun Oleh :  
Wardi Al-Qadri  
D031171002

Gowa, ..... Desember 2021

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Pembimbing I

Dr.Eng. A. Ardianti, ST., MT  
Nip. 19850526 201212 2 002

Pembimbing II

Hamzah, ST., MT.  
Nip. 19800618 200501 1 004

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT.  
Nip. 19730206 200012 1 002



## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

**Nama** : **Wardi Al-Qadri**  
**NIM** : **D031171002**  
**Program Studi** : **Teknik Perkapalan**  
**Jenjang** : **S1**

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

**“Analisis Kekuatan Kantilever Sebagai Penumpu Rel *Hatch Cover*”**

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.

Makassar, 2 Desember 2021

Yang Menyatakan,



**Wardi Al-Qadri**

## ABSTRAK

**Al-Qadri, Wardi.** 2021. “Analisis Kekuatan Kantilever Sebagai Penumpu Rel *Hatch Cover*” (dibimbing oleh **Andi Ardianti** dan **Hamzah**).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dimanakah letak komponen konstruksi yang paling kritis saat mengalami pembebanan dan bagaimana respon kekuatan balok kantilever pada struktur kantilever terhadap posisi roda penutup palka saat mengalami pembebanan. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi numerik pada model struktur kantilever menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software ANSYS Workbench*. Dari hasil penelitian, deformasi dan tegangan maksimum pada struktur terjadi pada saat posisi roda tengah *hatch cover* berada diantara dua balok kantilever, titik deformasi maksimum berada pada daerah sekitar kontak roda tengah *hatch cover* dengan nilai deformasi sebesar 2,383 mm. Sedangkan nilai tegangan maksimum yang terjadi adalah 131,4 MPa. Ditemukan juga bahwa posisi roda penutup palka berpengaruh terhadap besarnya nilai tegangan dan deformasi yang terjadi pada balok kantilever. Nilai tegangan dan deformasi maksimum pada balok kantilever terjadi ketika roda tengah penutup palka berada tepat di atasnya dan menurun saat roda *hatch cover* bergerak menjauh dari balok kantilever. Dapat dilihat bahwa deformasi maksimum balok kantilever 1 adalah 2,081 mm dan balok kantilever 2 adalah 1,998 mm. Nilai tegangan von-mises maksimum pada balok kantilever 1 sebesar 116,01 MPa dan balok kantilever sebesar 128,01 MPa serta nilai tegangan geser maksimum XZ pada balok kantilever 1 sebesar 39.532 MPa dan pada balok kantilever 2 sebesar 51,853 MPa. Nilai deformasi & tegangan maksimum ini terjadi pada saat struktur dibebani oleh kombinasi beban dinamis, beban hujan dan beban angin.

Kata Kunci: *barge*, *roof barge*, kantilever, *raised deck*, *bracket*, deformasi ,  
tegangan

## ABSTRACT

**Al-Qadri, Wardi.** 2021. “*Analysis of Cantilever Strength as Support for Hatch Cover Rail*” (supervised by **Andi Ardianti** and **Hamzah**).

*This research aims to find out where the most critical components of the cantilever construction are located when under loading and how the response of the cantilever beam strength on the cantilever structure to the position of the hatchcover wheels when subjected to loading. In this thesis, a numerical simulation of the cantilever structure model was carried out using the finite element method with the help of ANSYS Workbench software. From the results of the research, the maximum deformation and stress in the structure occurred when the hatch cover center wheel position was between two cantilever beams, the maximum deformation point was in the area around the hatch cover center wheel contact with a deformation value is 2,383 mm. While the maximum stress value that occurs is 131.4 MPa. It is also found that the position of the hatch cover wheel has an effect on the magnitude of the stress and deformation values that occur in the cantilever beam. The maximum stress and deformation values in the cantilever beam occur when the hatch cover center wheel is directly above it and decreases as the hatch cover wheel moves away from the cantilever beam. It can be seen that the maximum deformation of the cantilever beam 1 is 2.081 mm and the cantilever beam 2 is 1.998 mm. The maximum von-mises stress value in the cantilever 1 beam is 116.01 MPa and the cantilever beam is 128.01 MPa and the maximum shear stress XZ value in the cantilever 1 beam is 39,532 MPa and the cantilever beam 2 is 51,853 MPa. This maximum deformation & stress value occurs when the structure is loaded by combination load of dynamic loads, rain load and wind load.*

*Keywords : barge, roof barge, cantilever, raised deck, bracket, deformation, stress.*

## KATA PENGANTAR



*Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

Puji syukur kehadiran Allah ﷻ yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Analisis Kekuatan Kantilever Sebagai Penumpu Rel Hatch Cover**” yang disusun guna memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S1) di Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Serta tidak lupa shalawat serta salam tetap selalu tucurahkan kepada *Rasulullah* Muhammad ﷺ dan pengikutnya sampai akhir zaman.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini terdapat berbagai macam hambatan dan tantangan, namun semuanya dapat teratasi dengan penuh kesabaran dan keikhlasan serta bantuan, bimbingan, kritikan dan saran dari berbagai pihak. Penulis juga menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kata sempurna dan masih banyak kekurangan di dalamnya baik dari segi kualitas maupun kuantitas materi penelitian yang dikerjakan. Sehingga penulis sangat mengharapkan kritikan dan saran yang membangun demi kesempurnaan tulisan ini.

Selanjutnya penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada berbagai pihak yang turut membantu dan penyelesaian penelitian ini. Olehnya itu, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ayahanda **Salahuddin** dan Ibunda **Hajra Djamil**, orang tua tercinta yang senantiasa mencurahkan kasih sayang, doa dan dukungan serta motivasi yang tiada hentinya kepada penulis.
2. Ibu **Dr. Eng Andi Ardianti, ST., MT**, selaku pembimbing I dan Bapak **Hamzah, ST., MT**, selaku pembimbing II yang senantiasa membimbing dan mengarahkan penulis dengan penuh kesabaran dan keikhlasan sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak **Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dipl-Ing**, selaku Ketua Laboratorium Struktur Kapal, terima kasih banyak yang sebesar-besarnya karena banyak membantu dalam proses pengerjaan skripsi mulai dari proposal sampai selesai, juga kepada Bapak **Rizal Firmansyah, ST., MT** selaku Penguji

dan selaku penasehat akademik penulis. yang telah menghantarkan penulis memperoleh gelar akademik pada Departemen Teknik Perkapalan.

4. Bapak **Dr. Eng Suandar Baso, ST., MT** selaku Ketua Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin .
5. Keluarga Besar saya yang selalu memberikan dukungan dan semangat dalam perjalanan menyelesaikan pendidikan.
6. Bapak Ibu dosen perkapalan departemen teknik perkapalan yang telah membantu memberi arahan dan dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Seluruh staff Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang selalu membantu segala administrasi selama kuliah
8. Teman seperjuangan Labo Struktur 17. Farid, Amanul, Wiah dan Alifah teman berbagi selama berada di laboratorium struktur kapal.
9. Teman-teman SAVAGE dan khususnya teman-teman PONDOK DAENG yaitu Ridwan, Farid, Akbar dan Firdaus yang selalu memberi bantuan dan dukungan.
10. Teman-teman BBS Squad Penny, Yanti dan Ode Fawwaz atas bantuan dan dukungannya.
11. Teman-teman **Naval Architecture 2017** yang memberikan semangat selama berkuliah dan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
12. Senior labo struktur atas ketersediaanya dalam berdiskusi dan berbagi ilmu.
13. Dan juga semua pihak baik secara langsung maupun tidak langsung yang memiliki peranan dan kontribusi yang sangat penting dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Semoga pihak yang membantu dalam penulisan Tugas Akhir mendapatkan pahala oleh Allah ﷻ. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak yang berkenan membacanya dan mempelajarinya.

Makassar,      November 2021

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI .....</b>	<b>ii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR NOTASI.....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Barge .....	4
2.2 Kantilever.....	5
2.3 Beban-Beban yang Bekerja pada Struktur.....	7
2.4 Tegangan dan Regangan .....	11

2.5	Deformasi.....	15
2.6	Metode Elemen Hingga .....	16
2.7	Ansys .....	26
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>		<b>27</b>
3.1	Jenis Penelitian.....	27
3.2.	Lokasi dan Waktu Penelitian .....	27
3.3.	Jenis Data dan Metode Pengambilan Data.....	27
3.4.	Prosedur Analisis .....	28
3.5.	Kerangka Pikir .....	39
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>40</b>
4.1.	Pembebanan pada Struktur .....	40
4.2.	Analisis Kekuatan Struktur Kantilever .....	47
4.3.	Analisis perubahan Deformasi dan Tegangan .....	70
<b>BAB V PENUTUP .....</b>		<b>76</b>
5.1	Kesimpulan .....	76
5.2	Saran .....	77
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>78</b>
<b>LAMPIRAN-LAMPIRAN .....</b>		<b>80</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Faktor peluang rentang tegangan laut dengan spektrum garis lurus...	11
<b>Tabel 3.1.</b> Material Properties .....	27
<b>Tabel 3.2.</b> Berat setiap tipe <i>Hatch cover</i> .....	28
<b>Tabel 3.3.</b> Variasi Posisi roda <i>Hatch cover</i> terhadap struktur kantilever .....	30
<b>Tabel 4.1.</b> Berat dan Massa setengah <i>Hatch cover</i> .....	37
<b>Tabel 4.2.</b> Distribusi Beban pada Roda-roda akibat berat <i>hatch cover</i> .....	38
<b>Tabel 4.3.</b> Distribusi beban angin pada roda <i>Hatch cover</i> . .....	39
<b>Tabel 4.4.</b> Distribusi beban hujan pada roda <i>Hatch cover</i> . .....	40
<b>Tabel 4.5.</b> Distribusi beban dinamis pada roda <i>Hatch cover</i> .....	43
<b>Tabel 4.6.</b> Variasi pembebanan pada struktur Kantilever .....	47
<b>Tabel 4.7.</b> Deformasi balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 1.....	58
<b>Tabel 4.8.</b> Tegangan <i>von-mises</i> balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 1 .....	51
<b>Tabel 4.9.</b> Tegangan geser XZ balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 1 .....	52
<b>Tabel 4.10.</b> Deformasi balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 2.....	54
<b>Tabel 4.11.</b> Tegangan <i>von-mises</i> balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 2 .....	55
<b>Tabel 4.12.</b> Tegangan geser XZ balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 2 .....	55
<b>Tabel 4.13.</b> Deformasi balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 3 .....	58
<b>Tabel 4.14.</b> Tegangan <i>von-mises</i> balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 3 .....	59
<b>Tabel 4.15.</b> Tegangan geser XZ balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 3 .....	60

<b>Tabel 4.16.</b> Deformasi balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 4.....	62
<b>Tabel 4.17.</b> Tegangan <i>von-mises</i> balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 4 .....	63
<b>Tabel 4.18.</b> Tegangan geser XZ balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 4 .....	64
<b>Tabel 4.19.</b> Deformasi balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 5.....	66
<b>Tabel 4.20.</b> Tegangan <i>von-mises</i> balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 5 .....	67
<b>Tabel 4.21.</b> Tegangan geser XZ balok kantilever terhadap variasi posisi roda tengah pada pembebanan 5 .....	68

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> Balok Kantilever .....	5
<b>Gambar 2.2.</b> Beban Angin Pada Bangunan .....	8
<b>Gambar 2.3.</b> Batang Prismatis yang mengalami tarik .....	11
<b>Gambar 2.4.</b> Deformasi akibat momen lentur .....	14
<b>Gambar 2.5.</b> Hubungan antara tanda momen lentur dan tanda kurvatur.....	15
<b>Gambar 2.6.</b> Aproksimasi solusi keseluruhan diperoleh dari gabungan solusi- solusi elemen .....	17
<b>Gambar 2.7.</b> Dua jenis elemen MEH.....	18
<b>Gambar 2.8.</b> Beberapa bentuk dasar elemen hingga .....	20
<b>Gambar 2.9.</b> Bentuk elemen padat <i>Tetrahedra</i> .....	21
<b>Gambar 3.1.</b> Profil Construction Raised Deck <i>Barge Bahtera Power 3001</i> .....	29
<b>Gambar 3.2.</b> <i>Midship Section View Barge Bahtera Power 3001</i> .....	29
<b>Gambar 3.3.</b> Detail bentuk dan ukuran <i>Raised Deck</i> .....	30
<b>Gambar 3.4.</b> Sketsa Geometri menggunakan Autocad 2021 .....	32
<b>Gambar 3.5.</b> Geometri Struktur Kantilever .....	32
<b>Gambar 3.6.</b> Sketsa Geometri menggunakan Autocad 2021.....	33
<b>Gambar 3.7.</b> <i>Material Properties</i> yang digunakan pada geometri .....	34
<b>Gambar 3.8.</b> Data geometri pada <i>ANSYS Workbench</i> .....	34
<b>Gambar 3.9.</b> <i>Bonded contact</i> antara pelat geladak dan <i>bracket</i> .....	35
<b>Gambar 3.10.</b> Hasil <i>meshing</i> struktur kantilever .....	36
<b>Gambar 3.11.</b> <i>Fixed Support</i> pada model .....	36
<b>Gambar 3.12.</b> Pembebanan pada konstruksi kantilever.....	37
<b>Gambar 3.13.</b> Detail input pembebanan .....	37
<b>Gambar 3.14.</b> Hasil <i>solving</i> yang berhasil.....	38
<b>Gambar 4.1.</b> Posisi roda dilihat pada tampak samping dari hatch cover.....	41
<b>Gambar 4.2.</b> Deformasi maksimum pada Pembebanan 1.....	48
<b>Gambar 4.3.</b> Deformasi maksimum pada Pembebanan 1 Posisi 5 .....	48
<b>Gambar 4.4.</b> Deformasi arah Z pada pelat geladak .....	49
<b>Gambar 4.5.</b> Kurva deformasi arah Z pada pelat geladak .....	49

<b>Gambar 4.6.</b> Deformasi maks balok kantilever pembebanan 1 .....	50
<b>Gambar 4.7.</b> Tegangan von-mises maks pada pembebanan 1 .....	51
<b>Gambar 4.8.</b> Tegangan von-mises maks balok kantilever pembebanan 1.....	52
<b>Gambar 4.9.</b> Tegangan geser XZ maks balok kantilever pembebanan 1 .....	53
<b>Gambar 4.10.</b> Deformasi maks pada Pembebanan 2.....	53
<b>Gambar 4.11.</b> Deformasi maks balok kantilever pembebanan 2.....	54
<b>Gambar 4.12.</b> Tegangan von-mises maks pada pembebanan 2.....	55
<b>Gambar 4.13.</b> Tegangan von-mises maks balok kantilever pembebanan 2.....	56
<b>Gambar 4.14.</b> Tegangan geser XZ maks balok kantilever pembebanan 12 .....	57
<b>Gambar 4.15.</b> Deformasi maks pada Pembebanan 3.....	57
<b>Gambar 4.16.</b> Deformasi maks balok kantilever pembebanan 3.....	58
<b>Gambar 4.17.</b> Tegangan von-mises maks pada pembebanan 3.....	59
<b>Gambar 4.18.</b> Tegangan von-mises maks balok kantilever pembebanan 3.....	60
<b>Gambar 4.19.</b> Tegangan geser XZ maks balok kantilever pembebanan 3 .....	61
<b>Gambar 4.20.</b> Deformasi maks pada Pembebanan 4.....	61
<b>Gambar 4.21.</b> Deformasi maks balok kantilever pembebanan 4.....	62
<b>Gambar 4.22.</b> Tegangan von-mises maks pada pembebanan 4.....	63
<b>Gambar 4.23.</b> Tegangan von-mises maks balok kantilever pembebanan 4.....	64
<b>Gambar 4.24.</b> Tegangan geser XZ maks balok kantilever pembebanan 4 .....	65
<b>Gambar 4.25.</b> Deformasi maks pada Pembebanan 5.....	65
<b>Gambar 4.26.</b> Deformasi maks balok kantilever pembebanan 5.....	66
<b>Gambar 4.27.</b> Tegangan von-mises maks pada pembebanan 5.....	67
<b>Gambar 4.28.</b> Tegangan von-mises maks balok kantilever pembebanan 5.....	68
<b>Gambar 4.29.</b> Tegangan geser XZ maks balok kantilever pembebanan 5 .....	69
<b>Gambar 4.30.</b> Grafik hubungan posisi roda terhadap deformasi pada balok kantilever.....	70
<b>Gambar 4.31.</b> Grafik hubungan posisi roda terhadap tegangan von-mises pada balok kantilever .....	70
<b>Gambar 4.32.</b> Grafik hubungan posisi roda terhadap tegangan geser XZ pada balok kantilever .....	70

<b>Gambar 4.33.</b> Diagram perubahan deformasi balok kantilever 1 pada setiap variasi pembebanan .....	72
<b>Gambar 4.34.</b> Diagram perubahan deformasi balok kantilever 2 pada setiap variasi pembebanan .....	73
<b>Gambar 4.35.</b> Diagram perubahan tegangan von-mises balok kantilever 1 pada setiap variasi pembebanan .....	74
<b>Gambar 4.36.</b> Diagram perubahan tegangan von-mises balok kantilever 2 pada setiap variasi pembebanan.....	74
<b>Gambar 4.37.</b> Diagram perubahan tegangan geser XZ maksimum balok kantilever 1 pada setiap variasi pembebanan .....	75
<b>Gambar 4.38.</b> Diagram perubahan tegangan geser XZ maksimum balok kantilever 2 pada setiap variasi pembebanan .....	75

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>LAMPIRAN 1.</b> Gambar konstruksi profil <i>raised deck roof barge</i> Bahtera Power 3001 .....	80
<b>LAMPIRAN 2.</b> Gambar rencana umum <i>roof barge</i> Bahtera Power 3001.....	81
<b>LAMPIRAN 3.</b> Gambar detail <i>sideboard &amp; raised deck roof barge</i> Bahtera Power 3001 .....	82
<b>LAMPIRAN 4.</b> Tabel perhitungan berat <i>hatch cover</i> Tipe A.....	83
<b>LAMPIRAN 5.</b> Tabel perhitungan berat <i>hatch cover</i> Tipe B.....	84

## DAFTAR NOTASI

$L$	=	Panjang kapal ( m )
$B$	=	Lebar kapal
$C_0$	=	Koefisien gelombang
$C_{RW}$	=	<i>Service range coefficient</i>
$C_L$	=	Koefisien panjang
$l$	=	Panjang Batang ( mm )
FEA	=	<i>Finite Element Analysis</i>
$\sigma_b$	=	Tegangan lengkung
$\tau$	=	Tegangan geser
$\sigma_v$	=	Tegangan Ekuivalen
$W$	=	Beban (N)
$P$	=	Tekanan (kg/m <sup>2</sup> )
$A$	=	Luas penampang (m <sup>2</sup> )
$V$	=	Kecepatan (m/det)
$R$	=	Koefisien beban hujan (kg/m <sup>2</sup> )
$\alpha$	=	Sudut kemiringan atap (°)
$a_z$	=	Percepatan Vertikal
$a_y$	=	Percepatan Melintang
$a_x$	=	Percepatan Memanjang
$a_0$	=	Percepatan Dasar
$f_Q$	=	faktor peluang tergantung pada tingkat peluang Q
$\epsilon$	=	Regangan normal (mm/mm)
$\delta$	=	Perubahan panjang (mm)
{ }	=	Vektor kolom
$K$	=	Kekakuan
[ ]	=	Matriks
$k$	=	Faktor baja
$u$	=	Displacement

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Konstruksi dari kapal *Barge* atau tongkang yang kuat dan luas membuatnya menjadi moda andalan yang dipilih untuk mengangkut muatan dengan volume yang besar. *Barge* umumnya digunakan digunakan untuk mengangkut muatan dengan volume yang besar seperti kayu, batubara, pasir dan bahan galian (tambang) lainnya.

Geladak barge umumnya di desain dengan geladak yang terbuka namun lain halnya dengan *barge* Bahtera Power 3001 yang dibuat di Galangan PT. Bahtera Bahari *Shipyards*, pada *barge* tersebut dilengkapi dengan *roof*/atap atau juga disebut dengan *hatch cover*. *Barge* tersebut akan mengangkut Alumina yang berbentuk serbuk sehingga perlu mendapat perlindungan dari cuaca agar tidak tertiuip angin dan tidak rusak saat terkena air hujan pada saat proses pengangkutan.

Untuk mempermudah proses bongkar muat tentu saja geladak *barge* harus dalam kondisi terbuka agar alat angkat dapat beroperasi dengan leluasa mendistribusikan dan menjangkau seluruh muatan yang ada diatas geladak *barge*, sehinggah *hatch cover* dilengkapi dengan roda dan rel agar dapat membuka dan menutup dengan cara digeser.

Rel *hatch cover* di instalasikan diatas tumpuan balok-balok kantilever pada *raised deck* yang terpasang pada ujung *side board barge*. Balok-balok kantilever tersebut harus di desain kuat untuk menahan beban yang timbul dari *hatch cover* yaitu beban akibat berat konstruksi dari *Hatch cover*, beban akibat tekanan angin, dan beban akibat tekanan hujan. Hal ini bertujuan agar rel *hatch cover* tidak mengalami deformasi atau tetap segaris & selurus. Karena apabila rel *Hatch cover* mengalami deformasi maka akan terjadi gangguan maupun kegagalan pada saat proses buka tutup *hatch cover* yang tentu saja dapat menyebabkan kerusakan muatan yang menimbulkan kerugian.

Berdasarkan hal tersebut, pada penelitian ini penulis akan mencoba menganalisis besarnya tegangan dan deformasi kritis pada balok-balok kantilever tempat bertumpunya rel *Hatch cover*, Oleh karena itu diajukanlah penelitian dengan judul “**Analisis Kekuatan Kantilever Sebagai Penumpu Rel Hatch Cover**”.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana respon kekuatan balok kantilever pada struktur kantilever tersebut terhadap posisi roda *hatch cover* saat mengalami pembebanan ?
2. Dimanakah letak terjadinya deformasi dan tegangan maksimum pada konstruksi kantilever saat mengalami pembebanan ?

## **1.3 Batasan Masalah**

Untuk menyederhanakan pembahasan masalah yang terjadi dalam penelitian dan agar lebih terfokus dan terarah, maka dalam penelitian ini terdapat beberapa hal yang dijadikan sebagai batasan masalah, ialah sebagai berikut :

1. Data yang digunakan ialah data *Roof Barge Bahtera Power 3001*.
2. Pembebanan pada kantilever akan di variasikan berdasarkan berat, tekanan angin, hujan, serta penyusunan *hatch cover* saat di operasikan.
3. Hasil Analisis berupa gambar simulasi hasil deformasi dan tegangan yang terjadi pada pemodelan konstruksi *barge*.
4. Pengerjaan kekuatan struktur menggunakan pendekatan metode elemen hingga (*finite elemen methode*) yang dikerjakan dengan *software Ansys<sup>TM</sup>*.
5. Konstruksi Las diabaikan.

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari dilakukannya penelitian ini, ialah sebagai berikut :

1. Mengetahui besar nilai deformasi dan tegangan maksimum yang terjadi pada balok kantilever pada struktur.

2. Menemukan bagian pada struktur kantilever yang mengalami tegangan dan deformasi maksimum.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat yang didapatkan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui bagaimana kekuatan kantilever dapat menahan beban akibat *hatch cover* yang dipasang pada kapal barge.
2. Sebagai salah satu pertimbangan desainer kapal dalam merancang kapal khususnya *Roof Barge*.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Untuk mendapatkan alur penulisan yang jelas dan memudahkan pembaca mendapatkan uraian dan makna secara sistematis, maka penyajian materi penulisan ini dijabarkan secara umum dalam kerangka penulisan sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan, pada bab ini diuraikan latar belakang permasalahan, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II Landasan Teori, pada bab ini dipaparkan teori-teori yang mendukung penelitian ini. Terdiri dari *Barge*, Kantilever, Beban-beban yang bekerja pada struktur, tegangan, regangan, deformasi, metode elemen hingga dan Ansys.

BAB III Metode Penelitian, pada bab ini dijelaskan jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, jenis dan metode pengambilan data, prosedur analisis dan diagram alur penelitian.

BAB IV Hasil dan Pembahasan, pada bab ini dijelaskan hasil dari analisis kekuatan kantilever sebagai penumpu rel *hatch cover* pada Barge.

BAB V Penutup, pada bab ini dijelaskan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan. Pada bab ini juga berisikan saran sebagai pertimbangan dalam penyempurnaan analisis lebih lanjut.

Daftar Pustaka, berisikan referensi-referensi yang digunakan pada penelitian ini.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

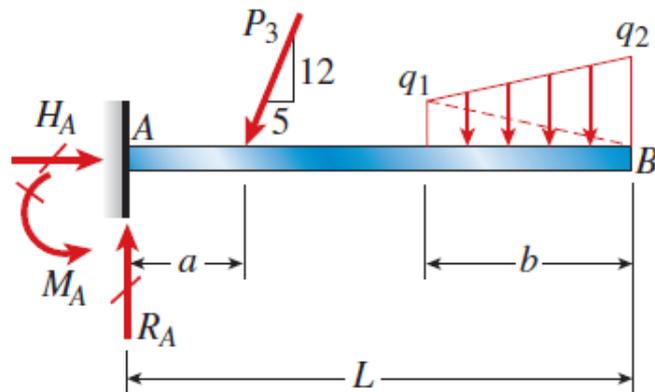
#### **2.1 Barge**

Tongkang atau Barge adalah suatu jenis kapal yang dengan lambung datar atau suatu kotak besar yang mengapung, digunakan untuk mengangkut barang dan ditarik dengan kapal tunda atau digunakan untuk mengakomodasi pasang-surut seperti pada dermaga apung (Manning, dikutip dalam Prayoga & Aryawan, 2016). Tongkang sendiri tidak memiliki sistem pendorong (propulsi) seperti kapal pada umumnya. Pembuatan kapal tongkang juga berbeda karena hanya konstruksi saja, tanpa sistem seperti kapal pada umumnya. Tongkang sendiri umum digunakan untuk mengangkut muatan dalam jumlah besar seperti kayu, batubara, pasir dan lain-lain. Berdasarkan fungsinya, Tongkang (Barge) dibagi dalam :

- Flat Top Barge : Adalah Barge yang berbentuk paling sederhana (seperti kotak korek api) dan dibagian atasnya berbentuk Flat atau datar.
- Cargo Barge : Adalah Barge yang berbentuk seperti kapal biasa, akan tetapi tidak ada kamar untuk mesin, karena kapal ini tidak bermesin induk. Dikatakan sama dengan kapal biasa karena mempunyai kamar kargo atau palka.
- Oil Barge : Adalah jenis Barge yang digunakan khusus untuk mengangkut minyak. Barge jenis ini ada juga yang bersifat ganda, yaitu dibagian bawahnya digunakan untuk membawa minyak, sedangkan diatas deck untuk jenis cargo lainnya.
- Construction Barge : Adalah jenis Flat Top Barge yang digunakan untuk menunjang pekerjaan Erection di lepas pantai Diatas deck biasanya dilengkapi juga dengan kamar akomodasi (Living Quarter) untuk para pekerja.
- Self-Propelled Barge : Tongkang ini berbeda karena memiliki tenaga penggerak sendiri, dengan bentuk kapal yang basisnya sama dengan kapal tongkang. Self-Propelled Barge biasanya dioperasikan pada perairan dangkal maupun sungai.

## 2.2 Kantilever.

Struktur kantilever adalah struktur dimana salah satu ujungnya dijepit dan ujung lainnya bebas yang batas kekuatannya adalah batas terbesar ukuran bangunan dimana perhitungan dan pemilihan material yang digunakan adalah material yang kaku.



Gambar 2.1. Balok kantilever

(Sumber : Geere & Goodno, 2009)

Di tumpuan jepit (clamped support) balok tidak dapat bertranslasi maupun berotasi, sedangkan di ujung bebas balok tersebut dapat bertranslasi dan berotasi. Dengan demikian, baik reaksi gaya maupun momen dapat ada di tumpuan jepit (Geere & Goodno, 2009).

Kantilever adalah suatu konstruksi yang ide awalnya demi untuk menggantikan konstruksi penopang (pillar) pada ruangan-ruangan di kapal agar kondisi ruangan lebih leluasa dan dari segi ergonominya juga dirasa lebih nyaman pandangnya. Ruangan-ruangan yang menggunakan pillar dan diganti alternatif lain yaitu menggunakan kantilever antara lain yaitu bangunan atas kapal, ruanganruangan palka, engine casing dan ruangan yang lain dimana terdapat lubang bukaan di atasnya.

Pada hakekatnya konstruksi kantilever fungsinya sama dengan pelintang balok pada kapal yaitu gading besar di bagian sisi/lambung kapal yang dihubungkan balok geladak besar oleh lutut (knee). Yang membedakan konstruksi kantilever dan pelintang penumpu geladak kapal yaitu cara merencanakan dan betuk konstruksinya.

Agar dapat menahan momen lengkung yang timbul dari beban P, kantilever yang mendukung penumpu, ambang palka, selubung kamar mesin dan bagian-bagian geladak yang tidak ditumpu harus dihubungkan ke pelintang, gading-gading besar, gading-gading utama yang diperkuat atau dinding.

Ketika menentukan ukuran konstruksi kantilever dan bagian konstruksi yang disebutkan sebelumnya, harus dipertimbangkan bahwa momen lengkung yang diterima kantilever tergantung pada kapasitas beban kantilever, kapasitas beban dipengaruhi oleh perbandingan kekakuan kantilever dengan konstruksi yang didukungnya.

Untuk menentukan besar dimensi scantling pada desain cantilever, maka harus diambil pertimbangan bahwa momen lentur kantilever tergantung pada kapasitas beban kantilever. Kapasitas beban tergantung pada rasio kekakuan kantilever yang sesuai dengan bagian yang didukung oleh kantilever. Hal tersebut dapat di tentukan dengan persamaan berikut: (BKI, 2018)

Ketika menentukan scantling kantilever, maka tegangan yang dizinkan harus memperhatikan:

a. Jika kantilever tunggal dipasang pada jarak yang besar :

Tegangan lengkung:

$$\sigma_b = \frac{125}{k} \text{ [ N/mm}^2 \text{ ]} \quad (2.1)$$

Tegangan geser:

$$\tau = \frac{80}{k} \text{ [ N/mm}^2 \text{ ]} \quad (2.2)$$

b. Jika beberapa kantilever dipasang dengan jarak yang lebih kecil (misalnya: pada setiap gading- gading) :

Tegangan lengkung:

$$\sigma_b = \frac{150}{k} \text{ [ N/mm}^2 \text{ ]} \quad (2.3)$$

Tegangan geser:

$$\tau = \frac{100}{k} \text{ [ N/mm}^2 \text{ ]} \quad (2.4)$$

Tegangan Ekuivalen

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 3. \tau^2} = \frac{180}{k} \text{ [ N/mm}^2 \text{ ]} \quad (2.5)$$

## 2.3 Beban-Beban yang Bekerja pada Struktur

### 2.3.1. Beban Hidup

Beban hidup adalah semua beban tidak tetap, kecuali beban angin, beban gempa dan pengaruh-pengaruh khusus yang diakibatkan oleh selisih suhu, pemasangan (erection), penurunan pondasi, susut, dan pengaruh-pengaruh khusus lainnya. Meskipun dapat berpindahpindah, beban hidup masih dapat dikatakan bekerja perlahan-lahan pada struktur. Beban hidup diperhitungkan berdasarkan perhitungan matematis dan menurut kebiasaan yang berlaku pada pelaksanaan konstruksi di Indonesia.

### 2.3.2. Beban Mati

Beban mati adalah semua beban yang berasal dari berat bangunan, termasuk segala unsur tambahan tetap yang merupakan satu kesatuan dengannya.

### 2.3.3. Beban Angin

Beban angin yang bekerja pada struktur bangunan tergantung dari kecepatan angin rapat massa udara, letak geografis, bentuk dan ketinggian bangunan serta kekakuan struktur. Beban angin yang bekerja terhadap struktur dapat dilihat pada persamaan berikut : (Nandira & Kamaluddin, 2015)

$$W = P \cdot A \quad (2.6)$$

Dimana :

$W$  = beban angin (kg)

$P$  = tekanan tiup angin ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

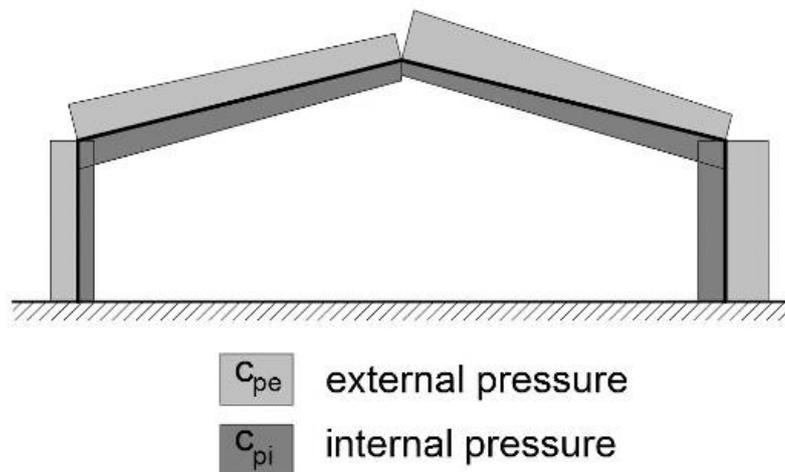
$A$  = luas penampang balok yang memikul angin ( $\text{m}^2$ )

Berdasarkan Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung 1987, tekanan tiup dilaut dan di tepi laut sampai sejauh 5 km dari pantai harus diambil minimum  $40 \text{ kg}/\text{m}^2$  atau Untuk daerah-daerah di dekat laut dan daerah-daerah lain tertentu, di mana terdapat kecepatan-kecepatan angin yang mungkin terdapat kecepatan-kecepatan angin yang mungkin menghasilkan tekanan tiup yang lebih besar daripada  $40 \text{ kg}/\text{m}^2$  tekanan tiup ( $p$ ) harus dihitung dengan rumus :

$$P = \frac{V^2}{16} \quad [ \text{kg/m}^2 ] \quad (2.7)$$

Dimana V adalah kecepatan angin dalam m/det.

Beban angin sangatlah penting untuk banyak jenis dari struktur baja dan seringkali merupakan beban horizontal utama. Untuk struktur yang tidak terlalu fleksibel pengaruh dinamisnya rendah dan beban angin dapat dianggap sebagai sifat statis. Beban angin di definisikan sebagai sebuah tekanan atau hisapan yang bekerja normal pada permukaan. Parameter yang terpenting dalam menentukan beban angin adalah kecepatan angin yang tergantung pada lokasi geografis, kekasaran permukaan dan tinggi di atas tanah, dan juga bentuk dari struktur. (Vayas, Ermopoulos & Ioannidis, 2019).



Gambar 2.2. Beban Angin Pada Bangunan  
(Sumber : Vayas, Ermopoulos & Ioannidis, 2019)

#### 2.3.4. Beban Hujan

Berdasarkan Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung 1987, Dalam perhitungan beban hujan diasumsikan sebagai beban yang bekerja tegak lurus terhadap bidang atap dan koefisien beban hujan ditetapkan sesuai dengan persamaan berikut :

$$R = 40 - 0.8 \alpha \quad (2.8)$$

Dimana :

- $R$  = koefisien beban hujan ( $\text{kg/m}^2$ )
- $\alpha$  = sudut kemiringan atap ( $^\circ$ )

### 2.3.5. Gaya Dinamis Akibat Percepatan

Beban Dinamis adalah beban dengan variasi perubahan beban terhadap waktu. Beban dinamis ini terdiri dari beban angin, getaran mesin kapal dan beban gelombang yang menimbulkan percepatan gerak kapal.

Dalam Ilmu Fisika, Percepatan adalah perubahan kecepatan dalam satuan waktu tertentu. Umumnya, percepatan dilihat sebagai gerakan suatu obyek yang semakin cepat atau lambat. Namun percepatan adalah besaran vektor, sehingga percepatan memiliki besaran dan arah. Satuan SI percepatan adalah  $m/s^2$ .

Pada kapal Ferry dengan muatan bobot besar seperti truk trailer atau troton yang berada di atas geladak juga menimbulkan efek tegangan berulang (periodik) kemudian percepatan gerak kapal. Gerakan kapal dianggap untuk mempelajari teori strip yang ditambahi gerakan heaving (jungkit). Dari gerakan heaving kapal dapat menimbulkan terjadinya percepatan gerak kapal arah vertikal pada saat kapal dalam keadaan tidak berlayar. Gerakan-gerakan yang mengandung komponen vertikal menimbulkan dampak perubahan displasmen kapal. Oleh karena itu, pada gerakan ini akan timbul gaya pengembali yang berusaha mengembalikan kondisi kapal seperti semula. Pada gerak kapal jungkit kapal berada dalam keadaan stabil, sedangkan gerakan lainnya kapal berada dalam kondisi keseimbangan indiferen (Sitepu dikutip dalam Sophian, 2014).

Pada sistem gerakan *heaving* timbul gaya dinamis yang menyebabkan terjadinya getaran dan percepatan gerak kapal yang mengakibatkan pembebanan pada konstruksi kapal berubah-ubah tiap peningkatan percepatan. Misalkan pembebanan pada konstruksi geladak yang mengangkut kendaraan seperti truk berbobot besar seperti trailer atau troton. Beban yang timbul pada konstruksi geladak adalah beban statis dari muatan truk, tekanan air dan berat kapal itu sendiri sedangkan beban dinamis yaitu berasal dari dinamika kapal, tekanan hidrodinamika akibat gerakan air (gelombang) dan permesinan di atas kapal. Perubahan pembebanan pada geladak dapat dihitung menggunakan rumus :

$$a. \text{ Beban} = m \times (g+a) \quad [ N ] \quad (2.8)$$

$$b. \text{ Luas} = p \times l \quad [ mm^2 ] \quad (2.9)$$

$$c. \text{ Pressure} = \frac{\text{Beban}}{\text{Luas}} \quad [ N/mm^2 ] \quad (2.10)$$

Berdasarkan BKI Volume II Rumus berikut dapat diambil sebagai acuan saat menghitung komponen percepatan akibat pergerakan kapal. Percepatan  $a_x$ ,  $a_y$  dan  $a_z$  adalah percepatan maksimum tanpa satuan (yaitu relatif terhadap percepatan gravitasi  $g$ ) dalam arah  $x$ ,  $y$  and  $z$ . Untuk keperluan perhitungan, kesemuanya dianggap bekerja secara terpisah. Komponen percepatan memperhitungkan komponen gerak berikut:

- a. **Percepatan vertikal** (tegak lurus terhadap garis dasar) disebabkan oleh gerak lonjak (*heave*) dan gerak angguk (*pitch*).

$$a_z = \pm a_0 \sqrt{1 + \left[5.3 - \frac{4.5}{L}\right]^2 \left[\frac{x}{L} - 0.45\right]^2 \left[\frac{0.6}{C_B}\right]^{1.5}} \quad (2.11)$$

- b. **Percepatan melintang** (vertikal terhadap sisi kapal) disebabkan gerak oleng (*sway*), gerak geleng (*yaw*), gerak lenggang (*roll*) termasuk komponen gravitasi oleng.

$$a_y = \pm a_0 \sqrt{0.6 + 2.5 \left[\frac{x}{L} - 0.45\right]^2 + k \left[1 + 0.6 \times k \frac{z-T}{B}\right]} \quad (2.12)$$

- c. **Percepatan memanjang** (dalam arah memanjang) disebabkan gerak lambung (*surge*) dan gerak angguk (*pitch*) termasuk komponen gravitasi angguk.

$$a_x = \pm a_0 \sqrt{0.06 + A^2 - 0.25 \times A} \quad (2.13)$$

Dimana

$$A = \left[0.7 - \frac{L}{1200} + 5 \frac{z-T}{B}\right] \frac{0.6}{C_B} \quad (2.14)$$

$$a_0 = \left[0.2 \frac{v_0}{\sqrt{L_0}} + \frac{3 \times c_0 \times c_l}{L_0}\right] f_Q \quad (2.15)$$

$L_0$  = panjang kapal  $L$  (m), tetapi untuk menentukan  $a_0$  panjang  $L_0$  tidak boleh kurang dari 100 m.

$$k = \frac{13.GM}{B} \quad (2.16)$$

$GM$  = tinggi metasentrik (m)

$$k_{min} = 1,0$$

$f_Q$  = faktor peluang tergantung pada tingkat peluang Q sebagaimana tercantum dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1. Faktor peluang rentang tegangan di laut dengan spektrum garis lurus

Q	$f_Q$
$10^{-8}$	1,000
$10^{-7}$	0,875
$10^{-6}$	0,750
$10^{-5}$	0,625
$10^{-4}$	0,500

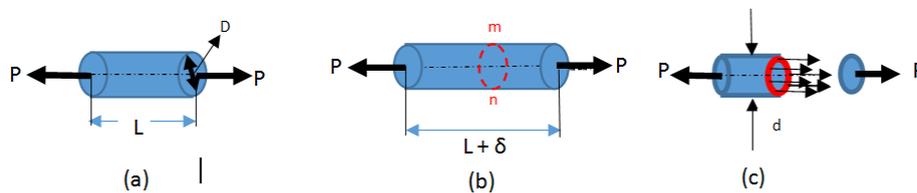
(Sumber : BKI, 2018)

## 2.4 Tegangan dan Regangan

### 2.4.1. Jenis Tegangan

#### 2.4.1.1. Tegangan Normal

Setiap material adalah elastis pada keadaan alaminya. Karena itu jika gaya luar bekerja pada benda, maka benda tersebut akan mengalami deformasi. Ketika benda tersebut mengalami deformasi, molekulnya akan membentuk tahanan terhadap deformasi. Tahanan ini per satuan luas dikenal dengan istilah tegangan. Secara matematik tegangan bisa didefinisikan sebagai gaya per satuan luas. Konsep dasar dalam mekanika bahan adalah tegangan dan regangan. Dapat ditinjau pada sebuah benda berbentuk batang prismatik seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Batang Prismatis yang mengalami tarik (a) diagram benda bebas dari segmen batang, (b) segmen batang setelah dibebani, (c) tegangan normal pada batang.

(Sumber: Gere & Temoshenco, 2000)

Dengan asumsi bahwa tegangan terbagi merata pada setiap batang (gambar 2.3.c) Maka dapat diturunkan rumus untuk menghitung tegangan adalah :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.17)$$

Dimana :

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

$P$  = besar gaya yang bekerja (N)

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

Persamaan ini memberikan intensitas tegangan merata pada batang prismatis yang dibebani secara aksial dengan penampang sembarang. Apabila batang ini ditarik dengan gaya  $P$ , maka tegangannya adalah tegangan tarik (tensile stress); apabila gayanya mempunyai arah sebaliknya, sehingga menyebabkan batang tersebut mengalami tekan, maka terjadi tegangan tekan (compressive stress). Karena tegangan ini mempunyai arah yang tegak lurus permukaan potongan, maka tegangan ini disebut tegangan normal (normal stress). Jadi, tegangan normal dapat berupa tarik atau tekan. Apabila konvensi tanda untuk tegangan normal dibutuhkan, biasanya tegangan tarik didefinisikan bertanda positif dan tegangan tekan bertanda negatif. (Gere & Temoshenco, 2000).

Adapun persamaan untuk tegangan normal bidang tiga dimensi adalah sebagai berikut :

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\epsilon_x (1 - \nu) + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)] \quad (2.18)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\epsilon_y (1 - \nu) + \nu(\epsilon_x + \epsilon_z)] \quad (2.19)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\epsilon_x (1 - \nu) + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)] \quad (2.20)$$

Analisis menggunakan perangkat lunak elemen hingga memiliki kelebihan yaitu dapat menghasilkan nilai tegangan Von Mises atau tegangan ekuivalen, yaitu jenis tegangan yang mengakibatkan kegagalan pada struktur material yang dirumuskan oleh penemunya yang bernama Von Mises. Untuk penentuan tegangan Von Mises, terlebih dahulu menghitung tegangan utama yang bekerja pada struktur dengan menggunakan persamaan diatas, setelah tegangan utama ditemukan maka tegangan Von Mises bisa didapatkan dengan persamaan (Shigley dikutip dalam Anggara, 2019) :

$$\sigma = \left\{ \frac{[\sigma_1 - \sigma_2]^2 + [\sigma_2 - \sigma_3]^2 + [\sigma_3 - \sigma_1]^2}{2} \right\}^{1/2} \quad (2.21)$$

#### 2.4.1.2. Tegangan Geser

Gaya pada benda menyebabkan perubahan ukuran benda. Pengaruh vektor gaya terhadap sumbu x menghasilkan besaran *tensile stress* dengan lambang  $\sigma_x$ . Indeks x menyatakan arah vektor gaya. Pengaruh gaya terhadap sumbu y dan z menghasilkan momen yang disebut tegangan geser (*shear stress*). Tegangan geser (*shear stress*) dilambangkan  $\tau$  yang secara matematis didefinisikan sebagai berikut:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2.22)$$

$$\tau = \frac{V \cdot St}{I \cdot b} \quad (2.23)$$

Dimana :

$\tau$	=	tegangan geser (N/mm <sup>2</sup> )
V	=	gaya sejajar bidang elemen (N)
A	=	luas penampang (mm <sup>2</sup> )
St	=	statis momen (mm <sup>3</sup> )
I	=	Inersia (mm <sup>4</sup> )
b	=	tebal (mm)

Persamaan tegangan geser (*shear stress*) untuk bidang tiga dimensi adalah sebagai berikut :

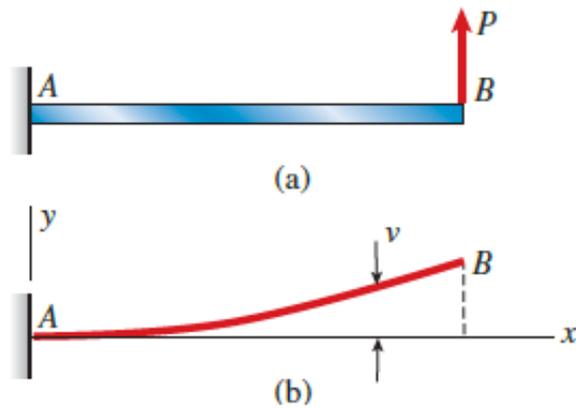
$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} \quad (2.24)$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xz} = G \cdot \gamma_{xz} \quad (2.25)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yz} \quad (2.26)$$

#### 2.4.1.3. Tegangan Lentur

Beban yang bekerja pada sebuah balok (*beam*) menyebabkan *beam* melentur/*bending*, hal tersebut menyebabkan deformasi sumbu *beam* hingga membentuk kurva. Sebagai contoh, asumsikan sebuah balok kantilever AB dikenai beban P pada ujung bebas (gambar 2.4a). sumbu yang awalnya lurus membengkok hingga membentuk kurva (gambar 2.4b), yang disebut dengan defleksi. (Gere & Goodno, 2009).



Gambar 2.4. Deformasi akibat momen lentur

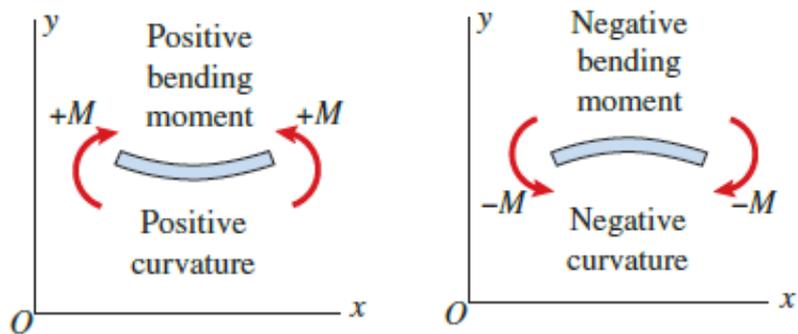
(Sumber: Gere & Goodno, 2009)

Hubungan tegangan-regangan yang paling umum ditemui pada bidang keteknikan adalah persamaan *linear-elastic material*. Untuk material seperti itu kita substitusikan *Hooke's law* untuk tegangan uniaxial ( $\sigma = E\epsilon$ ) ke dalam persamaan *strain-curvature* sehingga didapatkan (Gere & Goodno, 2009).

$$\sigma_x = -\frac{M_y}{I} \quad (2.27)$$

Persamaan (2.2) disebut dengan *flexure formula*, menunjukkan bahwa tegangan berbanding lurus dengan momen lentur M dan berbanding terbalik dengan momen inersia I dari penampang balok. Selain itu, tegangan bervariasi secara linear dengan jarak jarak y dari titik berat. Tegangan yang dihitung dari *flexure formula* disebut dengan tegangan lentur (*bending stresses*) atau *flexural stresses*. (Gere & Goodno, 2009)

Jika momen lentur dari balok adalah positif, maka tegangan lentur akan positif (tensil) pada bagian penampang balok dimana y negatif, yaitu dibagian bawah balok. Tegangan pada bagian atas balok akan negatif (kompresi). Jika momen lentur negatif, maka tegangan lentur kebalikannya. Hubungan ini ditunjukkan pada gambar 2.4. (Gere & Goodno, 2009)



Gambar 2.5. Hubungan antara tanda momen lentur dan tanda kurvatur  
(Sumber: Gere & Goodno, 2009)

#### 2.4.2. Regangan

Sebuah batang seperti pada gambar 2.3 akan mengalami perubahan panjang akibat dari beban aksial tarik/ tekan yang diberikan. Perubahan panjang dari batang adalah hasil kumulatif dari semua elemen bahan diseluruh volume batang. Dengan asumsi bahwa batang mengalami perubahan konstan diseluruh permukaan maka untuk menghitung perpanjangan pesatuan panjang atau regangan adalah :

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.28)$$

Dimana :

- $\epsilon$  = regangan normal (mm/mm)
- $\delta$  = perubahan panjang (mm)
- $L$  = panjang awal (mm)

Jika batang tersebut mengalami tarik, maka regangannya disebut regangan tarik, yang menunjukkan perpanjangan bahan. Jika batang tersebut mengalami tekan, maka regangannya adalah regangan tekan dan batang tersebut memendek. Regangan tarik biasanya bertanda positif dan regangan tekan bertanda negatif. Regangan  $\epsilon$  disebut regangan normal karena regangan ini berkaitan dengan tegangan normal. . (Gere & Temoshenco, 2000 ).

### 2.5 Deformasi

Deformasi material merupakan perubahan bentuk atau ukuran material karena adanya sebuah gaya kerja yang diterima. Deformasi material timbul akibat gaya kerja berupa kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan puntir atau torsi.

Deformasi terjadi bila bahan mengalami gaya. Selama deformasi, bahan menyerap energi sebagai akibat adanya gaya yang bekerja sepanjang deformasi. Sekecil apapun gaya yang bekerja, maka benda akan mengalami perubahan bentuk dan ukuran. Perubahan ukuran secara fisik ini disebut deformasi. Deformasi ada dua macam yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Yang dimaksud deformasi elastis adalah deformasi yang terjadi akibat adanya beban yang jika beban ditiadakan, maka material akan kembali ke ukuran semula. Sedangkan deformasi plastis adalah deformasi yang bersifat permanen jika bebannya dilepas (Jasmani, 2001).

Hubungan tegangan-regangan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.18)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} E &= \text{modulus elastisitas} \\ \epsilon &= \text{regangan normal (mm/mm)} \\ \sigma &= \text{tegangan normal (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

Sehingga deformasi ( $\delta$ ) dapat diketahui :

$$\delta = \frac{P \times L}{A \times E} \quad (2.29)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} E &= \text{modulus elastisitas (N/mm}^2\text{)} \\ P &= \text{besar gaya yang bekerja (N)} \\ A &= \text{luas penampang (mm}^2\text{)} \\ L &= \text{panjang awal (mm)} \end{aligned}$$

## 2.6 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala phisis. Tipe masalah teknis dan matematis phisis yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisa struktur dan kelompok masalah-masalah non-struktur (Susatio,2004).

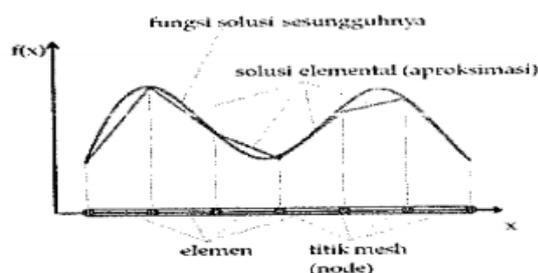
Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi :

1. Analisa tegangan/Stress, meliputi analisa Truss dan frame serta masalah-masalah yang berhubungan dengan tegangan-tegangan yang terkonsentrasi.
2. Buckling.
3. Analisa getaran.

Dalam persoalan-persoalan yang menyangkut geometri yang rumit, seperti persoalan pembebanan terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Hal ini disebabkan karena matematika analisis memerlukan besaran atau harga yang harus diketahui pada setiap titik pada struktur yang dikaji.

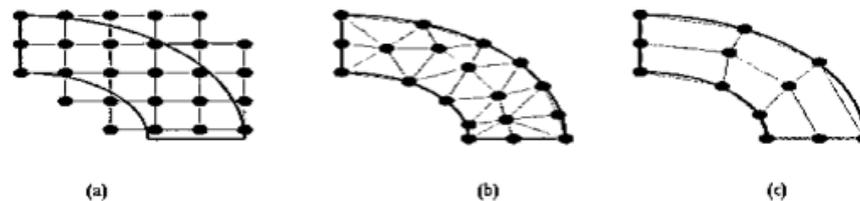
Penyelesaian analisis dari suatu persamaan diferensial suatu geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit, tidak mudah diperoleh. Formulasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini (Susatio,2004).

Proses inti MEH adalah membagi problem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau elemen-elemen dari mana solusi yang lebih sederhana dapat dengan mudah diperoleh. Solusi dari setiap elemen jika digabungkan akan menjadi solusi problem secara keseluruhan. Gambar 2.4 menjelaskan cara kerja MEH di mana solusi suatu problem yang kompleks diaproksimalkan oleh solusi elemen. Untuk mendapatkan solusi elemental, MEH menggunakan fungsi interpolasi untuk mengaproksimalkan solusi elemen. Untuk contoh ini suatu fungsi linear yang sederhana dipergunakan sebagai fungsi interpolasi. Setelah solusi setiap elemen diperoleh, dengan menggabungkan solusi-solusi elemen maka solusi keseluruhan problem dapat diperoleh. Dengan menggunakan fungsi polinomial seperti fungsi kuadrat sebagai fungsi interpolasi, solusi yang lebih akurat bisa diperoleh.



Gambar 2.6. Aproksimasi solusi keseluruhan diperoleh dari gabungan solusi-solusi elemen

Prinsip MEH adalah membagi domain permasalahan, baik itu domain ruang (spatial domain) atau domain waktu (time domain), menjadi sub domain atau elemen yang lebih kecil. Dengan menghitung solusi pada elemen-elemen dan selanjutnya menggabungkan keseluruhan solusi elemental, solusi total dari permasalahan diperoleh. Dalam menghitung solusi per elemen tentunya solusi elemen harus memenuhi beberapa ketentuan, seperti kontinuitas pada titik-titik nodal dan antarmuka (interface) elemen. Gambar 2.7 menggambarkan dua jenis elemen MEH, yaitu elemen segitiga (*triangular element*) dan segiempat (*quadrilateral element*).



Gambar 2.7 (a) mesh metode perbedaan hingga, (b) elemen segitiga, (c) elemen segiempat (• adalah titik mesh nodes)  
(Sumber : Isworo & Pathur, 2018)

Dengan MEH, solusi yang diperoleh adalah fungsi interpolasi setiap elemen. Setelah fungsi interpolasi elemen dihitung, solusi keseluruhan dapat diperoleh. Fungsi-fungsi interpolasi setiap elemen ditentukan oleh nilai pada titik mesh.

Pada prinsipnya penerapan Metode Elemen Hingga terdiri dari langkah-langkah sebagai berikut:

#### 1. Diskritisasi Domain

Pada tahap ini kita tentukan jenis elemen yang akan kita gunakan. Untuk problem 2-dimensi (Gambar 2.5), elemen 2-dimensi yang umum digunakan adalah tiga sisi (triangular) atau empat sisi (quadrilateral). Elemen-elemen ini bisa berupa elemen linear ataupun non-linear. Untuk problem 3 dimensi, elemen 3 dimensi yang umum digunakan adalah elemen tetrahedral (empat muka) dan heksahedral (enam muka).

## 2. Penentuan Bentuk Fungsi Aproksimasi

Pada tahap ini bentuk dari fungsi interpolasi ditentukan, fungsi yang umum digunakan adalah fungsi polinomial. Tingkat dari polinomial ini ditentukan oleh jumlah node pada setiap elemen dan syarat kontinuitas yang diperlukan pada batas elemen. Untuk elemen segitiga dengan tiga titik nodal, fungsi interpolasinya adalah fungsi linear atau polinomial tingkat 1. Dengan enam titik nodal, fungsi interpolasi yang digunakan adalah fungsi polinomial tingkat 2 atau fungsi kuadratik.

## 3. Penghitungan Properti Elemen

Fungsi interpolasi yang telah ditentukan pada tahap 2 kemudian disubstitusikan kembali pada persamaan-persamaan diferensial dan diproses guna 15 mendapatkan sistem persamaan linear atau sistem matriks yang merupakan properti dari elemen yang terkait. Ada beberapa cara yang digunakan untuk mendapatkan persamaan linear tersebut, antara lain pendekatan direk, pendekatan variasional, pendekatan residu berbobot (weighted residue) dan pendekatan keseimbangan energi.

## 4. Pembentukan Sistem Persamaan Linear

Matriks-matriks elemen yang terbentuk kemudian digabung menjadi matriks global. Ukuran matriks elemen adalah jumlah node per elemen dikalikan jumlah degree of freedom (dof) setiap node. Jadi untuk elemen segitiga dengan 3 node dan 1 dof, ukuran dari matriks elemennya adalah  $3 \times 3$ . Seandainya setiap node mempunyai 2 dof maka ukuran matriks elemennya adalah  $6 \times 6$ .

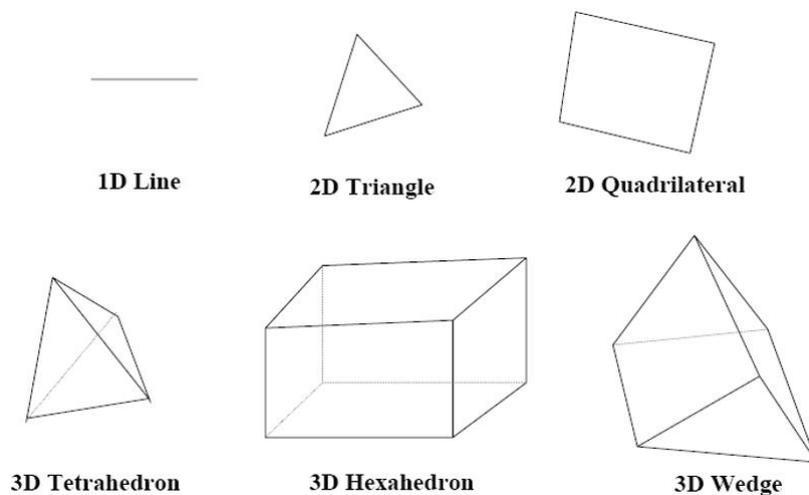
## 5. Pemecahan Sistem Persamaan Linear

Sistem global yang terbentuk pada tahap 4 dapat berupa sistem persamaan linear atau sistem persamaan non-linear. Jika sistem yang terbentuk berupa sistem persamaan linear teknik-teknik umum untuk memecahkan sistem dapat kita gunakan.

## 6. Post Process Hasil

Setelah solusi diperoleh dari tahap 5, hasil dapat ditampilkan berupa grafik kountour atau plot. Jika ada parameter lain yang bergantung pada hasil maka parameter ini dihitung setelah hasil diperoleh. (Isworo dan Pathur, 2018).

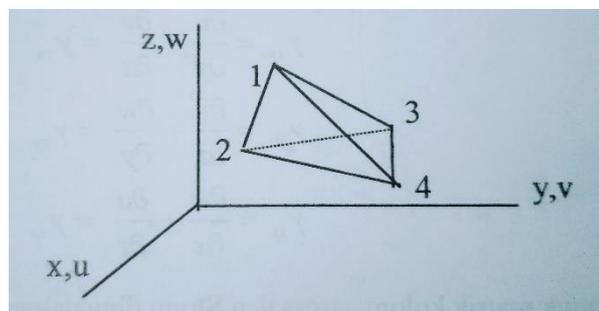
Seperti telah dijelaskan langkah pertama yang penting dalam MEH adalah diskretisasi. Diskretisasi ini dilakukan dengan *meshing*, yaitu dengan membagi-bagi suatu kontinum (model fisik kontinu) menjadi sejumlah terhingga elemen-elemen sederhana yang lebih kecil, yang gabungannya mendekati geometri kontinum semula. *Meshing* ini dapat dilakukan secara manual atau dibantu program *preprocessor* yang terintegrasi dalam paket program MEH, atau program khusus *pre-processor*. Kata ‘mendekati’ dalam definisi diskretisasi ditekankan karena bisa saja bentuk keseluruhan model elemen hingga (hasil diskretisasi) tidak secara eksak sama dengan geometri kontinum semula. Ini terjadi terutama untuk model kontinum dengan batas-batas kurva lengkung pada model 2D dan batas-batas permukaan lengkung pada model 3D. Elemen ‘sederhana’ yang dimaksudkan di sini adalah elemen yang bentuknya sederhana. Bentuk-bentuk elemen yang umum digunakan untuk model 1D, 2D, dan 3D diperlihatkan pada Gambar 2.8. (Tjong, 2021).



Gambar 2.8 Beberapa bentuk dasar elemen hingga  
(Sumber : Tjong, 2021)

Setiap elemen hingga memiliki sejumlah titik khusus yang disebut titik nodal. Titik titik nodal ini sangat penting karena pada titik-titik ini didefinisikan nilai-nilai variabel utama yang tidak diketahui. Jumlah seluruh variabel utama pada satu titik nodal disebut derajat kebebasan titik nodal (nodal DOF). Jumlah seluruh derajat kebebasan titik nodal dari suatu elemen hingga adalah derajat kebebasan elemen (elemen DOF). Selain itu, titik-titik nodal berfungsi sebagai titik penghubung antara satu elemen dengan elemen lainnya dalam model elemen hingga. Tidak ada bagian lain pada elemen hingga yang berinteraksi dengan elemen lainnya kecuali pada titik nodal.

Dalam penelitian ini digunakan elemen padat *tetrahedra*, adapun bentuk elemen *tetrahedra* ditunjukkan pada Gambar 2.7 berikut ini.



Gambar 2.9 Bentuk elemen padat *Tetrahedra*

(Sumber : Susatio, 2004)

Langkah-langkah yang dikerjakan dalam menganalisa adalah :

- Langkah 1 : Diskritisasi dan pemilihan tipe elemen

Perhatikan cara penomoran yang dilakukan. Nomor terakhir (=4) ditentukan terlebih dahulu. Nomor-nomor lainnya ditentukan searah dengan arah jarum jam.

*Displacement* = {q}.

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2.30)$$

- Langkah 2 : Pemilihan fungsi *Displacement*

Fungsi *Displacement*  $u, v, w$  harus merupakan fungsi linier karena hanya ada 2 node yang membatasi sebuah rusuk elemen. Masing-masing fungsi *Displacement* tersebut adalah

$$u(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z$$

$$v(x, y, z) = a_5 + a_6x + a_7y + a_8z$$

$$w(x, y, z) = a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z \quad (2.31)$$

Dengan syarat batas: pada  $(x, y, z), u = u_1$

pada  $(x, y, z), u = u_2$  dan seterusnya dihasilkan:

$$u = \frac{1}{6v} [ \{ (\alpha_1 + \beta_1x + \gamma_1y + \delta_1z)u_1 + (\alpha_2 + \beta_2x + \gamma_2y + \delta_2z)u_2 + (\alpha_3 + \beta_3x + \gamma_3y + \delta_3z)u_3 + (\alpha_4 + \beta_4x + \gamma_4y + \delta_4z)u_4 \} ] \quad (2.32)$$

Dimana  $6v$  dihitung dari harga determinan berikut ini.

$$6v = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (2.33)$$

$v$  menyatakan volume dari elemen *Tetrahedra*. Koefisien-koefisien  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ , ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) dalam persamaan (11.14) diberikan sebagai berikut.

$$\alpha_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

$$\alpha_2 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

$$\beta_1 = - \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

$$\beta_2 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

$$\gamma_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

$$\gamma_2 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

$$\delta_1 = - \begin{vmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix}$$

$$\delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\alpha_3 &= \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} & \alpha_4 &= - \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \\
\beta_3 &= - \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} & \beta_4 &= - \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \\
\gamma_3 &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{bmatrix} & \gamma_4 &= - \begin{bmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{bmatrix} \\
\delta_3 &= - \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{bmatrix} & \delta_4 &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (2.34)
\end{aligned}$$

Fungsi *Displacement* dalam kaitannya dengan *Shape Function* N ditulis sebagai berikut.

$$- \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2.35)$$

dimana

$$\begin{aligned}
N_1 &= \frac{(\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z)}{6v} \\
N_2 &= \frac{(\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z)}{6v} \\
N_3 &= \frac{(\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z)}{6v} \\
N_4 &= \frac{(\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z)}{6v} \quad (2.36)
\end{aligned}$$

- Langkah 3 : Menentukan *Strain – Displacement* dan hubungan *Stress/Strain* dari elemen untuk kasus *stress* tiga dimensi diberikan dalam persamaan berikut ini.

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2.37)$$

Dikalikan dengan matrik [B], *Strain* dinyatakan sebagai:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\} \quad (2.38)$$

Dimana

$$[B] = [\bar{B}_1 \ \bar{B}_2 \ \bar{B}_3 \ \bar{B}_4] \quad (2.39)$$

sub matrik  $[\bar{B}_1]$  adalah:

$$[\bar{B}_1] = \begin{bmatrix} N_{1,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{1,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{1,z} \\ N_{1,y} & N_{1,x} & 0 \\ 0 & N_{1,z} & N_{1,y} \\ N_{1,z} & 0 & N_{1,x} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Catatan:

1. Indek huruf dibelakang koma menyatakan diferensial dari  $N_1$  terhadap x.
2. Untuk sub matrik lain  $\bar{B}_2, \bar{B}_3, \bar{B}_4$  tinggal mengganti indeks 1 pada persamaan (2.30) berturut-turut dengan 2, 3, dan 4.

Dengan memasukkan harga  $N_i$  dari persamaan (11.17) ( $i = 1,2,3,4$ ) ke persamaan (2.30) diperoleh sub matrik:

$$[\bar{B}_1] = \frac{1}{6v} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 0 \\ 0 & \delta_1 & \gamma_1 \\ \delta_1 & 0 & \beta_1 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Demikian pula sub matrik  $[\bar{B}_2], [\bar{B}_3], [\bar{B}_4]$

Hunungan Stress – Strain diberikan melalui persamaan

$$\{\sigma\} = [c]\{\varepsilon\} \quad (2.42)$$

dimana matrik konstitutif [c] untuk material elastik diberikan dalam persamaan berikut :

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ \text{symetry} & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

- Langkah 4 : Menurunkan persamaan matrik kekakuan elemen

Matrik kekakuan elemen diberikan dalam persamaan :

$$[K] = \iiint_v [B]^T [c][B]dv \quad (2.43)$$

Karena kedua matrik [B] dan [c] konstan untuk elemen *tetrahedra* yang sederhana, persamaan (11.25) dapat disederhanakan menjadi:

$$[K] = [B]^T [c][B]v \quad (2.43.a)$$

Dengan  $v$  = volume *tetrahedra*

Matrik kekakuan elemen berordo (12 x 12)

$$\text{Matrik } body\ force \{Q\}_{BF} = \iiint_v [N]^T \{x\} dv \quad (2.44)$$

Dimana [N] matrik berordo (3 x 12) dan matrik kolom {x} adalah:

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_{BF}$$

Matrik traksi pada permukaan {Q}<sub>T</sub> adalah:

$$\{Q\}_T = \iint [N]^T \{T\} ds \quad (2.45)$$

Sebagai contoh, anggap tekanan *uniform* P bekerja pada bidang elemen yang dibatasi node 1, 2, 3 maka

$$\{Q\}_T = \iint_s [N]^T \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} ds \quad (2.46)$$

dimana [N]<sup>T</sup> dievaluasi pada bidang 1, 2, 3 dan P<sub>x</sub>, P<sub>y</sub>, P<sub>z</sub> adalah komponen tekanan berturut-turut terhadap x, y, dan z. Dapat dihitung hasilnya sebagai berikut:

$$\{Q\}_T = \frac{S_{123}}{3} \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ P_x \\ P_y \\ P_z \\ P_x \\ P_y \\ P_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.46.a)$$

dimana  $S_{1,2,3}$  adalah luas bidang sisi elemen yang berbatasan dengan node 1, 2, 3.

## 2.7 Ansys

Ansys adalah salah satu *software* yang digunakan untuk menganalisis berbagai macam struktur, aliran fluida, dan perpindahan panas. Adapun contoh software analisis yang lain yaitu NASTRAN, CATIA, Fluent dan yang lainnya (Pinem, 2013).

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku batang baja akibat mendapat beban terpusat. Pada penggunaannya, secara umum program ANSYS memiliki tahapan utama yaitu (Kusbiantoro dkk, 2016) :

1. *Pre-Pocessing* adalah langkah awal dalam permodelan elemen hingga. Pada pre-pocessing terdapat beberapa fungsi dimana kita harus mendeinisikan fungsi-fungsi tersebut akan menghasilkan perhitungan yang spesifik pada benda yang akan dianalisa. Fungsi-fungsi yang terdapat preprocessing adalah: permodelan, penentuan tipe elemen, penentuan material , *meshing*.
2. *Solution*, Pada tahapan ini FEM telah mendekati proses perhitungan dan analisa. Ada beberapa langkah dalam proses perhitungan yang harus dilalui terlebih dahulu. Langkah-langkah tersebut adalah: pembebanan dan analisa.
3. *General Post-Processing* Setelah proses permodelan dan analisis selesai langkah selanjutnya adalah proses *post processing*. Proses ini digunakan untuk melihat hasil analisis, dalam hal ini hasil yang dilihat adalah *displacement*, momen, gaya geser, dan gaya normal yang terjadi.