

**ANALISIS KEKUATAN PERTAMBAHAN PANJANG *LADDER* KAPAL  
*CUTTER SUCTION DREDGER***

*STRENGTH ANALYSIS DUE TO THE ELONGATION'S LADDER OF  
CUTTER SUCTION DREDGER SHIP*

**HARIYONO  
D052201003**



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

**ANALISIS KEKUATAN PERTAMBAHAN PANJANG *LADDER* KAPAL  
*CUTTER SUCTION DREDGER***

*STRENGTH ANALYSIS DUE TO THE ELONGATION'S LADDER OF  
CUTTER SUCTION DREDGER SHIP*

**Tesis**

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi  
Teknik Perkapalan

Disusun dan diajukan oleh

HARIYONO  
D052201003

Kepada

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

**TESIS****ANALISIS KEKUATAN PERTAMBAHAN PANJANG LADDER KAPAL  
CUTTER SUCTION DREDGER**

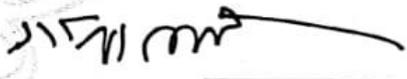
Disusun dan diajukan oleh

**HARIYONO**  
Nomor Pokok D052201003

Telah dipertahankan didepan Panitia Ujian Tesis  
pada tanggal 04 Maret 2022  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui,  
Komisi Penasehat,

  
Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dipl. Ing-  
Ketua

  
M. Zubair M. Alie, S.T., M.T., Ph.D.  
Anggota

Ketua Program Studi  
Teknik Perkapalan

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



  
Dr. Ir. Syamsul Asri, M.T.



  
Prof. Dr. Ir. Muh. Arsyad Thaha, M.T.

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hariyono

Nomor Mahasiswa : D052201003

Program Studi : Teknik Perkapalan

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 4 Maret 2022



Hariyono

## PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa dengan selesainya tesis ini.

Gagasan yang melatari tajuk permasalahan ini timbul dari hasil pengamatan penulis terhadap beberapa pemilik Kapal Isap Produksi (KIP) yang ingin melakukan pertambahan panjang *ladder* pada kapal *cutter suction dredger* sehingga mampu menambang lebih dalam. Penulis bermaksud menganalisis kekuatan struktur *ladder* kapal *cutter suction dredger* sebelum dan setelah di perpanjang.

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam penyusunan tesis ini, yang hanya berkat bantuan berbagai pihak, maka tesis ini selesai pada waktunya. Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dipl. Ing sebagai Ketua Komisi Penasihat dan Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D sebagai Anggota Komisi Penasihat atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari pengembangan minat terhadap permasalahan penelitian ini, pelaksanaan penelitian sampai penulisan tesis ini.

Ucapan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada Ayahanda Ismail dan Ibunda Hayana serta seluruh keluarga dan teman-teman program studi Magister Teknik Perkapalan atas doa dan segala dukungannya baik moril maupun materil selama mengikuti pendidikan di Universitas Hasanuddin.

Akhirnya penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan industri perkapalan Indonesia.

Makassar, 4 Maret 2022

Hariyono

## ABSTRAK

**HARIYONO.** *Analisis Kekuatan Pertambahan Panjang Ladder Kapal Cutter Suction Dredger* (dibimbing oleh **Ganding Sitepu** dan **Muhammad Zubair Muis Alie**).

Penelitian ini bertujuan mengetahui respon struktur *ladder* sebelum dan setelah di perpanjang, kekuatan batas struktur *ladder* pada area katrol, dan kekuatan batas struktur *longitudinal ladder* akibat vertikal momen lentur. Konstruksi *ladder* di pertambah panjang mulai dari 58 m, 62 m, 66 m, sampai 70 m yang setiap pertambahan panjang di variasikan sudut kemiringan *ladder* mulai dari 0°, 30°, 45°, sampai 60°. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin panjang *ladder* maka nilai tegangan semakin besar dengan rata-rata persentase kenaikan 20,3% dari tegangan awal. Sementara pada variasi sudut semakin besar sudut kemiringan *ladder* maka nilai tegangan berkurang 16,2% dari tegangan awal. Dari beban pipa, *cutter* dan torsi *cutter* struktur *strut ladder* mengalami tegangan maksimum yaitu 56,88 N/mm<sup>2</sup> yang berjarak 49 m dari *shaft ladder*. Investigasi kekuatan batas menggunakan metode *Nonlinear Finite Element Analysis* (NLFEA) pada sudut 0° *strut ladder* akan patah ketika mendapatkan beban pipa 167,6 ton, beban *cutter* 67,3 ton dan torsi *cutter* sebesar 7,79x10<sup>8</sup> Nmm. Pada sudut kemiringan 60° *strut ladder* akan patah ketika mendapatkan beban pipa 132,7 ton, beban *cutter* 53,3 ton dan torsi *cutter* sebesar 6,17 x10<sup>8</sup> Nmm. Sementara analisis kekuatan batas *longitudinal ladder* dengan variasi momen pada sudut 0° untuk kondisi *sagging* dan *hogging* mengalami pergeseran maksimum pada *column* yang berjarak 42 m dari *shaft ladder* bergeser 131,73 mm yang akan runtuh ketika menerima momen sebesar 2,89 x 10<sup>9</sup> Nmm sementara sudut 60° bergeser 66,17 mm dari posisi awal sebelum mendapat beban dan akan runtuh ketika menerima momen sebesar 1,45 x 10<sup>9</sup> Nmm. Semakin besar sudut kemiringan akan berbanding terbalik dengan nilai tegangan dan pergeseran yang dihasilkan.

Kata kunci: *ladder*, vertikal momen lentur, kekuatan-batas, NLFEA.

## ABSTRACT

**HARIYONO.** *Strength Analysis Due to the Elongation's Ladder of Cutter Suction Dredger Ship (supervised by Ganding Sitepu and Muhammad Zubair Muis Alie).*

The research aimed to find out the response of the ladder structure before and after being extended, the limit strength of the ladder structure in the pulley area, and ultimate strength the longitudinal ladder structure due to the vertical bending moment. Ladder construction is increased in length starting from 58 m, 62 m, 66 m, to 70 m with each increase in length varying the slope angle of the ladder starting from 0°, 30°, 45°, to 60°. The results of the analysis show that the longer the ladder, the greater the stress value with an average percentage increase of 20.3% from the initial stress. Meanwhile, in the variation of the angle, the greater the slope angle of the ladder, the lower the stress value by 16.2% from the initial stress. From the pipe load, cutter and cutter torque, the strut ladder structure experiences a maximum stress of 56.88 N/mm<sup>2</sup> which is 49 m from the ladder shaft. Investigation of the limit strength using the Nonlinear Finite Element Analysis (NLFEA) method at an angle of 0° the strut ladder will break when it gets a pipe load of 167.6 tons, a cutter load of 67.3 tons and a cutter torque of 7.79x10<sup>8</sup> Nmm. While at an angle of 60° the strut ladder will break when it gets a pipe load of 132.7 tons, cutter load 53.3 tons and cutter torque of 6.17 x10<sup>8</sup> Nmm. While the analysis ultimate strength longitudinal of ladder with moment variations at an angle of 0° for sagging and hogging conditions experienced a maximum deflection in the column which is 42 m from the ladder shaft shifting 131.73 mm which will collapse when receiving a moment of 2.89 x 10<sup>9</sup> Nmm while the angle is 60° shifted 66.17 mm from the initial position before being loaded and will collapse when receiving a moment of 1.45 x 10<sup>9</sup> Nmm. The greater angle of inclination will be inversely proportional to the value of the resulting stress and deflection.

*Keyword: ladder, bending moment, ultimate strength, NLFEA.*

## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL.....                              | i    |
| HALAMAN PENGANTAR.....                          | ii   |
| HALAMAN PENGESAHAN.....                         | iii  |
| HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN .....               | iv   |
| PRAKATA.....                                    | v    |
| ABSTRAK.....                                    | vi   |
| ABSTRACT .....                                  | vii  |
| DAFTAR ISI.....                                 | viii |
| DAFTAR TABEL.....                               | xi   |
| DAFTAR GAMBAR.....                              | xii  |
| DAFTAR NOTASI.....                              | xvi  |
| <br>  |      |
| I. PENDAHULUAN                                  |      |
| A. Latar Belakang.....                          | 1    |
| B. Rumusan Masalah .....                        | 3    |
| C. Batasan Masalah .....                        | 3    |
| D. Tujuan Penelitian .....                      | 3    |
| E. Manfaat Penelitian .....                     | 4    |
| F. Sistematika Penulisan .....                  | 4    |
| <br>  |      |
| II. TINJAUAN PUSTAKA                            |      |
| A. Teknis Penambangan di KIP Timah .....        | 5    |
| B. Struktur Rangka .....                        | 13   |
| C. Beban-Beban yang Bekerja pada Struktur ..... | 20   |

|  |    |
|--|----|
| D. Jenis-Jenis Tumpuan .....   | 23 |
| E. Tegangan, Regangan dan Elastisitas .....  | 24 |
| F. Interaksi Rasio .....   | 36 |
| G. Metode Elemen Hingga .....  | 37 |
| H. Kekuatan Batas ( <i>Ultimate Strength</i> ) .....   | 41 |
| I. Spesifikasi Material .....  | 44 |
| J. Tegangan Izin .....   | 45 |
| K. Pembebanan Hogging dan Sagging .....  | 45 |
| L. Kerangka Konseptual .....   | 47 |
| III. METODE PENELITIAN   |    |
| A. Jenis Penelitian .....  | 48 |
| B. Lokasi Dan Waktu Penelitian .....   | 48 |
| C. Teknik Analisis Data .....  | 49 |
| D. Alur Penelitian .....   | 54 |
| IV. PEMBAHASAN   |    |
| A. Perhitungan Beban <i>Ladder</i> .....   | 57 |
| B. Variasi Sudut <i>Ladder</i> .....   | 60 |
| C. Variasi Panjang <i>Ladder</i> .....   | 61 |
| D. Analisis Struktur <i>Ladder</i> .....   | 61 |
| 1. Analisis Struktur <i>Ladder</i> akibat Beban Pipa, Beban <i>Cutter</i> , dan<br>Torsi <i>Cutter</i> ..... | 61 |
| 2. Analisis Struktur <i>Ladder</i> pada Area Katrol .....  | 68 |
| E. Kekuatan Batas ( <i>Ultimate Strength</i> ) .....   | 72 |

|   |    |
|---|----|
| 1. Kekuatan Batas <i>Strut</i> 1 dengan Variasi Beban Pipa, Beban <i>Cutter</i> dan Putaran <i>Cutter</i> ..... | 72 |
| 2. Kekuatan Batas Struktur <i>Longitudinal Ladder</i> dengan Variasi Momen Lentur Vertikal .....                | 74 |
| V. PENUTUP  |    |
| A. Kesimpulan .....   | 79 |
| B. Saran .....  | 80 |

#### DAFTAR PUSTAKA

## DAFTAR TABEL

| nomor |   | halaman |
|-------|---|---------|
| 1.    | Spesifikasi material  | 44      |
| 2.    | Komponen konstruksi <i>ladder</i>   | 51      |
| 3.    | Variasi kenaikan beban  | 59      |
| 4.    | Variasi kenaikan momen lentur   | 60      |
| 5.    | Batas pembebanan untuk tegangan izin dan tegangan runtuh pada <i>strut ladder</i> 0 derajat   | 72      |
| 6.    | Batas pembebanan untuk tegangan izin dan tegangan runtuh pada <i>strut ladder</i> 60 derajat  | 73      |
| 7.    | Batas vertikal momen lentur untuk tegangan izin dan tegangan runtuh dengan panjang <i>ladder</i> 70 meter dan sudut kemiringan 0 derajat  | 75      |
| 8.    | Batas vertikal momen lentur untuk tegangan izin dan tegangan runtuh dengan panjang <i>ladder</i> 70 meter dan sudut kemiringan 60 derajat | 78      |

## DAFTAR GAMBAR

| nomor |  | halaman |
|-------|--|---------|
| 1.    | Simulasi kedalaman <i>ladder</i> KIP Timah   | 2       |
| 2.    | Skema ponton   | 6       |
| 3.    | Tampak Atas dan Tampak Samping KIP Timah 8   | 7       |
| 4.    | <i>Ladder</i> KIP Timah 8  | 8       |
| 5.    | <i>Cutter head</i>   | 9       |
| 6.    | Diameter pipa  | 10      |
| 7.    | Sambungan/Penyetelan Pipa  | 11      |
| 8.    | Contoh tipe B (dalam mm) untuk simulasi Gleeble sebelum kompresi. Contoh tarik dipotong secara elektrik setelah dikompresi dengan panjang pengukur di dalam bagian terkompresi | 12      |
| 9.    | Pengukuran dimensi, pemodelan aplikasi, dan perhitungan simulasi numerik   | 13      |
| 10.   | Sistem konstruksi untuk struktur baja  | 15      |
| 11.   | Penampang profil   | 16      |
| 12.   | Sambungan lewatan  | 17      |
| 13.   | Model <i>brace</i> Y   | 18      |
| 14.   | Model <i>brace</i> K   | 18      |
| 15.   | Model <i>brace</i> N   | 19      |
| 16.   | Model <i>brace</i> X   | 19      |

| <b>nomor</b> |   | <b>halaman</b> |
|--------------|---|----------------|
| 17.          | Jenis kolom tersusun  | 22             |
| 18.          | Koordinat Balok Berdinding Tipis                                | 22             |
| 19.          | Tumpuan engsel  | 23             |
| 20.          | Tumpuan rol   | 23             |
| 21.          | Tumpuan jepit   | 24             |
| 22.          | Tegangan yang bekerja pada suatu bidang                         | 26             |
| 23.          | Sistem tegangan Biaksial  | 30             |
| 24.          | Sistem tegangan triaksial                                       | 30             |
| 25.          | Diagram hubungan antara tegangan-regangan                       | 35             |
| 26.          | Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan                   | 36             |
| 27.          | Kondisi batas untuk model FE                                    | 39             |
| 28.          | Perilaku tekuk kolom di bawah kompresi aksial                   | 42             |
| 29.          | Kurva Tegangan Kekuatan Batas                                   | 42             |
| 30.          | Model material bilinear isotropic hardening                     | 45             |
| 31.          | <i>Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal</i> | 46             |
| 32.          | Momen lentur vertikal akibat gelombang                          | 46             |
| 33.          | Kerangka Konseptual   | 47             |
| 34.          | Ilustrasi aktual sebelum penambahan panjang <i>ladder</i>       | 50             |
| 35.          | Ilustrasi setelah penambahan panjang <i>ladder</i>              | 50             |
| 36.          | Posisi sumbu pada model <i>ladder</i>                           | 51             |
| 37.          | Posisi Pengekangan pada <i>ladder</i>                           | 52             |

| <b>nomor</b> |  | <b>halaman</b> |
|--------------|--|----------------|
| 38.          | Pembebanan pada <i>ladder</i>  | 53             |
| 39.          | Pengekangan pada kekuatan membujur ( <i>longitudinal</i> ) <i>ladder</i> dengan menggunakan metode <i>Multi Point Constraint (MPC)</i> | 54             |
| 40.          | Alur pikir penelitian  | 56             |
| 41.          | Variasi sudut kemiringan <i>ladder</i>   | 60             |
| 42.          | Variasi panjang <i>ladder</i>  | 61             |
| 43.          | Pergeseran arah x, y dan z dengan panjang model 70 meter akibat beban <i>cutter</i>  | 62             |
| 44.          | Pergeseran arah x, y dan z dengan panjang model 70 meter akibat beban pipa   | 63             |
| 45.          | Pergeseran arah x, y dan z dengan panjang model 70 meter akibat momen torsi  | 63             |
| 46.          | Pergeseran arah x, y dan z dengan panjang model 70 meter untuk semua beban   | 64             |
| 47.          | Kurva variasi sudut <i>ladder</i> dengan <i>displacemement</i> pada setiap penambahan panjang <i>ladder</i>                            | 65             |
| 48.          | Perilaku dan distribusi tegangan kerja pada konstruksi <i>ladder</i> dengan panjang model 70 meter                                     | 66             |
| 49.          | Kurva variasi sudut <i>ladder</i> dengan tegangan ( <i>von mises stress</i> ) pada setiap penambahan panjang <i>ladder</i>             | 67             |
| 50.          | Patah <i>ladder</i> pada area katrol   | 68             |
| 51.          | Komponen struktur <i>ladder</i> yang akan dianalisis   | 69             |

| <b>nomor</b> |   | <b>halaman</b> |
|--------------|---|----------------|
| 52.          | Perilaku dan Distribusi Tegangan kerja pada struktur <i>ladder</i> (Gambar 52b. Katrol 2), (Gambar 52a. Katrol 1)   | 69             |
| 53.          | Nilai tegangan pada komponen area katrol 1  | 70             |
| 54.          | Nilai tegangan pada komponen area katrol 2  | 70             |
| 55.          | Hubungan antara tegangan dengan komponen struktur area pondasi  | 71             |
| 56.          | Kurva hubungan antara tegangan dengan defleksi  | 73             |
| 57.          | Deformasi kekuatan batas pada panjang <i>ladder</i> 70 meter dan sudut kemiringan 0 derajat pada sumbu Y akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>                         | 74             |
| 58.          | Perilaku dan distribusi tegangan kekuatan batas pada panjang <i>ladder</i> 70 meter dan sudut kemiringan 0 derajat pada sumbu Z akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>  | 75             |
| 59.          | Deformasi kekuatan batas pada panjang <i>ladder</i> 70 meter dan sudut kemiringan 60 derajat pada sumbu Y akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>                        | 76             |
| 60.          | Perilaku dan distribusi tegangan kekuatan batas pada panjang <i>ladder</i> 70 meter dan sudut kemiringan 60 derajat pada sumbu Z akibat <i>hogging</i> dan <i>sagging</i> | 77             |
| 61.          | Kurva hubungan antara tegangan dengan variasi momen lentur pada kondisi <i>hogging</i> dan <i>sagging</i>   | 78             |

## DAFTAR NOTASI

| <b>simbol</b>   |  | <b>satuan</b>     |
|-----------------|--|-------------------|
| A               | = Luas penampang                                     | mm <sup>2</sup>   |
| E               | = Modulus Elastisitas (Modulus young)                | N/mm <sup>2</sup> |
| $\sigma$        | = Tegangan   | N/mm <sup>2</sup> |
| $\tau$          | = Tegangan geser                                     | N/mm <sup>2</sup> |
| $\varepsilon$   | = Regangan normal                                    | -                 |
| $\gamma$        | = Regangan geser                                     | -                 |
| $\nu$           | = Poisson ratio                                      | -                 |
| $\varepsilon_0$ | = Regangan awal                                      | -                 |
| { }             | = Vektor kolom                                       | -                 |
| [ ]             | = Matriks  | -                 |
| $\Sigma$        | = Penjumlahan  | -                 |
| F               | = Gaya yang bekerja atau beban                       | N                 |
| $\sigma_x$      | = Tegangan normal yang bekerja pada bidang x         | N/mm <sup>2</sup> |
| $\sigma_y$      | = Tegangan normal yang bekerja pada bidang y         | N/mm <sup>2</sup> |
| $\sigma_z$      | = Tegangan normal yang bekerja pada bidang z         | N/mm <sup>2</sup> |
| V               | = Komponen gaya yang sejajar dengan bidang elementer | N                 |
| $\Delta$        | = Ubah bentukan aksial total                         | mm                |
| $\Delta L$      | = Pertambahan panjang total                          | mm                |
| L               | = Panjang Batang                                     | mm                |

| <b>simbol</b>   |  | <b>satuan</b>     |
|-----------------|--|-------------------|
| OD              | = Diameter luar pipa                         | mm                |
| ID              | = Diameter dalam pipa                        | mm                |
| R <sub>V</sub>  | = gaya reaksi vertical                       | N                 |
| R <sub>H</sub>  | = gaya reaksi horizontal                     | N                 |
| M               | = Momen                                      | Nmm               |
| M <sub>T</sub>  | = Momen Torsi                                | Nmm               |
| M <sub>US</sub> | = Kekuatan batas momen lentur <i>sagging</i> | Nmm               |
| M <sub>UH</sub> | = Kekuatan batas momen lentur <i>hogging</i> | Nmm               |
| IR              | = Interaksi Rasio                            | -                 |
| n               | = Putaran                                    | Rps               |
| W <sub>P</sub>  | = Berat pipa                                 | Ton               |
| W <sub>B</sub>  | = Berat Bauksit                              | Ton               |
| V <sub>P</sub>  | = Volume pipa                                | m <sup>3</sup>    |
| γ <sub>b</sub>  | = Massa Jenis Bauksit                        | Kg/m <sup>3</sup> |
| B <sub>JB</sub> | = Berat jenis baja                           | Kg/m <sup>3</sup> |
| P               | = Daya                                       | Watt              |
| S               | = <i>Strut</i>                               |                   |
| C               | = <i>Column</i>                              |                   |
| DB              | = <i>Diagonal Bracing</i>                    |                   |

# BAB I

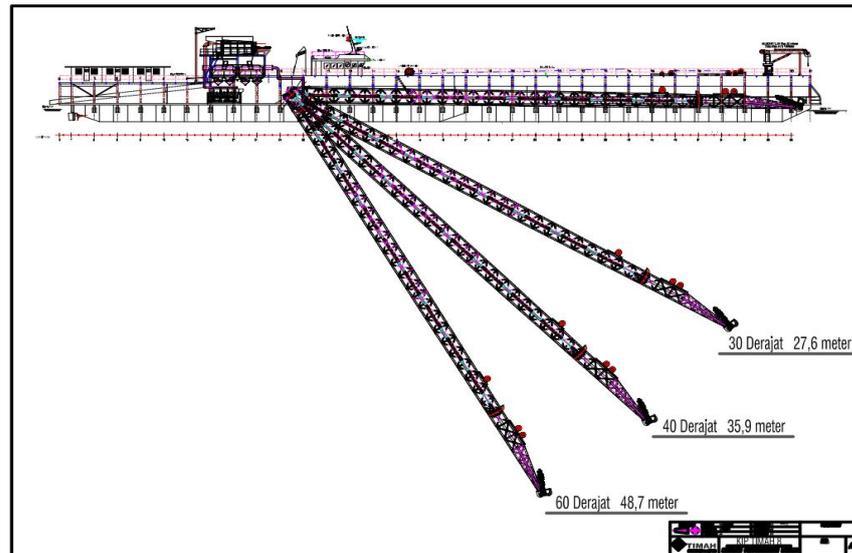
## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Pulau Bangka, Belitung dan Batam adalah penghasil timah tertinggi di Indonesia baik di daratan maupun di laut. Saat ini penggerak ekonomi untuk wilayah ini masih didominasi dari sektor pengolahan timah. Pengelolah penambangan timah harus sebaik mungkin agar menguntungkan banyak pihak. Pertambangan di laut memerlukan sarana seperti kapal. Kapal yang digunakan untuk menambang timah dinamakan Kapal Isap Produksi (KIP) yaitu suatu alat gali atau pemindahan tanah yang dipergunakan untuk menggali lapisan tanah bawah laut, peralatan mekanis dan pengolahan materialnya bertumpu pada sebuah ponton. Lapisan tanah bawah laut yang mengandung pasir timah dipotong dengan menggunakan cutter/pemotong.

Sebagai alat apung ciri khas kapal isap produksi (KIP) adalah terdiri 4 *capsul* (Pontoon), *capsul* sisi kanan dan kiri berukuran lebih pendek dan dua *capsul* di tengah yang berukuran lebih panjang. Terdapat pula alat pemotong/*cutter* yang terpasang di tengah kapal yang digunakan untuk menggali timah di dasar laut. Konstruksi utama dari KIP Timah 8 memiliki panjang total 84,18 meter, lebar total 22 meter, dan tinggi total 10,5 meter. KIP Timah 8 merupakan kapal dengan tipe *cutter suction dredger*, yang proses penggaliannya menggunakan *cutter* untuk memberai tanah dan menggunakan pompa lumpur untuk menghisap tanah yang terberai melalui pipa yang berada di bawah *cutter* untuk kemudian dialirkan menuju instalasi pencucian sementara yang ada di KIP. [1]

*Ladder* adalah kerangka baja panjang yang berfungsi sebagai tiang dan tempat penempatan *cutter*, pipa isap, pompa lumpur dan pipa tekan. [2] *Ladder* dapat beroperasi pada sudut maksimum 60 derajat seperti pada Gambar 1



Gambar 1. Simulasi kedalaman ladder KIP Timah 8. [1]

Operasi dari KIP ditentukan dari spesifikasi alat penggaliannya yaitu panjang *ladder* dan sudut maksimum *ladder* dengan permukaan air yang berpengaruh pada kedalaman maksimum yang dapat dihasilkan.[2] Pengaruh transportasi dari material juga menentukan kemampuan dalam operasi KIP yaitu banyaknya material yang dapat dihisap oleh pipa isap dan pompa lumpur per jam.[1]

Timah di dasar laut semakin dalam karena sering dilakukan penambangan sehingga banyak para pemilik kapal ingin menambah panjang *ladder* kapalnya dengan harapan masih bisa mencapai dasar laut untuk menambang timah. Modifikasi *ladder* kapal dilakukan agar bisa digunakan untuk menambang di laut. *Ladder* KIP Timah 8 akan diperpanjang agar mampu menambang lebih dalam. Beberapa *ladder* mengalami gagal struktur seperti pada KIP Timah 19 tahun 2019 yang mengalami patah *ladder* dan kerusakan bermula di sekitar area katrol, mungkin disebabkan oleh korosi, umur *ladder* maupun kekuatan (struktur) *ladder*. Upaya pemanjangan *ladder* harus dilakukan dengan perhitungan yang cermat agar tidak terjadi kegagalan struktur [3]. Biaya perbaikan *ladder* yang patah sangat besar yaitu sekitar  $\pm$  6 Milyar. Adanya analisis

mengenai struktur *ladder* tentunya sangat diharapkan sehingga dapat meminimalkan tingkat kerusakan (patah) pada *ladder* kapal.

### **B. Rumusan Masalah**

Berpijak dari latar belakang di atas, maka yang menjadi masalah pada penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana respon struktur *ladder* sebelum dan setelah diperpanjang?
2. Bagaimana kekuatan batas struktur *ladder* pada area katrol ?
3. Bagaimana kekuatan batas struktur *longitudinal ladder* akibat vertikal momen lentur.?

### **C. Batasan Masalah**

Agar pembahasan ini fokus pada judul penelitian dan untuk menghindari pembahasan yang terlalu luas, maka dibuat beberapa batasan masalah, yaitu :

1. Penampang komponen konstruksi *ladder*, kapasitas *cutter*, dan pompa dalam keadaan konstan.
2. Pemodelan konstruksi dan struktur yang ditinjau hanya pada area *ladder* kapal.
3. Adanya cacat produksi (pengelasan dan lain-lain) diabaikan.

### **D. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan penelitian ini adalah :

1. Dapat menganalisis respon struktur *ladder* sebelum dan setelah diperpanjang.
2. Dapat menganalisis kekuatan batas struktur *ladder* pada area katrol.
3. Dapat menganalisis kekuatan batas struktur *longitudinal ladder* akibat vertikal momen lentur.

### **E. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat penelitian ini adalah :

1. Sebagai pertimbangan bagi desainer kapal dalam merancang struktur *ladder* kapal isap produksi.
2. Sebagai bahan acuan penelitian (referensi) dalam bidang analisis struktur *ladder* kapal isap produksi

### **F. Sistematika Penulisan**

Penyajian materi penulisan ini dijabarkan secara umum dalam kerangka penulisan sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan, di sini diuraikan latar belakang , perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka, berisikan tinjauan pustaka yang berkaitan dengan topik penelitian yang digunakan dalam menyelesaikan dan membahas permasalahan penelitian.

BAB III Metode Penelitian, berisikan metode yang digunakan untuk memperoleh hasil dari penelitian dan teknik analisis data.

BAB IV Hasil dan Pembahasan, berisikan hasil analisis data, hasil pengolahan serta pembahasannya.

BAB V Penutup, berisikan kesimpulan dari hasil pembahasan permasalahan yang diteliti, dan saran-saran yang direkomendasikan penulis.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Teknis Penambangan di KIP Timah 8

Kapal Isap Produksi (KIP) Timah 8 adalah milik PT. Timah (Persero) berdimensi panjang total 85,5 meter, lebar total 22 meter, dan tinggi total 10,5 meter bertipe *cutter section dredger* dan mulai beroperasi tahun 2010. Operasi dari KIP ditentukan dari spesifikasi alat penggaliannya yaitu panjang *ladder* dan sudut maksimum *ladder* dengan permukaan air yang berpengaruh pada kedalaman maksimum yang dapat dihasilkan. Pengaruh transportasi dari material juga menentukan kemampuan dalam operasi KIP yaitu banyaknya material yang dapat dihisap oleh pipa isap dan pompa lumpur per jam. Pengolahan pada KIP memanfaatkan prinsip *gravity concentration* yaitu perbedaan massa jenis suatu material terhadap kecepatan alir, percepatan jatuh dan besar kecil ukuran material. Massa jenis dari suatu bahan galian mempengaruhi kecepatan pengendapan material dimana material yang memiliki massa jenis yang tinggi akan lebih cepat mengendap sedangkan yang memiliki massa jenis yang rendah mengendap lebih lambat sehingga terbawa aliran air menjadi *tailing*.

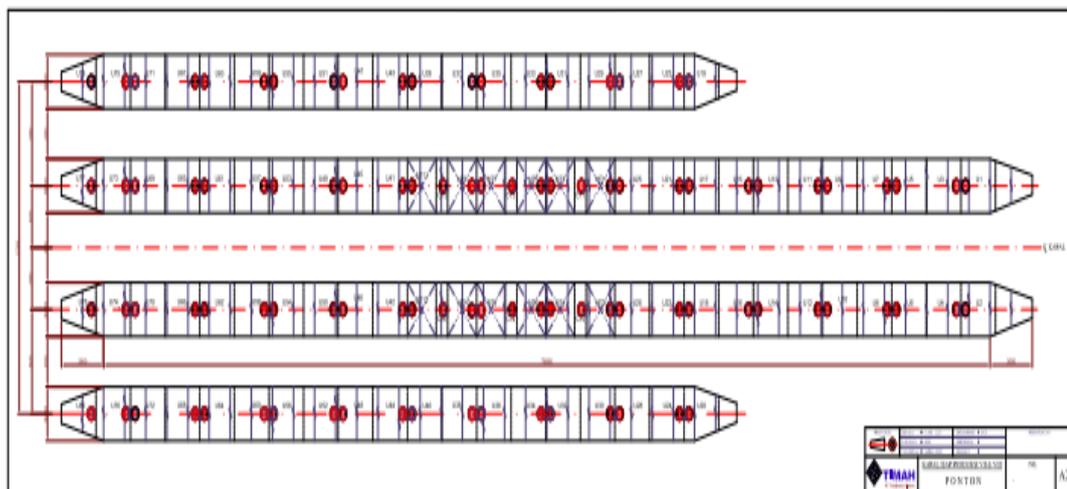
##### 1. Bagian- Bagian Utama KIP Timah 8

Secara garis besar bagian dari KIP dibagi kedalam 2 bagian utama yaitu:

###### a. Ponton

Ponton merupakan bagian yang sangat penting dalam pengoperasian KIP. Ponton merupakan benda apung yang berperan untuk menahan kapal agar tetap terapung. ponton KIP terbuat dari baja berongga yang berbentuk kapsul dan ponton terbagi kedalam empat bagian utama yaitu dua ponton bagian dalam dan dua ponton bagian luar. Ponton tersebut dibagi kedalam

beberapa kompartemen seperti pada Gambar 2. Pembagian kompartemen ini sebagai antisipasi awal jika terjadi kebocoran sehingga air yang masuk hanya pada satu kompartemen saja dan kapal masih tetap terapung. Selain sebagai alat apung, ponton juga berfungsi sebagai wadah untuk menyimpan bahan bakar dan air tawar pada beberapa kompartemen ponton. Bentuk ponton yang menyerupai kapsul berupa silinder pada KIP berguna untuk meminimalkan dampak arus air laut terhadap kapal sehingga kapal lebih hydrodinamis dan tidak mudah terbawa arus dari samping.



Gambar 2. Skema ponton. [1]

#### b. Bangunan Atas

Bangunan atas merupakan bagian yang berfungsi sebagai alat penopang bagian-bagian lainnya sehingga konstruksi kapal lebih kokoh dan tahan lama. Pada KIP terdapat dua deck utama yaitu *deck* bawah dan *deck* atas. Segala peralatan yang berada pada deck atas ditahan rangka kapal sehingga kapal tetap stabil. Rangka KIP terbuat dari baja yang kuat. Rangka pada KIP terbagi ke dalam tiga bagian utama yaitu:

##### 1) Bagian Haluan Kapal

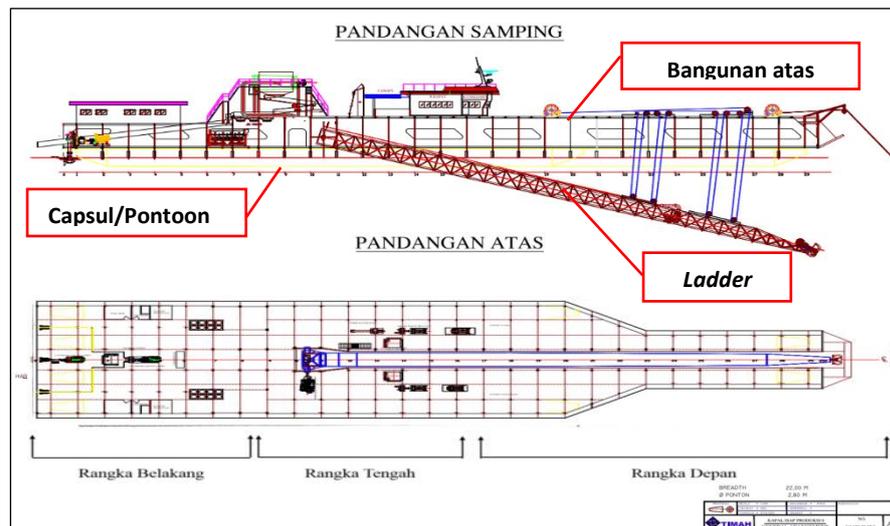
Berfungsi untuk menopang bagian *ladder*, jangkar kapal, *winch ladder* dll.

## 2) Bagian Tengah Kapal

Berfungsi sebagai penopang ruang navigasi, *revolving screen*, *jig primer*, *store buck*, saluran tailing, bagian instalasi pencucian lainnya dan mesin-mesin yang menunjang operasi.

## 3) Bagian Buritan Kapal

Berfungsi untuk menahan beban yang berasal dari ruang ABK, mesin kapal yaitu berupa mesin *propeller* pendorong, *swing* kanan dan *swing* kiri Bandar tailing dan tempat penyimpanan timah.



Gambar 3. Tampak Atas dan Tampak Samping KIP Timah 8. [1]

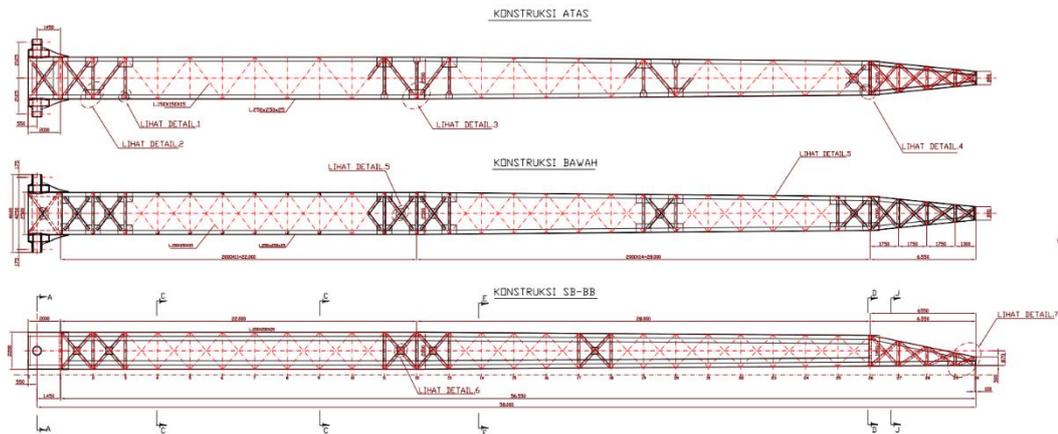
Gambar 3 adalah konstruksi kapal isap produksi (KIP) Timah 8 yang terdiri dari bangunan atas dengan profil *girder* terhubung ke pontoon dan juga dilengkapi *ladder* sebagai alat untuk menggali.

## 2. Susunan Umum Konstruksi *Ladder* dan Peralatannya

### a. *Ladder*

*Ladder* adalah kerangka baja panjang yang berfungsi sebagai tiang dan tempat penempatan *cutter*, pipa isap, pompa lumpur dan pipa tekan seperti pada Gambar 4. Pada saat *ladder* digunakan, *ladder* diturunkan

pada kedalaman tertentu bertujuan pengoperasian *cutter* dalam penggalian tanah dan pengisapan tanah oleh pipa isap. Setiap KIP mempunyai panjang *ladder* yang berbeda-beda.



Gambar 4. Ladder KIP Timah 8. [4]

Panjang total *ladder* KIP Timah 8 yaitu 58 meter, kedalaman gali maksimal yang dapat dicapai 50 meter dengan sudut elevasi terhadap garis air maksimum  $60^{\circ}$ . *Ladder* digerakkan oleh *winch ladder* yang berfungsi untuk menaik turunkan ujung *ladder* berdasarkan prinsip kerja katrol (*skep*). Jumlah *skep* yang digunakan 7 pcs dengan diameter *skep* yaitu 920 mm, diameter kawat *ladder* 38 mm, kekuatan tarik *winch* 30 ton, kecepatan kawat *winch* 12 meter/min, kapasitas drum *winch* 400 meter. *Winch Ladder* digerakkan oleh *hugglund* yang merupakan penggerak hidrolik.

#### b. *Cutter Head*

*Cutter head* merupakan alat yang berfungsi sebagai pemotong lapisan berupa, pasir kasar, pasir halus dan lapisan *casiterite* ( $\text{SnO}_2$ ). *Cutter* terletak pada ujung *ladder* yang merupakan dalam satu rangkaian pada proses penggalian. *Cutter* digerakkan oleh penggerak hidrolik (*hugglund*) yang terdiri 3 pipa berdimensi 14 mm berada di dalam sepanjang *ladder* sampai *cutter head*. Pergerakan dari *cutter* tersebut yang dari penggerak hidrolik (*hugglund*) berupa putar 360 derajat yang mempunyai kecepatan putaran yang dibagi dalam 5 step speed dengan kecepatan minimal mulai

pada 5 rpm pada step speed-1 hingga kecepatan maksimum 24 rpm pada *step speed-5*.



Gambar 5. *Cutter head*. [4]

Pada Gambar 5 *Cutter* memiliki bentuk menyerupai gerigi dengan dudukan *circle* yang terpasang pada ujung *ladder*. *Cutter* memiliki diameter 1,8 meter dengan jumlah daun (*blade*) 6 daun, memiliki kuku *cutter* 48 pcs, *shaft* dan *block bearing* 1 set, *sealing system (floating seal)* 2 set, *bearing* 5 set, saluran pelumas dan *drain* 1 set, tekanan kerja pompa hidrolik 0-350 bar, konstanta motor 560 Nm/bar, Torsi maksimum 196000 Nm, *output* gaya potong maksimum 217778 Nm. Perhitungan momen torsi dapat dilihat pada Persamaan 1

$$M_T = \frac{P}{2\pi n} \quad (1)$$

#### c. Pipa Isap

Pipa isap berada di dalam *ladder* dan berfungsi untuk menghisap tanah maupun material yang telah dihancurkan oleh *cutter*. Pada bagian ujung pipa isap berbentuk mulut bebek, yaitu tempat masuknya tanah dan material kedalam pipa hisap. Material yang masuk kedalam pipa hisap disedot oleh pompa lumpur dan dilanjutkan ke pipa tekan. Pipa Isap mempunyai diameter 14 inch.

d. Pompa Lumpur

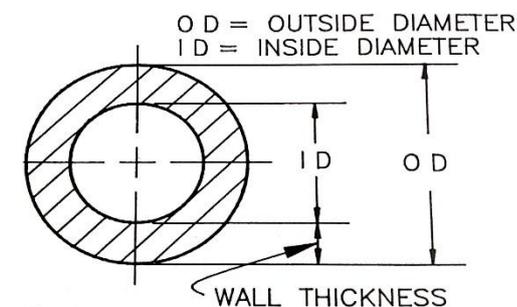
Pompa lumpur terletak pada bagian tengah *ladder* yang terhubung dengan pipa hisap. Berfungsi untuk menyedot tanah dan material melalui pipa hisap dan melanjutkannya ke pipa tekan menuju saring putar. Pompa lumpur digerakkan oleh mesin penggerak CAT yang diteruskan ke *gearbox* dengan menggunakan *shaft* sepanjang *ladder*. Pompa lumpur memiliki kapasitas *slurry* 2500m<sup>3</sup>/jam dengan *head* mencapai 45-50 m dan daya penggerak 310 kW.

e. Pipa Tekan

Pipa tekan / *press pipe* berada di luar *ladder* merupakan lanjutan dari pompa lumpur yang berfungsi untuk meneruskan material yang telah diisap menuju saringan putar. Pipa tekan mempunyai diameter 12 inch.

3. Kontruksi Pipa

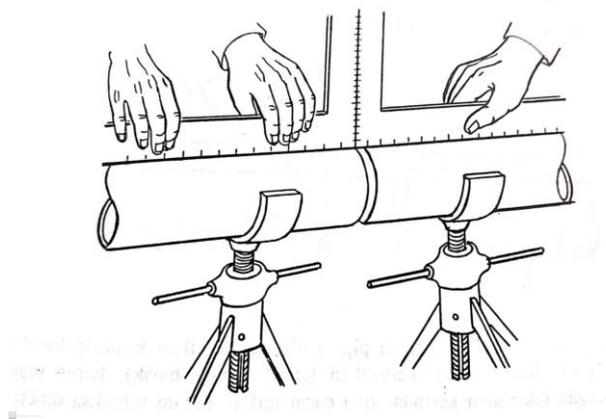
Secara umum, pipa adalah istilah yang digunakan untuk menunjuk badan tubular berongga yang digunakan untuk mengangkut kotoran apa pun yang memiliki karakteristik aliran seperti yang ditemukan dalam cairan, gas, uap, padatan cair, dan bubuk halus. Sama seperti metode pembuatan yang berbeda, ada juga cara berbeda untuk mengkategorikan ukuran pipa. pipa diidentifikasi oleh tiga kategori ukuran yang berbeda: ukuran pipa nominal, diameter luar, dan diameter dalam. [5]



Gambar 6. Diameter pipa. [5]

*Nominal pipe size (NPS)* digunakan hanya sebagai nama. Dalam proses perpipaan, istilah nominal mengacu pada nama pipa, diameter luar (OD) dan diameter dalam (ID) seperti yang tersirat dari namanya yang merujuk ke pipa dengan pengukuran luar dan dalam aktualnya dalam proses perpipaan (Gambar 6). Metode pengukuran pipa mempertahankan diameter luar yang seragam sambil memvariasikan diameter bagian dalam. metode ini mencapai kekuatan yang diinginkan yang diperlukan pipa untuk menjalankan fungsi yang diinginkan saat beroperasi di bawah berbagai suhu dan tekanan. [5]

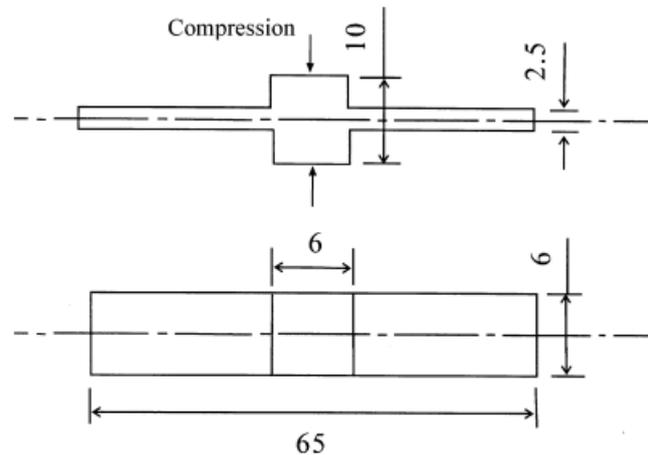
Bagian-bagian pipa dipotong dengan alat potong pipa atau las potong (Gambar 7). Penyetelan merupakan pekerjaan yang sangat penting. Setiap langkah harus dilaksanakan secara teliti sekali. Pemotongan bagian-bagian pipa harus tepat sekali dengan ukuran yang tercantum pada Gambar 7, dengan memperhitungkan lebar alur las dan jarak antara pipa untuk penetrasi las. Khususnya untuk pipa-pipa yang terbuat dari bahan yang berhubungan dengan mesin-mesin yang mempunyai bagian yang berputar (*rotaring equipment*), pemasangan dan penyetelan harus benar-benar teliti.



Gambar 7. Sambungan/penyetelan pipa. [6]

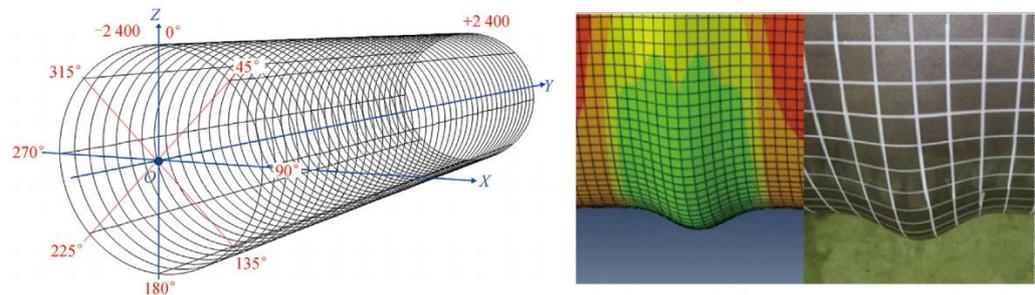
Penyetelan dilaksanakan dengan mempergunakan dua buah siku-siku baja. Dalam hal memakai siku-siku tersebut, kedua sisi pipa

dipertemukan sehingga saling berdekatan dengan jarak  $\pm 3/32$  inci untuk pengisian las. [6]



Gambar 8. Contoh tipe B (dalam mm) untuk simulasi Gleeble sebelum kompresi. Contoh tarik dipotong secara elektrik setelah dikompresi dengan panjang pengukur di dalam bagian terkompresi. [3]

Baja paduan mikro Nb – Ti canai panas dan baja paduan mikro Nb – Ti – 0,09% Mo, rasio kekuatan luluh terhadap kekuatan tarik (YS / UTS) ditemukan menjadi sebuah fungsi struktur mikro dan laju pendinginan dalam pengujian tersebut di mana tidak ada simulasi gulungan dan tidak ada deformasi sebelumnya. *Bainit* atau *acicular* kasar *ferit*, yang dibentuk pada laju pendinginan yang tinggi, menaikkan rasio YS / UTS pada kondisi proses ini. Dengan simulasi *coiling*, rasionya tidak peka terhadap laju pendinginan atau struktur mikro karena gulungan memungkinkan pemulihan dislokasi, sehingga mengurangi perbedaan dislokasi kepadatan yang muncul antara laju pendinginan rendah dan tinggi. Ditunjukkan secara skematis pada Gambar 8, adalah digunakan untuk mempelajari pengaruh kompresi austenit sebelumnya di bawah  $T_{nr}$  dalam *Gleeble* 1500TM sebelum pendinginan, dari ada panjang pengukur yang lebih pendek yang dipotong kawat setelah deformasi dan pendinginan dari pusat 6 mm x 10 mm yang dikompresi bagian pusat. [3]



Gambar 9. Pengukuran dimensi, pemodelan aplikasi, dan perhitungan simulasi numerik. [7]

Pengukuran laser digunakan untuk mendapatkan bentuk yang tepat pipa baja; berdasarkan teknologi pemodelan terbalik digital, persamaan konstitutif sebenarnya dari bahan pipa baja itu diperkenalkan untuk melakukan simulasi yang tepat pada tekuk perilaku pipa baja dalam kondisi tekanan internal dan lentur (Gambar 9), dan membentuk simulasi numerik teknologi untuk kapasitas regangan tekuk pipa baja [7]. Berat pipa dapat dihitung dengan Persamaan 2 dan berat lumpur dapat dihitung dengan Persamaan 3

$$W_p = (\pi R^2) \times L \times B_{jb} - (\pi r^2) \times L \times B_{jb} \quad (2)$$

$$W_B = V_p \times \gamma_b \quad (3)$$

## B. Struktur Rangka

Struktur rangka adalah struktur yang elemennya terdiri dari batang Tarik, kolom, balok, dan batang yang mengalami lenturan dan bebabn aksial. Kebanyakan konstruksi gedung yang umum berada dalam kategori ini adalah gedung bertingkat yang biasanya terdiri dari balok dan kolom yang disambung secara kaku atau dengan sambungan ujung sederhana bersama sokongan/*bracing* diagonal untuk stabilitas. Walaupun gedung bertingkat banyak berwujud tiga dimensi tetapi bila direncanakan dengan

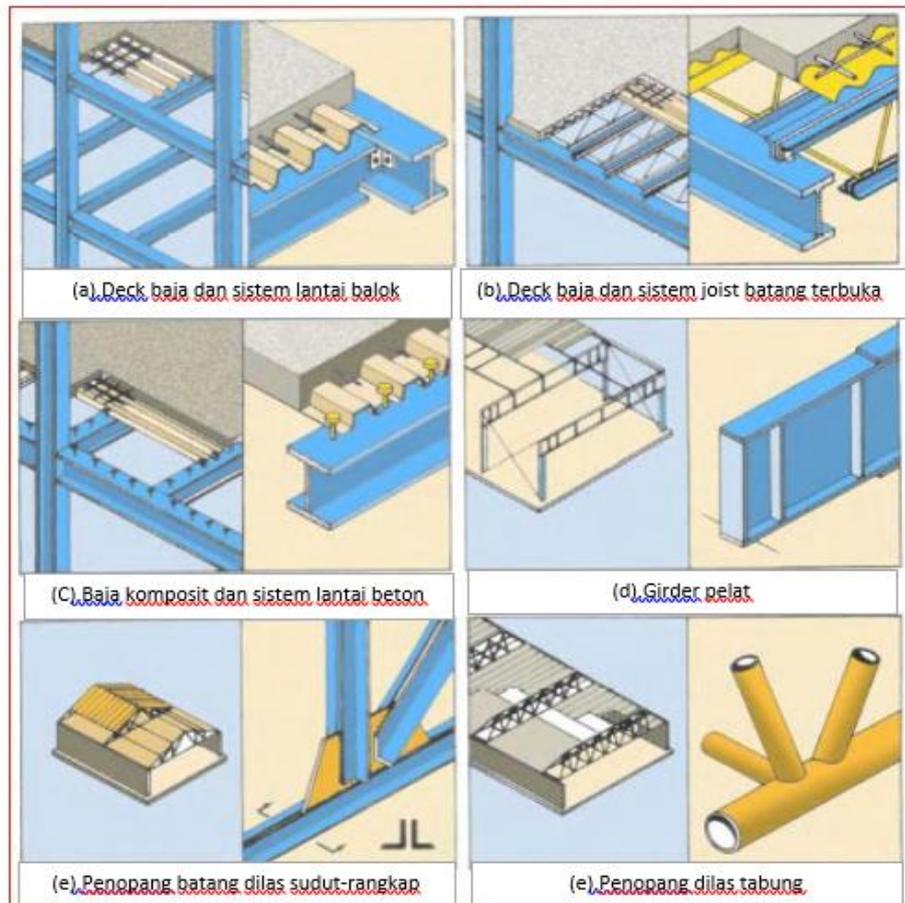
sambungan kaku biasanya memiliki kekakuan yang jauh lebih besar dalam salah satu arah dibandingkan dengan yang lainnya. [8]

## 1. Kolom

Kolom merupakan suatu kesatuan struktur yang pada hakekatnya tidak dapat berlaku secara independen dalam praktek biasanya diartikan sebagai pembatasan antara lendutan stabil dan tidak stabil pada batang tekan. Pembahasan kekuatan kolom pada saat ini menganggap bahwa kedua ujung kolom adalah sendi atau tidak mengekang momen. Ujung yang tidak mengekang momen merupakan keadaan terlemah untuk batang tekan bila translasi salah satu ujung terhadap ujung lainnya dicegah. Adapun teori tekuk kolom yang pertama dikemukakan oleh Leonard Euler pada tahun 1759 yang menjelaskan batang dengan beban konsentris yang semula lurus dan semua seratnya tetap elastis sehingga tekuk terjadi dan mengalami lengkungan yang kecil. Pada penyelidikan tersebut Euler hanya menyelidiki batang yang dijepit disalah satu ujung dan bertumpuan sederhana. [9]

## 2. Balok

Balok adalah gabungan dari elemen tarik dan elemen tekan balok umumnya dipandang sebagai batang yang memikul beban gravitasi transversal termasuk momen ujung. Balok pada struktur dapat disebut sebagai gelagar yang merupakan balok terpenting dengan jarak antara yang lebar. Rangka anak merupakan rangka yang tidak terlalu penting dalam struktur biasanya memiliki jarak yang rapat dan berbentuk struktur rangka batang. *Gording* yaitu balok atap yang membentang antara rangka batang rusuk yaitu balok horizontal pada dinding yang terutama dipakai untuk menahan beban lentur akibat angin pada bangunan industri umumnya sebagai penyangga dinding seng/baja gelombang [8]. Berikut beberapa profil baja seperti pada Gambar 10.



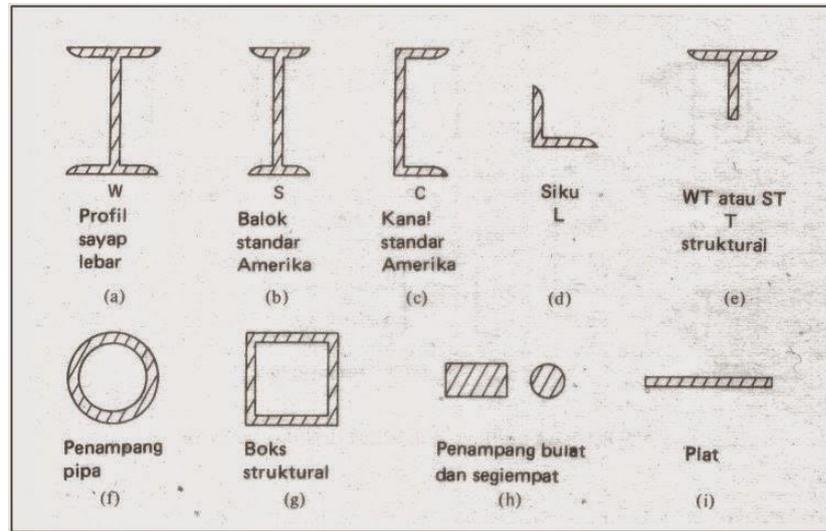
Gambar 10. Sistem konstruksi untuk struktur baja. [10]

Balok geladak berfungsi untuk menyalurkan beban yang bekerja pada pelat geladak ke penumpu utama geladak (*main truss*) yang kemudian ke kaki geladak, dimana ukuran balok geladak tergantung jarak antar balok geladak. Jika geladak tidak ditutup dengan sebuah modul, maka bagian geladak ditutup dengan pelat baja yang ketebalannya tergantung jarak balok geladak. [8]

### 3. Penampang Profil

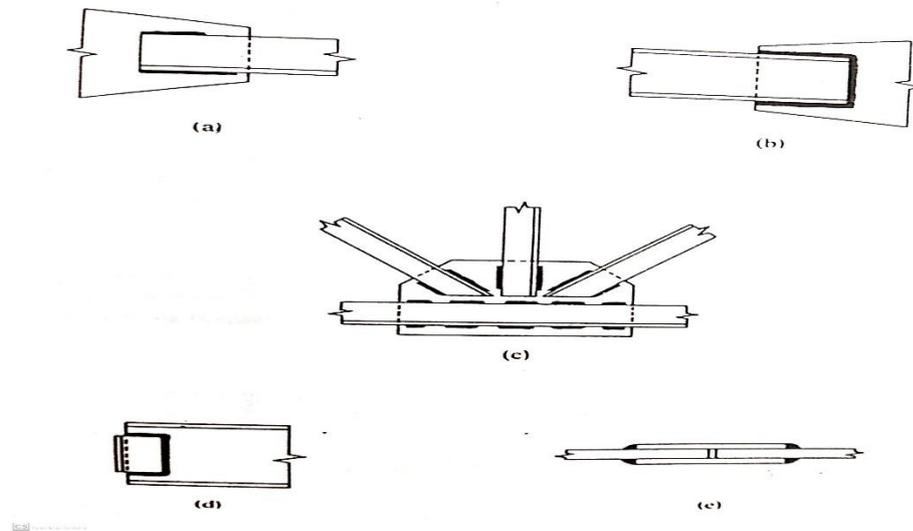
Beberapa bentuk penampang seperti persegi, bulat, siku, persegi empat dan berbagai macam diantaranya dihasilkan dalam batasan ukuran yang luas dan digunakan seperti halnya pada pelat datar dan batang solid

dengan berbagai ketebalan. Profil sayap lebar adalah profil yang banyak digunakan sebagai dudukan pelat seperti terlihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Penampang profil. [10]

Balok standar Amerika (Gambar 11b) yang biasanya disebut balok I memiliki sayap (*flange*) yang pendek dan meruncing, serta badan yang tebal dibanding dengan profil sayap lebar. Balok I jarang dipakai karena bahan yang berlebihan pada badannya dan kekakuan lateralnya relatif kecil (akibat sayap yang pendek). Kanal (Gambar 11c) dan siku (Gambar 11d) sering dipakai baik secara tersendiri atau digabungkan dengan penampang lain. Profil T struktural (Gambar 11e) dibuat dengan membelah dua profil sayap lebar atau balok I dan biasanya digunakan sebagai batang pada rangka batang (*truss*). Penampang pipa (Gambar 11f) dibedakan atas “standar”, “sangat kuat”, dan “dua kali sangat kuat” sesuai dengan tebalnya dan juga dibedakan atas diameternya. Boks struktural (Gambar 11g) dipakai bila dibutuhkan penampilan arsitektur yang menarik dengan baja ekspos. Penampang yang diperlihatkan pada Gambar 12 semuanya dibuat dengan penggilingan panas, yaitu dibentuk dari balok (*billet*) baja panas yang digiling berkali-kali dengan gulungan (*rol*) sehingga didapat bentuk akhir. [10]



Gambar 12. Sambungan lewatan. [10]

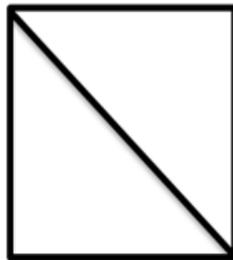
Keuntungan sambungan lewatan yaitu mudah disesuaikan dengan potongan yang akan disambung tidak memerlukan ketepatan dalam pembuatannya bila dibanding dengan jenis sambungan lain. Kemudian mudah disambung karena tepi potongan yang akan disambung tidak memerlukan persiapan khusus dan biasanya dipotong dengan nyala (api) atau geseran. [10]

#### 4. *Brace*

*Bracing system* berfungsi untuk membantu menyalurkan beban horisontal ke pondasi, melindungi keutuhan struktur selama proses fabrikasi dan instalasi, menahan gerak sentakan dari sistem *jacket-pile* yang terpasang. serta menyangga anoda korosi dan konduktor-konduktor sumur serta menyalurkan gaya gelombang yang ditimbulkan ke pondasi karakteristik penting lainnya dari rangka tubular adalah kestabilan penampang yang dinyatakan dalam rasio diameter/tebal dinding ( $d/t$ ) yang juga menunjukkan kestabilan terhadap *local buckling*. Kekuatan tekuk di kaki geladak harus dirancang agar platform dek memiliki kekuatan yang memadai tidak hanya mendukung tetapi juga untuk keselamatan manusia yang bekerja di platform termasuk semua fasilitas. [11]

Model *brace* pada struktur sangat bervariasi beberapa model *brace* digambarkan seperti pada gambar berikut. [8]

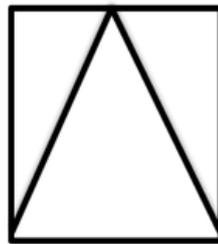
- a. Model Struktur dengan Kaki *Brace* Y.



Gambar 13. Model brace Y

Gambar 13 menunjukkan model *brace* Y yang merupakan pola perangkaan struktur yang sederhana, pola ini memiliki jumlah join yang sedikit, tidak simetris dan tidak memiliki redundansi yang baik. Pola perangkaan ini biasanya digunakan pada struktur yang tidak membutuhkan gaya kekakuan yang tinggi.

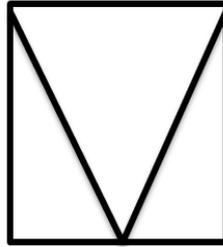
- b. Model Struktur dengan Kaki *Brace* K.



Gambar 14. Model brace K

Gambar 14 menunjukkan model *brace* K, merupakan pola perangkaan yang terhubung pada kaki struktur yang menumpu *brace* horizontal. Pola perangkaan ini memiliki jumlah join yang cukup banyak, memiliki bentuk yang simetris dengan redundansi yang cukup. Pola perangkaan ini biasa digunakan pada dasar kaki jacket dan menggunakan *skirt pile*.

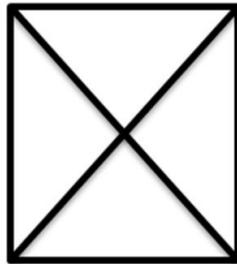
- c. Model Struktur dengan Kaki *Brace N*.



Gambar 15. Model brace N

Gambar 15 adalah model *brace N*, merupakan pola perangkaan yang menghubungkan kaki jaket atau kaki geladak dengan tumpuan *brace* horizontal, pola perangkaan ini memiliki jumlah join yang cukup banyak dan memiliki bentuk cabang V pada sisi transversal yang akan menyebabkan ukuran horizontal *brace* yang cukup besar. Pola perangkaan ini banyak digunakan pada struktur yang tidak terlalu dalam.

- d. Model Struktur dengan Kaki *Brace X*.



Gambar 16. Model brace X

Gambar 16 adalah model *brace x* berfungsi untuk memperpendek panjang efektif rangka tanpa mengurangi kekakuan struktur rangka penyangga. Apabila satu kaki rangka X dalam keadaan tertekan dan yang lain tertarik, maka bagian yang tertarik akan menahan bagian yang tertekan dari lendutan keluar bidang pada pertemuan rangka tersebut dan diameter kedua rangka tersebut dapat dikurangi sehingga mengurangi beban

gelombang pada anjungan. API RP2A merekomendasi pola perangkaan X ini untuk anjungan pada lokasi rawan gempa. [8]

### **C. Beban-Beban yang Bekerja pada Struktur**

#### **1. Beban Mati**

Beban mati merupakan beban yang berasal dari berat struktur ladder sendiri dan berat berbagai peralatan yang permanen yang berada pada struktur *ladder* serta peralatan tambahan yang beratnya tidak berubah dalam kondisi operasi. Beban mati disebut juga beban kerja akibat gravitasi yang tetap posisinya, disebut demikian karena bekerja terus menerus dengan arah ke bumi tempat struktur didirikan. Besar struktur dipandang sebagai beban mati, demikian pula perlengkapan yang digantungkan pada struktur seperti pipa air, pipa listrik, saluran pendingin dan pemanas ruangan, lampu, genting dan plafon atau dengan kata lain, semua benda yang tetap posisinya selama struktur berdiri dipandang sebagai beban mati. [11]

#### **2. Beban Hidup**

Beban hidup merupakan beban yang berlaku pada struktur selama operasinya saja dan bisa berubah-ubah selama kondisi operasi atau dari kondisi operasi ke kondisi lainnya. beban hidup adalah beban gravitasi pada struktur, yang besar dan lokasinya bervariasi, contoh beban hidup adalah manusia, mebel, (*furniture*), peralatan yang dapat bergerak. Karena berat, lokasi dan kepadatan beban hidup sifatnya tidak diketahui, maka besar sesungguhnya dan posisi beban ini sangat sukar untuk ditentukan. [11]

#### **3. Beban Kejut**

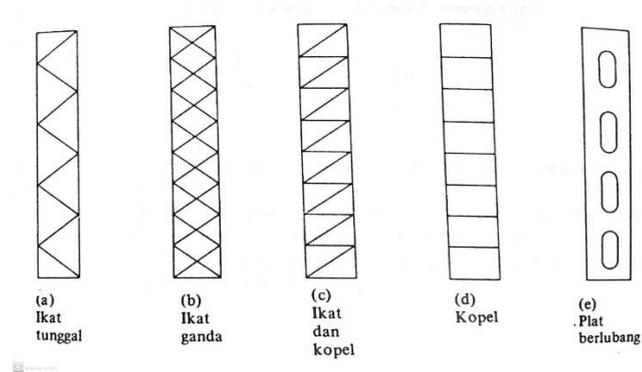
Istilah kejut (*impact*) merupakan beban yang digunakan dalam perencanaan struktur yang menyatakan pengaruh dinamis dari beban yang diberikan secara tiba-tiba. Dalam perhitungan beban kejut, beban hidup yang menimbulkan pengaruh dinamis harus diperbesar dengan faktor kejut. Walaupun analisis dinamis struktur bisa dilakukan untuk menentukan

pengaruh ini secara akurat, prosedur ini biasanya sangat rumit atau mahal bagi perencanaan praktis. Atas alasan ini, rumus empiris dan faktor kejut biasanya digunakan. Bila pengaruh dinamis kecil (misalnya faktor kejut lebih kecil dari 20%), pengaruh ini biasanya diperhitungkan dengan menggunakan harga *konservatif* (lebih besar) untuk beban hidup yang ditetapkan. [11]

Dalam perencanaan analisis kekuatan *ladder*, beban kejut yang dinamis adalah peralatan cutter yang menggali permukaan tanah. Dalam merencanakan kekuatan dan kemampuan struktur *ladder* dalam menahan gaya atau beban yang ditimbulkan oleh cutter tersebut penting menghitung beban *ladder*, sehingga tipe konstruksi struktur ataupun pemilihan jenis material sesuai dengan yang digunakan. Beban dinamis merupakan beban yang berlaku pada platform dalam kaitannya dengan respon reaksi terhadap tubrukan. [8]

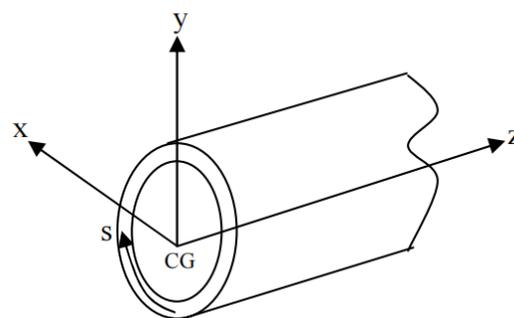
#### 4. Pengaruh Geser

Penyambungan antara batang-batang tersusun dengan memakai batang ikat/diagonal (*lacing*) bermanfaat agar semua komponen bekerja sebagai satu kesatuan. Komponen geser dari beban aksial timbul ketika batang tekan melentur. Besarnya pengaruh geser terhadap pengurangan kekuatan kolom sebanding sebanding dengan besarnya deformasi yang ditimbulkan oleh gaya geser. Penampang berbadan pejal (*solid-webbed*) seperti profil W memiliki deformasi geser yang lebih kecil dari pada kolom tersusun (Gambar 17) yang menggunakan batang ikat dan/atau plat kopel (*batten plates*). Selain itu, seperti yang ditunjukkan nanti, gaya geser kecil pengaruhnya terhadap pengurangan kekuatan kolom dengan profil berbadan pejal dan dapat diabaikan dengan aman. Namun, pengaruh geser sebaiknya tidak diabaikan untuk kolom tersusun/berkisi (*lattice column*). [10]



Gambar 17. Jenis kolom tersusun. [10]

Rumusan dalam Beam-HULLST (*Beam Finite Element*) didasarkan pada teori balok berdinding tipis. Di sini, teori fundamental Elemen balok berdinding tipis mencakup efek torsi sebagai kasus umum. Sistem koordinat didefinisikan sebagai ditunjukkan pada Gambar 18. Sumbu  $x$  dan  $y$  didefinisikan pada balok penampang dan sumbu  $z$  sejajar dengan balok sumbu. Asal dari sistem koordinat terletak di pusat gravitasi penampang. Koordinat  $s$  didefinisikan disepanjang garis ketebalan tengah. Dengan asumsi bahwa penampang tetap tidak terdistorsi selama deformasi, perpindahan  $U$ ,  $V$  dan  $W$  pada Persamaan (4, 5, dan 6) di  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  pada koordinat  $(x, y, z)$  bisa diekspresikan seperti pada Gambar 18. [12]



Gambar 18. Koordinat Balok Berdinding Tipis. [12]

$$U(x,y,z) = u_s(z) - (y-y_s)\theta(z) \quad (4)$$

$$V(x,y,z) = v_s(z) + (x-x_s)\theta(z) \quad (5)$$

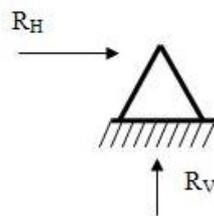
$$W(x,y,z) = w(z) + xu'_s(z) - yv'_s(z) + \omega_{ns}(x,y)\theta'(z) \quad (6)$$

Dengan  $u_s$  dan  $v_s$  adalah perpindahan dipusat geser dalam arah  $x$  dan  $y$  dan  $w$  adalah perpindahan pada pusat gravitasi ke arah  $z$ .  $\theta$  adalah sudut rotasi sekitar pusat geser  $x_s$  dan  $y_s$  adalah koordinat  $x$  dan  $y$  dari pusat geser.  $\omega_{ns}$  adalah fungsi pembengkokan pada geser pusat. Bilangan prima (') menunjukkan diferensiasi ke koordinat- $z$ . [12]

#### D. Jenis – Jenis Tumpuan

##### 1. Tumpuan Engsel

Engsel merupakan tumpuan yang dapat menerima gaya reaksi vertikal ( $R_V$ ) dan gaya reaksi horizontal ( $R_H$ ). Tumpuan yang berpasak mampu melawan gaya yang bekerja dalam setiap arah dari bidang. Jadi pada umumnya reaksi pada suatu tumpuan seperti ini mempunyai dua komponen yang satu dalam arah horizontal dan yang lainnya dalam arah vertikal. Tumpuan engsel dapat dilihat seperti pada Gambar 19.



Gambar 19. Tumpuan engsel

##### 2. Tumpuan Rol

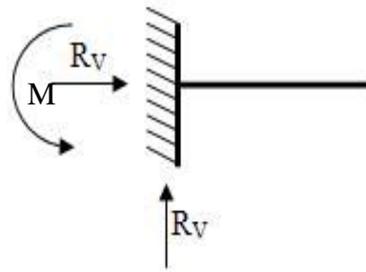
Rol merupakan tumpuan yang hanya dapat menerima gaya reaksi vertikal ( $R_V$ ). mampu melawan gaya-gaya dalam suatu garis aksi yang spesifik. Penghubung yang terlihat pada Gambar 19 hanya dapat melawan beban vertikal. Sedang rol-rol hanya dapat melawan suatu tegak lurus pada bidang. Tumpuan rol terlihat seperti pada Gambar 20.



Gambar 20. Tumpuan rol

### 3. Tumpuan Jepit

Tumpuan jepit merupakan tumpuan yang dapat menerima gaya reaksi vertical ( $R_V$ ), gaya reaksi horizontal ( $R_H$ ) dan momen ( $M$ ) akibat jepitan dua penampang. Tumpuan jepit ini mampu melawan gaya dalam setiap arah dan juga mampu melawan suatu kopel atau momen. Secara fisik, tumpuan ini diperoleh dengan membangun sebuah balok ke dalam suatu dinding batu bata. Mengecornya ke dalam beton atau mengelas ke dalam bangunan utama. Tumpuan jepit terlihat seperti pada Gambar 21.



Gambar 21. Tumpuan jepit

## E. Tegangan, Regangan dan Elastisitas

### 1. Tegangan Pada Struktur

Balok yang digunakan sebagai elemen struktur *ladder* akan bekerja berbagai jenis tegangan seperti tegangan aksial, tegangan tekuk/lentur, dan tegangan geser.

Adapun tegangan kerja yang terjadi pada struktur adalah :

#### a) Tegangan Aksial

Tegangan aksial yang bekerja ( $\sigma_a$ ) pada elemen baja dihitung dengan Persamaan 7. [13]

$$\sigma_a = \frac{P_{max}}{A} \quad (7)$$

Dimana :  $\sigma_a$  = Tegangan aksial (N/mm<sup>2</sup>)

$P_{max}$  = Gaya aksial pada elemen (kN)

$A$  = Luas penampang elemen ( $m^2$ )

b) Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

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

Tegangan lentur yang bekerja ( $\sigma_b$ ) dapat ditentukan dengan rumus seperti Persamaan 8: [9]

$$\sigma_b = \frac{M.y}{I} \quad (8)$$

Dimana  $\sigma_b$  = Tegangan lentur (N/mm<sup>2</sup>)

$M$  = Momen yang bekerja pada elemen (kN.m)

$y$  = Jarak Sumbu Balok (m)

$I$  = Inersia Penampang (m<sup>4</sup>)

c) Tegangan Geser (*Shear Stress*)

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

Tegangan geser ( $\tau$ ) timbul akibat kerja dari dua gaya geser (S) yang saling berlawanan arah (aksi–reaksi) terhadap suatu bidang geser, pada satuan luas bidang penampang tahanan elemem struktur (A). Sehingga bidang penampang tersebut mengalami regangan geser searah bekerjanya gaya. Jika besaran gaya geser (S) dikerjakan pada batang akan

menimbulkan tegangan geser ( $\tau$ ). Tegangan geser ( $\tau$ ), yaitu tegangan yang timbul akibat gaya geser atau gaya lintang. Ciri dari gaya geser atau gaya lintang adalah melintang batang atau tegak lurus batang. [13]

$$\tau = \frac{F_v}{A} \quad (9)$$

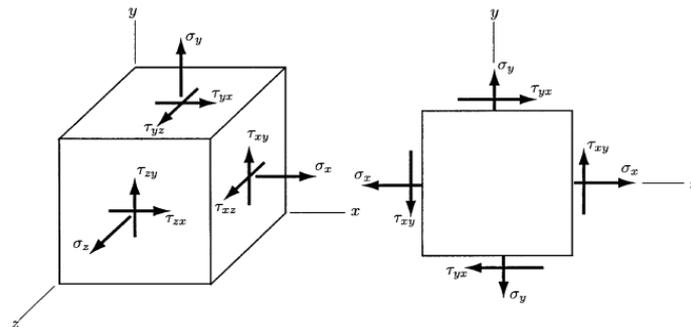
Dimana:  $\tau$  = Tegangan geser (N/mm<sup>2</sup>)

$F_v$  = Gaya geser atau gaya lintang (kN)

$A$  = Luas penampang (m<sup>2</sup>)

Pada suatu bidang yang dikenal suatu gaya akan terdapat dua jenis tegangan yang mempengaruhi bidang tersebut. Umumnya tiga dimensi elemen tegangan diilustrasikan pada Gambar 22. Tiga tegangan normal positif  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  dan  $\sigma_z$ , dan ada 6 tegangan geser positif,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zy}$ ,  $\tau_{zx}$ , dan  $\tau_{xz}$ , ditampilkan untuk memastikan keseimbangan statis, seperti pada Persamaan 10 berlaku. [14]

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (10)$$



Gambar 22. Tegangan yang bekerja pada suatu bidang. [14]

Keterangan :

$\sigma_x$  = tegangan normal yang bekerja pada bidang x

$\sigma_y$  = tegangan normal yang bekerja pada bidang y

$\sigma_z$  = tegangan normal yang bekerja pada bidang z

$\tau_{xy}$  = tegangan geser yang bekerja pada bidang normal x dalam arah y

$\tau_{xz}$  = tegangan geser yang bekerja pada bidang normal x dalam arah z

$\tau_{yx}$  = tegangan geser yang bekerja pada bidang normal y dalam arah x

$\tau_{yz}$  = tegangan geser yang bekerja pada bidang normal y dalam arah z

Adapun persamaan tegangan normal seperti Persamaan (11, 12, dan 13) untuk bidang tiga dimensi adalah:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\epsilon_x (1+\nu) + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)] \quad (11)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\epsilon_y (1+\nu) + \nu(\epsilon_x + \epsilon_z)] \quad (12)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\epsilon_z (1+\nu) + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)] \quad (13)$$

Adapun persamaan tegangan geser seperti Persamaan (14, 15, dan 16) untuk persoalan tiga dimensi adalah

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} \quad (14)$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xz} = G \cdot \gamma_{xz} \quad (15)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yz} = G \cdot \gamma_{yz} \quad (16)$$

#### 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 adalah tegangan tertinggi yang diizinkan dalam suatu konstruksi atau dapat dikatakan sebagai tegangan maksimum yang terjadi dalam konstruksi atau dapat dikatakan sebagai tegangan maksimum yang

terjadi dalam suatu konstruksi yang tidak diperkenankan untuk dilampaui. Secara khusus tegangan tegangan izin ditentukan oleh [15]. bahwa tegangan izin yang bekerja tidak boleh melewati:

$$\text{Tegangan} = \frac{150}{k} [\text{N/mm}^2] ; \text{ dengan } k = \text{faktor baja} \quad (17)$$

Baja struktur lambung adalah baja yang mempunyai nominal nilai lulu atas minimal (*yield point*)  $R_{EH}$  235 N/mm<sup>2</sup> dan kekuatan tarik (*tensile strenght*)  $R_m$  400-520 N/m<sup>2</sup>. [15]

Tegangan izin digunakan dalam menganalisis tegangan kerja pada struktur yang diharapkan besarnya tegangan kerja harus lebih kecil dari tegangan izin bahan. [16]

a) Tegangan Izin Aksial (*allowable axial compressive stress*)

Tegangan izin aksial dirumuskan dengan Persamaan 18. [16]

$$\sigma_{ai} = 0,6 \sigma_y \quad (18)$$

Dimana;  $\sigma_{ai}$  = tegangan izin aksial tekan (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_y$  = tegangan luluh bahan (N/mm<sup>2</sup>)

b) Tegangan Izin Lentur (*allowable bending stress*)

Tegangan izin lentur dirumuskan dengan Persamaan 19. [16]

$$\sigma_{bi} = 0,75 \sigma_y \quad (19)$$

Dimana;  $\sigma_{bi}$  = tegangan izin lentur (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_y$  = tegangan luluh bahan (N/mm<sup>2</sup>)

c) Tegangan Izin Geser (*allowable shear stress*)

Tegangan izin geser dirumuskan dengan Persamaan 20. [16]

$$\tau_i = 0,4 \sigma_y \quad (20)$$

Dimana;  $\tau_i$  = tegangan izin geser (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_y$  = tegangan luluh bahan (N/mm<sup>2</sup>)

## 2. Regangan

Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada Persamaan 21. [11]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l} \quad (21)$$

Dimana :  $\varepsilon$  = Regangan

$\Delta L$  = Pertambahan panjang (m)

$L$  = Panjang mula-mula (m)

Regangan merupakan ukuran mengenai seberapa jauh batang tersebut berubah bentuk. Tegangan diberikan pada material dari arah luar, Regangan adalah tanggapan material terhadap tegangan. Pada daerah elastis, besarnya tegangan berbanding lurus dengan regangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan benda tersebut disebut modulus elastisitas atau *Modulus Young*. Pengukuran *Modulus Young* dapat dilakukan dengan menggunakan gelombang akustik, karena kecepatan jalannya bergantung pada *Modulus Young*. Secara matematis dirumuskan: [17]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (22)$$

$$E = \frac{F.L}{A.\Delta L} \quad (23)$$

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

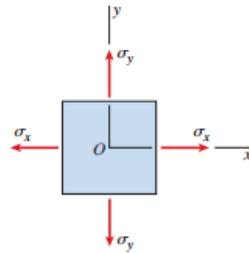
$\sigma$  = Tegangan (N/mm<sup>2</sup>)

$F$  = Gaya (kN)

$L$  = Panjang mula-mula (m)

$\Delta L$  = Pertambahan panjang/pendek (m)

$A =$  Luas penampang ( $m^2$ )



Gambar 23. Sistem tegangan Biaksial. [14]

Dalam kasus khusus tegangan biaksial (Gambar 23) terjadi apabila dalam suatu struktur bekerja beban aksial dalam dua arah sumbu yang saling tegak lurus. Kita mempunyai  $\tau_{xy} = 0$ , sehingga hukum Hooke untuk tegangan bidang disederhanakan menjadi. [14]

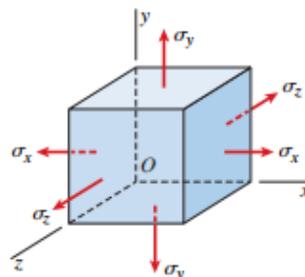
$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad (24)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad (25)$$

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (26)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (27)$$

Selanjutnya dalam sistem tegangan triaksial terjadi jika tegangan bekerja dalam tiga arah sumbu koordinat, Jika material mengikuti hukum Hooke, kita dapat memperoleh hubungan antara tegangan normal dan regangan normal seperti pada Gambar 24.



Gambar 24. Sistem tegangan triaksial. [14]

Regangan yang dihasilkan oleh tegangan  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , dan  $\sigma_z$  yang bekerja secara independen untuk mendapatkan regangan yang dihasilkan. Dengan demikian, kita dengan mudah sampai pada Persamaan (28, 29 dan 30) untuk regangan dalam tegangan triaksial. [14]

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_y + \sigma_z) \quad (28)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_z + \sigma_x) \quad (29)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \quad (30)$$

Dalam persamaan ini, konvensi tanda standar digunakan; yaitu, tarik tegangan  $s$  dan regangan ekstensional  $e$  positif. Persamaan (31, 32 dan 33) dapat diselesaikan secara bersamaan untuk tegangan dalam hal regangan. [14]

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu) \varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \quad (31)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu) \varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)] \quad (32)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu) \varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \quad (33)$$

### 3. Elastisitas

Elastisitas adalah sifat benda yang setelah diberi gaya dan kemudian gaya dihilangkan tetap dapat kembali ke bentuk semula. Apalagi batas elastisitas tercapai dalam konstanta Young atau Modulus Young, maka benda akan mencapai batas deformasi yang berarti tidak dapat kembali ke bentuk semula (disebut plastis).

Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi antara lain:

#### a. Kekakuan Batang

Semakin kaku suatu batang maka lendutan batang yang akan terjadi pada batang akan semakin kecil

b. Besar Kecilnya Gaya yang Diberikan

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

c. Jenis Tumpuan yang Diberikan

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

d. Jenis Beban yang Terjadi pada Batang

Beban terdistribusi merata dengan beban titik, keduanya memiliki kurva defleksi yang berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata slope yang terjadi pada bagian batang yang paling dekat lebih besar dari slope titik. Ini karena sepanjang batang mengalami beban sementara pada beban titik hanya terjadi pada beban titik tertentu saja [17]. Elastisitas benda kemudian dinyatakan dalam tegangan, regangan, dan menjadi dasar fenomena benda yang disebut pegas sebagaimana Hukum Hooke. Sesuai Hukum Hooke, tegangan sebanding dengan regangan. Hal ini berlaku di dalam batas elastis. Perbandingan tegangan satuan  $\sigma$  untuk regangan satuan  $\varepsilon$  dari setiap bahan yang diberikan dari hasil eksperimen, memberikan suatu ukuran kekuatannya, yaitu elastisitas  $E$  dapat dilihat pada Persamaan 34.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{N/m}^2) \quad (34)$$

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

persatuan panjang yang dinyatakan dengan  $\varepsilon$ , dapat dilihat pada Persamaan 35.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (35)$$

Sehingga dapat dirumuskan Persamaan 36 untuk menentukan bentuk total  $\Delta$  suatu bahan yang mengalami beban aksial P, yaitu :

$$\begin{aligned} \Delta L &= \varepsilon \cdot L \\ &= \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot L \\ &= \frac{F}{A} \cdot \frac{1}{E} \cdot L \\ \Delta L &= \frac{FL}{AE} \end{aligned} \quad (36)$$

Dimana :

- $\Delta$  = Ubahan bentuk aksial total (mm)
- F = beban aksial toatal (N)
- L = Panjang batang (mm)
- A = Luas penampang batang (mm<sup>2</sup>)
- E = Modulus elastisitas bahan (N/m<sup>2</sup>)
- $\varepsilon$  = ubahan bentuk atau regangan

#### 4. Lendutan (*Defleksi*)

Defleksi adalah perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertical yang diberikan pada balok atau batang. Deformasi pada balok secara sangat mudah dapat dijelaskan berdasarkan defleksi balok dari posisinya sebelum mengalami pembebanan. Defleksi diukur dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah terjadi deformasi. Konfigurasi yang diasumsikan dengan deformasi permukaan netral dikenal sebagai kurva elastis dari balok [9]. 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 lainnya, misalnya, defleksi izin mungkin saja didasarkan atas toleransi yang diperkenankan terjadi pada elemen lain.

Persamaan untuk balok ditumpu sederhana yang dibebani merata seperti pada Persamaan 37. [10]

$$\text{lendutan maksimum } \Delta = \frac{5WL^4}{384} EI \quad (37)$$

$$\text{lendutan izin } \Delta_{\text{izin}} = \frac{5WL^4}{384}, \quad \text{Atau}$$

$$\Delta_{\text{izin}} = \frac{5(360)WL^4}{384 EL} \quad (38)$$

dimana  $E$  = Modulus Elastis  $(N/mm^2)$

$I$  = Momen Inersia  $(m^4)$

$W$  = Beban Merata  $(N/mm)$

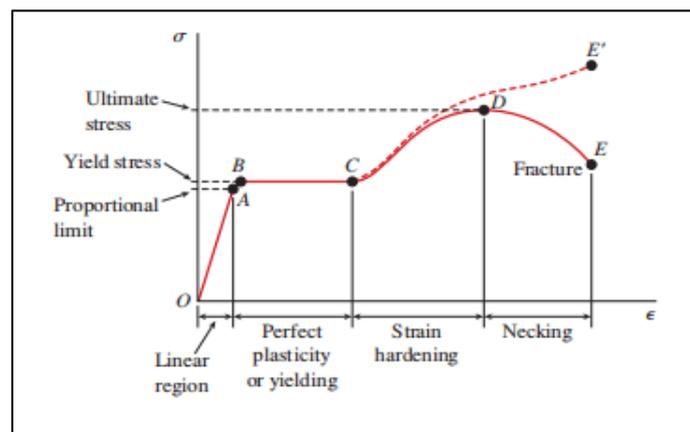
$L$  = Bentang Lantai  $(m)$

## 5. Hubungan Tegangan dan Regangan

Diagram tegangan-regangan untuk baja struktural tipikal dalam tarik ditunjukkan pada Gambar 25. Regangan pada sumbu horizontal dan tegangan pada sumbu vertikal. Grafik hubungan antara tegangan dan regangan ditunjukkan secara skematis (tidak berskala) untuk spesimen baja pada Gambar 25. grafik ini disebut sebagai diagram tegangan-regangan.

Diagram dimulai dengan garis lurus dari titik asal  $O$  ke titik  $A$ , yang berarti bahwa hubungan antara tegangan dan regangan di awal ini daerah tidak hanya linier tetapi juga proporsional kemudian di luar titik  $A$  proporsionalitas antara tegangan dan regangan tidak ada lagi sehingga tegangan di  $A$  disebut batas proporsional. Kemiringan lurus garis dari  $O$  ke  $A$  disebut modulus elastisitas. Regangan mulai meningkat lebih cepat untuk

setiap kenaikan tegangan Akibatnya, kurva tegangan-regangan memiliki kemiringan yang semakin kecil hingga pada titik B kurva menjadi horizontal. peningkatan nyata dalam gaya tarik (dari B ke C). titik B disebut *yielding point*. Tegangan yang sesuai dikenal sebagai *yielding stress*. di titik D disebut tegangan ultimit (*ultimate stress*). Tegangan luluh dan tegangan ultimit suatu material disebut juga kekuatan luluh dan kekuatan ultimit (*ultimate strength*). [18]



Gambar 25. Diagram hubungan antara tegangan-regangan. [18]

### 1) Daerah Linear (*Elastic Limit*)

Bila sebuah material diberi beban sampai pada titik *proportional limit*  $\sigma_p$ , kemudian bebannya dihilangkan, maka material tersebut akan kembali ke kondisi semula (hampir kembali ke kondisi semula) regangan kembali pada titik 0. Tetapi beban ditarik sampai melewati titik  $\sigma_p$ , hukum hooke tidak lagi berlakudan terdapat perubahan permanen dari material tersebut.

### 2) Titik Luluh (Batas Proporsional)

Titik luluh merupakan titik dimana suatu material apabila diberi suatu beban memasuki fase peralihan deformasi plastis. Titik luluh (batas proporsional) yaitu titik sampai dimana penerapan Hukum Hooke masih bisa ditolerir. Dalam aplikasinya, batas proporsional biasanya disamakan dengan batas elastis.

### 3) Deformasi Plastis (*Plastic Deformation*)

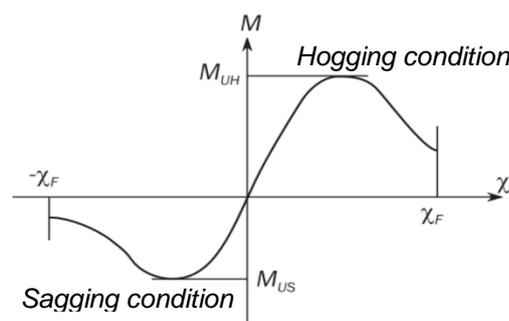
Deformasi plastis merupakan perubahan bentuk secara permanen yang terjadi pada material apabila diberi beban yang menyebabkannya tertarik sampai melewati batas proporsionalnya.

### 4) *Ultimate Tensile Strength* (UTS)

*Ultimate Tensile Strength* (UTS) merupakan besar tegangan maksimum yang didapatkan dalam uji tarik.

### 5) Titik Putus (*Fracture*)

Titik putus (*fracture*) merupakan besar tegangan dimana bahan yang diuji putus atau patah.



Gambar 26. Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan. [19]

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 26. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.

## F. Interaksi Rasio

Pemeriksaan tegangan dilakukan sebagai ukuran penilaian apakah tegangan kombinasi yang bekerja pada profil masih berada di bawah tegangan izin material yang digunakan. Dalam merencanakan sebuah struktur tegangan kerja tidak bisa melebihi tegangan yang diizinkan dengan kata lain perbandingan tegangan kerja terhadap tegangan izin tidak

lebih dari 1. Perbandingan antara tegangan kerja dengan tegangan izin material disebut *stress ratio (interaction ratio)* dengan bentuk Persamaan 39. [16]

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ai}} + \frac{\sqrt{\sigma_{b \text{ minor}}^2 + \sigma_{b \text{ mayor}}^2}}{\sigma_{bi}} \leq 1 \quad (39)$$

Dimana : IR = Interaksi Rasio

$\sigma_a$  = Tegangan aksial aktual (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ai}$  = Tegangan aksial yang diizinkan (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_a$  = Tegangan lentur aktual (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{bi}$  = Tegangan lentur yang diizinkan (N/mm<sup>2</sup>)

## G. Metode Elemen Hingga

### 1. Metode Finite Element Analysis (FEA)

Metode Elemen Hingga (*Finite Elemen Method*) adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala phisis. Tipe masalah teknik dan matematis phisis yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga yaitu analisis struktur dan non struktur. Tipe permasalahan analisis struktur meliputi analisis tegangan, *buckling* dan getaran sementara non struktur meliputi perpindahan panas dan massa, mekanika fluida, dan distribusi potensial listrik dan magnet. Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi : [20]

1. Analisis tegangan/*Stress*, meliputi analisis *Truss* dan *frame* serta masalah-masalah yang berhubungan dengan tegangan-tegangan yang terkonsentrasi
2. *Buckling*
3. Analisis Getaran

Selain metode ini merupakan metode konvensional yang digunakan untuk memecahkan masalah tegangan dan deformasi yaitu menggunakan teori balok, teori kolom, pelat dan lain-lain. Sehingga penerapannya dibatasi untuk sebagian struktur dan beban sederhana. Disisi lain metode elemen hingga menerapkan:

- a) Membagi sebuah struktur menjadi elemen-elemen kecil
- b) Mengubah setiap elemen menjadi model matematika
- c) Menggabungkan elemen-elemen kemudian memecahkannya secara keseluruhan

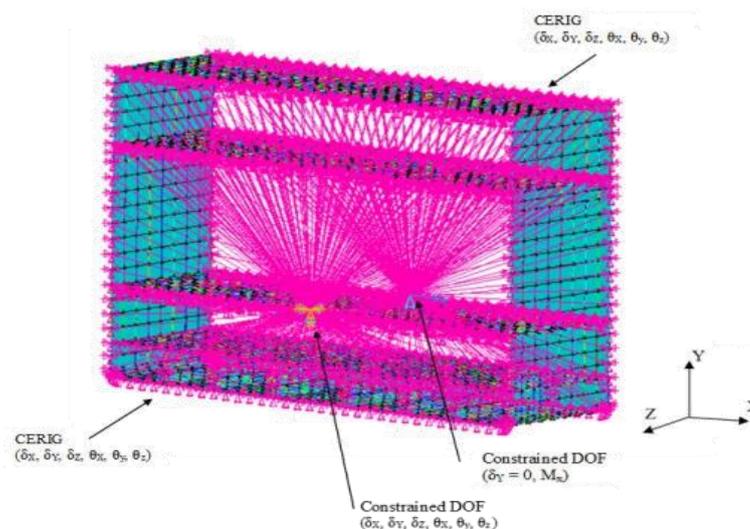
Prosedur perhitungan menggunakan komputer membutuhkan solusi linear, umumnya sebagai berikut.

- a) Menghitung [B] matriks menggunakan geometri sebuah elemen dan untuk menghitung [D] matriks menggunakan sifat material (*material properties*).
- b) Menghitung matriks [K] dari elemen  
Langkah a) dan b) diulang untuk semua elemen
- c) Menggabungkan semua matriks kekakuan
- d) Menghitung displasment dari setiap node pada kondisi dibebani dan ditumpu dengan menggunakan persamaan kekakuan
- e) Menghitung regangan (*strain*) setiap elemen
- f) Menghitung regangan (*strain*) setiap elemen
- g) Menghitung tegangan utama, tegangan ekuivalen dan lain-lain

## 2. Metode Non Linear Finite Element Analysis (NLFEA)

Metode NLFEA adalah salah satu metode elemen hingga yang digunakan dan direkomendasikan oleh biro klasifikasi untuk menghitung kekuatan struktur kapal, disamping metode lainnya seperti teori balok,

metode *presumed stress distribution*, ISUM dan ISFEM [21] menghitung dan membandingkan kekuatan-batas struktur kapal dengan menggunakan metode teori balok, metode *presumed stress distribution*, NLFEA, ISUM dan ISFEM. Penelitian ini akan menggunakan metode NLFEA untuk menghitung kekuatan-batas longitudinal struktur kapal tanker baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat kandas dan tubrukan. Dalam analisis sederhana, pengerasan regangan, ketidak sempurnaan awal, tegangan sisa pengelasan, dan kerusakan seperti yang diakibatkannya tabrakan, grounding dan retakan tidak dimasukkan dalam analisis. Model elemen hingga yang dihasilkan dalam penelitian. [22] diilustrasikan pada Gambar 27.



Gambar 27. Kondisi batas untuk model FE. [22]

Hasil dari Metode Elemen Hingga ini sangat baik jika meshing, *restrain Multiple Point Constraint* (MPC) dan di *apply* dengan tepat. Kekuatan tertinggi diperoleh dengan analisis FE dibandingkan dengan solusi analitik yang dilakukan oleh Beam-HULLST (*Beam Finite Element*). Prosedur ini menggunakan metode Smith diringkas sebagai berikut: (1) program dikembangkan dengan mengadopsi metode Smith dimana penampang kapal dibagi secara sederhana elemen yang terdiri dari pelapisan kaku dan melekat; (2) hubungan tegangan-regangan rata-rata untuk elemen individu

dengan pertimbangan tekuk dan hasil diturunkan; (3) itu kekakuan aksial tangensial elemen individu menggunakan kemiringan rata-rata tegangan rata-rata kurva regangan pada regangan saat ini diturunkan; (4) posisi sumbu netral sesaat ditentukan; (5) kekakuan lentur penampang sehubungan dengan seketika sumbu netral ditentukan; dan (6) kenaikan regangan dalam elemen individu di bawah menerapkan kenaikan kelengkungan, dan kenaikan tegangan mereka menggunakan kemiringan kurva tegangan rata-rata regangan dihitung. [22]

Dalam persoalan-persoalan yang menyangkut geometris 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 [20]. Software yang akan digunakan untuk menganalisis struktur *ladder* yaitu *software* Ansys. *Software* ini dapat memodelkan elemen hingga yang digunakan untuk menganalisis berbagai macam struktur, aliran fluida, dan perpindahan panas dari *software* analisis yang lain yaitu NASTRAN, CATIA, Fluent dan yang lainnya. Secara umum penyelesaian elemen hingga menggunakan Ansys dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu:

a. *Preprocessing* : pendefinisian masalah

*Preprocessing* terdiri dari tiga langkah umum yaitu : (i) menentukan *keypoint/lines/areas/volume*, (ii) menentukan tipe elemen dan bahan yang digunakan/sifat geometrik, dan (iii) *mesh lines/areas/volumes* sebagaimana dibutuhkan. Jumlah detail yang diperlukan akan tergantung pada dimensi analisis yaitu 1D, 2D, asimetri dan 3D.

b. *Solution : assigning, constrain, and solving*

Ditahap *solution* ini, ditentukan beban (titik atau tekanan), kekangan (translasi dan rotasi) dan kemudian menyelesaikan hasil persamaan yang telah diset.

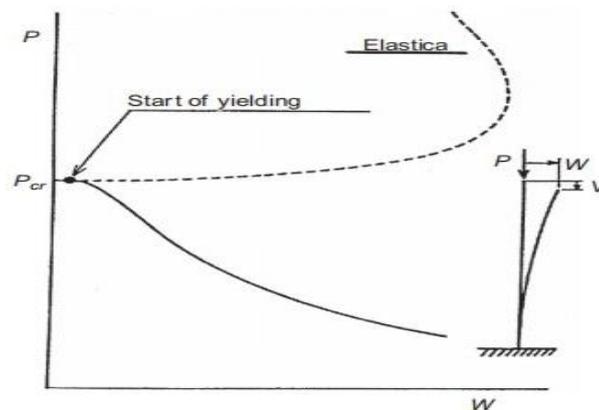
c. *Postprocessing : proses lanjutan dan hasil*

Pada tahap *postprocessing* dapat *displacemement nodal*, elemen gaya dan momen, defleksi bidang dan *stress countur diagrams*.

### H. Kekuatan Batas (*Ultimate Strength*)

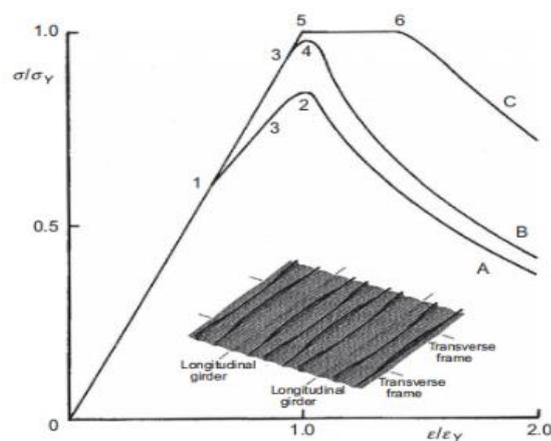
Kekuatan batas (*ultimate strength*) adalah tegangan pada level tertinggi yang bisa ditahan oleh sebuah benda uji sebelum benda uji patah [23]. Anggota kolom yang mengalami luluh dan kapasitasnya mulai berkurang dengan peningkatan defleksi. Dalam pengertian ini, kekuatan tekuk anggota kolom adalah beban maksimum dan dapat dianggap sebagai kekuatan batas [24]. *Ultimate strength* untuk kapal yang mengalami kerusakan pada lambung akibat terjadi kandas telah dilakukan penelitian dengan hasil yang baik dengan menggunakan *Finite Element (FE)* [25]. Sehingga dengan asumsi bahwa *ladder* yang terpasang pada kapal isap produksi (KIP) Timah 8 juga bisa dihitung dengan *ultimate strength*.

Kekuatan batas struktur (*ultimate strength*) bergantung pada berbagai faktor yang berpengaruh yaitu sifat geometris/material, karakteristik pembebanan, terkait ketidaksempurnaan fabrikasi, kondisi batas dan usia bendungan lokal terkait dengan korosi, retak lelah dan deformasi. [23] Dalam kasus pelat tebal, leleh mulai terjadi sebelum pelat mengalami tekuk (*buckling*). Dalam hal ini, daya dukung beban maksimum yaitu kekuatan batas hampir sama dengan kekuatan plastis sepenuhnya, dan kapasitas ini dipertahankan sampai tekuk terjadi jika material tidak menunjukkan pengerasan regangan yang luar biasa. Setelah tekuk terjadi, kapasitas mulai berkurang dengan peningkatan defleksi tekuk. [24]



Gambar 28. Perilaku tekuk kolom di bawah kompresi aksial. [24]

Bagian kolom lurus yang dikenai gaya dorong aksial dipertimbangkan. Dalam hal ini, defleksi meningkat tanpa peningkatan beban aksial yang diterapkan untuk sementara waktu setelah tekuk. Ketika mulai meningkat dan kolom dapat mempertahankan beban lebih lanjut jika perilakunya elastis sempurna ini disebut elastis (Gambar 28) Di sisi lain, anggota kolom yang sebenarnya mengalami luluh dengan menekuk setelah tekuk terjadi dan kekuatannya mulai berkurang dengan peningkatan defleksi. Dalam pengertian ini, kekuatan tekuk anggota kolom adalah beban kekuatan maksimum dan dapat dianggap sebagai kekuatan batas. [25]



Gambar 29. Kurva Tegangan Kekuatan Batas. [24]

Gambar 29 menunjukkan hubungan tegangan dan regangan rata-rata saat rasio kelangsingan panel lokal tinggi mengikuti kurva A. Dalam hal ini, tekuk panel elastis membutuhkan tempat secara lokal di Titik 1, dan kekakuannya berkurang selanjutnya karena defleksi besar pada panel lokal berkembang pesat. Pada titik 3, leleh mulai terjadi, dan pada Titik 2, tekuk keseluruhan terjadi sebagai panel yang kaku. Poin 2 adalah singkatan dari kekuatan batas. Ketika rasio kelangsingan panel lebih rendah, hubungan tegangan regangan diwakili kurva B. Dalam hal ini, leleh awal terjadi di titik 3, dan kekuatan batas dicapai pada Titik 4 dengan tekuk keseluruhan. [24]

Ketika panel dan penumpu memiliki rasio kelangsingan yang jauh lebih rendah, hubungan tegangan regangan mengikuti kurva C yang di mulai pada Titik 5, dan segera leleh terjadi diseluruh pelat yang kaku. Namun, tidak ada defleksi yang dihasilkan pada saat ini. Di titik 6, baik panel atau penumpu mengalami tekuk dan kapasitas menurun selanjutnya dengan peningkatan defleksi pada panel atau penumpu. Setelah ini, deformasi plastis terkonsentrasi sepanjang satu garis tegak lurus terhadap arah pembebanan dan pelepasan elastis terjadi pada sisa pelat yang dikakukan. [23]

Fenomena tekuk biasanya dibagi menjadi tiga kategori, yaitu tekuk elastis, tekuk elastis-plastis dan tekuk plastis, dua yang terakhir disebut tekuk inelastis. Kekakuan di dalam bidang berkurang secara signifikan setelah dimulainya tekuk. Dalam hal ini, tekuk elastis dari pelapisan antara penumpu dapat diizinkan dalam desain, terkadang sengaja untuk menghemat berat material. Karena kekuatan sisa yang signifikan dari pelapisan tidak diharapkan setelah tekuk terjadi pada inelastis namun inelastis tekuk biasanya dianggap sebagai kekuatan batas. [23]

Kemudian, dengan peningkatan lebih lanjut pada beban tekanan lateral, sendi plastis juga terbentuk pada kedua ujung dijepit, dan mekanisme plastis terbentuk ketika tekanan lateral mencapai:

$$q_{\max} = C_H \frac{16}{a^2 b} M_p \quad (40)$$

Ketika kegagalan HI (*Hinge Induced*) terjadi di bawah aksi dorong longitudinal gabungan dan tekanan lateral, kekuatan batas tekan didekati dengan interpolasi linier yang dinyatakan dalam Persamaan 41.

$$\sigma_u = \frac{\sigma_u^{cr}}{q_{\max} - q_{cr}} (q - q_{cr}) + \sigma_u^{cr} \quad (q_{cr} \leq q \leq q_{\max}) \quad (41)$$

Nilai teoritis  $C_H$  adalah 1,0 bila penumpu dengan pelat terpasang mengalami tekuk lentur murni. Namun, untuk memperhitungkan pengaruh distorsi lokal dari penumpu atau lokal tekuk pelat,  $C_H$  ditetapkan sebagai 0,95 [23].

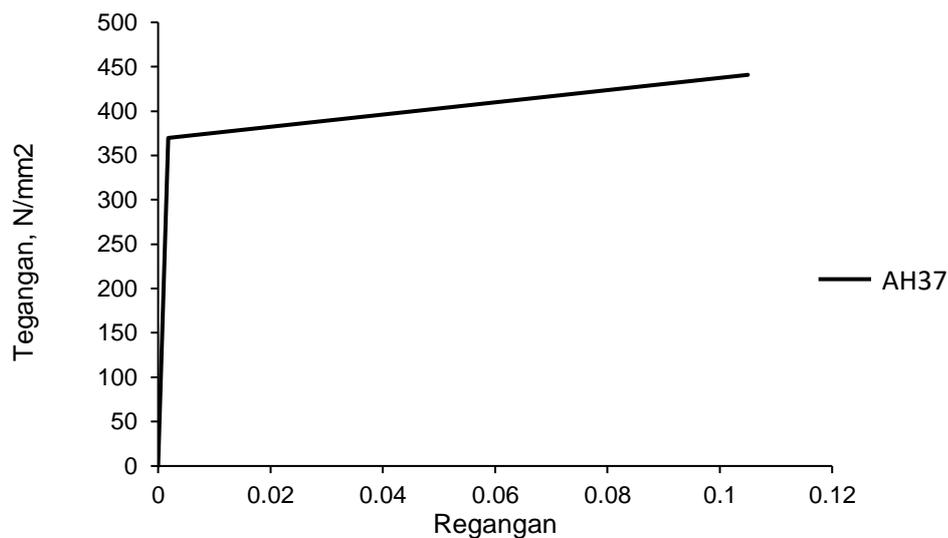
### I. Spesifikasi Material

Kurva tegangan regangan dari material yang digunakan pada model elemen hingga harus tersedia. Kurva tegangan regangan sangat menentukan nilai kekuatan-batas dari struktur kapal. Penelitian ini menggunakan spesifikasi material pada Tabel 1, serta kurva tegangan regangan seperti pada Gambar 30.

Tabel 1. Spesifikasi material. [26]

| Spesifikasi Material                      | AH37   |
|---|--------|
| <i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )       | 7850   |
| <i>Modulus Young</i> (N/mm <sup>2</sup> ) | 210000 |
| <i>Poisson's Ratio</i>                    | 0,3    |
| <i>Yield Strength</i>                     | 370    |
| <i>Tangent Modulus</i>                    | 675    |

Berdasarkan Tabel 1 Material AH37 merupakan material khusus untuk *marine*. Modulus elastisitas sebesar 210000 N/mm<sup>2</sup>, rasio poisson 0,3 dan tegangan luluh AH37 sebesar 370 N/mm<sup>2</sup> serta *tangent modulus* AH37 sebesar 675 seperti pada Gambar 30.



Gambar 30. Model material bilinear isotropic hardening. [26]

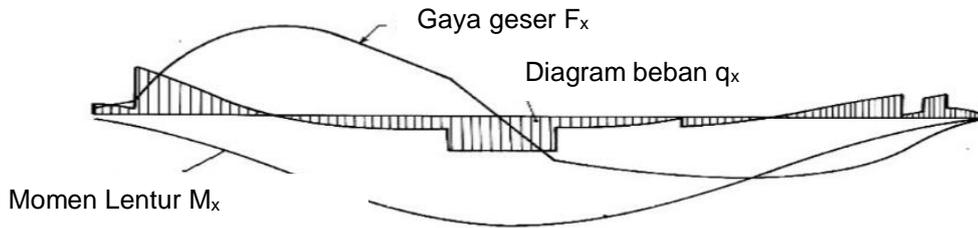
### J. Tegangan Izin

Tegangan izin adalah tegangan tertinggi yang diizinkan dalam suatu konstruksi atau dapat dikatakan sebagai tegangan maksimum yang terjadi dalam konstruksi yang tidak diperkenankan untuk dilampau. Secara khusus tegangan izin ditentukan oleh BKI. [15] bahwa tegangan izin yang bekerja tidak boleh melewati tegangan seperti pada Persamaan 42.

$$\text{Tegangan} = \frac{150}{k} \text{ [N/mm}^2 \text{] ; dengan } k = \text{faktor baja} \quad (42)$$

### K. Pembebanan *Hogging* dan *Sagging*

Momen lentur dan gaya geser pada kondisi air tenang berasal dari gaya apung dan distribusi berat sepanjang kapal seperti Gambar 31. [27]



Gambar 31. Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal.

[26]

Berat dan gaya apung diasumsikan sebagai  $w_x$  dan  $b_x$ , maka distribusi beban adalah

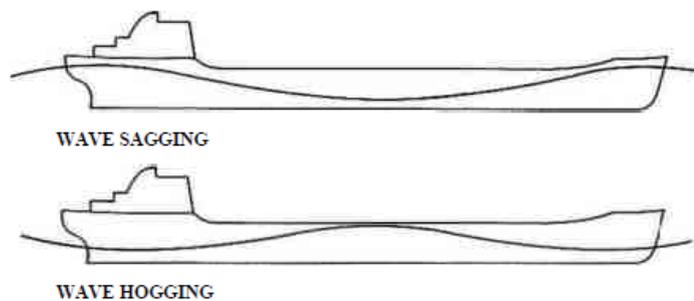
$$q_x = b_x - w_x \dots \dots \dots (43)$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal adalah

$$F_x = \int_0^x (b_x - w_x) dx \dots \dots \dots (44)$$

$$M_x = \int_0^x F_x dx \dots \dots \dots (45)$$

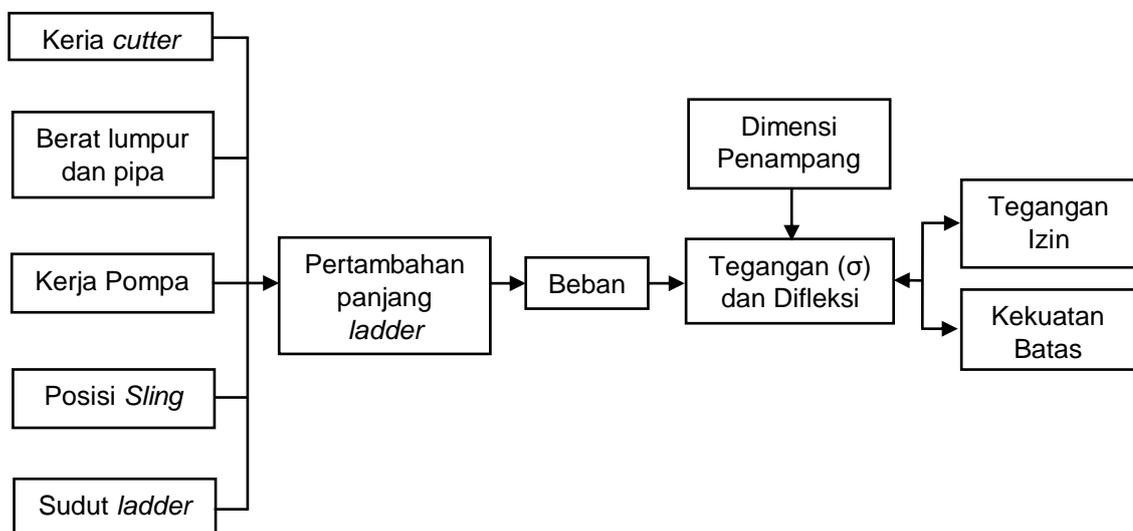
Beban dinamis longitudinal diakibatkan oleh gelombang. Ketika kapal berada pada puncak gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *hogging*. Ketika kapal berada di lembah gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *sagging*. Adapun kondisi kapal akan mengalami *hogging* ataupun *sagging* dapat dilihat pada Gambar 32.



Gambar 32. Momen lentur vertikal akibat gelombang. [27]

## L. Kerangka Konseptual

Penelitian ini terfokus pada struktur *ladder* Kapal Isap Produksi (KIP) Timah 8. Kerangka konseptual pengelompokkan beban-beban yang bekerja pada *ladder* KIP Timah 8 yaitu kerja *cutter*, berat lumpur dan pipa, kerja pompa, posisi *sling*, dan sudut *ladder*. Sudut *ladder* divariasikan mulai dari 30°, 45° dan 60° setiap pertambahan panjang *ladder* divariasikan sudut yang sama sebelumnya dengan pertambahan panjang *ladder* mulai dari panjang *ladder* awal, kemudia ditambah 4 meter, 8 meter dan 12 meter. pemodelan menggunakan *software Ansys*. Kemudian dilakukan hasil analisis struktur berupa tegangan, pergeseran element dan *ultimate strength*. Tegangan izin berdasarkan *rules* BKI dan API (Rp 2a-Wsd) yang hasilnya dapat menjadi pertimbangan bagi desainer kapal dan acuan penelitian (referensi) dalam bidang analisis struktur *ladder* kapal isap produksi seperti pada Gambar 33.



Gambar 33. Kerangka konseptual