

ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR SISTEM MEKANIK PESAWAT SINAR-X DIGITAL

Ahmad Zayadi¹⁾, Marsudi²⁾, Cahyono Heri Prasetyo,

¹⁾Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains Universitas Nasional
Jln. Sawo Manila, Pejaten, Pasar Minggu, Jakarta 12520.

²⁾Prodi Teknik Penerbangan Fakultas Teknik Kedirgantaraan Universitas Marsekal Suryadarma
Komplek Halim Perdana Kusuma Jakarta 13610
Corresponding Author: zayadiahmad43@gmail.com

Abstrak - Analisis kekuatan struktur sistem mekanik pada pesawat sinar-x digital. Penelitian ini sangat penting untuk mengetahui kekuatan dan kualitas dari struktur sistem mekanik pesawat sinar-x digital. Pada penelitian analisis kekuatan struktur sistem mekanik metode yang dipakai menghitung tegangan, tegangan bengkok, angka faktor keamanan alat, dan menghitung defleksi yang terjadi pada struktur. Hasil dari penelitiannya yang didapatkan: tegangan bengkok pada rangka pemegang penangkap sebesar $\sigma_x = 7,07 \text{ N/mm}^2$, sedangkan tegangan bengkok ijin sebesar $\sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$. Tegangan bengkok pada rangka pemegang tabung sebesar $\sigma_x = 7,8 \text{ N/mm}^2$, sedangkan tegangan bengkok ijin sebesar $\sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$. Tegangan von mises pada rangka lengan bagian beban penyeimbang sebesar $\sigma' = 19,44 \text{ N/mm}^2$, sedangkan nilai faktor keamanan sebesar $n = 11,05$. Tegangan von mises pada rangka lengan bagian pembebanan tabung sebesar $\sigma' = 18,41 \text{ N/mm}^2$, sedangkan nilai faktor keamanan sebesar $n = 11,67$. Tegangan bengkok yang terjadi pada rangka kolom sebesar $\sigma_x = 22,60 \text{ N/mm}^2$, sedangkan tegangan bengkok ijin sebesar $\sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$. Kemampuan *ball screw* menggerakkan beban operasi sebesar $F_{bm} = 777,9\text{N}$. Tegangan bengkok yang terjadi pada rangka landasan sebesar $\sigma_x = 21,43 \text{ N/mm}^2$, sedangkan tegangan bengkok ijin sebesar $\sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$. Berdasarkan data yang telah didapatkan, maka struktur sistem mekanik pesawat sinar-x digital dinyatakan aman dan kuat.

Kata Kunci : Analisis, Kekuatan Struktur, Pesawat Sinar-x *Digital*.

Abstract - Analysis of structural strength of mechanical systems on digital x-ray devices. This research is very important to know the strength and quality of the structure of mechanical system of digital x-ray plane. To research analysis strength structure system mechanical calculation methods were used counting stress, bending stress; the safety factor a tool, and calculate deflection occurring in structure. The result of his research or: the bending stress at order holders catcher of $\sigma_x = 7,07 \text{ N/mm}^2$, while the bending stress is equal to $\sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$. The bending stress on the tube holder is as big as $\sigma_x = 7,8 \text{ N/mm}^2$, while the bending stress is equal to $\sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$. Stress von mises in order arms part burden a counterweight of $\sigma' = 19,44 \text{ N/mm}^2$, while the value of the safety factor is $n = 11,05$. Stress von mises in order to arms a part of encumbering tube $\sigma' = 18,41 \text{ N/mm}^2$, while the value of the safety factor is $n = 11,67$. Bending stress happened to column of order $\sigma_x = 22,60 \text{ N/mm}^2$, while the bending stress is equal to $\sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$. The ball screw move of the operation $F_{bm} = 777,9\text{N}$. Bending stress occurred on the basis of order $\sigma_x = 21,43 \text{ N/mm}^2$, while the bending stress is equal to $\sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$. Based on the data has obtained, then structure mechanical system plane digital sinar-x expressed safe and strength.

Keywords : Analysis, Strength of structure, Digital x-ray devices.

I. PENDAHULUAN

Aplikasi teknik nuklir dalam kehidupan manusia banyak ragamnya salah satunya di bidang kesehatan, BATAN adalah salah satu lembaga yang telah banyak melakukan penelitian dan pengembangan aplikasi teknik nuklir untuk kesehatan di Indonesia. Untuk melaksanakan kegiatan Litbangyasa iptek nuklir telah dibangun dan dilengkapi berbagai fasilitas/sarana penelitian yang tersebar di beberapa lokasi antara lain di Kawasan Nuklir Serpong di Kawasan Puspipetek, Kawasan Nuklir Bandung, Kawasan Nuklir Yogyakarta, Kawasan Nuklir Pasar Jumat di Jakarta, Pada kawasan Serpong dimana salah satunya adalah Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN). Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN) adalah salah satu pusat di BATAN yang mempunyai tugas melaksanakan perumusan dan pengendalian kebijakan teknis, pelaksanaan, dan pembinaan dan bimbingan di bidang perkerjasama instrumentasi, elektromekanik dan kendali, mekanik, struktur, dan proses fasilitas nuklir. Salah satu tugas PRFN (Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir) dalam bidang perkerjasama instrumentasi, elektromekanik dan kendali, mekanik, struktur adalah pengembangan prototipe sinar-x. Pesawat sinar-x digital yang sedang dikembangkan yaitu model berdiri. Pada prototipe pesawat sinar-x digital terdiri dari flange dudukan lengan rel, rangka lengan, rangka landasan, rangka kolom, lengan dudukan film, pemegang tabung sinar-x. Persyaratan kinerja dari sistem mekanik pesawat sinar-x digital meliputi: pergerakan lengan secara vertikal, pembebanan tabung dan film pada rangka lengan. Maka perlu dilakukan analisis kekuatan yang meliputi, analisis struktur rangka landasan, rangka kolom, dan rangka lengan. Dalam rangka validasi desain untuk mendapatkan sertifikasi dan ijin edarsuatu alat kesehatan oleh Kementerian Kesehatan serta pada saat dipasarkan alat tersebut dapat diterima oleh konsumen, maka perlu dilakukan analisis kekuatan struktur yang

menyangkut aspek: keamanan dan kenyamanan operator dan pasien.

Analisis kekuatan struktur akan dilakukan pada sistem mekanik pada perangkat sinar-x yang merupakan bagian terpenting dari pesawat sinar-x digital. Hal ini dikarenakan fungsi sistem mekanik adalah untuk menopang sistem kendali dan tabung sebagai pembangkit sinar-x, perangkat penangkap citra, serta modul elektronik sehingga dalam pengoperasiannya dapat dilakukan pengendalian agar tercapai pencitraan yang baik dari obyek yang akan disinari. Dari analisis kekuatan struktur pada sistem mekanik pesawat sinar-x digital diharapkan dapat digunakan sebagai acuan dalam memperoleh sertifikasi alat maupun sebagai jaminan atas keselamatan dan kenyamanan perangkat. Untuk itu penulis mengambil penelitian ini dengan judul analisis kekuatan struktur sistem mekanik pesawat sinar-x digital. Tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui nilai tegangan bengkok yang terjadi pada rangka lengan, *ball screw*, rangka penahan layar penangkap citra, rangka penahan tabung sinar-x, rangka kolom, *ball screw*, rangka landasan.
2. Untuk mengetahui kekuatan material dari struktur sistem mekanik pesawat sinar-x.

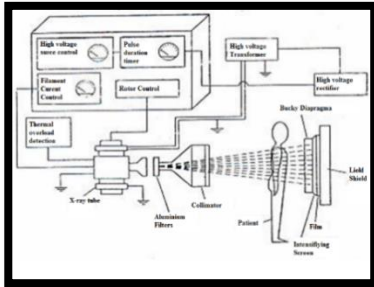
II. TINJAUAN LITERATUR

2.1 Pengertian Sinar-x

Sinar-x merupakan gelombang elektro-magnetik, dimana dalam proses terjadinya memiliki energi yang berbeda-beda. Perbedaan tersebut didasarkan pada energi kinetik elektron. Sinar-x yang terbentuk ada yang memiliki energi rendah sekali sesuai dengan energi elektron pada saat timbulnya sinar-x. Juga ada yang berenergi tinggi, yakni berenergi sama dengan energi kinetik elektron pada saat menumbuk target anode. Terbentuknya sinar-x dapat terjadi apabila partikel bermuatan, elektron misalnya, mengalami perlambatan yang diakibatkan adanya interaksi dengan suatu material.

2.2 Pesawat Sinar-x

Pesawat sinar-x adalah pesawat yang menghasilkan gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi (sinar-x) untuk digunakan dalam diagnostik atau terapi. Blok diagram pesawat sinar-x ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Blok Diagram Pesawat Sinar-x

Pada dasarnya pesawat sinar-X terdiri dari 3 (tiga) bagian utama, yaitu tabung sinar-X, sumber tegangan tinggi yang mencatu tegangan listrik pada kedua elektrode dalam tabung sinar-X, dan unit pengatur bagian pesawat sinar-X.

2.3 Prinsip Kerja Sinar-X

Tabung yang digunakan adalah tabung vakum yang di dalamnya terdapat 2 elektrode yaitu anoda dan katoda. Katoda/filamen tabung *Roentgen* dihubungkan ke *transformator filamen*. *Transformator filamen* ini akan mendistribusikan elektron sehingga mengakibatkan terjadinya pemanasan pada filamen tabung *Roentgen*, sehingga terjadi *thermionic emission*, dimana elektron-elektron akan membebaskan diri dari ikatan atomnya, sehingga terjadi elektron bebas dan terbentuklah awan-awan elektron.

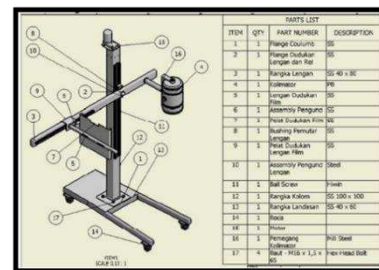
2.4 Prototipe Sistem Mekanik Sinar-x PRFN-BATAN

PRFN-BATAN telah membuat sebuah prototipe pesawat sinar-x digital seperti terlihat pada gambar 2, dimana prototipe itu terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

1. Rangka lengan berfungsi untuk menempatkan tabung sinar-x dan film.
2. Tabung atau kolimator merupakan salah satu bagian dari pesawat

sinar-x digital yang memiliki fungsi untuk pengaturan besarnya ukuran lapangan radiasi.

3. Pemegang film merupakan sebuah komponen yang berfungsi untuk menempatkan layar film untuk *roentgen*.
4. *Bushing* pemutar lengan, berfungsi untuk memutar lengan dan memindahkan suatu posisi kolimator dan layar film secara berputar.
5. *Ball screw* berfungsi sebagai penggerak rangka lengan dari bawah maupun keatas (*mobile*).
6. Rangka kolom merupakan rangka utama untuk menahan randasan rel untuk pergerakan rangka lengan.
7. Landasan rel pada lengan berfungsi untuk menggeser posisi layar film.
8. Landasan rel pada rangka kolom berfungsi menyeimbangkan pergeseran terhadap rangka lengan.



Gambar 2.2 Bagian-bagian prototipe pesawat sinar-x digital

2.5 Perhitungan Kekuatan Struktur

Dalam melakukan analisis kekuatan struktur sistem mekanik pesawat sinar-x ini banyak ditemukan berbagai permasalahan yang bersangkutan dengan kekuatan bahan.

Contohnya : pengukuran gaya yang diakibatkan dari beban tabung dan sistem kendali, layar penangkap citra, beban penyeimbang, beban rangka kolom serta lengan, sifat mekanik dari material SS 304. Selain itu juga menganalisis tegangan-teganagan yang terjadi pada setiap komponen struktur sistem mekanik pesawat sinar-x digital, menghitung defleksi yang terjadi disetiap struktur sistem mekanik pesawat sinar-x digital yang diakibatkan dari pengaruh beban yang terjadi pada setiap struktur.

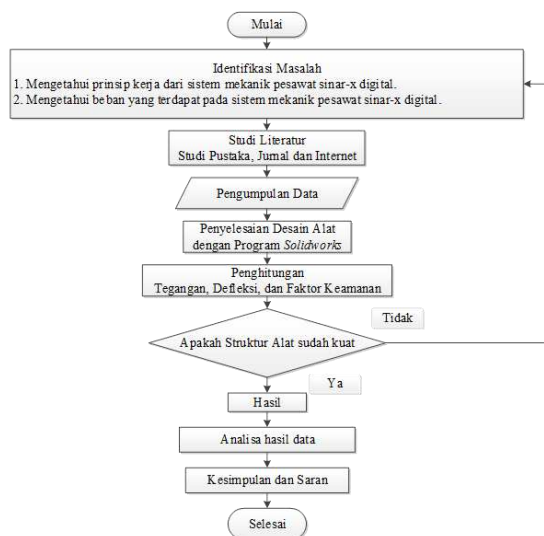
Tegangan-tegangan yang terjadi pada struktur sistem mekanik pesawat sinar-x digital yaitu:

- a. Tegangan.
- b. Tegangan bengkok ijin.
- c. Tegangan von mises.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam analisis kekuatan sistem mekanik pesawat sinar-x digital ada beberapa tahap yaitu seperti pada gambar 3, diagram alir dibawah ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Data Pembebanan Pada Sistem Mekanik Pesawat Sinar-x Digital

Sistem mekanik merupakan alat untuk menggerakkan tabung sinar-x, dan film, ball screw pada sistem mekanik digunakan untuk menggerakkan rangka lengan. Kekuatan dari struktur sistem mekanik dalam menahan beban disesuaikan dari dimensi dan material yang digunakan. Berikut adalah tabel parameter beban pada sistem mekanik pesawat sinar-x yang akan dianalisis.

Tabel 3.1 Parameter beban yang digunakan dalam analisis kekuatan

No.	Beban Yang Digunakan Pada Alat	Nilai (Kg)
1.	Sistem kendali dan tabung	40
2.	Perangkat Penangkap Citra	6
3.	Pb (sebagai beban penyeimbang)	15
4.	Untuk rangka landasan maka (beban no 1,2,3 dan Beban rangka kolom serta lengan)	90

3.3 Data Material Sistem Mekanik Pesawat Sinar-x Digital

Material yang digunakan untuk sistem mekanik pesawat sinar-x adalah SS 304. Sifat mekanik yang terdapat pada *Stainless steel 304* menurut AISI (*American Iron and Steel Institute*), sebagai berikut:

Tabel 3.2 Sifat Mekanik *Stainless Steel 304*

Properties	Value
Kekuatan luluh (<i>Yield Strength</i>)	215 N/mm ²
Kekuatan tekanan maksimum (<i>Ultimate Tensile Strength</i>)	505 N/mm ²
Batas elastisitas (<i>Modulus Elastisitas</i>)	193.000N/mm ²

3.4 Perhitungan Kekuatan Rangka Pemegang Penangkap Citra

Data yang telah dikumpulkan, digunakan untuk menghitung tegangan, tegangan bengkok, dan defleksi yang terjadi pada rangka pemegang penangkap citra, datanya adalah sebagai berikut:

- Beban penangkap citra = 6 kg
- Tebal penyangga = 1 mm
- Lebar penyangga luar (b₂)= 30 mm
- Panjang penyangga luar (h₂)=30 mm
- Lebar penyangga dalam (b₁) = 25,08 mm
- Panjang penyangga dalam (h₂)=25,08 mm
- Panjang penyangga (l) = 691,92 mm
- Tebal persegi penyangga layar = 1 mm

- Mencari Gaya Yang Terjadi

$$F = m \times g = 6 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 58,86 \text{ N}$$

- Luas area rangka pemegang penangkap citra

$$A = (\text{Lebar titik 1} \times 2) \times (\text{Lebar titik 2} \times 2) \times 2 \text{ titik penyangga} = (1 \text{ mm} \times 2) \times (1 \text{ mm} \times 2) \times 2 = (2 \text{ mm}) \times (2 \text{ mm}) \times 2 = 8 \text{ mm}^2$$

- Tegangan Rangka Pemegang Penangkap Citra

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{58,86 \text{ N}}{8 \text{ mm}^2} = 7,35 \text{ N/mm}^2$$

- Tegangan Yang Diijinkan

$$S_{sy} = 0,577 \times S_y = 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 \\ = 124,05 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Rangka Pemegang Penangkap Citra**

$$\sigma_x = \frac{M c}{I} = \frac{345,96 \text{ mm} \times 58,86 \text{ N} \times 12 \text{ mm}}{34.529,24 \text{ mm}^4} = 7,07 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Yang Diijinkan**

$$\sigma_{x \text{ ijin}} = 66\% \times (S_y) = 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 \\ = 141,9 \text{ N/mm}^2$$

- **Defleksi maksimum yang terjadi pada rangka pemegang penangkap citra**

$$\delta_{\max} = \frac{P a^2}{6 E I} (3l - a) \\ = \frac{58,86 \text{ N} \times (345,96 \text{ mm})^2}{6 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (34.529,24 \text{ mm}^4)} \times (3 \times 691,92 \text{ mm} - 345,96 \text{ mm}) \\ = (1,76 \times 10^{-4}) \times 1.037,88 \text{ mm} = 0,18 \text{ mm}$$

- **Defleksi maksimum yang diijinkan**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{691,92 \text{ mm}}{180} = 3,84 \text{ mm}$$

- **Regangan Pada Pemegang Penangkap Citra**

Regangan yang terjadi pada rangka pemegang penangkap citra, untuk membandingkan deformasi maksimum dengan panjang mula rangka pemegang penangkap citra sebelum terjadi tegangan.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,18 \text{ mm}}{691,92 \text{ mm}} = 2,6 \times 10^{-4}$$

- **Rangka Pemegang Tabung**

Rangka pemegang tabung yang dirancang berfungsi menahan tabung sinar-x, data-data yang diketahui untuk menganalisis kekuatan struktur pemegang tabung yaitu:

- Beban sistem kendali dan tabung sinar-x (W1) = 40 kg.
- Panjang = 244 mm
- Diameter = 50 mm
- Kekuatan luluh/*Yield Strength* (S_y) = 215 N/mm²

- **Luas area beban yang terdapat pada rangka lengan pemegang tabung**

$$A = \frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{3,14}{4} \times 50^2 = 1.962,5 \text{ mm}^2$$

- **Gaya dari beban tabung**

$$F = m \cdot g = 40 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 392,4 \text{ N}$$

- **Tegangan yang berada pada rangka lengan pemegang tabung**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{392,4 \text{ N}}{1.962,5 \text{ mm}^2} = 0,19 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan yang Diijinkan**

$$S_{sy} = 0,577 \times S_y = 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 = 124,05 \text{ N/mm}^2$$

- **Momen Inersia Pada Rangka Pemegang Tabung**

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{3,14 \times 50^4}{64} = 306.640,62 \text{ mm}^4$$

- **Tegangan Bengkok Yang Terjadi Pada Rangka Pemegang Tabung**

$$\sigma_x = \frac{M c}{I} = \frac{244 \text{ mm} \times 392,4 \text{ N} \times 50 \text{ mm}/2}{306.640,62 \text{ mm}^4} = 7,8 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok yang Diijinkan**

$$\sigma_{x \text{ ijin}} = 66\% \times (S_y) = 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 \\ = 141,9 \text{ N/mm}^2$$

- **Nilai Faktor Keamanan yang Direalisasikan pada Rangka Pemegang Terhadap Tegangan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,19 \text{ N/mm}^2} = 1.131,57$$

- **Besar Faktor Keamanan yang Direalisasikan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{7,8 \text{ N/mm}^2} = 27,56$$

- **Nilai Kemiringan pada Rangka Pemegang Tabung**

$$\theta = \frac{P l^2}{2 E I} = \frac{392,4 \text{ N} \times (244 \text{ mm})^2}{2 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 306.640,62 \text{ mm}^4} = 1,97 \times 10^{-4}$$

- **Defleksi Maksimum yang Terjadi pada Rangka Pemegang Tabung**

$$\delta_{\max} = \frac{P l^3}{3 E I} = \frac{392,4 \text{ N} \times (244 \text{ mm})^3}{3 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 306.640,62 \text{ mm}^4} = 0,032 \text{ mm}$$

- **Defleksi Maksimum yang Diijinkan**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{244 \text{ mm}}{180} = 1,35 \text{ mm}$$

- **Regangan Pada Rangka Pemegang Beban Tabung**

Dalam menghitung regangan pada rangka pemegang beban tabung, untuk membandingkan deformasi maksimum dengan panjang mula rangka lengan pemegang beban tabung sebelum terjadi tegangan.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,032 \text{ mm}}{244 \text{ mm}} = 1,31 \times 10^{-4}$$

- **Kekuatan Rangka Lengan**

Pada perhitungan teganan rangka lengan ini akan dibahas tentang tegangan yang terjadi pada rangka lengan, dan bahan yang dipakai. Apabila diketahui sebagai berikut:

- Sistem Kendali (W_1) = 10 kg
- Berat Tabung (W_2) = 30 kg
- Beban perangkat penangkap citra (W_3) = 6 kg
- Pb (sebagai beban penyeimbang) (W_4) = 15 kg
- Jarak dari pengunci ke beban penyeimbang = 999,9 mm
- Jarak rangka lengan bagian beban penyeimbang = 1.287,5 mm
- Jarak dari pengunci ke sistem kendali dan tabung = 311 mm
- Ukuran *hollow* bagian luar = 40x80 mm
- Ukuran *hollow* bagian dalam = 76x36 mm
- Massa jenis timbal = 11,34 g/cm³
- Diameter sistem kendali penahan tabung = 50 mm
- Kekuatan luluh / *Yield Strength* (S_y) = 215 N/mm²
- *Modulus Elastisitas* (E) = 193.000 N/mm²

a. **Perhitungan tegangan rangka lengan pada titik beban layar penangkap citra dan beban penyeimbang**

- **Volume Timbal Yang Menjadi Penyeimbang Pada Bagian Rangka Lengan**

$$V = \frac{15.000 \text{ gram}}{11,34 \text{ gr/cm}^3} = 1.322,75 \text{ cm}^3 = 1.322.750 \text{ mm}^3$$

- **Area Bagian Dalam Rangka Lengan**

$$A = h_1 \times b_1 = 76 \text{ mm} \times 36 \text{ mm} = 2.736 \text{ mm}^2$$

- **Luas area Posisi Timbal**

$$L = \frac{V}{A} = \frac{1.322.750 \text{ mm}^3}{2.736 \text{ mm}^2} = 483,46 \text{ mm}$$

- **Gaya Yang Diakibatkan Oleh Beban Penyeimbang**

$$F_x = m \times g = 6 \text{ kg} + 15 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 21 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 206,01 \text{ N}$$

- **Gaya Torsi Penangkap Citra**

$$T = m \times g = 6 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 58,86 \text{ N}$$

- **Luas Penampang Rangka Lengan Pada Bagian Beban Penyeimbang Dan Penangkap Citra**

$$A = 76 \text{ mm} \times 483,46 \text{ mm} = 36.742,96 \text{ mm}^2$$

- **Momen Inersia Pada Rangka Lengan**

$$I = \frac{1}{12} \times b_2 \times h_2^3 - \frac{1}{12} \times b_1 \times h_1^3 = \frac{1}{12} \times 40 \times 80^3 - \frac{1}{12} \times 36 \times 76^3 = 389.738,66 \text{ mm}^4$$

- **Tegangan Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Akibat Beban Penyeimbang Dan Penangkap Citra**

$$\sigma = \frac{F_x}{A} = \frac{206,01 \text{ N}}{36.742,96 \text{ mm}^2} = 0,0056 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Yang Diijinkan**

$$S_{sy} = 0,577 \times S_y = 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 = 124,05 \text{ N/mm}^2$$

- **Titik Beban Penyeimbang Rangka Lengan**

$$C = \frac{80 \text{ mm}}{2} = 40 \text{ mm}$$

- **Unsur Tegangan Bengkok Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Yang Disebabkan Dari Beban Penyeimbang**

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{M c}{I} \\ &= \frac{999,9 \text{ mm} \times 147,15 \text{ N} \times 40 \text{ mm}}{389.738,66 \text{ mm}^4} \\ &= 15,10 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\end{aligned}$$

- **Tegangan Bengkok Yang Diijinkan**

$$\begin{aligned}\sigma_{x \text{ ijin}} &= 66\% \times (S_y) \\ &= 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 = 141,9 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Tegangan Torsi Rangka Lengan Dari Pemegang Penangkap Citra Dan Penangkap Citra**

$$\begin{aligned}t_{zx} &= \frac{T r}{J} \\ &= \frac{345,96 \text{ mm} \times 58,86 \text{ N} \times 12 \text{ mm}}{34.529,24 \text{ mm}^4} = 7,07 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Tegangan Von Mises Dari Beban Penyeimbang Dan Penangkap Citra**

$$\begin{aligned}\sigma' &= (\sigma_x^2 + 3t_{zx}^2)^{1/2} \\ &= ((15,10 \text{ N/mm}^2)^2 + 3(7,07 \text{ N/mm}^2)^2)^{1/2} \\ &= 19,44 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Nilai Faktor Keamanan Yang Drealisasikan Pada Struktur Rangka Lengan Pada Titik Beban Penyeimbang Dan Penangkap Citra**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,0056 \text{ N/mm}^2} = 38.392,85$$

- **Nilai Faktor Keamanan Yang Drealisasikan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{19,44 \text{ N/mm}^2} = 11,05$$

- **Gaya Yang Terjadi Pada Rangka Pemegang Penangkap Citra Dan Beban Penyeimbang**

$$P = 147,15 \text{ N} + 58,86 \text{ N} = 206,01 \text{ N}$$

- **Kemiringan Pada Ujung Rangka Pemegang Penangkap Citra**

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{P l^2}{2 E I} \\ &= \frac{206,01 \text{ N} \times (999,9 \text{ mm})^2}{2 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 389.738,66 \text{ mm}^4} \\ &= 1,36 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

- **Defleksi Maksimum Yang Terjadi Pada Rangka Pemegang Penangkap Citra**

$$\begin{aligned}\delta_{\max} &= \frac{P l^2}{6 E I} (3l - a) \\ &= \frac{206,01 \text{ N} \times (999,9 \text{ mm})^2}{6 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (389.738,66 \text{ mm}^4)} (3 \times 1.287,5 \text{ mm} - 999,9 \text{ mm}) \\ &= (4,56 \times 10^{-4}) \times 862,8 \text{ mm} \\ &= 0,39 \text{ mm}\end{aligned}$$

- **Defleksi Maksimum Yang Diijinkan**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{1.287,5 \text{ mm}}{180} = 7,15 \text{ mm}$$

- b. **Perhitungan Tegangan Rangka Lengan Pada Titik Sistem Tabung**

- **Luas Penampang Rangka Lengan Pada Titik Beban Sistem Kendali Dan Tabung Sebear**

$$\begin{aligned}A &= (b_2 \times h_2) - (b_1 \times h_1) \\ &= (40 \times 80) - (36 \times 76) = 464 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

- **Besar Gaya Yang Diakibatkan Dari Beban Sistem Kendali Dan Tabung**

$$F_y = m \times g = 40 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 392,4 \text{ N}$$

- **Tegangan Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Bagian Titik Beban Tabung**

$$\sigma = \frac{F_y}{A} = \frac{392,4 \text{ N}}{464 \text{ mm}^2} = 0,84 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Yang Diijinkan**

$$\begin{aligned}S_{Sy} &= 0,577 \times S_y \\ &= 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 = 124,05 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Momen Inersia Pada Rangka Lengan**

$$\begin{aligned}I &= \frac{1}{12} \times b_2 \times h_2^3 - \frac{1}{12} \times b_1 \times h_1^3 \\ &= \frac{1}{12} \times 40 \times 80^3 - \frac{1}{12} \times 36 \times 76^3 \\ &= 389.738,66 \text{ mm}^4\end{aligned}$$

- **Titik Beban Pada Rangka Lengan Untuk Sistem Kendali Dan Tabung**

$$C = \frac{80 \text{ mm}}{2} = 40 \text{ mm}$$

- **Tegangan Kritis Yang Terjadi Rangka Lengan Pada Titik Beban Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{M c}{I} \\ &= \frac{311 \text{ mm} \times 392,4 \text{ N} \times 40 \text{ mm}}{389.738,66 \text{ mm}^4} \\ &= 12,52 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Tegangan Bengkok Yang Diijinkan**

$$\begin{aligned}\sigma_{x \text{ ijin}} &= 66\% \times (S_y) \\ &= 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 \\ &= 141,9 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Beban Torsi Dari Rangka Lengan Ke Tabung**

$$\begin{aligned}t_{zx} &= \frac{T_r}{J} = \frac{392,4 \text{ N} \times 244 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}/2}{306.640,62 \text{ mm}^4} \\ &= 7,8 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Tegangan Von Mises Dari Beban Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\begin{aligned}\sigma' &= (\sigma_x^2 + 3t_{zx}^2)^{1/2} \\ &= \left((12,51 \text{ N/mm}^2)^2 + 3(7,8 \text{ N/mm}^2)^2 \right)^{1/2} = \\ &= 18,41 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,84 \text{ N/mm}^2} = 255,95$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Dengan Tegangan Von Mises Sebesar 10,6 N/mm²**

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{18,41 \text{ N/mm}^2} = 11,67$$

- **Kemiringan Pada Ujung Rangka Lengan Titik Beban Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{P L^2}{2 E I} = \frac{392,4 \text{ N} \times (311 \text{ mm})^2}{2 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 389.738,66 \text{ mm}^4} \\ &= 2,52 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

- **Defleksi Maksimum Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Titik Beban Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\begin{aligned}\delta_{\max} &= \frac{P L^2}{6 E I} (3l - a) \\ &= \frac{392,4 \text{ N} \times (311 \text{ mm})^2}{6 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (389.738,66 \text{ mm}^4)} \\ &\quad (3 \times 487,5 \text{ mm} - 311 \text{ mm})\end{aligned}$$

$$= (8,4 \times 10^{-5}) \times 1.151,5 \text{ mm} = 0,09 \text{ mm}$$

- **Defleksi Ijin Maksimum Yang Terjadi**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{487,5 \text{ mm}}{180} = 2,7 \text{ mm}$$

- **Regangan Rangka Lengan**

Dalam menghitung regangan pada rangka lengan, untuk membandingkan deformasi maksimum dengan panjang mula rangka lengan sebelum terjadi tegangan.

- **Regangan Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Titik Beban Penyeimbang Dan Penangkap Citra**

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,39 \text{ mm}}{1.287,5 \text{ mm}} = 3,02 \times 10^{-4}$$

- **Regangan Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Titik Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,09 \text{ mm}}{487,5 \text{ mm}} = 1,8 \times 10^{-4}$$

3.5 Kekutan Rangka Kolom

Rangka kolom dirancang untuk menahan rell dan sekaligus beban dari rangka lengan. Dalam perhitungan kekuatan rangka kolom meliputi perhitungan tegangan, tegangan bengkok, momen inersia, dan menghitung defleksi. Apabila diketahui, sebagai berikut:

- Rangka terbuat dari *hollow* SS 304, berikut adalah luasan rangka kolom:
- Panjang *hollow* bagian luar = 100 mm
- Lebar *hollow* bagian luar = 100 mm
- Panjang *hollow* bagian dalam = 94 mm
- Lebar *hollow* bagian dalam = 94 mm
- Panjang rangka kolom = 2.000 mm
- Tebal rangka kolom = 2 mm
- Top *ball screw* / penahan *ball screw* pada rangka kolom dirancang untuk menahan tegangan dari *ball screw* terhadap beban-beban yang terdapat pada rangka lengan, top *ball screw* terdapat 2 bagian dibagian atas rangka kolom dan didekat rangka landasan, berikut ukuran tebal dan sisi top *ball screw*:
- Tebal top *ball screw* = 10 mm
- Sisi top *ball screw* = 94 mm
- Sistem Kendali (W_1) = 10 kg

- Berat Tabung (W_2) = 30 kg
- Beban perangkat penangkap citra (W_3) = 6 kg
- Pb (sebagai beban penyeimbang) (W_4) = 15 kg

- **Luas Penampang Pada Rangka Kolom**

$$A = \text{Tebal top ball screw} \times \text{Sisi Top ball screw} \times 4 \text{ sisi} \\ = ((10 \text{ mm} \times 92 \text{ mm} \times 4) \times 2) \\ = 7.360 \text{ mm}^2$$

- **Gaya Yang Diakibatkan Dari Beban Tabung, Sistem Kendali, Beban Penyeimbang Dan Penangkap Citra**

$$F = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \\ = (10 \text{ kg} + 30 \text{ kg} + 6 \text{ kg} + 15 \text{ kg}) \times 9,81 \text{ m/s}^2 \\ = 61 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 598,41 \text{ N}$$

- **Tegangan Yang Terjadi Pada Rangka Kolom**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{598,41 \text{ N}}{7.360 \text{ mm}^2} = 0,081 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Yang Diijinkan**

$$S_{sy} = 0,577 \times S_y \\ = 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 = 124,05 \text{ N/mm}^2$$

- **Titik Pembebanan Yang Terjadi Pada Rangka Kolom**

$$C = \frac{100 \text{ mm}}{2} = 50 \text{ mm}$$

- **Momen Inersia Yang Terdapat Pada Rangka Kolom**

$$I = \frac{1}{12} \times b_2 \times h_2^3 - \frac{1}{12} \times b_1 \times h_1^3 \\ = \frac{1}{12} \times 100 \times 100^3 - \frac{1}{12} \times 94 \times 94^3 = 1.827.092 \text{ mm}^4$$

- **Tegangan Bengkok Yang Terjadi Pada Rangka Kolom**

$$\sigma_x = \frac{M c}{I} \\ = \frac{1.380,39 \text{ mm} \times 598,41 \text{ N} \times 50 \text{ mm}}{1.827.092 \text{ mm}^4} = 22,60 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Yang Diijinkan Pada Bagian Rangka Kolom**

$$\sigma_{x \text{ ijin}} = 66\% \times (S_y) = 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 \\ = 141,9 \text{ N/mm}^2$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Terhadap Tegangan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,081 \text{ N/mm}^2} = 2.654,32$$

- **Faktor Keamanan Rangka Kolom Terhadap Tegangan Bengkok**

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{22,60 \text{ N/mm}^2} = 9,5$$

- **Kemiringan Pada Ujung Rangka Pemegang Rangka Kolom**

$$\theta = \frac{P l^2}{2 E I} \\ = \frac{598,41 \text{ N} \times (1.938 \text{ mm})^2}{2 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 1.827.092 \text{ mm}^4} = 3,18 \times 10^{-3}$$

- **Defleksi Maksimum Yang Terjadi Pada Rangka Kolom**

$$\delta_{\max} = \frac{P a^2}{6 E I} (3l - a) \\ = \frac{598,41 \text{ N} \times (1.380,39 \text{ mm})^2}{6 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (1.827.092 \text{ mm}^4)} \\ (3 \times 1.938 \text{ mm} - 1.380,39 \text{ mm}) \\ = (5,38 \times 10^{-4}) \times 1.672,83 \text{ mm} \\ = 0,89 \text{ mm}$$

- **Defleksi Ijin Maksimum**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{1.938 \text{ mm}}{180} = 10,76 \text{ mm}$$

- **Nilai Regangan Pada Rangka Kolom Yang Terjadi Akibat Dari Defleksi**

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,89 \text{ mm}}{1.928 \text{ mm}} = 4,61 \times 10^{-4}$$

3.6 Kekutan Pada *Ball Screw*

Ball screw adalah aktuator linier yang bertindak untuk mengubah gerak putar menjadi gerak lurus dengan gesekan kecil. Gesekan yang terjadi bisa kecil dikarenakan antara nut dengan boltnya terdapat *ball*(gotri) yang berfungsi untuk mengurangi koefisien gesek.

Parameter beban *ball screw*:

- Sistem Kendali (W_1) = 10 kg
- Berat Tabung (W_2) = 30 kg
- Beban perangkat penangkap citra (W_3) = 6 kg
- Pb (sebagai beban penyeimbang) (W_4) = 15 kg.

Dimensi dari *ball screw* yaitu:

- Diameter = 20 mm
- Pitch = 5 mm
- d (radius ulir *ballscrew*) = 1 mm

- L (panjang *ballscrew*) = 1900 mm

• **Gaya Yang Terdapat Pada *Ball Screw***

$$F = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$$

$$= (10 \text{ kg} + 30 \text{ kg} + 6 \text{ kg} + 15 \text{ kg}) \times 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$= 61 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 598,41 \text{ N}$$

• **Kekuatan *Ball Screw***

$$P = \frac{F_{bm}}{2,8}$$

• **Kekuatan *Ball Screw* Dalam Satu Kondisi**

- Beban (F) = 598, 41 N
- Putaran Motor (n) = 2,5 Rps x 60 = 150 Rpm
- Rasio waktu pembebanan (t) = 45%
- Beroperasi saat kondisi normal (f_p) = 1,3
- Jarak antara bantalan bagian bawah = 1.442,39 yang menahan *ball screw* dengan bagian atas yang mejadi tumpuan rangka lengan

• **Kecepatan Perputaran *Ball Screw***

$$n_{av} = n \times \frac{t}{100} = 150 \times \frac{45}{100} = 67,5 \text{ Rpm}$$

• **Kemampuan *Ball Screw* Untuk Menjalani Beban Operasi**

$$F_{bm} = \sqrt[3]{F^3 \times \frac{n}{n_{av}} \times \frac{t}{100} \times f_p^3}$$

$$= \sqrt[3]{598,41^3 \text{ N} \times \frac{150 \text{ Rpm}}{67,5 \text{ Rpm}} \times \frac{45}{100} \times 1,3^3}$$

$$= 777,9 \text{ N}$$

• **Kekuatan Yang Dimiliki *Ball Screw* Sebelum Pembebanan**

$$P = \frac{F_{bm}}{2,8} = \frac{1.196,82 \text{ N}}{2,8} = 427,43 \text{ N}$$

• **Kekuatan *Ball Screw* Sebelum Beban Tarik Torsi**

$$T_d = \frac{K_p \times P \times l}{2 \pi} = \frac{0,26 \times 427,43 \text{ N} \times 5 \text{ mm}}{2 \times 3,14}$$

$$= 88,48 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

• **Gaya Aksial Yang Terjadi Pada *Ball Screw***

$$F_a = F_{bm} + P = 777,9 \text{ N} + 427,43 \text{ N} = 1.205,33 \text{ N}$$

• **Kemampuan Gaya Aksial Pada *Ball Screw***

$$F_{ai} = \frac{F_a}{F_s} = \frac{1.205,33 \text{ N}}{1,3} = 927,17 \text{ N}$$

• **Gaya Tekuk Yang Diijinkan**

$$F_k = 40.720 \times \frac{N_f \cdot d_r^4}{L_t^2} =$$

$$40.720 \times \frac{0,5 \cdot 20 \text{ mm}^4}{1.442,39 \text{ mm}^2} = 902,3 \text{ N}$$

• **Kekuatan Tekuk Pada *Ball Screw***

$$F_c = \frac{34 \times 10^3 \cdot f \cdot d_r^4}{l^2} = \frac{34 \times 10^3 \cdot 20 \text{ mm}^4}{1900 \text{ mm}^2} = 3.013,8 \text{ N}$$

3.7 Kekuatan Pada Rangka Landasan

Rangka landasan perlu juga diperhitungkan juga untuk menahan berat sebesar 90 kg. Agar rangka landasan kuat maka dihitung kekuatan rangka landasan tersebut.

• **Rangka Landasan**

Rangka landasan yang dirancang ini berfungsi sebagai tumpuan *ballscrew* rangka lengan, rangka landasan, rangka kolom dirancang sebagai berikut:

Keterangan :

- Lebar batang penahan 1 (b_1) = 40,08 mm
- Panjang batang yang terkena beban 1 (h_1) = 60 mm
- Lebar batang penahan 1 (b_2) = 32,06 mm
- Panjang batang yang terkena beban 1 (h_2) = 52mm
- Lebar batang penahan 2 (b_3) = 200 mm
- Panjang batang yang terkena beban 2 (h_3) = 10 mm
- Beban yang bekerja pada rangka landasan = 90 kg
- Kekuatan luluh / *Yield Strength* (S_y) = 215N/mm²

• **Gaya Yang Terjadi Akibat Beban Pada Rangka Landasan**

$$F = m \times g = 90 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 882,9 \text{ N}$$

- **Luas Area Penampang Pada Titik Beban Yang Ada Di Rangka Landasan**

$$A = ((b_1 - b_2) (h_1 - h_2) \times 2) + ((b_3 \times h_3) \times 2) \\ = ((40,08 - 32,06) (60 - 52) \times 2) + ((200 \times 10) \times 2) = 128,32 \text{ mm}^2 + 4000 \text{ mm}^2 \\ = 4.128,32 \text{ mm}^2$$

- **Tegangan Yang Terjadi Pada Rangka Landasan**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{882,9 \text{ N}}{4.128,32 \text{ mm}^2} = 0,2138 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Yang Diijinkan**

$$S_{Sy} = 0,577 \times S_y = 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 = 124,05 \text{ N/mm}^2$$

- **Momen Inersia Yang Terdapat Pada Rangka Landasan**

- Ukuran luar = $b_1 = 40,08 \text{ mm}, h_1 = 60 \text{ mm}$
- Ukuran dalam = $b_2 = 32,06 \text{ mm}, h_2 = 52 \text{ mm}$
- Plat alas 1 = $b_3 = 75 \text{ mm}, h_3 = 10 \text{ mm}$
- Plat alas 2 = $b_4 = 280 \text{ mm}, h_4 = 2 \text{ mm}$

$$I = \frac{1}{12} (b_1 \cdot h_1^3 - b_2 \cdot h_2^3) + \frac{1}{12} (b_3 \cdot h_3^3) + \frac{1}{12} (b_4 \cdot h_4^3) \\ = \frac{1}{12} (40,08 \times 60^3 - 32,06 \times 52^3) + \frac{1}{12} (75 \times 10^3) + \frac{1}{12} (280 \times 2^3) \\ = 345.782,3 \text{ mm}^4 + 6.250 \text{ mm}^4 + 186,6 \text{ mm}^4 = 352.218,9 \text{ mm}^4$$

- **Tegangan Bengkok yang Terjadi Pada Rangka Landasan**

Tegangan bengkok jika diketahui, nilai – nilai pada kerangka sebagai berikut:

- Jarak ke titik berat : $2 = 475 \text{ mm} : 2 = 237,5 \text{ mm}$
- Beban pada rangka landasan sebesar = $882,9 \text{ N}$
- Lebar landasan yang terkena beban = $72 \text{ mm} : 2 = 36 \text{ mm}$

$$\sigma_x = \frac{M \cdot c}{I} \\ = \frac{237,5 \text{ mm} \times 882,9 \text{ N} \times 36 \text{ mm}}{352.218,9 \text{ mm}^4} \\ = 21,43 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Yang Diijinkan**

$$\sigma_{x \text{ ijin}} = 66\% \times (S_y) \\ = 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 \\ = 141,9 \text{ N/mm}^2$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Pada Rangka Landasan Terhadap Tegangan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,2138 \text{ N/mm}^2} = 1.005,61$$

- **Faktor Keamanan Pada Rangka Landasan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{21,43 \text{ N/mm}^2} = 10,03$$

- **Kemiringan Yang Terdapat Pada Rangka Landasan Sisi A**

$$\theta_A = \frac{P l^2}{16 E I} \\ = \frac{882,9 \text{ N} \times (475 \text{ mm})^2}{16 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 352.218,9 \text{ mm}^4} = 1,83 \times 10^{-4} \text{ (searah jarum jam)}$$

- **Kemiringan Yang Terdapat Pada Rangka Landasan Sisi B**

$$\theta_B = \frac{P l^2}{16 E I} \\ = \frac{882,9 \text{ N} \times (475 \text{ mm})^2}{16 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 352.218,9 \text{ mm}^4} = 1,83 \times 10^{-4} \text{ (kebalikan arah jarum jam)}$$

- **Defleksi Maksimum**

$$\delta_{\text{max}} = \frac{P l^3}{48 E I} \\ = \frac{882,9 \text{ N} \times (475 \text{ mm})^3}{48 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (352.218,9 \text{ mm}^4)} \\ = 0,028 \text{ mm}$$

- **Defleksi Ijin Maksimum Yang Terjadi**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{475 \text{ mm}}{180} = 2,63 \text{ mm}$$

- **Regangan Pada Rangka Landasan**

Regangan yang terjadi pada rangka landasan, untuk membandingkan deformasi maksimum dengan panjang mula rangka landasan citra sebelum terjadi tegangan

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,028 \text{ mm}}{475 \text{ mm}} = 5,8 \times 10^{-6}$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam analisis kekuatan pada alat sistem mekanik pesawat sinar-x, faktor keamanan dapat ditentukan dengan kekuatan luluh/*yield strength* (S_y) dibagi dengan tegangan yang terjadi pada setiap penampang.

Berat Pada analisis kekuatan sistem mekanik pesawat sinar-x, telah ditentukan faktor pembebanan seperti berat tabung, penangkap citra, pb (beban penyeimbang), rangka kolom, rangka landasan. Data yang telah ditentukan, selanjutnya digunakan untuk menghitung momen inersia, tegangan bengkok yang terjadi pada rangka lengan, yaitu:

- Sistem Kendali (W_1) = 10 kg
- Berat Tabung (W_2) = 30 kg
- Beban perangkat penangkap citra (W_3) = 6 kg
- Pb (sebagai beban penyeimbang) (W_4) = 15 kg.
- Untuk rangka landasan maka (beban = 90 kg no 1,2,3 dan Beban rangka landasanserta lengan) Berat total keseluruhan (W_5)

$$M = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5)$$

$$= (10 \text{ kg} + 30 \text{ kg} + 6 \text{ kg} + 15 \text{ kg} + 90 \text{ kg})$$

$$= 151 \text{ kg}$$

$$F = m \times g = 151 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 1.481,31 \text{ N}$$

4.1 Rangka Pemegang Penangkap Citra

Rangka pemegang penangkap citra dirancang untuk memegang layar penangkap citra. Rangka pemegang ini dapat bergerak (*mobile*). Pada rangka pemegang penangkap citra perlu dihitung tegangan untuk menahan beban dari penangkap citra (*roentgen*). Rangka pemegang penangkap citra menahan beban sebesar 6 kg, maka akan terjadi tegangan – tegangan yang disebabkan oleh gaya dari penangkap citra.

- **Besar Gaya Yang Disebabkan Dari Beban Penang Citra**

$$F = m \times g = 6 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 58,86 \text{ N}$$

- **Tegangan Yang Terjadi Pada Lengan Penangkap Citra**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{58,86 \text{ N}}{8 \text{ mm}^2} = 7,35 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Yang Diijinkan**

$$S_{sy} = 0,577 \times S_y$$

$$= 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2$$

$$= 124,05 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Pada Rangka Pemegang Penangkap Citra**

$$\sigma_x = \frac{M c}{I}$$

$$= \frac{345,96 \text{ mm} \times 58,86 \text{ N} \times 12 \text{ mm}}{34.529,24 \text{ mm}^4}$$

$$= 7,07 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Diijinkan Pada Rangka Pemegang Penangkap Citra**

$$\sigma_{x \text{ ijin}} = 66\% \times (S_y)$$

$$= 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 = 141,9 \text{ N/mm}^2$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Pada Rangka Lengan Pemegang Tabung Terhadap Nilai Tegangan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{7,35 \text{ N/mm}^2} = 29,25$$

- **Faktor Keamanan Rangka Pemegang Penangkap Citra Menggunakan Material SS304 Dengan Kekuatan Luluh/ Yield Strength (S_y) = 215 N/Mm²**

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{7,07 \text{ N/mm}^2} = 30,41$$

- **Kemiringan Pada Ujung Rangka Pemegang Penangkap Citra**

$$\theta = \frac{P l^2}{2 E I}$$

$$= \frac{58,86 \text{ N} \times (691,92 \text{ mm})^2}{2 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 34.529,24 \text{ mm}^4} = 2,11 \times 10^{-3}$$

- **Defleksi Maksimum Yang Terjadi Pada Rangka Pemegang Penangkap Citra**

$$\delta_{\max} = \frac{P a^2}{6 E I} (3l - a)$$

$$= \frac{58,86 \text{ N} \times (345,96 \text{ mm})^2}{6 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (34.529,24 \text{ mm}^4)} (3 \times 691,92 \text{ mm} - 345,96 \text{ mm})$$

$$= (1,76 \times 10^{-4}) \times 1.037,88 \text{ mm}$$

$$= 0,18 \text{ mm}$$

- **Defleksi Ijin Maksimum Yang Terjadi**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{691,92 \text{ mm}}{180} = 3,84 \text{ mm}$$

Rangka pemegang penangkap citra dinyatakan aman dan kuat karena nilai $\delta_{\max} = 0,032 \text{ mm} < y = 1,35 \text{ mm}$

- **Regangan Pemegang Penangkap Citra**

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,18 \text{ mm}}{691,92 \text{ mm}} = 2,6 \times 10^{-4}$$

- **Rangka Pemegang Tabung**

Gaya (F) pada rangka pemegang tabung yang disebabkan oleh beban tabung sebesar 30 kg = 294,3 N. Luas penampang *area* sebesar 1.962,5 mm⁴.

- **Tegangan Yang Terjadi Pada Rangka Pemegang Tabung**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{392,4 \text{ N}}{1.962,5 \text{ mm}^2} = 0,19 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Yang Diijinkan Pada Rangka Pemegang Tabung**

$$\begin{aligned} S_{sy} &= 0,577 \times S_y \\ &= 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 \\ &= 124,05 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

- **Tegangan Bengkok Yang Terjadi Rangka Pemegang Tabung Akibat Beban Dari Tabung**

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{Mc}{I} \\ &= \frac{244 \text{ mm} \times 392,4 \text{ N} \times 50 \text{ mm}/2}{306.640,62 \text{ mm}^4} = 7,8 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

- **Tegangan Bengkok Diijinkan Pada Rangka Pemegang Tabung**

$$\begin{aligned} \sigma_{x \text{ ijin}} &= 66\% \times (S_y) \\ &= 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 = 141,9 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Pada Rangka Lengan Pemegang Tabung Terhadap Nilai Tegangan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,19 \text{ N/mm}^2} = 1.131,57$$

- **Faktor Keamanan Dengan Rangka Pemegang Tabung Menggunakan Bahan SS304**

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{7,8 \text{ N/mm}^2} = 27,56$$

- **Nilai Kemiringan Pada Rangka Pemegang Tabung**

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{Pl^2}{2EI} \\ &= \frac{392,4 \text{ N} \times (244 \text{ mm})^2}{2 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 306.640,62 \text{ mm}^4} = 1,97 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

- **Defleksi Maksimum Yang Terjadi Pada Rangka Pemegang Tabung**

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= \frac{Pl^3}{3EI} \\ &= \frac{392,4 \text{ N} \times (244 \text{ mm})^3}{3 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 306.640,62 \text{ mm}^4} \\ &= 0,032 \text{ mm} \end{aligned}$$

- **Defleksi Ijin Maksimum Yang Terjadi**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{244 \text{ mm}}{180} = 1,35 \text{ mm}$$

Rangka pemegang penangkap citra dinyatakan aman dan kuat karena nilai $\delta_{\max} = 0,032 \text{ mm} < y = 1,35 \text{ mm}$.

- **Regangan Yang Diakibatkan Dari Defleksi Alat**

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,032 \text{ mm}}{244 \text{ mm}} = 1,31 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

4.2 Kekuatan Rangka Lengan

Pada rangka lengan memiliki dua titik beban yaitu beban dari penangkap citra, sistem kendali tabung. Masing-masing titik beban memiliki nilai beban yang berbeda sebagai berikut:

- Sistem Kendali (W_1) = 10 kg
- Berat Tabung (W_2) = 30 kg
- Beban perangkat penangkap citra (W_3) = 6 kg.
- Pb (sebagai beban penyeimbang) (W_4) = 15 kg.

Hasil perhitungan tegangan, defleksi dan regangan yang terjadi pada rangka lengan pada bagian beban penyeimbang dan rangka lengan.

- **Tegangan Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Yang Diakibatkan Dari Beban Penyeimbang**

$$\sigma = \frac{F_x}{A} = \frac{206,01 \text{ N}}{36.742,96 \text{ mm}^2} = 0,0056 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Ijin**

$$\begin{aligned} S_{sy} &= 0,577 \times S_y \\ &= 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 = 124,05 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

- **Tegangan Kritis Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Dari Gaya Beban Penyeimbang**

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{Mc}{I} \\ &= \frac{999,9 \text{ mm} \times 147,15 \text{ N} \times 40 \text{ mm}}{389.738,66 \text{ mm}^4} = 15,10 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

- **Tegangan Bengkok Ijin**

$$\begin{aligned}\sigma_{x \text{ ijin}} &= 66\% \times (S_y) \\ &= 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 = 141,9 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Beban Torsi Dari Pemegang Penangkap Citra Dan Penangkap Citra**

$$\begin{aligned}t_{zx} &= \frac{Tr}{J} \\ &= \frac{345,96 \text{ mm} \times 58,86 \text{ N} \times 12 \text{ mm}}{34.529,24 \text{ mm}^4} = 7,07 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Tegangan Von Mises Dari Beban Penyeimbang Dan Penangkap Citra**

$$\begin{aligned}\sigma' &= (\sigma_x^2 + 3t_{zx}^2)^{1/2} \\ &= ((15,10 \text{ N/mm}^2)^2 + 3(7,07 \text{ N/mm}^2)^2)^{1/2} \\ &= 19,44 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Terhadap Tegangan Dari Beban Penyeimbang**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,0056 \text{ N/mm}^2} = 38.392,85$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Terhadap Tegangan Von Mises**

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{19,44 \text{ N/mm}^2} = 11,05$$

- **Kemiringan Pada Ujung Rangka Lengan Bagian Titik Beban Pemegang Penangkap Citra**

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{P a^2}{2 E I} \\ &= \frac{206,01 \text{ N} \times (999,9 \text{ mm})^2}{2 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 389.738,66 \text{ mm}^4} = 1,36 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

- **Defleksi Maksimum Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Pada Bagian Titik Beban Pemegang Penangkap Citra**

$$\begin{aligned}\delta_{\text{max}} &= \frac{P a^2}{6 E I} (3l - a) \\ &= \frac{206,01 \text{ N} \times (999,9 \text{ mm})^2}{6 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (389.738,66 \text{ mm}^4)} (3 \times 1.287,5 \text{ mm} - 999,9 \text{ mm}) \\ &= (4,56 \times 10^{-4}) \times 862,8 \text{ mm} = 0,39 \text{ mm}\end{aligned}$$

- **Defleksi Ijin Maksimum Yang Terjadi**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{1.287,5 \text{ mm}}{180} = 7,15 \text{ mm}$$

Rangka lengan bagian beban penyeimbang dan penangkap citra dinyatakan aman dan kuat karena nilai $\delta_{\text{max}} = 0,39 \text{ mm} < y = 7,15 \text{ mm}$.

- **Regangan Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Titik Beban Penyeimbang Dan Penangkap Citra**

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,39 \text{ mm}}{1.287,5 \text{ mm}} = 3,02 \times 10^{-4}$$

Hasil perhitungan tegangan, defleksi, regangan pada rangka lengan bagian sistem kendali dan tabung.

- **Tegangan Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Yang Diakibatkan Dari Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{392,4 \text{ N}}{464 \text{ mm}^2} = 0,84 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Yang Dijinkan**

$$\begin{aligned}S_{S_y} &= 0,577 \times S_y \\ &= 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 = 124,05 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Tegangan Kritis Pada Rangka Lengan Yang Diakibatkan Oleh Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{M c}{I} \\ &= \frac{311 \text{ mm} \times 392,4 \text{ N} \times 40 \text{ mm}}{389.738,66 \text{ mm}^4} = 12,52 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Tegangan Bengkok Ijin**

$$\begin{aligned}\sigma_{x \text{ ijin}} &= 66\% \times (S_y) \\ &= 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 = 141,9 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Beban Torsi Dari Pemegang Tabung**

$$\begin{aligned}t_{zx} &= \frac{Tr}{J} \\ &= \frac{392,4 \text{ N} \times 244 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}/2}{306.640,62 \text{ mm}^4} = 7,8 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Tegangan Von Mises Dari Pembebanan Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\begin{aligned}\sigma' &= (\sigma_x^2 + 3t_{zx}^2)^{1/2} \\ &= ((12,51 \text{ N/mm}^2)^2 + 3(7,8 \text{ N/mm}^2)^2)^{1/2} = 18,41 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Terhadap Tegangan Yang Diakibatkan Dari Sistem Kendali Dan Tabung**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,84 \text{ N/mm}^2} = 255,95$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Terhadap Tegangan Von Mises**

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{18,41 \text{ N/mm}^2} = 11,67$$

- **Kemiringan Pada Ujung Rangka Lengan Titik Beban Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\theta = \frac{P a^2}{2 E I} = \frac{392,4 \text{ N} \times (311 \text{ mm})^2}{2 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 389.738,66 \text{ mm}^4} = 2,52 \times 10^{-4}$$

- **Defleksi Maksimum Yang Terjadi Pada Rangka Lengan Titik Beban Sistem Kendali Dan Tabung**

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= \frac{P a^2}{6 E I} (3l - a) \\ &= \frac{392,4 \text{ N} \times (311 \text{ mm})^2}{6 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (389.738,66 \text{ mm}^4)} \\ &\quad (3 \times 487,5 \text{ mm} - 311 \text{ mm}) \\ &= (8,4 \times 10^{-5}) \times 1.151,5 \text{ mm} \\ &= 0,09 \text{ mm} \end{aligned}$$

- **Defleksi Ijin Maksimum Yang Terjadi**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{487,5 \text{ mm}}{180} = 2,7 \text{ mm}$$

Struktur rangka lengan bagian titik beban tabung dinyatakan kuat karena nilai $\delta_{\max} = 0,09 \text{ mm} < y = 2,7 \text{ mm}$.

- **Nilai Regangan Yang Terjadi Dihitung**

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,09 \text{ mm}}{487,5 \text{ mm}} = 1,8 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

- **Kekuatan Rangka Kolom**

Rangka kolom dirancang untuk sebagai menahan beban dari *ball screw* dan untuk menempatkan rel penggerak dari rangka lengan.

- **Tegangan Yang Diakibatkan Dari Rangka Kolom**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{598,41 \text{ N}}{7.360 \text{ mm}^2} = 0,081 \text{ N/mm}^2$$

- **Nilai Tegangan Diijinkan**

$$S_{Sy} = 0,577 \times S_y = 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 = 124,05 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Yang Terjadi**

$$\sigma_x = \frac{M c}{I} = \frac{1.380,39 \text{ mm} \times 598,41 \text{ N} \times 50 \text{ mm}}{1.827.092 \text{ mm}^4} = 22,60 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Yang Diijinkan Pada Bagian Rangka Kolom**

$$\begin{aligned} \sigma_{x \text{ ijin}} &= 66\% \times (S_y) \\ &= 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 = 141,9 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

- **Faktor Keamanan Struktur Rangka Kolom Terhadap Tegangan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,081 \text{ N/mm}^2} = 2.654,32$$

- **Faktor Keamanan Struktur Rangka Dari Tegangan Bengkok**

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{22,60 \text{ N/mm}^2} = 9,51$$

- **Kemiringan Pada Ujung Bebas Rangka Kolom**

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{P l^2}{2 E I} \\ &= \frac{598,41 \text{ N} \times (1.938 \text{ mm})^2}{2 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 1.827.092 \text{ mm}^4} = 3,18 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

Defleksi maksimum yang terjadi pada rangka kolom

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= \frac{P a^2}{6 E I} (3l - a) \\ &= \frac{598,41 \text{ N} \times (1.380,39 \text{ mm})^2}{6 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (1.827.092 \text{ mm}^4)} \quad (3 \\ &\quad \times 1.938 \text{ mm} - 1.380,39 \text{ mm}) \\ &= (5,38 \times 10^{-4}) \times 1.672,83 \text{ mm} \\ &= 0,89 \text{ mm} \end{aligned}$$

- **Defleksi Ijin Maksimum Yang Terjadi**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{1.938 \text{ mm}}{180} = 10,76 \text{ mm}$$

Rangka kolom dinyatakan aman dan kuat, karena nilai $\delta_{\max} = 0,89 \text{ mm} < y = 10,76 \text{ mm}$.

4.3 Kekuatan Pada *Ball screw*

Beban yang digerakkan dan ditahan *ball screw* terdapat pada rangka lengan. Total beban yang terdapat pada rangka lengan sebesar.

$$F = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \\ = (10 \text{ kg} + 30 \text{ kg} + 6 \text{ kg} + 15 \text{ kg}) \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 61 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 598,41 \text{ N}$$

- **Kemampuan *Ball Screw* Untuk Menjalani Beban Operasi**

$$F_{bm} = \sqrt[3]{F^3 \times \frac{n}{n_{av}} \times \frac{t}{100} \times f_p^3} \\ = \sqrt[3]{598,41^3 \text{ N} \times \frac{150 \text{ Rpm}}{67,5 \text{ Rpm}} \times \frac{45}{100} \times 1,3^3} \\ = 777,9 \text{ N}$$

Kemampuan *ball screw* dapat terhadap beban operasi mencapai 777,9 N. Sedangkan beban yang terdapat pada rangka lengan sebesar. *Ball screw* dinyatakan kuat dan aman, karena dapat menggerakkan beban sebesar 61 kg = 598,41 N.

- **Kekuatan *Ball Screw* Sebelum Pembebanan**

$$P = \frac{F_{bm}}{2,8} = \frac{1.196,82 \text{ N}}{2,8} = 427,43 \text{ N}$$

- **Kekuatan *Ball Screw* Sebelum Beban Tarik Torsi**

$$T_d = \frac{K_p \times P \times l}{2 \pi} = \frac{0,26 \times 427,43 \text{ N} \times 5 \text{ mm}}{2 \times 3,14} = 88,48 \text{ N.mm}$$

- **Gaya Aksial Yang Terjadi Pada *Ball Screw***

$$F_a = F_{bm} + P \\ = 777,9 \text{ N} + 427,43 \text{ N} = 1.205,33 \text{ N}$$

- **Gaya Aksial Yang Dijinkan**

$$F_{ai} = \frac{F_a}{F_s} = \frac{1.205,33 \text{ N}}{1,3} = 927,17 \text{ N}$$

- **Gaya Tekuk Yang Dijinkan Pada *Ball Screw***

$$F_k = 40.720 \times \frac{N_f \cdot d_r^4}{L_t^2} \\ = 40.720 \times \frac{0,5 \cdot 20^4}{1.900^2} = 902,3 \text{ N}$$

- **Kekuatan Tekuk Pada *Ball Screw***

$$F_c = \frac{34 \times 10^3 \cdot f \cdot d_r^4}{l^2}$$

$$= \frac{34 \times 10^3 \cdot 2 \cdot 20^4}{1900^2} = 3.013,8 \text{ N}$$

4.4 Kekuatan Rangka Landasan

Rangka landasan yang dirancang ini berfungsi sebagai tumpuan *ball screw*, rangka lengan, rangka kolom, data yang diketahui sebagai berikut:

- Lebar batang penahan 1 (b_1) = 40,08 mm
- Panjang batang yang terkena beban 1 (h_1) = 60 mm
- Lebar batang penahan 1 (b_2) = 32,06 mm
- Panjang batang yang terkena beban 1 (h_2) = 52 mm
- Lebar batang penahan 2 (b_3) = 200 mm
- Panjang batang yang terkena beban 2 (h_3) = 10 mm
- Beban yang bekerja pada rangka kolom = 90kg
- Kekuatan luluh/*Yield Strength* (S_y) = 215N/mm²

- **Gaya Yang Terjadi Pada Rangka Kolom**

$$F = m \times g = 90 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 882,9 \text{ N}$$

- **Luas Area Penampang Pada Titik Beban Yang Ada Di Rangka Kolom**

$$A = ((b_1 - b_2) (h_1 - h_2) \times 2) + ((b_3 \times h_3) \times 2) \\ = ((40,08 - 32,06) (60 - 52) \times 2) + ((200 \times 10) \times 2) \\ = 128,32 \text{ mm}^2 + 4000 \text{ mm}^2 = 4.128,32 \text{ mm}^2$$

- **Tegangan Yang Terjadi Pada Rangka Kolom**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{882,9 \text{ N}}{4.128,32 \text{ mm}^2} = 0,2138 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Yang Dijinkan**

$$S_{sy} = 0,577 \times S_y \\ = 0,577 \times 215 \text{ N/mm}^2 = 124,05 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Yang Terjadi Pada Rangka Landasan**

$$\sigma_x = \frac{M \cdot c}{I} \\ = \frac{237,5 \text{ mm} \times 882,9 \text{ N} \times 36 \text{ mm}}{352.218,9 \text{ mm}^4} = 21,43 \text{ N/mm}^2$$

- **Tegangan Bengkok Yang Diijinkan**

$$\begin{aligned}\sigma_{x \text{ ijin}} &= 66\% \times (S_y) \\ &= 66\% \times 215 \text{ N/mm}^2 = 141,9 \\ &\text{N/mm}^2\end{aligned}$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Pada Rangka Landasan Terhadap Tegangan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{0,2138 \text{ N/mm}^2} = 1.005,61$$

- **Faktor Keamanan Yang Direalisasikan Terhadap Kekuatan Rangka Landasan**

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x} = \frac{215 \text{ N/mm}^2}{21,43 \text{ N/mm}^2} = 10,03$$

- **Kemiringan Yang Terdapat Pada Rangka Landasan**

$$\begin{aligned}\theta_A &= \frac{P l^2}{16 E I} \\ &= \frac{882,9 \text{ N} \times (475 \text{ mm})^2}{16 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 352.362 \text{ mm}^4} = \\ &1,83 \times 10^{-4} \text{ (searah jarum jam)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_B &= \frac{P l^2}{16 E I} \\ &= \frac{882,9 \text{ N} \times (475 \text{ mm})^2}{16 \times 193.000 \text{ N/mm}^2 \times 352.362 \text{ mm}^4} = \\ &1,83 \times 10^{-4} \text{ (kebalikan arah jarum jam)}\end{aligned}$$

- **Defleksi Maksimum**

$$\begin{aligned}\delta_{\text{max}} &= \frac{P l^3}{48 E I} \\ &= \frac{882,9 \text{ N} \times (475 \text{ mm})^3}{48 \times (193.000 \text{ N/mm}^2) \times (352.362 \text{ mm}^4)} = \\ &0,028 \text{ mm}\end{aligned}$$

- **Defleksi Ijin Maksimum Yang Terjadi**

$$y = \frac{l}{180} = \frac{475 \text{ mm}}{180} = 2,63 \text{ mm}$$

Rangka landasan dinyatakan kuat karena nilai $\delta_{\text{max}} = 0,028 \text{ mm} < y = 2,63 \text{ mm}$

- **Regangan Yang Terjadi Pada Rangka Landasan**

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{0,028 \text{ mm}}{475 \text{ mm}} = 5,8 \times 10^{-6}$$

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan analisis kekuatan sistem mekanik pesawat sinar-x digital maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

a. Struktur rangka pemegang penangkap citra memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan yang diijinkan $\sigma = 7,35 \text{ N/mm}^2 < S_{sy} = 124,05 \text{ N/mm}^2$
- Tegangan bengkok yang terjadi pada rangka pemegang penangkap citra lebih kecil dari tegangan bengkok yang diijinkan $\sigma_x = 7,07 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$.

b. Struktur rangka pemegang sistem kendali dan tabung memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan yang diijinkan $\sigma = 0,19 \text{ N/mm}^2 < S_{sy} = 124,05 \text{ N/mm}^2$
- Tegangan bengkok yang terjadi pada struktur rangka pemegang tabung lebih kecil dari tegangan bengkok yang diijinkan $\sigma_x = 7,8 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$.

c. Struktur rangka lengan pada bagian titik beban penyeimbang dan penangkap citra memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan ijin $\sigma = 0,0056 \text{ N/mm}^2 < S_{sy} = 124,05 \text{ N/mm}^2$, tegangan von mises yang terjadi sebesar $\sigma' = 19,44 \text{ N/mm}^2$
- Nilai faktor keamanan rangka lengan pada bagian titik beban penyeimbang dan penangkap citra terhadap tegangan von mises sebesar $n = 11,05$.

d. Struktur rangka lengan bagian titik beban sistem kendali dan tabung memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan ijin $\sigma = 0,84 \text{ N/mm}^2 < S_{sy} = 124,05 \text{ N/mm}^2$
- Tegangan von mises yang terjadi sebesar $\sigma' = 18,41 \text{ N/mm}^2$
- Nilai faktor keamanan rangka lengan pada bagian titik beban sistem kendali dan tabung sebesar $n = 11,67$.

e. Struktur rangka kolom memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan ijin $\sigma = 0,081 \text{ N/mm}^2 < S_{sy} = 124,05 \text{ N/mm}^2$

- Tegangan bengkok yang terjadi pada struktur rangka kolom lebih kecil dari tegangan bengkok yang diijinkan $\sigma_x = 22,60 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$.
- f. Kemampuan *ball screw* untuk menjalani beban operasi sebesar $F_{bm} = 777,9 \text{ N}$, kemampuan gaya aksial setelah diberi faktor keamanan yaitu $F_{ai} = 927,17 \text{ N}$.
- g. Struktur rangka landasan memiliki spesifikasi sebagai berikut:
 - Tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan ijin $\sigma = 0,2138 \text{ N/mm}^2 < S_{sy} = 124,05 \text{ N/mm}^2$
 - Tegangan bengkok yang terjadi pada struktur rangka pemegang tabung lebih kecil dari tegangan bengkok yang diijinkan $\sigma_x = 21,43 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{x \text{ ijin}} = 141,9 \text{ N/mm}^2$.

DAFTAR PUSTAKA

1. Muhammad Awwaluddin, I Putu Susila, Edy Purwanta, Abdul Jalil, Ahmad H. November 2014. "Perancangan sistem mekanik pesawat sinar-x digital". Batan: Jurnal Perangkat Nuklir. Volume 08, Nomor 02.
2. Anggi Kurniawan. 2014. "Analisis Kekuatan Struktur Cran Hook Dengan Perangkat Lunak Elemen Hingga Untuk Pembebanan 20 Ton". Skripsi. S1 Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Bengkulu.
3. Richard G. Budynas, 2011, Shigley's Mechanical Engineering Design, 9th edition.
4. Larry D. Mitchell, 1983, Mechanical Engineering Design, 4th edition.
5. Ahmad Satiri. 2011. "Perancangan Alat Angkat Kendaraan Roda 4 Menggunakan Sistem Hidrolik Kapasitas 2 Ton" Skripsi. Fakultas Teknik dan Sains, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nasional.
6. Roger L Brockenbrough, Frederick S. Merritt, 1999, Structural Steel Designer's Handbook, 3rd edition.
7. The Atlas Steels Technical Handbook of Stainless Steels, Agustus 2013 "Global metals" Stainless steel – 304/304L.
8. Brosur ball screw Hiwin S99TE18 – 1309, Hal. 18 & 38.
9. Brosur ball screw SKF, Hal. 50.
10. Brosur ball screw Hiwin S99TE18 – 1309, Hal. 30.
11. Brosur ball screw THK. Hal. 15-75.
12. Brosur ball screw Hiwin S99TE18 – 1309, Hal. 25.
13. Brosur ball screw Hiwin S99TE18 – 1309, Hal. 21.
14. Brosur ball screw Hiwin S99TE18 – 1309, Hal. 23.
15. Brosur ball screw Hiwin S99TE18 – 1309, Hal. 22.
16. Mustopa, Naharuddin. 2005. "Analisis Teoritis Dan Eksperimental Lentutan Batang Pada Balok Segiempat Dengan Variasi Tumpuan".
17. James M Gere, Stephen P. Timoshenko. 1972. "Mekanika Bahan", 4rd edition, Jakarta
18. Timoshenko, S. 1986. "Dasar-dasar Perhitungan Kekuatan Bahan". Restu Agung, Jakarta.
19. Beumer, B.J.M. 1980. "Pengetahuan Bahan Teknik. Bharata" Karya Aksara, Jakarta.
20. Singer, Ferdinand L, Pytel Andrew. 1985. "Kekuatan Bahan. Erlangga", Jakarta.
21. Zainal Abidin, Berthan Ridho Rama. 2015. "Analisis Distribusi Tegangan Dan Defleksi Connecting Rod Sepeda Motor 100 CC Menggunakan Metode Elemen Hingga". Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.
22. Muhammad Ashfal Fuad. 2015. "Analisis Defleksi Rangka Mobil Listrik Berbasis Angkutan Massal Menggunakan Metode Elemen Hingga". Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang.
23. Agustinus Purna Irawan. 2007. "Diktat Kuliah Mekanika Teknik (Statika Struktur)". Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanegara.
24. Popov, E.P. 1984. "Mekanika Teknik". Terjemahan Zainul Astamar. Penerbit Erlangga. Jakarta.
25. Khurmi, R.S. 2001. "Strenght Of Materials". S. Chand & Company Ltd. New Delhi.

26. Brosur AK Steel201 Stainless Steel.
27. Paul Tran CSWE, CSWI. 2014. Solidworks 2014 Part I.
28. Rasyanto, "Teknologi Rumah Sakit". <http://rasyanto.blogspot.co.id/p/ms-ct-scan-64-slices.html>.
29. Firmansyah Gita Pradana, "Pesawat Rontgen Konvensional". <http://gonnabefine23.blogspot.co.id/2010/03/rancangan-pesawat-rontgen-konvensional.html>.
30. The Stainless Steel Information Center. "Specialty Steel Industry of North America". <http://www.ssina.com/hintsandtips/index.html>.
31. J.M. Gere & S.P., "MOMEN DAN DEFLEKSI MAKSIMUM STRUKTUR STATIS TERTENTU". <http://only-05.blogspot.co.id/2012/04/>.
32. AISI tipe 304 Stainless Steel. Tipe 300 Stainless Steel. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a>