

## PERANCANGAN SISTEM MEKANIK PADA PEREKAYASAAN PESAWAT SINAR-X DIGITAL

Muhammad Awwaluddin, I Putu Susila, Edy Purwanta, Abdul Jalil, Ahmad H.  
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN) – BATAN  
Email : muhammad.awwaluddin@batan.go.id

### ABSTRAK

*PERANCANGAN SISTEM MEKANIK PADA PEREKAYASAAN PESAWAT SINAR-X DIGITAL, Untuk mendukung beroperasinya pesawat sinar-x digital telah dilakukan perancangan sistem mekanik yang berfungsi untuk menahan sekaligus menggerakkan tabung sinar-x, film detektor, serta sebagai tempat dudukan box kontrol. Perancangan yang dilakukan meliputi rangka landasan, rangka kolom dan rangka lengan agar dapat beroperasi sesuai yang diharapkan. Untuk merealisasikan rancangan ini dibutuhkan hollow SS304 berukuran 40 x 60 x mm dengan tebal 2 mm sepanjang 4,1 m, ukuran 100 x 100 mm dan tebal 2 mm sepanjang 2 m, serta ukuran 40 x 80 mm tebal 2 mm sepanjang 1,8 m. Dibutuhkan juga linear guide way model HGW20HB sepanjang 3 m. Dengan rancangan yang diajukan, maka pengoperasian pesawat sinar-x digital dapat dilakukan dengan baik.*

*Kata kunci : Perangkat Sinar-x, Perancangan Mekanik.*

### ABSTRACT

*MECHANICAL SYSTEM DESIGN IN THE ENGINEERING DESIGN OF DIGITAL X-RAY, has been designed a mechanical system design to hold and moving the x-ray tube, detector films, and a place the holder control box. The design was conducted on the frame fondation, frame columns and frame arms in order to operate the device as well SS304 hollow measuring 40 x 60 x mm with thickness of 2 mm long 4.1 m, size 100 x 100 mm and 2 mm thick along the 2 m, and the size of 40 x 80 mm thickness 2 mm long 1.8 m is needed to reactive the design the linear guide way models HGW20HB 3 m. With the proposed design, the operation of the digital x-rays can be completed as well.*

*Keywords: x-ray devices, Mechanical Design.*

## 1. PENDAHULUAN

Untuk mendukung beroperasinya pesawat sinar-x digital perlu dilakukan perancangan sistem mekanik dari pesawat tersebut. Sistem mekanik pada perekayasa ini merupakan bagian terpenting dari perekayasa Sinar-x Digital, hal ini dikarenakan fungsi sistem mekanik adalah untuk menopang semua 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. Perancangan sistem mekanik yang dilakukan meliputi perancangan rangka landasan, perancangan rangka kolom dan perancangan rangka lengan. Metode yang digunakan adalah dengan menentukan material yang akan digunakan, menentukan beban yang digunakan, menentukan distribusi pembebanan dan menentukan kontruksi rangka pendukung. Bahan yang digunakan adalah hollow SS 304 yang mempunyai sifat tahan karat dengan berat jenis  $8000 \text{ kg/m}^3$  dan merupakan bahan yang biasa dipakai dalam dunia kedokteran. Hasil perancangan sistem mekanik ini diharapkan mampu untuk melakukan pencitraan obyek (manusia) dalam keadaan berdiri maupun dalam keadaan tidur. Pergerakan lengan diharapkan dapat bergerak secara vertikal dari ketinggian 650 mm sampai ketinggian 1800 mm serta dapat berotasi  $180^\circ$ . Dengan berat perangkat sistem kendali dan tabung berkisar antara 30 kg sedangkan sistem penangkap citra hanya berkisar 5 kg dan berat penyeimbang 10 kg maka

rancangan lengan maupun landasan harus benar benar mempertimbangkan sistem keseimbangan maupun kekuatan untuk menjamin keamanan, kenyamanan, maupun fungsi yang diharapkan. Selain itu perangkat sinar-x yang dihasilkan nantinya harus dapat dipindah pindah (portable) serta tidak mudah berkarat.

Dengan perancangan sistem mekanik yang diajukan diharapkan fungsi yang diharapkan dapat terpenuhi, sehingga hasil pencitraan dapat maksimal dan dapat memenuhi persyaratan yang telah ditentukan.

### 1.1. TEORI

#### 1.1.1. Pembebanan, Syarat Kesetimbangan dan Momen Gaya<sup>[1][4]</sup>

Beban adalah massa dalam satuan kg dikalikan percepatan gravitasi dalam satuan  $m/s^2$ , jika dirumuskan adalah:

$$W = m \times g \dots\dots\dots(1)$$

Parameter beban yang digunakan dalam perancangan sistem mekanik pesawat sinar-x digital dapat ditunjukkan pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Parameter beban yang digunakan dalam perancangan

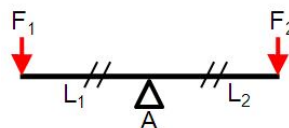
No	beban yang digunakan dalam perancangan	Nilai
1	Sistem kendali dan tabung	30 kg
2	Perangkat Penangkap Citra	5 kg
3	Pb (Sebagai beban penyeimbang)	10 kg
4	Untuk rangka landasan maka ( beban no 1,2,3 dan Beban rangka kolom serta lengan )	75 kg

Beban yang berupa sistem kendali dan tabung berada pada salah satu sisi lengan dengan posisi tetap, sedangkan beban yang berupa perangkat penangkap citra berada pada sisi lengan yang satunya dan dapat bergerak dari jarak 450-1250 mm dari titik pusat. Sedangkan beban yang berupa Pb berada pada sisi lengan yang terdapat perangkat penangkap citra, namun bersifat tetap.

Akibat adanya beban yang ada pada rangka, maka dapat menyebabkan berubahnya dimensi atau bentuk struktur yang digunakan serta dapat mempengaruhi pergerakan posisi struktur. Gerak suatu benda dapat dianggap terdiri dari gerak benda itu sebagai keseluruhan, yaitu gerak translasinya, serta gerak rotasi. Pada umumnya satu gaya saja yang bekerja pada sebuah benda mengakibatkan perubahan baik pada gerak translasinya maupun pada gerak rotasinya. Tetapi bila yang bekerja itu beberapa gaya sekaligus seperti ditunjukkan pada gambar 1. Dengan  $F_1$  sama dengan  $F_2$  dan jarak dari titik pusatnya sama, maka akibatnya saling meniadakan, sehingga tidak menghasilkan perubahan pada gerak translasi maupun pada gerak rotasi. Bila demikian halnya, maka dikatakan benda itu dalam kesetimbangan. Ini berarti bahwa : benda itu sebagai satu keseluruhan tetap diam atau bergerak menurut garis lurus dengan kecepatan konstan dan benda itu tidak berotasi sama sekali atau berotasi dengan kecepatan konstan persamaannya adalah :

$$\Sigma F_x = 0 \text{ dan } \Sigma F_y = 0 \dots\dots\dots(2)$$

jika digambarkan maka:



Gambar 1. Diagram pembebanan gaya dalam keadaan seimbang

Persamaan 2. disebut sarat pertama kesetimbangan, dan dikatakan benda dalam kesetimbangan translasi. Jika sebuah benda terdapat sejumlah gaya pada satu bidang saja, maka jumlah gaya-gaya ini dapat dikurangi menjadi dua buah gaya saja. Apabila dua buah gaya ini besarnya sama, arahnya berlawanan dan mempunyai garis kerja yang sama, maka akan menghasilkan jumlah momen sama dengan nol.

$$\sum M = \sum(F \times l) = 0 \dots\dots\dots(3)$$

**1.1.2. Momen Inersia<sup>[2]</sup>**

Momen inersia yang digunakan pada perhitungan konstruksi pada perancangan rangka dengan struktur hollow dan penampang segiempat yang berlubang adalah menggunakan persamaan berikut:

$$I_{xx} = 1/12 b d^3 - 1/12 b_1 d_1^3 \dots\dots\dots(4)$$

Inersia digunakan untuk memperhitungkan kekuatan konstruksi, misalnya : defleksi, lendutan, tegangan yang terjadi pada struktur.

**1.1.3. Tegangan ( $\sigma$ )<sup>[3]</sup>**

Tegangan (stress) adalah gaya persatuan luas penampang :

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(5)$$

Dengan F adalah gaya (N) dan A adalah luas penampangnya (mm<sup>2</sup>). Tegangan yang terjadi pada struktur rangka yang dirancang ada empat yaitu:

- a. Tegangan tarik ( $\sigma_t$ ) yaitu tegangan yang terjadi akibat gaya tarik. Tegangan ini berada pada rangka lengan akibat beban pada lengan, serta pada sambungan antara kolom dan landasan
- b. Tegangan tekan ( $\sigma_c$ ) yaitu tegangan yang terjadi akibat gaya tekan. Tegangan ini berada pada rangka landasan akibat beban yang berasal dari kolom dan lengan.
- c. Tegangan geser ( $\tau$ ) yaitu tegangan yang terjadi akibat gaya geser. Tegangan ini terjadi pada pengunci lengan saat lengan berotasi 180°.
- d. Tegangan bengkok ( $\sigma$ ) yaitu tegangan yang terjadi pada material akibat gaya tekan maupun tarik dan dipengaruhi oleh inersia bahan. Tegangan ini terjadi pada seluruh struktur dan dihitung dengan rumus:

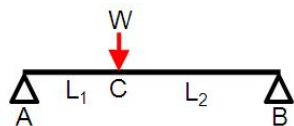
$$\sigma = \frac{M \cdot l}{I_x} \dots\dots\dots(6)$$

**2. METODE PERANCANGAN**

Metode perancangan sistem mekanik pada perckayasaan pesawat Sinar-x Digital meliputi:

**2.1. Penentuan beban yang digunakan digunakan dalam perancangan sistem mekanik pesawat sinar-x digital.** Dalam hal ini dapat ditunjukkan pada tabel 1.

**2.2. Penentuan bentuk pembebanan yang terjadi.**



Gambar 2. Diagram pembebanan Rangka Landasan



Gambar 3. Diagram pembebanan Rangka kolom dan rangka lengan

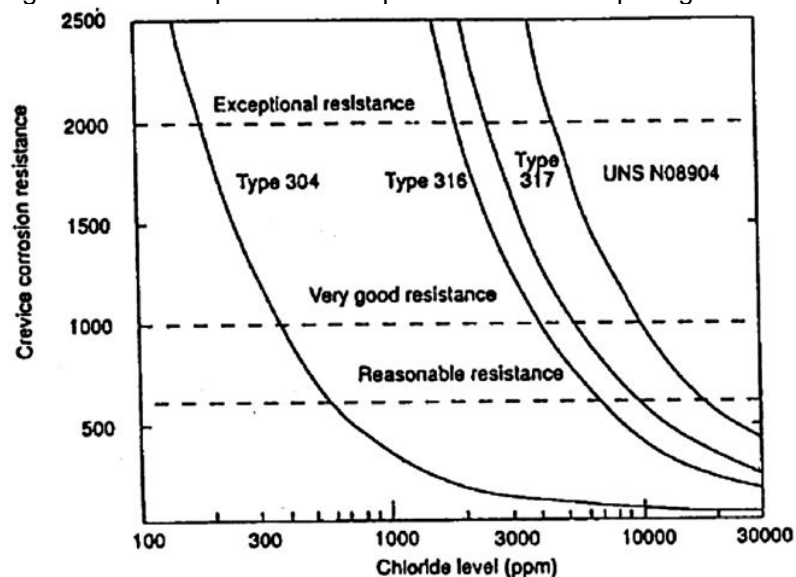
Dimana pada gambar 2.,  $W$  adalah beban yang berasal dari kolom dan lengan sebesar 75 kg.  $L_1$  adalah jarak titik pusat beban dengan support A sebesar 408 mm dan  $L_2$  adalah jarak titik pusat beban dengan support B sebesar 927 mm. Pada gambar 3.,  $W_1$  adalah beban perangkat penangkap citra sebesar 5 kg dan beban kolimator sebesar 10 kg.  $W_2$  adalah beban sistem kendali dan tabung sebesar 30 kg.  $L_1$  adalah jarak beban  $W_1$  dengan titik pusat lengan A sebesar 1300 mm.  $L_2$  adalah jarak beban  $W_2$  dengan titik pusat lengan A sebesar 500 mm.

### 2.3. Penentuan jarak pergerakan penangkap citra dan pergerakan naik turun lengan

Jarak pergerakan penangkap citra pada lengan ke arah horisontal ke kanan dan ke kiri adalah 500 mm dari titik pusat sampai 1300 mm, sehingga diperlukan desain struktur yang baik agar mampu menahan beban maupun dalam menjaga keseimbangan. Untuk pergerakan naik turun lengan ke arah vertikal adalah dari 650 mm di atas permukaan lantai sampai pada ketinggian 1800 mm sehingga desain kolom maupun landasan harus diperhitungkan kekuatannya.

### 2.4. Penentuan bahan yang digunakan pada perekayasaan pesawat sinar-x digital

Persyaratan desain yang diberikan untuk bahan yang akan digunakan adalah Bahan harus tahan terhadap karat, tidak diperlukan proses pengecatan, mempunyai tegangan luluh dan tegangan bengkok yang tinggi, ringan, serta memiliki karakteristik pembentukan dan pengelasan yang baik. Untuk memenuhi kriteria persyaratan desain maka proses pemilihan bahan dilakukan dengan cara melihat grafik dari referensi material yang tahan terhadap karat dan diperoleh material seperti gambar 4 :

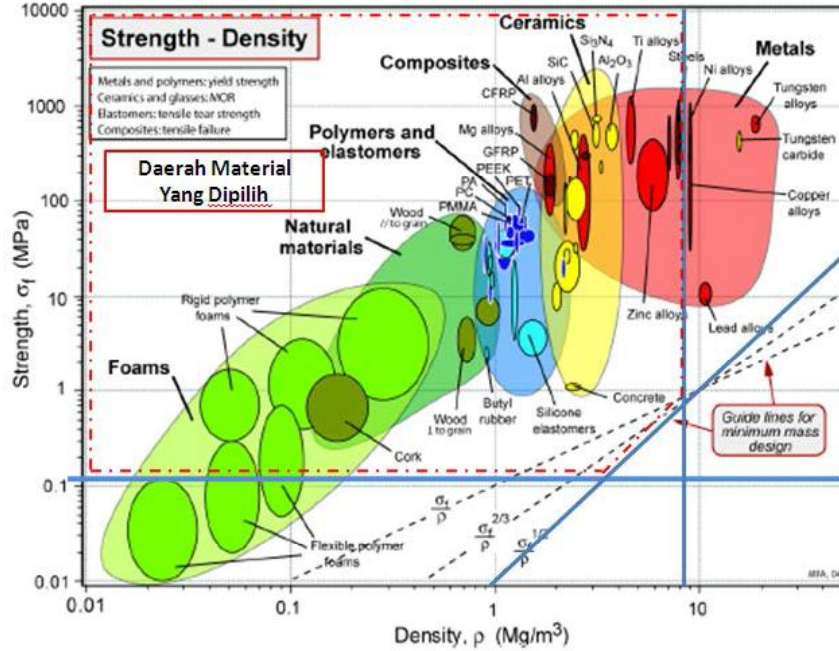


Gambar 4. Prediksi ketahanan korosi dari beberapa jenis stainless steel dan campuran nikel pada temperatur permukaan laut<sup>[7]</sup>

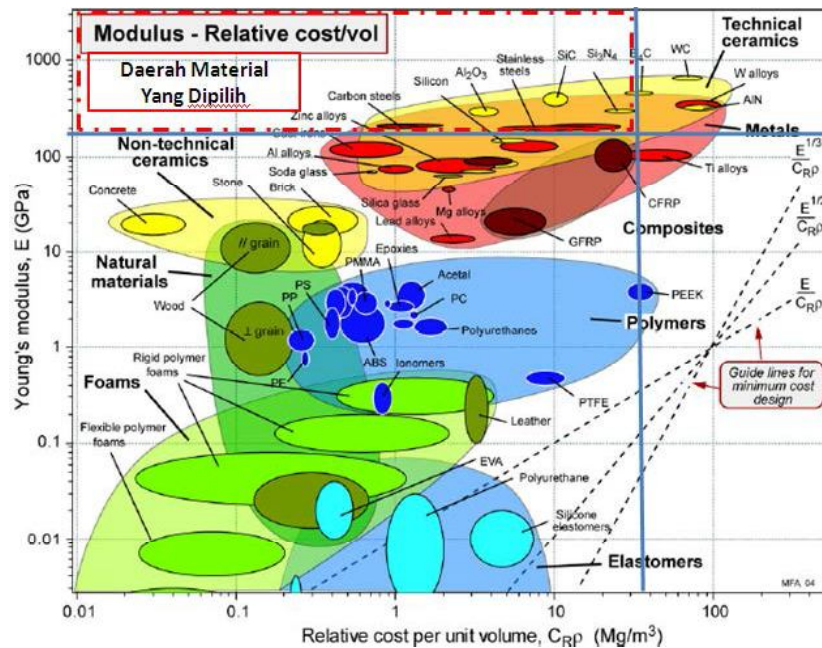
Selanjutnya untuk menentukan material yang kuat dengan berat minimal maka harus dihitung *failure strength* nya dengan persamaan 5, dari perhitungan didapatkan  $\sigma_{max} = 0,12MPa$  dimana  $\sigma_f \geq \sigma_{max}$ . dengan membatasi maksimal densitas adalah  $8 \text{ Mg/m}^3$  kemudian dimasukkan ke dalam grafik pemilihan material Michael ashby terhadap densitas mengikuti garis dengan persamaan 7. sehingga diperoleh daerah pemilihan material seperti pada gambar 5. dimana SS304 termasuk didalamnya.<sup>[8]</sup>

$$\sigma_f^{\frac{1}{2}} / \rho \dots\dots\dots (7)$$

Dengan  $\sigma_f^{\frac{1}{2}}$  adalah tegangan rencana (N/mm<sup>2</sup>) dan  $\rho$  adalah densitas (kg/m<sup>3</sup>).



Gambar 5. Daerah pemilihan material dengan hubungan antara *failure strength* terhadap *densitas* material



Gambar 6. Daerah pemilihan material dengan hubungan antara young's modulus terhadap relative cost per unit volume.

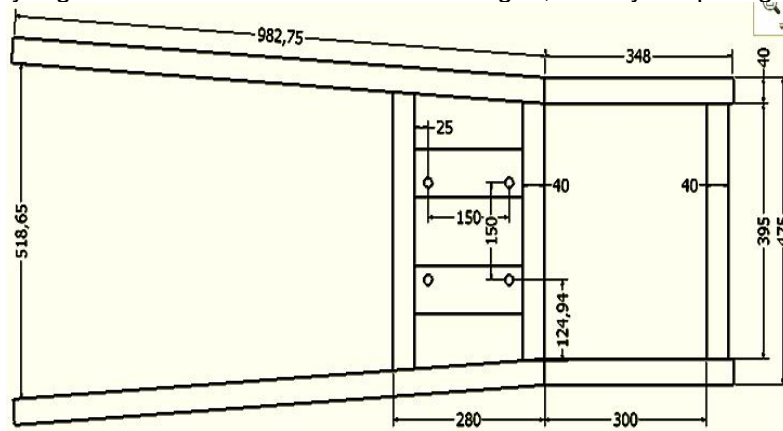
Untuk menentukan material dengan biaya yang relative murah dengan modulus elastisitas yang tinggi maka dilakukan perhitungan dengan persamaan 8.

$$C_{v,R} = \frac{\frac{Cost}{kg} \times Density\ of\ material}{\frac{Cost}{kg} \times Density\ of\ mild\ steel\ rod} \dots\dots\dots(8)$$

Dengan  $\frac{Cost}{kg}$  adalah harga material tiap satuan kilo (rupiah/kg). Hasil perhitungan didapatkan biaya relatif material per unit volume,  $C_{v,R} = 4.22$  sehingga diperoleh  $C_{v,R\rho} = 33.76\ Mg/m^3$ . Dengan membatasi modulus elastisitas maksimal adalah 200 GPa, maka didapatkan daerah pemilihan material seperti gambar 6. dimana SS304 termasuk didalamnya.

**2.5. Penentuan Konstruksi Landasan Rangka**

Rangka landasan dirancang seringkasan mungkin untuk mengurangi beban yang berlebih pada rangka, tetapi tetap memperhitungkan segala aspek yang diperlukan termasuk perawatan dan keselamatan. Desain model yang di pilih adalah desain rangka model H, karena model ini merupakan model alternatif yang terbaik untuk acuan pembuatan rangka landasan dikarenakan mudah dalam pembuatan, memiliki keseimbangan yang baik serta memiliki sedikit sambungan, hasilnya seperti gambar 7



Gambar 7. Rencana rangka landasan

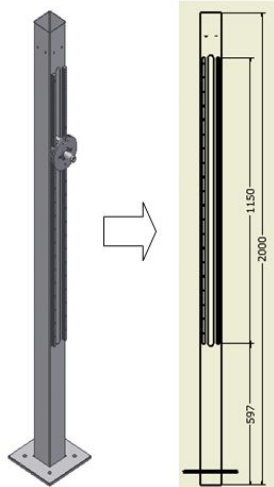
**2.5.1. Distribusi beban statis**

Beban rangka landasan berasal dari kolom dan lengan dengan distribusi seperti pada gambar 2, sebagai berikut:  $W = 75\ Kg$  ( terdiri dari 30 kg beban system kendali dan tabung, 5 kg beban perangkat penangkap citra, 10 kg beban penyeimbang (Pb), 30 kg beban rangka lengan dan kolom serta motor maupun ulir). Dengan  $L_1 = 408\ mm$ ,  $L_2 = 927\ mm$  maka dengan persamaan (3) didapatkan:  $MB = 22,92\ kg$  dan  $MA = 52,08\ kg$ . Sedangkan  $MC$  terhadap  $A = 30,6\ kg.m$  dan terhadap  $B$  adalah  $69,525\ kg.m$ . Jika bahan yang digunakan SS304 dengan tegangan tarik adalah 205 MPa dan angka keamanan yang digunakan adalah 4, maka didapatkan tegangan ijin 51,25 MPa. Tegangan geser ijin bahan ( $\sigma_g$ ) adalah  $0,5\ \sigma_{ijin}$ , sehingga di dapatkan 25,625 MPa. Hasil perhitungan tegangan yang terjadi pada landasan rangka adalah 12 kPa yang berarti di bawah tegangan ijin atau aman. Jika hollow yang dipakai ukuran 40 x 60 mm dengan tebal 2 mm, maka dengan persamaan (4) didapatkan momen inersia sebesar 1023000  $mm^4$ . Tegangan bengkok yang terjadi dihitung dengan persamaan (6) dan hasilnya sebesar 40,078 MPa yang mana masih di bawah tegangan luluh material sebesar 81GPa.

## 2.6. Penentuan Konstruksi Rangka Kolom

Kolom dirancang untuk mampu menahan beban yang berasal dari rangka lengan sebesar 10 kg, tabung x-ray ( $W_2$ ) 30 kg terletak 500 mm dari titik tumpu A, film ( $W_1$ ) 5kg dan Pb ( $W_1$ )10 kg terletak 1300 mm dari titik tumpu A.

Hasil rancangan rangka kolom seperti terlihat pada gambar 8. Bahan rangka terbuat dari hollow SS304 berukuran 100 x100 mm tebal 2 mm dan tinggi 2000 mm. Distribusi pembebanan seperti pada gambar 3.

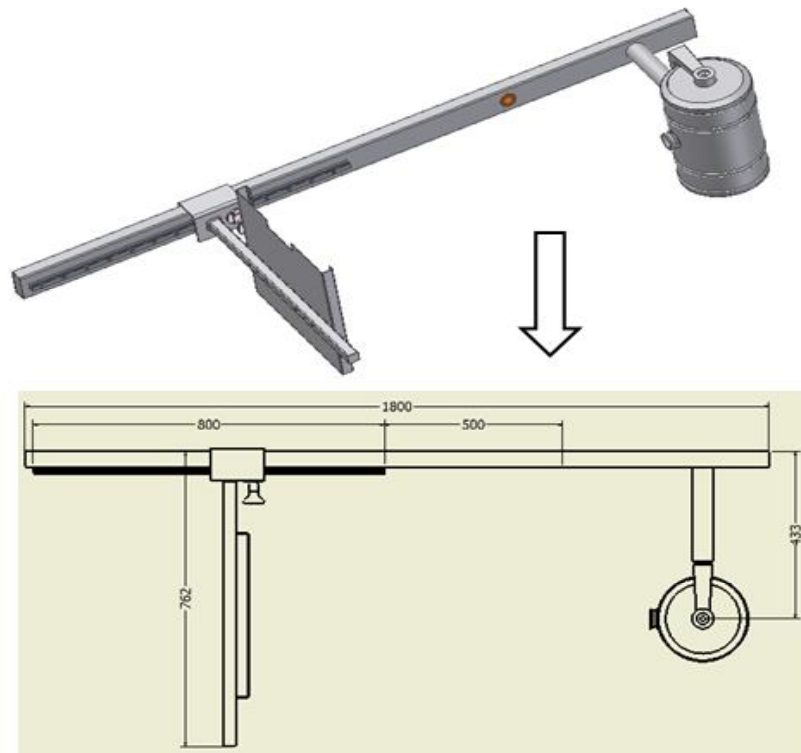


Gambar 8. Rangka kolom

Dengan persamaan (3), Maka didapatkan  $MW_1$  terhadap A sebesar 19,5kg.m.  $MW_2$  terhadap A sebesar 20 kg.m. Tegangan yang terjadi pada rangka kolom dihitung dengan persamaan (5) hasilnya adalah 105,76923 kPa yang berarti di bawah tegangan ijin atau aman. Dengan persamaan (4) maka didapatkan Momen Inersia bahan sebesar 1255445,33 mm<sup>4</sup>. Dengan persamaan (6) maka didapatkan Tegangan bengkok yang terjadi pada rangka kolom kearah depan (jika diasumsikan beban seluruhnya pada lengan mengarah depan) sebesar 2,278 MPa dimana masih di bawah tegangan luluh material sebesar 81GPa.

## 2.7. Penentuan kontruksi rangka lengan

Rangka lengan dirancang untuk mampu menahan beban dari system kendali dan tabung, perangkat penangkap citra, serta Pb sebagai penyeimbang. Beban yang terjadi sama seperti yang diterima oleh kolom. Bahan yang digunakan adalah hollow SS304 berukuran 40 x 80 mm. dengan persamaan (4) didapatkan  $I_{xx} = 389738,67$  mm<sup>4</sup>,  $I_{yy} = 131178,67$  mm<sup>4</sup>. Untuk menghitung tegangan bengkok pada rangka lengan dihitung dengan persamaan (6) yang meliputi 2 arah yaitu: Kearah titik pusat lengan dengan inersia x, maka didapatkan  $\sigma = 41,05$  MPa dengan beban 40 kg, dan  $\sigma = 40,03$  MPa dengan beban 15 kg. Kearah titik pusat lengan dengan inersia y didapatkan  $\sigma = 44,16$  Mpa dengan beban 40 kg, dan  $\sigma = 43,05$  MPa dengan beban 15 kg. hasil rancangan rangka lengan dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Konstruksi Rangka Lengan

**2.8. Penentuan baut yang digunakan untuk sambungan rangka kolom**

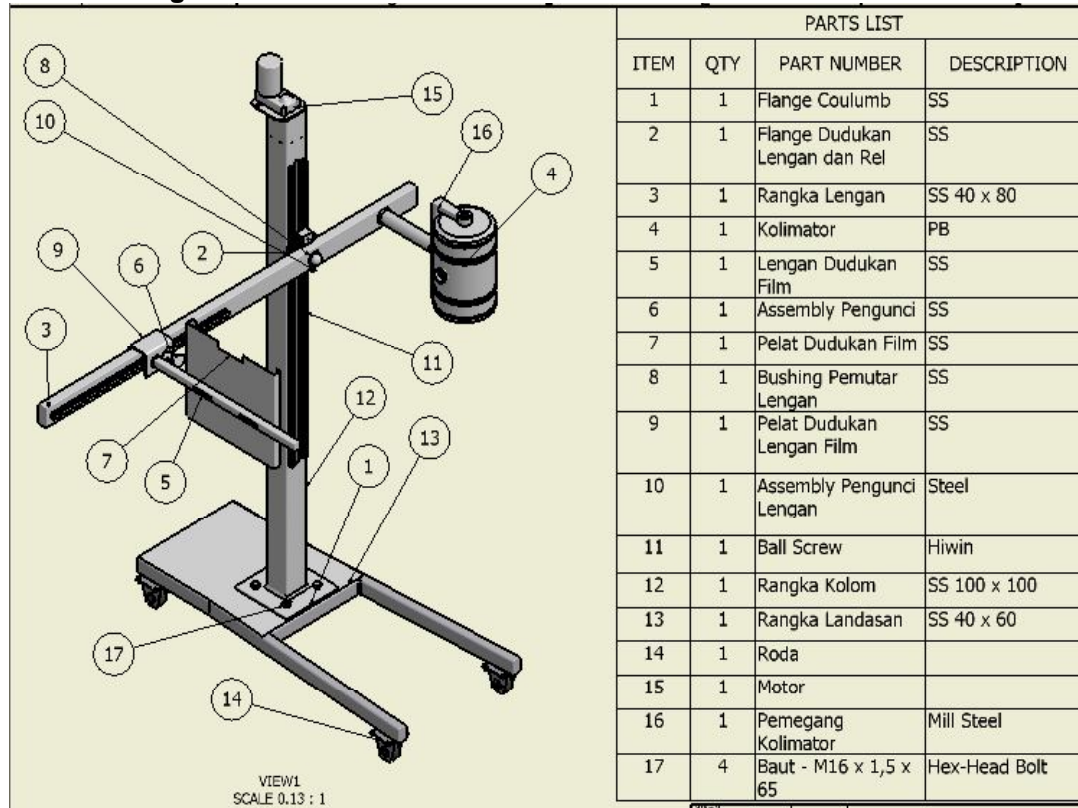
Baut yang digunakan untuk sambungan antara rangka kolom dan rangka landasan adalah baut yang terbuat dari stainless steel dengan sifat material seperti pada tabel 2 di bawah.

Tabel 2. Mechanical properties of stainless steel bolts (from ISO 3506-1: 1997)

SS materials	SS material class	Strength class	Tensile strength $R_{m,min}$ N/mm <sup>2</sup>	0.2% Stress $R_{p0.2,min}$ N/mm <sup>2</sup>	Elongation at break $A_{min}$ mm	Hardness HV
Austenitic SS	A1, A2, A3, A4, A5	50	500	210	0.6d	—
		70	700	450	0.4d	—
		80	800	600	0.3d	—
Martensitic SS	C1, C4	50	500	250	0.2d	155 - 220
		70	700	410		220 - 330
	C1	10	1100	820		350 - 440
	C3	80	800	640		240 - 340
Ferrite SS	F1	45	450	250	135 - 220	
		60	600	410	180 - 285	



### 2.9. Perancangan sistem mekanik secara keseluruhan



Gambar 10. General Drawing Rancangan Mekanik Perekayasa Sinar-x Digital

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perancangan sistem mekanik pada perekayasa pesawat sinar-x digital dengan beban pada tabel 1, dan diagram pembebanan mengikuti gambar 2 dan 3, maka didapatkan bentuk rancangan sistem mekanik pesawat sinar-x digital seperti pada gambar 10. Bahan yang digunakan untuk rancangan mekanik tersebut berdasarkan proses pemilihan material yang telah dilakukan adalah hollow SS 304. Untuk rangka landasan menggunakan hollow SS304 ukuran 40 x 60 mm dengan tebal 2 mm sepanjang 4,1 m. Untuk rangka kolom ukuran 100 x 100 mm, tebal 2 mm dengan panjang 2 m, dan untuk rangka lengan menggunakan ukuran 40 x 80 mm tebal 2 mm dengan panjang 1,8 m. karakteristik material SS304 dapat dilihat pada tabel 3 di bawah:

Tabel 3. Karakteristik SS304<sup>[5]</sup> <sup>[6]</sup>

Karakteristik SS304				
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\sigma_v$ (MPa)	$\tau_s$ (GPa)	$\sigma_s$ (MPa)
8000	193	205	81	515

Hasil perhitungan kekuatan rancangan sistem mekanik dapat dilihat pada tabel 4 di bawah:

Tabel 4. Hasil perhitungan kekuatan perancangan sistem mekanik

No	Keterangan	Hasil perhitungan	Nilai Batas
1	Rangka Landasan a. Tegangan tarik	12 kPa	205 MPa

	b. Tegangan bengkok	40,078 MPa	81 GPa
2	Rangka Kolom		
	a. Tegangan tarik	105 kPa	205 MPa
	b. Tegangan bengkok	2,278 MPa	81 GPa
3	Rangka Lengan		
	a. Tegangan tarik mak	105 kPa	205 MPa
	b. Tegangan bengkok mak	44,16 MPa	81 GPa
4	Kekuatan Sambungan	33437,05 N	> 750N

Dengan perancangan yang diajukan ini diharapkan pesawat sinar-x digital dapat dioperasikan sesuai dengan persyaratan desain yang telah ditentukan dan hasil pencitraan yang diperoleh dapat memenuhi standar yang telah ditentukan.

#### 4. KESIMPULAN

Dengan selesainya perancangan ini maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Rancangan sistem mekanik pesawat sinar-x digital ini dapat digunakan dan memenuhi kriteria keamanan serta fungsi yang telah ditetapkan.
2. Realisasi rancangan ini dapat dilakukan dengan fasilitas yang ada di bengkel PRFN-BATAN

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] JONIFAN, LIDYA LIN, YASMAN, Modul Pembelajaran FISIKA MEKANIKA, 2011.
- [2] DARMADI B. DJAROT, DIKTAT STATIKA STRUKTUR 1, Malang, 2003.
- [3] PRIMIS HILL, MCGRAW, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, Eighth edition, Budynas-nisbett. 2005.
- [4] JAMES M. GERE, STEPHEN P. TIMOSHENKO., Mekanika bahan, edisi kedua versi SI., Alih bahasa HANS J. WOSPAKRIK Institut Teknologi Bandung, Penerbit Erlangga, 1996
- [5] *AMERICAN STANDARD TESTING AND MATERIAL (ASTM)*, 2013
- [6] AK STEEL CORPORATION, 304/304L STAINLESS STEEL DATA SHEET, 2007
- [7] B. TODD AND J.W.OLDFIELD: "Reverse Osmosis- Which Stainless Steel to Use," *A vesta Corrosion Management (acorn)* No. 1-2, 1991
- [8] ASHBY F. MICHAEL, *Materials Selection in Mechanical Design*, Third edition, Pergamon Press, 2005.