

## Analisis Tegangan Tabung Motor Roket RX 250 Akibat Laju Perpindahan Panas dan Tekanan

Agus Budi Djatmiko <sup>1)</sup>, Fauzhia Rahmasari <sup>2,\*</sup>, Aji Digdoyo <sup>3)</sup>, Erma Yuniaty <sup>4)</sup>, Nani Kurniawati <sup>5)</sup>,  
I Nyoman Artana <sup>6)</sup>, Bagas Setiohadi <sup>7)</sup>

<sup>1</sup> Pusat Teknologi Roket BRIN, Jl. Raya LAPAN No. 2 Mekarsari, Rumpin, Bogor, Indonesia

<sup>2,3,4,5,6,7</sup> Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Jayabaya, Jl. Raya Bogor KM. 28,8  
Cimanggis, Jakarta Timur, Indonesia

\*) Corresponding author: fauzhiarahmasari@gmail.com

### Abstract

*The rocket motor tube is one of most important rocket components. Because of its function, rocket motor tube must really have a pretty good safety factor. An increase in temperature and pressure in the tube can cause loading or force on rocket motor tube in radial and axial direction and cause force due to heat stress. Pressure that occurs in motor is channeled through the nozzle whose function is to convert compressive energy into kinetic energy, giving rise to thrust coming out of the rocket nozzles. The temperature of gas produced due to combustion is quite high, so that it can cause dimensional changes in rocket nozzle material, for that it needs to be further analyzed in order to get a better rocket performance. This study discusses the stress analysis of the RX 250 LAPAN rocket motor tubes due to pressure and thermal loads due to combustion gas. In this design material from AISI 1045 with  $\sigma_{yield} = 4,5E + 08 \text{ N/m}^2$ . The results of the design of the RX 250 LAPAN rocket motor tube obtained the magnitude of the stress due to pressure of 40 bar, obtained by  $\sigma_p = 6,74E + 07 \text{ N/m}^2$ , the thermal stress  $\sigma_z = 1,2E + 08 \text{ N/m}^2$  is, and the total voltage is  $\sigma_{total} = 1,88E + 08 \text{ N/m}^2$ , with a safety factor of  $SF = 2,4$ , this is quite safe for the RX 250 rocket motor tube.*

### Abstrak

Tabung motor roket salah satu komponen roket yang sangat penting. Oleh karena fungsinya, tabung motor roket harus benar-benar mempunyai faktor keamanan yang cukup baik. Kenaikan tekanan dan temperatur dalam tabung dapat menimbulkan pembebanan atau gaya pada tabung motor roket ke arah radial dan aksial dan juga menimbulkan gaya akibat tegangan panas. Temperatur gas yang dihasilkan akibat pembakaran cukup tinggi, sehingga dapat menyebabkan tegangan pada material tabung motor roket, untuk itu perlu dianalisa lebih lanjut agar mendapatkan kinerja roket yang lebih baik. Dalam penelitian ini dibahas mengenai analisis tegangan pada tabung motor roket RX 250 LAPAN akibat beban tekanan dan termal akibat gas pembakaran. Pada perancangan ini digunakan bahan dari AISI 1045 dengan  $\sigma_{yield} = 4,5E + 08 \text{ N/m}^2$ . Hasil perancangan terhadap tabung motor roket RX 250 LAPAN didapat besarnya tegangan akibat tekanan 40 bar, didapat sebesar  $\sigma_p = 6,74E + 07 \text{ N/m}^2$ , tegangan akibat panas adalah  $\sigma_z = 1,2E + 08 \text{ N/m}^2$ , dan tegangan total yang terjadi adalah  $\sigma_{total} = 1,88E + 08 \text{ N/m}^2$ , dengan faktor keamanan sebesar  $SF = 2,4$ . Hal ini aman bagi tabung motor roket RX 250.

**Kata Kunci:** Tegangan tabung, tekanan ruang bakar, temperature

## PENDAHULUAN

Program teknologi peroketan khususnya struktur tabung motor roket sangat diperlukan untuk pengembangan di wahana dirgantara. Kenaikan tekanan dalam tabung dapat menimbulkan pembebanan atau tegangan pada tabung motor roket ke arah radial dan aksial dan juga menimbulkan tegangan panas akibat kenaikan temperatur [1].

Tekanan yang terjadi dalam tabung motor roket disalurkan melalui nozel yang fungsinya mengubah energi tekan menjadi energi kinetis sehingga menimbulkan gaya dorong yang keluar dari nozel roket [2].

Tabung motor roket adalah suatu komponen dari roket yang gunanya untuk untuk menimbulkan tenaga dorong yang akan mengangkat roket meluncur menembus atmosfer bumi. Proses timbulnya gaya dorong pada motor roket yaitu propelan yang ada pada tabung roket yang berfungsi sebagai bahan bakar dinyalakan sehingga terjadi pembakaran dalam tabung motor yang dapat menimbulkan temperatur dan tekanan dalam tabung motor naik [3].

Pada setiap roket yang akan diluncurkan perlu diprediksi kinerja motor roket yang meliputi kekuatan tabung, impuls spesifik, gaya dorong, tekanan pembakaran dan waktu pembakaran semua ini dapat diperoleh melalui uji statik.

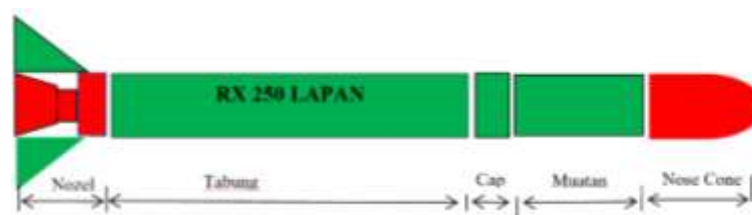
Temperatur gas yang dihasilkan akibat pembakaran cukup tinggi, sehingga dapat menyebabkan tegangan pada material tabung motor roket, untuk itu perlu dianalisa lebih lanjut agar mendapatkan kinerja roket yang lebih baik.

Tabung motor roket salah satu komponen roket yang sangat penting karena harus mampu menahan tekanan gas hasil pembakaran dan juga beban termal yang terjadi. Oleh karena fungsinya, tabung motor roket harus benar-benar mempunyai faktor keamanan yang cukup baik. Proses timbulnya gaya dorong pada motor roket yaitu propelan yang ada pada tabung roket yang berfungsi sebagai bahan bakar dinyalakan sehingga terjadi pembakaran dalam tabung motor yang dapat menimbulkan temperatur dan tekanan dalam tabung motor naik [4].

Dalam penelitian ini dibahas mengenai analisis tegangan yang terjadi pada tabung roket RX 250 LAPAN dengan propelan jenis HTPB (*Hydroxy Terminated Polybutadiene*) akibat kenaikan temperatur dan tekanan.

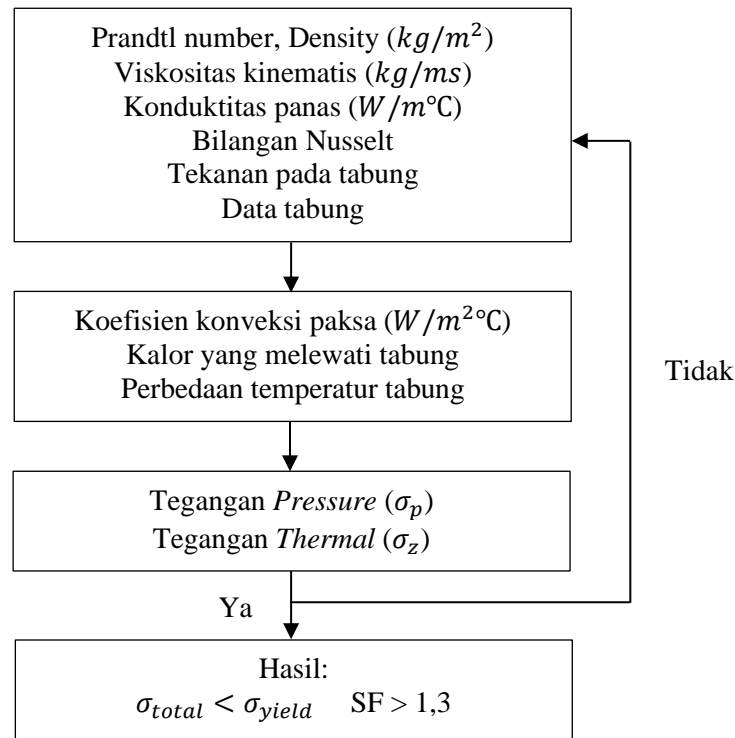
## METODE PENELITIAN / RESEARCH METHODOLOGY

Gambar 1 merupakan struktur roket RX 250 LAPAN yang akan diteliti.



Gambar 1. Struktur roket RX 250 LAPAN

Penelitian dimulai dengan mencari besaran, konduktitas panas dari liner, bilangan prandtl, viskositas kinematik, *density* pada temperatur 2727°C, kemudian mencari koefisien konveksi paksa antara gas dan liner. Kemudian mencari kalor yang melewati tabung motor, dan temperatur pada dinding luar tabung muatan, mencari data uji statik tekanan yang terjadi, kemudian mencari tegangan yang terjadi pada tabung akibat panas dan tekanan dapat dilihat pada Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2. Diagram alir perancangan tabung motor RX 250

### 2.1. Panas yang Lewat

Menghitung panas yang melewati tabung motor roket RX 250 akibat adanya temperatur pembakaran yang tinggi. Tabung terdiri dari propelan pada bagian dalam kemudian ada liner sebagai isolator dan bagian terluar baru tabung motor roket. Dan panas yang melewati tabung dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut [5]

$$q = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{\Delta T_2}{R_2} \quad (1)$$

atau dapat dikembangkan menjadi:

$$q = \frac{(T_i - T_0)}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L}} \quad (2)$$

dimana:

$h_1$  = koefisien konveksi antara gas dengan liner pada temperatur 3000<sup>0</sup>K atau 2727<sup>0</sup>C

$k_1$  = konduktifitas panas dari liner = 2,5 (W/m<sup>0</sup>C)

$k_2$  = konduktifitas panas dari tabung = 15 (W/m<sup>0</sup>C)

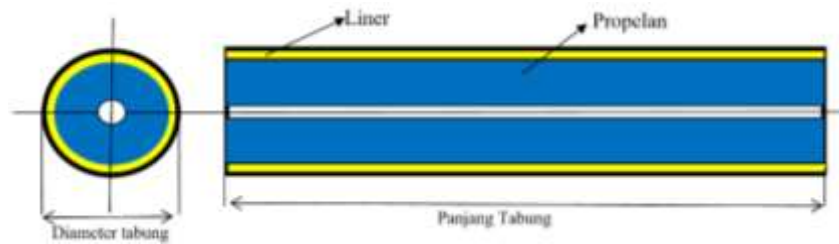
$L$  = panjang tabung = 4 m

$r_1$  = jari jari liner dalam = 111 mm

$r_2$  = jari jari dalam tabung motor roket = 118 mm

$r_3$  = jari jari luar tabung = 125 mm

Gambar 3 di bawah merupakan struktur tabung motor roket pada roket RX 250 LAPAN.



Gambar 3. Struktur tabung motor roket

## 2.2. Proses pada Tabung Motor Roket

Sifat fisik harus dihitung pada temperatur rata-rata  $T_m = 2727^\circ\text{C}$  ( $3000^\circ\text{K}$ ) dimana pada temperatur tersebut ( $2727^\circ\text{C}$ ) dapat diketahui dari sifat fisik gas ideal adalah sebagai berikut [5,6]:

$$\rho_{2727} = 7,43E - 01 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{2727} = 3,97E - 05 \text{ kg/ms}$$

$$c_{p2727} = 1,291 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$k_{2727} = 0,13169 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Pr_{2727} = 0,763$$

Perhitungan bilangan Grashoff [7]:

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\mu^2} \quad (3)$$

dimana:

$g$  = percepatan gravitasi

$\mu$  = viskositas kinematis

$L$  = panjang silinder

Dengan data diatas maka didapat besar  $Gr_L = 2,42E + 11$ , dimana  $Gr_L * Pr = Ra$ , sehingga didapat  $Ra = 1,8E + 11$ .

Karena  $Ra > 10^{11}$ , konveksi bebas aliran di dalam pipa silindris vertikal aliran laminar. Substitusi nilai-nilai bilangan Rayleigh dan Prandtl untuk perhitungan bilangan Nusselt yaitu sebagai berikut [7]:

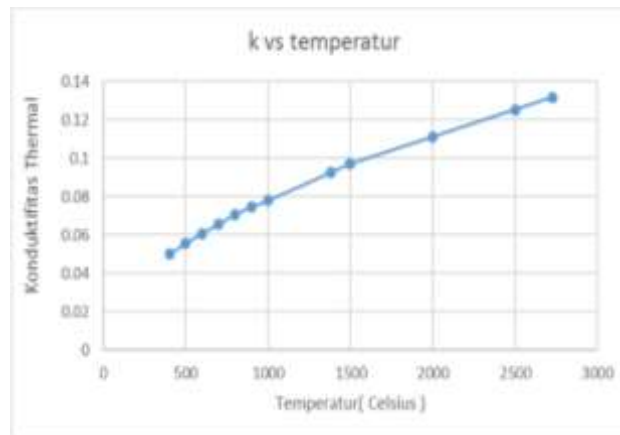
$$Nu^{\frac{1}{2}} = 0,825 + \frac{0,387Ra^{\frac{1}{6}}}{[1 + (0,492/Pr^{\frac{9}{16}})]^{\frac{8}{27}}} \quad (4)$$

Hasil perhitungan didapat  $Nu = 4,58E + 2$ . Menghitung besarnya koefisien konveksi bebas antara gas pembakaran roket dengan liner ( $h_1$ ), adalah [8].

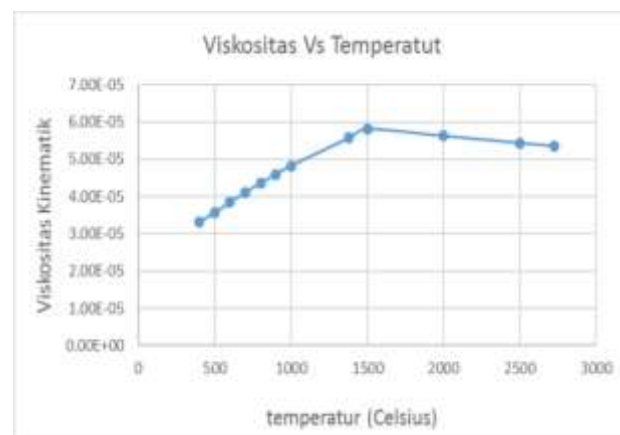
$$Nu = \frac{h_1L}{k} \quad (5)$$

sehingga didapatkan

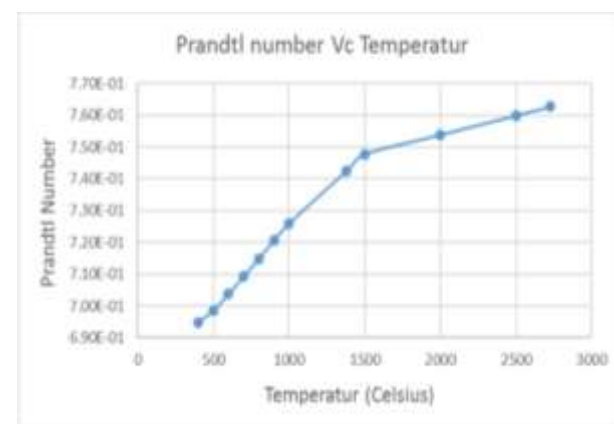
$$h_1 = 4,58E + 2 \frac{0,13169}{4} = 15,1 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2}^\circ\text{C} \right) \quad (6)$$



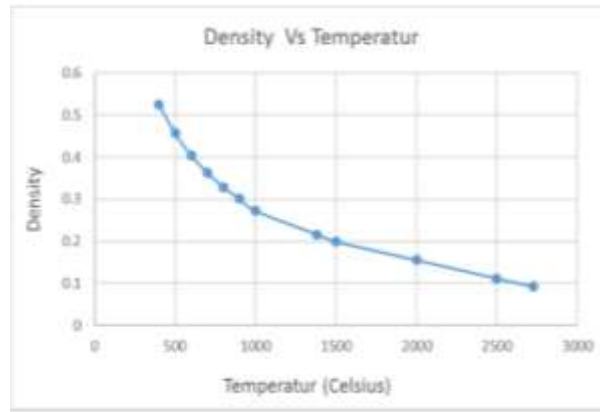
Gambar 4. Koefisien k terhadap temperatur



Gambar 5. Viskositas terhadap temperatur



Gambar 6. Prandtl terhadap temperatur

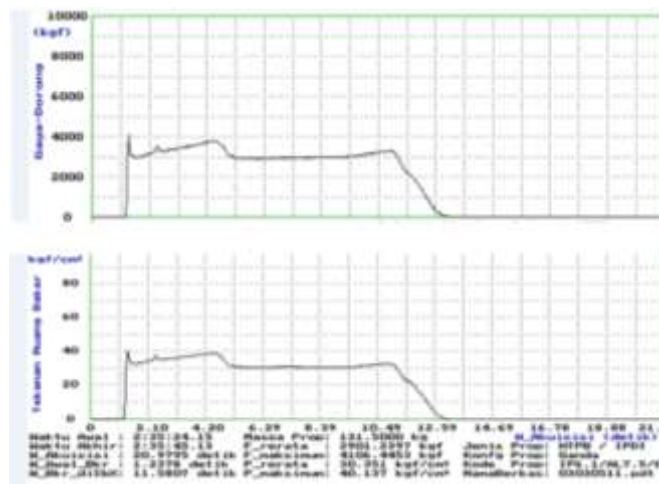


Gambar 7. Density terhadap temperatur

Untuk mendapatkan koefisien konveksi pada temperatur tinggi yaitu temperatur  $3000^{\circ}K$  sangatlah sulit mendapatkan data mengenai konduktifitas termal, viskositas kinematis, bilangan Prandtl dan density, sehingga dilakukan pendekatan untuk mencarinya (lihat Gambar 4 sampai dengan 7) dan didapat nilai konduktifitas termal,  $k = 0,13169 (W/m^{\circ}K)$ , viskositas kinematis  $\mu = 3,97E - 05 kg/m$  detik, bilangan Prandtl  $Pr = 7,43E - 01$  dan density  $\rho = 0,09176$ . Sehingga hasil perhitungan didapat besar dari koefisien konveksi paksa sebesar  $h = 15,1 (W/m^2^{\circ}K)$ .

### 2.3. Hasil Pengujian

Hasil uji statik didapat tekanan ruang bakar tabung roket RX 250 adalah  $P = 40 kgf/cm^2$ , data ini untuk mengukur tegangan tabung motor roket akibat tekanan. Hasil uji statik dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil uji statik roket RX 250

### 2.4. Hasil Perhitungan

#### 2.4.1. Data Tabung Motor Roket

Konduktifitas termal liner  $k_1 = 2,5 W/m^{\circ}C$ , konduktifitas termal tabung  $k_2 = 15 W/m^{\circ}K$ ,  $L =$  panjang tabung  $= 4,0 m$ , jari-jari liner dalam liner  $r_1 = 111 mm$ , jari-jari dalam tabung motor roket  $r_2 = 118 mm$ , jari-jari luar tabung  $r_3 = 125 mm$ , tebal tabung  $t = 7 mm$ , tebal liner  $= 7 mm$  mengalami tekanan internal  $p_i = 40 bar$  seperti yang ditunjukkan hasil uji statik. Tabung terbuat dari baja AISI 1045 dengan  $E = 200 GPa$  dan poisson ratio  $\nu = 0,3$ .

Dari hasil uji statik diketahui temperatur dalam tabung  $T_i = 2727^\circ\text{C}$ , dan temperatur luar tabung  $T_o = 540^\circ\text{C}$  dan hasil perhitungan didapat  $h_i = 15,1 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

#### 2.4.2. Menghitung Laju Perpindahan Kalor

Dengan menggunakan persamaan 2 di atas dimana tahanan kalor total yaitu  $R_{th} = 0,0133$  didapat besar panas yang melewati tabung adalah sebagai berikut [9].

$$q = \frac{(2727 - 540)}{0,0133} = 68000 \text{ Watt} \quad (7)$$

#### 2.4.3. Menghitung Temperatur dalam Tabung

Dengan diketahui besar laju perpindahan panas  $q$ , maka besar temperatur dalam tabung adalah sebagai berikut [9].

$$q = \frac{(T_2 - T_0)}{\frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L}}, T_3 = q \left( \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} \right) + T_0 \quad (8)$$

sehingga,

$$T_3 = 68000 \left( \frac{\ln(0,125/0,118)}{2\pi(15)(4)} \right) + 540,44$$

$$T_3 = 554,31^\circ\text{C}$$

#### 2.4.4. Tegangan Akibat Termal

Untuk menghitung besar tegangan yang terjadi pada tabung motor roket RX 250 akibat beban temperatur adalah [9].

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{2(1-\nu)} \left[ \frac{(r_o^2 T_o - r_i^2 T_i) + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} (T_i - T_o)}{(r_o^2 - r_i^2)} - \frac{(T_i - T_o)}{\ln \frac{r_i}{r_o}} - T \right] \quad (9)$$

dimana:

$\alpha$  = koefisien *thermal expansion* untuk baja ( $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C}$ )

E = Modulus elastisitas ( $2,0 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ )

$\nu$  = Poisson ratio (0,3)

$T_o = 540^\circ\text{C}$

$T_i = 554,31^\circ\text{C}$

sehingga hasil yang didapat yaitu:

$$\sigma_z = 1,2E + 08 \text{ N/m}^2 \quad (10)$$

#### 2.4.5. Tegangan Akibat Pressure

Untuk menghitung tegangan akibat beban tekanan yang terjadi pada tabung motor roket RX 250 digunakan persamaan sebagai berikut [9].

$$\sigma_p = \frac{P_i r_i}{t} \quad (11)$$

dimana:

- P = tekanan dalam tabung (60 bar = 40e6 N/m<sup>2</sup>)
- r<sub>i</sub> = jari-jari dalam tabung (0,118 m)
- t = tebal tabung (0,006 m)

sehingga diperoleh

$$\sigma_p = 6,74E + 07 \text{ N/m}^2 \tag{12}$$

#### 2.4.6. Tegangan Total

Tegangan total yang terjadi pada tabung adalah gabungan tegangan akibat tekanan dan tegangan akibat termal yaitu [10]:

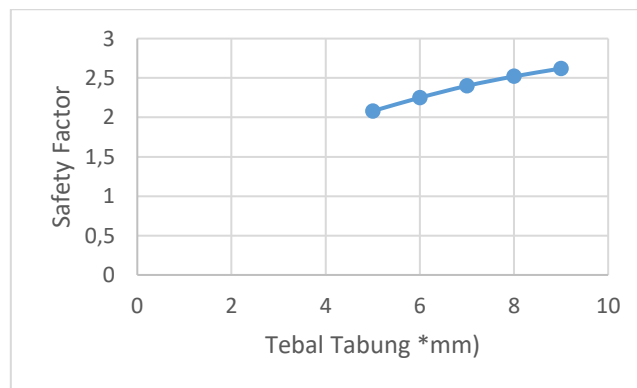
$$\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_z \tag{13}$$

sehingga diperoleh

$$\sigma_{total} = 1,88E + 08 \text{ N/m}^2$$

dengan menggunakan bahan tabung dari AISI 1045 dengan  $\sigma_{yield} = 4,5E+08$ , dengan faktor keamanan dari tabung adalah  $SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{total}} = \frac{4,5E+08}{1,88E+08} = 2,4$ , maka perancangan tabung roket RX 250 cukup aman.

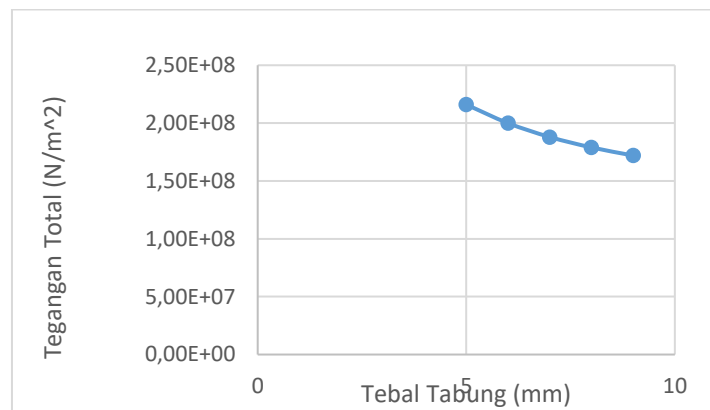
### HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 9. Grafik antara tebal tabung terhadap faktor keamanan tabung

Pada Gambar 9 dijelaskan hubungan antara tebal tabung roket RX 250 terhadap faktor keamanan tabung dengan tebal tabung 7 mm, didapat besar tegangan akibat tekanan  $\sigma_p = 6,74 E+07 \text{ N/m}^2$ , kemudian dihitung tegangan termal akibat perbedaan temperatur dinding dalam dan luar yaitu  $\Delta T = 13,79 \text{ }^\circ\text{C}$ , dengan jari-jari dalam tabung r<sub>i</sub> = 118 mm dan jari-jari luar tabung r<sub>o</sub> = 125 mm didapat besar tegangan termal adalah  $\sigma_z = 1,2 E+08 \text{ N/m}^2$ , sehingga tegangan total pada tabung RX 250 adalah  $\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_z = 1,88E+08 \text{ N/m}^2$ , dimana bahan tabung roket adalah AISI 1045 dengan  $\sigma_{yield} = 4,5 E+08 \text{ N/m}^2$ , *safety factor* untuk tabung didapat  $SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{total}} = \frac{4,5E+8}{1,54E+8} = 2,92$ .





Gambar 10. Grafik antara tebal tabung terhadap tegangan pada tabung

Pada Gambar 9 dijelaskan hubungan antara tegangan total terhadap tebal tabung, tegangan total adalah penjumlahan antara tegangan termal dan tegangan *pressure* yang terjadi pada tabung motor roket RX 250. Tegangan termal yaitu tegangan yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur pada tabung roket RX 250, sedangkan tegangan *pressure* yaitu tegangan akibat adanya tekanan yang timbul pada tabung roket, sehingga makin tebal tabung motor roket maka tegangan total yang terjadi pada tabung motor roket makin kecil.

Untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada tabung roket RX 250 akibat tekanan dan temperatur (*thermal*), pertama yaitu menghitung tegangan yang terjadi pada tabung akibat tekanan sekitar  $p_i = 40$  bar, jari-jari dalam tabung  $r_i = 118$  mm dan jari-jari luar tabung  $r_o = 125$  mm dimana bahan tabung roket adalah AISI 1045 dengan  $\sigma_{yield} = 4,5E + 08$  N/m<sup>2</sup>, didapat tegangan akibat tekanan adalah  $\sigma_p = 6,74$  e7 N/m<sup>2</sup>. Sedangkan untuk menghitung tegangan yang terjadi pada tabung RX 250, dimana elasiitas bahan tabung  $E = 2,0e11$  N/m<sup>2</sup> dan koefisien *thermal expansion*  $\alpha = 3,5$  e-6, jari-jari dalam tabung  $r_i = 118$  mm dan jari-jari luar tabung  $r_o = 125$  mm dengan perbedaan temperatur dinding luar  $T_0 = 540$  °C dan tekanan dalam tabung  $4e6$  N/m<sup>2</sup>, didapat tegangan akibat termal adalah  $\sigma_z = 1,2e+8$  N/m<sup>2</sup>. Tegangan total adalah  $\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_z = 1,54E + 08$  N/m<sup>2</sup> untuk tebal tabung sebesar 7,0 mm, sedangkan untuk ketebalan tabung yang lain dapat dilihat pada Gambar 10.

## KESIMPULAN / CONCLUSION

Dari hasil perancangan terhadap tabung motor roket RX 250 dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan untuk kalor yang melewati tabung motor roket RX 250 dengan diameter  $d = 250$ mm dan tebal  $7$ mm, temperatur dinding dalam  $554,31$ °C dan temperatur dinding luar tabung  $540$ °C hasil perhitungan didapat  $q = 68000$  watt.
2. Hasil perhitungan terhadap tegangan tabung motor roket RX 250 arah radial, akibat tekanan  $4e6$  N/m<sup>2</sup> didapat besar  $\sigma_p = 6,4E+07$  N/m<sup>2</sup>.
3. Hasil perhitungan terhadap tegangan tabung motor roket RX 250 dengan tebal dinding  $t = 7$ mm, akibat temperatur dinding luar  $T_0 = 540$ °C, didapat besar tegangan termal  $\sigma_z = 1,2E + 08$ N/m<sup>2</sup>.
4. Tegangan total yang terjadi pada tabung motor roket RX 250 adalah  $\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_z = 1,88E + 08$ N/m<sup>2</sup>, dengan bahan tabung AISI 1045 dan  $\sigma_{yield} = 4,5E + 08$ , maka tabung motor roket cukup aman dengan faktor keamanan  $SF = 2,4$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. W. Cornelisse, H. F. R. Schoyer, and K. F. Wakker, *Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics*, London: Pitman Publishing Limited, 1979.
- [2] S. W. Swindeman, *Thermal Stresses in Hollow Cylinders of Beryllium Oxide*, Texas: Union Carbide Cooperation, 1962.
- [3] R. S. Khurmy, and J. K. Gupta, *Textbook Machine Design*, New Delhi: S. Chand Publishing, 2005.
- [4] S. Laohalertdecha, “A Review on The Heat-Transfer Performance and Pressure-Drop Characteristics of Various Enhanced Tubes,” *International Journal of Air Conditioning and Refrigeration*, vol. 20, no. 4, 2012.
- [5] E. Kayabasi, “The effects of component dimensions on heat transfer and pressure loss in shell and tube heat exchangers,” *International Journal of Green Energy*, vol. 16, 2019.
- [6] G. Stefan, “Shell and Tube Heat Exchanger-The Heat Transfer Area Design.” *Journal of Mechanical Engineering-Strojnický Časopis*, vol. 67, 2017.
- [7] D. G. Prabhanjan, “Comparison of heat transfer rates between a straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger.” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 29, no. 2, pp. 185-191, 2002.
- [8] A. H. Dhumal, “Heat Transfer Enhancement for Tube in Tube Heat Exchanger Using Twisted Tape Inserts.” *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, vol. 4, no. 5, pp. 2349-6495, 2017.
- [9] D. Ameta, “Shell and Tube Heat Exchanger,” *International of Journal Sciences Technologies*, vol. 5, no. 2, 2017.
- [10] B. Jiang, “Experimental study on effect of tube arrangement mode on heat transfer characteristics of a new type of elastic tube bundle,” *3rd International Conference on Fluid Mechanics and Industrial Applications IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, pp. 1300, 2019.