

PERANCANGAN TABUNG MOTOR ROKET RX 450 LAPAN AKIBAT LAJU PERPINDAHAN PANAS DAN TEKANAN

A. B. Djatmiko^{1*}, M. Ibadi¹ dan F. Rahmasari²

¹ Pustekroket LAPAN

²FTI Universitas Jayabaya Jakarta

Corresponding author: agusbudi60@gmail.com

ABSTRAK: Proses timbulnya gaya dorong pada motor roket dapat dijelaskan sebagai berikut, propelan pada tabung roket yang berfungsi sebagai bahan bakar dinyalakan sehingga terjadi pembakaran dalam tabung motor yang dapat menimbulkan temperatur dan tekanan dalam tabung motor menjadi naik. Kenaikan temperatur dan tekanan dalam tabung dapat menimbulkan pembebanan atau gaya pada tabung motor roket ke arah radial dan aksial dan juga menimbulkan gaya akibat tegangan panas. Tekanan yang terjadi dalam motor disalurkan melalui nosel yang fungsinya mengubah energi tekan menjadi energi kinetis, sehingga menimbulkan gaya dorong yang keluar dari nosel roket. Temperatur gas yang dihasilkan akibat pembakaran cukup tinggi, sehingga dapat menyebabkan perubahan dimensi pada material nosel roket, untuk itu perlu dianalisa lebih lanjut agar mendapatkan kinerja roket yang lebih baik. Dalam tulisan ini dibahas mengenai perancangan pada tabung motor roket RX 450 Lapan akibat beban tekanan dan thermal dari hasil gas pembakaran. Pada perancangan ini digunakan bahan tabung dari KH 406 dengan $\sigma_{yield} = 12,2 \text{ E}+08 \text{ N/m}^2$, tekanan tabung sebesar 60 bar dan perbedaan temperature tabung sebesar $\Delta T = 44,11 \text{ }^\circ\text{C}$. Hasil perancangan terhadap tabung motor roket RX 450 LAPAN didapat besarnya tegangan akibat proses pembakaran, yaitu tegangan akibat tekanan sebesar $\sigma_p = 2,19\text{E}+08 \text{ N/m}^2$, tegangan akibat panas adalah $\sigma_z = 2.16\text{E}+08 \text{ N/m}^2$, dan tegangan total yang terjadi pada tabung motor roket RX 450 adalah $\sigma_{total} = 4,35\text{E}+08 \text{ N/m}^2$, dengan faktor keamanan sebesar $SF = 2,8$. hal ini cukup aman bagi tabung motor roket RX 450.

Kata Kunci: tekanan ruang bakar, temperatur, tegangan tabung

ABSTRACT: The process of generating the thrust on the rocket motor can be explained as follows, the propellant in the rocket tube which functions as fuel is ignited so that combustion occurs in the motor tube which can cause the temperature and pressure in the motor tube to rise. The increase in temperature and pressure in the tube can cause a load or force on the rocket motor tube in the radial and axial direction and also cause a force due to heat stress. The pressure that occurs in the motor is channeled through a nozzle whose function is to convert compressive energy into kinetic energy, causing a thrust to come out of the rocket nozzle. The temperature of the gas produced by combustion is quite high, so that it can cause dimensional changes in the rocket nozzle material, for that it needs to be further analyzed in order to get a better rocket performance. This paper discusses the design of the RX 450 Lapan rocket motor tube due to the pressure and thermal loads from the combustion gas yield. In this design, a tube material from KH 406 with $\sigma_{yield} = 12.2 \text{ E} + 08 \text{ N} / \text{m}^2$ is used, a tube pressure of 60 bar and a tube temperature difference of $\Delta T = 44.11 \text{ }^\circ\text{C}$. The design results of the RX 450 LAPAN rocket motor tube obtained the magnitude of the stress due to the combustion process, namely the stress due to the pressure of $\sigma_p = 2.19\text{E} + 08 \text{ N} / \text{m}^2$, the stress due to heat is $\sigma_z = 2.16\text{E} + 08 \text{ N} / \text{m}^2$, and the total stress that occurs in the tube the RX 450 rocket motor is $\sigma_{total} = 4.35\text{E} + 08 \text{ N} / \text{m}^2$, with a safety factor of $= 2.8$. this is quite safe for the RX 450 rocket motor tube.

Keywords: combustion chamber pressure, temperature, tube stress

PENDAHULUAN

Tabung motor roket adalah salah satu komponen dari roket yang gunanya untuk menimbulkan tenaga dorong yang akan mengangkat roket meluncur menembus atmosfer bumi. Proses timbulnya gaya dorong pada motor roket dapat dijelaskan sebagai berikut: propelan yang ada pada tabung roket yang berfungsi sebagai bahan bakar dinyalakan sehingga terjadi pembakaran dalam tabung motor yang menimbulkan temperatur dan tekanan dalam tabung motor naik (Dhumal et al.,2017; Jiang et al.,2019; Prabhanjan et al.,2002). Kenaikan temperatur dan tekanan dalam tabung menimbulkan pembebanan atau gaya pada tabung motor ke arah aksial dan radial dan juga menimbulkan gaya akibat tegangan panas.

Tekanan yang terjadi dalam tabung motor disalurkan melalui *nozzle* yang fungsinya mengubah energi tekan menjadi energi kinetis, sehingga timbul gaya dorong yang keluar dari *nozzle* roket. Melihat proses yang terjadi pada motor roket untuk menghasilkan gaya dorong, diperlukan penelitian material yang digunakan untuk tabung motor roket yaitu sifat-sifat fisis dan sifat mekanik akibat temperatur pemanasan yang bervariasi, supaya dapat di prediksi kekuatan tabung motor tersebut terhadap gaya yang terjadi, diantaranya gaya aksial, radial dan gaya akibat tegangan panas. Material yang dipakai adalah Aluminium Al-Alloy yang berbentuk tabung atau pipa (Ameta, 2017; Kayabasi et al., 2019; Cornelisse, 1979).

Tabung dari material kh 460 dengan diameter luar d = 450 mm dan tebal 6 mm merupakan salah satu tabung motor roket yang akan digunakan untuk motor roket rx-450. Untuk mengetahui kekuatan struktur tabung ini maka perlu dilakukan analisis tegangan statik pada struktur tersebut. Analisa tegangan akan dilakukan dengan teori perpindahan panas dan tegangan pada tabung dengan menggunakan program excel sederhana, untuk mengetahui kekuatan struktur pada beberapa kondisi pembebanan, maka disini dilakukan kaji parametrik dengan memberikan variasi tebal tabung dan tegangan yang terjadi (Lieanhard, 2008; Stefan et al., 2017; Khurmy, 2005; Laohalertdecha et al., 2012).

Tujuan penulisan ini adalah untuk merencanakan dan menganalisis kekuatan struktur tabung motor roket rx-450 yang sangat penting dan harus mampu menahan beban tekanan-gas (*internal pressure*) yang cukup besar serta beban thermal dari gas pembakaran di dalam tabung roket, meskipun beban thermal ini dapat dikurangi dengan memberikan lapisan material liner atau inhibitor yang cukup baik sebagai lapisan isolasi.

LANDASAN TEORI

Panas yang lewat

Menghitung panas yang melewati tabung motor RX 450 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 (Lieanhard, 2008).

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

atau dikembangkan menjadi:

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

Dimana:

h1 = koefisien konveksi antara gas dengan liner pada temperatur 3000°K = 88.4 (W/m²°C)

k1 = konduktifitas panas dari liner = 2.5 (W/m°C)

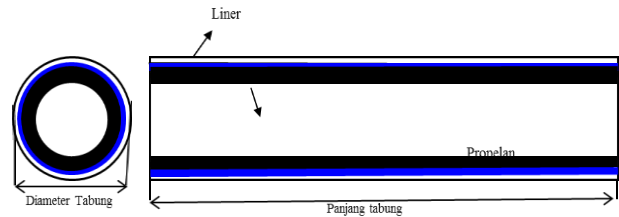
k2 = konduktifitas panas dari tabung = 15 (W/m°C)

L = panjang tabung = 4 m

r1 = jari-jari liner dalam 0.209 m

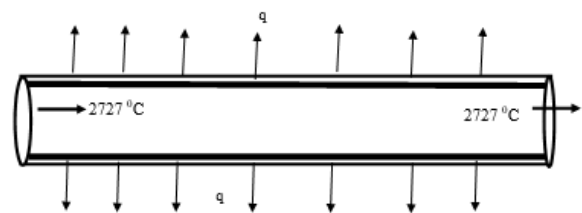
r2 = jari-jari liner dalam tabung motor roket = 0.219 m

r3 = jari-jari luar tabung = 0.225 m



Gambar 1 Diameter Tabung dan Panjang Tabung.

1. Proses pada tabung motor roket



Gambar 2 Proses pada tabung motor roket.

Temukan sifat fisik gas. Sifat fisik harus dihitung pada temperatur air rata-rata: Tm = 2727 °C (3000 °K). Dimana pada temperatur tersebut (2727 °C) dapat diketahui dari sifat fisik gas ideal adalah sebagai berikut,

$$\rho_{2727} = 7.43E-01 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{2727} = 3.97E-05 \text{ kg/ms}$$

$c_{p2727} = 1.291 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
 $k_{2727} = 0.13169 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
 $Pr_{2727} = 0.763$

Hitung bilangan Grashoff (Cornelisse,1979; Lieanhard, 2008)

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

Dimana:

g = percepatan gravitasi

μ = viskositas kinematik

L = panjang silinder

Dengan data diatas maka didapat besar $Gr_L = 2,42 \text{ E}+11$
 $Gr_L \cdot Pr = Ra$, didapat $Ra = 1,8 \text{ E}+11$

karena $Ra > 10^{11}$, konveksi bebas aliran di dalam pipa silindris vertical aliran laminar. Substitusi nilai-nilai bilangan Rayleigh dan Prandtl untuk hitung bilangan Nusselt (Cornelisse,1979; Lieanhard, 2008):

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

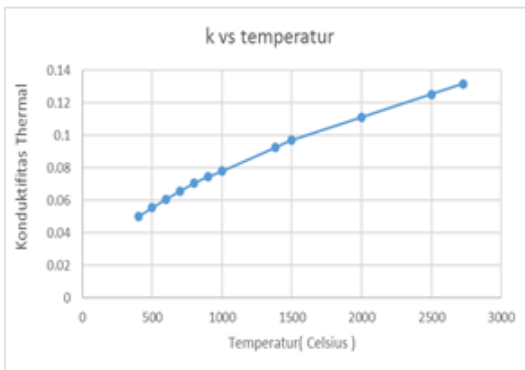
Hasil perhitungan didapat $Nu = 4,58 \text{ E}+2$

Menghitung besarnya koefisien konveksi bebas antara gas pembakaran roket dengan liner (h_1) adalah

$$Nu = \frac{h_1 L}{k} \quad (5)$$

Hitung h_1 :

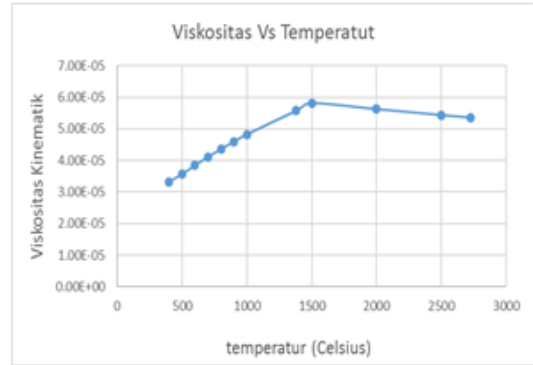
$$h_1 = Nu \frac{k}{L} = 4,58 \text{ E} + 2 \frac{0,13169}{4} = 15,1 \text{ (W / m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$$



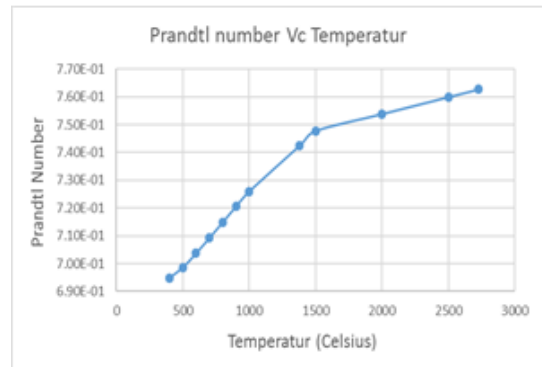
Gambar 3 Grafik k terhadap temperatur celsius.

Untuk mendapatkan koefisien konveksi pada temperatur tinggi yaitu temperatur 3000 OK sangatlah sulit mendapatkan data mengenai konduktivitas thermal, viskositas kinematis, bilangan prandtl dan density, sehingga dilakukan pendekatan untuk mencarinya (lihat garfik 1 sd 4), sehingga didapat nilai konduktivitas thermal,

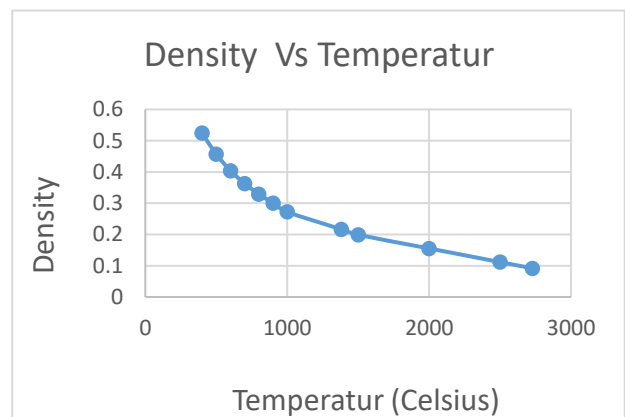
$k = 0.13169 \text{ (W/m}^\circ\text{K)}$, viskositas kinematis $\mu = 3.97 \text{ E}-05 \text{ kg/m}^\circ\text{detik}$, bilangan prandtl $Pr = 7.43 \text{ E}-01$ dan density $\rho = 0.09176$. dan hasil perhitungan didapat besar dari kovesien konveksi paksa sebesar $h = 15,1 \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K)}$.



Gambar 4 Grafik viskositas terhadap temperatur



Gambar 5 Grafik prandtl terhadap temperatur

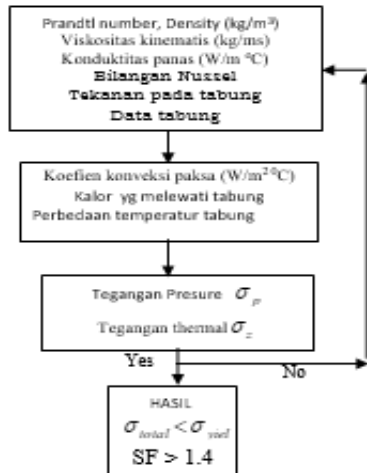


Gambar 6 Grafik density terhadap temperatur

METODE PENELITIAN

Penelitian dimulai dari mencari besaran, konduktivitas panas dari liner, bilangan prandtl, viskositas kinemati,

density pada temperatur 2727 C, kemudian mencari koefisien konveksi paksa antara gas dan liner. Kemudian mencari kalor panas yang melewati tabung motor, dan temperatur pada dinding luar tabung mutan, mencari data uji statik tekanan yang terjadi, kemudian mencari tegangan yang terjadi pada tabung akibat panas dan tekanan



Gambar 7 Diagram alir perancangan tabung motor RX 450

PERHITUNGAN

Data Tabung Motor Roket

$k_1 = 2,5 \text{ W/m } 0\text{C}$, dan $k_2 = 15 \text{ W/m } 0\text{C}$, $L =$ panjang tabung = 4 m, $r_i =$ jari jari liner dalam 0.209 m, $r_2 =$ jari jari dalam tabung motor roket = 0.219 m, $r_3 =$ jari jari luar tabung = 0.225 m mengalami tekanan internal $p_i = 600$ bar seperti yang ditunjukkan. Tabung terbuat dari baja AISI 1045 dengan $E = 200 \text{ GPa}$ dan $\nu = 0,3$. dari hasil uji statik diketahui temperatur dalam tabung $T_i = 2727 \text{ } 0 \text{ C}$, dan temperatur luar tabung $T = 603,83 \text{ C}$ dan hasil perhitungan didapat $h_1 = 15,1 \text{ W/m}^2 \text{ C}$

1. Menghitung Laju Perpindahan Kalor (q)

Menggunakan persamaan (1) diatas didapat besar panas yang melewati tabung adalah sebagai berikut :

$$q = \frac{(T_i - T_o)}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L}} = \frac{(T_i - T_o)}{R_{th}} \quad (6)$$

dari data diatas, dengan menggunakan program sederhana excel, didapat besar laju perpindahan panas q sebagai berikut dimana tahanan kalor total :

$$q = \frac{(2727 - 603,79)}{0,0133}$$

$R_{th} = 0.0133$, maka

$q = 163000 \text{ Watt}$

2. Menghitung Temperatur dalam Tabung

Diketahui besar laju perpindahan panas q , maka besar temperatur dalam tabung adalah :

$$q = \frac{(T_2 - T_o)}{\frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L}}, T_2 = qx \left(\frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} \right) + T_o \quad (7)$$

$$T_2 = 615000x \left(\frac{\ln(0,225/0,219)}{2\pi(15)x4} \right) + 603,83$$

dan hasil perhitungan didapat $T_2 = 615,49 \text{ } ^\circ\text{C}$

3. Tegangan akibat Thermal

Untuk menghitung besar tegangan yang terjadi pada tabung motor roket RX 450 akibat beban temperatur adalah (Swindeman, 1962):

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{2(1-\nu)} \left[\frac{(r_o^2 T_o - r_i^2 T_i) + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} (T_i - T_o)}{(r_o^2 - r_i^2)} - \frac{(T_i - T_o)}{\ln \frac{r_i}{r_o}} - T \right] \quad (8)$$

Dimana :

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

$E =$ modulus elastisitas = $2.1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$

$\nu =$ Poisson Ratio = 0.3

$\Delta T = (T_2 - T_0) = 647,94 - 603,83 = 44,11 \text{ } ^\circ\text{C}$

hasil hitungan didapat $\sigma_z = 2.16 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

4. Tegangan akibat Pressure

Menghitung tegangan akibat beban tekanan yang terjadi pada tabung motor roket RX 450 digunakan persamaan sebagai berikut (Khurmy et al., 2005):

$$\sigma_p = \frac{p_i r_i}{2t}$$

Dimana :

$P =$ tekanan dalam tabung = 60 bar = $60 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$

$r_i =$ jari jari dalam tabung (m)

$t =$ tebal tabung (m)

$$\sigma_p = \frac{p_i r_i}{t} = \frac{60 \cdot 10^6 \cdot 0,219}{0,006}$$

$$\sigma_p = 2.19 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$$

5. Tegangan Total

Tegangan total yang terjadi pada tabung adalah gabungan tegangan akibat tekanan dan tegangan akibat thermal yaitu

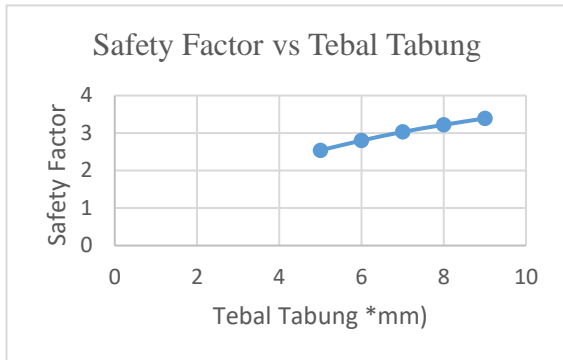
$$\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_z$$

$$\sigma_{total} = 2.16 \cdot 10^8 + 2,19 \cdot 10^8$$

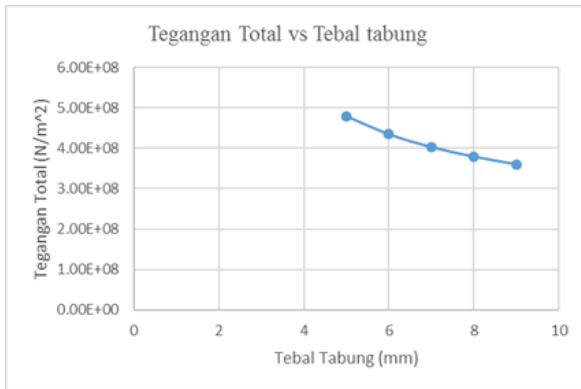
$$= 4,35 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$$

Digunakan bahan tabung dari KH 406 dengan $\sigma_{yield} = 12,2 \cdot 10^8$, dengan faktor dari tabung adalah:

$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{total}} = \frac{12,22 + e8}{4,35E + 8} = 2,8$. Perancangan tabung motor roket RX 450 cukup aman.



Gambar 8 Grafik hubungan antar tebal tabung terhadap faktor keamanan tabung.



Gambar 9 Grafik hubungan antar tebal tabung terhadap tegangan pada tabung.

PEMBAHASAN DAN HASIL

Grafik 1 : menerangkan hubungan anantara tebal tabung rilet RX 450 terhadap faktor keamanan tabung terlihat disini dngan tebal tabung 6 mm, didapat besar tegangan akibat tekanan $\sigma_p = 2.19 E+08N/m^2$, kemudian dihitung tegangan thermal akibat perbedaan temperature dinding dalam dan luar yaitu $\Delta T = 44,11 \text{ }^\circ\text{C}$, dengan jari jari dalam tabung $r_i = 0.219$ dan jari jari luar tabung $r_o = 0.225$ m didapat besar tegangan thermal adalah $\sigma_z = 2.16 E+08 N/m^2$, sehingga tegangan total pada tabung Rx 450 adalah $\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_z = 4,35 E+08 N/m^2$, dimana bahan tabung roket adalah KH 406 dengan $\sigma_{yield} = 12,2 E+08$,

safety faktor tabung didapat $SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{total}} = \frac{12,2e8}{4,35e8} = 2,8$.

Grafik 2 : diatas menerangkan hubungan antara Tegangan Total terhadap tebal tabung , tegangan tta adalah penjumlahan antara tegangan thermal dan tegangan presure yang terjadi pada tabung motor roket RX450. . Tegangan thermal yaitu tegangan yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur pada tabung roket RX 450, sedangkan tegangan presure yaitu tegangan akibat adanya tekanan yang timbul pada tabung roket, terlihat disini 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 450 akibat tekanan dan temperatur (thermal), pertama yaitu menghitung tegangan yang terjadi pada tabung akibat tekanan sekitar $p_i = 60$ bar, jari jari dalam tabung $r_i = 0.219$ dan jari jari luar tabung $r_o = 0.225$ m dimana bahan tabung roket adala AISI 1045 dengan $\sigma_{yield} = 3. 10E+08$, didapat tegangan akibat tekanan adalah $\sigma_p = 2,16 e8 N/m^2$. Sedangkan untuk menghitung tegangan yang terjadi pada tabung RX 450, dimana elastisitas bahan tabung $E = 2.1e11 N/m^2$ dan koefisien thermal expansion $\alpha = 11.7 e-6$, jari jari dalam tabung $r_i = 0.219$ m dan jari jari luar tabung $r_o = 0.225$ m dengan perbedaan tempeatur dinding dalam dan luar tabung sebesar $\Delta T = 44,11 \text{ }^\circ\text{C}$, didapat tegangan akibat thermal adalah $\sigma_z = 2.19e8 N/m^2$.

Tegang total adalah $\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_z = 4,35 E+08 N/m^2$ untuk tebal tabung sebesar 6 mm dengan, sedangkan untuk ketebalan tabung yang lain dapat dilihat pada grafik 2 diatas.

KESIMPULAN

1. Hasil perhitungan untuk kalor yang melewati taung motor roket RX 450, dengan diameter $d = 450$ mm dan tebal 6 mm, temperatur dinding dalam tabung $647 \text{ }^\circ\text{C}$ dan temperature dinding luar tabung $603 \text{ }^\circ\text{C}$ hasil perhitungan didapat $q = 615000$ Watt
2. Hasil perhitungan terhadap tegangan tabung mtor roket RX 450 arah radial, akibat tekanan 600 bar didapat besar $\sigma_p = 2,16E+08N/m^2$
3. Hasil perhitungan terhadap tegangan tabung motor roket RX 450, akibat tekanan perbedaan temperature $\Delta T = 44,11 \text{ }^\circ\text{C}$ didapat besar $\sigma_z = 2.19E+08N/m^2$
4. Tegangan total yang terjadi pada tabung motor roket RX 450 adalah $\sigma_{total} = \sigma_p + \sigma_z = 4,35E+08 N/m^2$, dengan bahan tabung AISI 1045 dan $\sigma_{yield} = 12,2 E+08$, maka tabung motor roket cukup aman dengan faktor keamanan $SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{total}} = \frac{12,2e8}{4,35e8} = 2,8$

UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan selesainya penelitian ini saya sebagai penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Kepala Pusat Teknologi Roket LAPAN, Leader Struktur Kerekayasaan Roket Sonda LAPAN yang telah memberikan ijin dan data-data untuk penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

- Ameta, D. (2017). Shell and tube heat exchanger. *Intenational of Jurnal Sciences Technologies*. 5(2).
- Cornelisse, J.W., Schoyer, H.F.R., Wakker, K.F. (1979). *Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics*, Pitman Publishing Limited London.
- Dhumal, A. H., Kerkal, G. M., Pawale Asst, K.T. (2017). Heat Transfer Enhancement for Tube in Tube Heat Exchanger Using Twisted Tape Inserts. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 4(5), ISSN: 2349-6495.
- Jiang, B., Liu, J., Liu, F., Wang, J., Liu, K., Guo, K. (2019). 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* 1300.
- Kayabasi, E., Alperen, M. A., Kurt, H. (2019). The effects of component dimensions on heat transfer and pressure loss in shell and tube heat exchangers. *Journal International Journal of Green Energy*, 16.
- Khurmy, RS and Gupta, J.K. (2005). *Textbook Machine Design*. Publisher S. Chand. ISBN 10 812125371
- Lienhard IV, J. H. (2008). *A Heat Transfer TextBook Third Edition*
- Laohalertdecha, S., Dalkilic, A.S., Wongwises. (2012). A review on pressure-rop characteristics of various enhanced tubes. *International Journal of Air Conditioning and Refrigeration.*, 20(04).
- Prabhanjan, D.G., Raghavan, G.S.V., Renni, T.J. (2002). Comparison of heat transfer rates between a straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(2): 185-191.
- Štefan, P.G., Františe, D., Martin, J., Juraj, K. (2017). Shell and tube heat exchanger – the heat transfer design. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnícky časopis*, 67 (2017).
- Swindeman, S. W., (1962). *Thermal Stresses in Hollow Cylinders of Beryllium Oxide*. Union Carbide Corporation.