

**ANALISIS STRUKTUR TABUNG MOTOR ROKET RX 1220 LAPAN
AKIBAT PENGARUH BEBAN TEKANAN**
**STRUCTURE ANALYSIS OF ROCKET MOTOR TUBE LAPAN RX1220
DUE TO PRESSURE LOAD**

Mahfud Ibadi⁽¹⁾, Ronald Gunawan Putra⁽²⁾ Agus Budi Djatmiko⁽³⁾ Haryadi Abrizal⁽⁴⁾
^(1,2)Perekayasa Pada Bidang Struktur Mekanika LAPAN
^(3,4)Peneliti Pada Bidang Struktur Mekanika LAPAN

Abstrak

Kenaikan temperatur dan tekanan dalam tabung akibat proses pembakaran roket 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. Karena adanya gaya-gaya aksial maka akan ada perpindahan sepanjang tabung yang merupakan fungsi posisi x dan waktu t yang dapat menyebabkan timbulnya getaran dan tegangan.

Dalam tulisan ini dibahas mengenai pengaruh beban tekanan yang terjadi pada tabung roket RX 1220 LAPAN dengan propelan jenis HTPB akibat beban tekanan. Hasil perhitungan terhadap tabung motor roket RX 1220 LAPAN dengan bahan AL6061 T6 dengan tebal tabung 3.65 mm didapat frekuensi natural arah axial $\omega_{n1} = 31,746.97$ rad/det dan besarnya frekuensi natural arah longitudinal $\omega_{n2} = 16,420.57$ rad/det, sedangkan frekuensi maksimum yang bekerja pada roket sebesar $\omega = 12,560$ rad/detik.

Kemudian tegangan pada arah tangensial $\sigma_{\theta} = 8.92e^7$ N/m² dan tegangan arah longitudinal $\sigma_l = 4.46e^7$ N/m² dengan tegangan total $\sigma_{tot} = 1.34.e^8$ N/m² dan tegangan yang diijinkan $\sigma_{ii} = 2e^8$ N/m². Tabung motor roket RX 1220 aman terhadap getaran maupun tegangan yang dihasilkan oleh tekanan pada tabung roket, karena frekuensi kerja lebih kecil dari frekuensi natural dan faktor keamanan untuk tegangan pada tabung $SF = (\sigma_{ii} / \sigma_{tot}) = 1.79$.

Kata kunci : tabung motor roket , frekuensi natural, tegangan

Abstract

The increase of temperature and pressure in the tube due to the rocket combustion process can cause loading or force on the rocket motor tube in the radial and axial direction and also cause force due to heat stress. The pressure that occurs in the motor is channeled through the nozzle that function to convert the compressive energy into kinetic energy, giving rise to the thrust that exits from the rocket nozzle. Because of the axial forces, there will be displacement along the tube which is a function of position x and time t which can cause vibration and stress happening.

In this paper we discuss the research on vibrations and stress that occur in the RX 1220 LAPAN rocket tube with the propellant type HTPB due to pressure loads. The results of the RX 1220 LAPAN rocket motor tube with AL6061 T6 material with a tube thickness of 3.65 mm obtained axial direction natural frequencies 31,746.97 rad/sec and the amount of longitudinal natural frequency 16,420.57 rad / sec, while the maximum frequencies acting on the rocket is 12,560 rad/sec.

Then the stress in the direction of tangential is $8.92.e^7$ N/m² and the longitudinal stress is $4.46.e^7$ N/m² with a total stress of $1.34.e^8$ N/m² and the allowable stress is $2.e^8$ N/m². The RX 1220 rocket motor tube is safe for vibration and stress generated by pressure on the rocket tube, because the working frequency is smaller than the natural frequency and safety factor for the stress on the tube 1.79.

Keywords: rocket motors tube, natural frequency, stress

1. PENDAHULUAN

Kenaikan temperatur dan tekanan dalam tabung akibat proses pembakaran roket 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. Karena adanya gaya-gaya aksial maka akan ada perpindahan u sepanjang tabung yang merupakan fungsi posisi x dan waktu t yang dapat menyebabkan timbulnya getaran dan tegangan.

Secara umum getaran benda-benda ini adalah jumlah ragam utama, untuk ragam utama getaran, tiap partikel benda melakukan gerakan harmonik sederhana pada frekuensi yang sesuai dengan akar tertentu persamaan frekuensi. Setiap partikel melewati kedudukan setimbangnya masing-masing secara bersama-sama atau simultan. [2,4,9]

Tabung motor roket salah satu komponen roket yang sangat penting karena harus mampu menahan tekanan gas hasil pembakaran dan juga beban thermal yang terjadi. Oleh karena fungsinya, tabung motor roket harus benar-benar mempunyai faktor keamanan yang cukup baik. Proses timbulnya tekanan 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 dapat menimbulkan temperatur dan tekanan dalam tabung motor naik. [5,6]

Tabung motor roket adalah bagian terpenting dari sebuah roket, Kenaikan temperatur dan tekanan dalam tabung menimbulkan pembebanan atau gaya pada tabung motor roket ke arah radial dan aksial yang mengakibatkan terjadinya getaran dan tegangan.

Karena adanya gaya-gaya pada arah radial dan longitudinal, maka akan ada perpindahan u sepanjang tabung yang merupakan fungsi posisi x dan waktu t yang dapat menyebabkan timbulnya getaran dan tegangan. [1,8,10]

Dalam perencanaannya roket tidak boleh bekerja pada frekuensi naturalnya karena dapat menyebabkan roket bergetar (resonansi), selain itu tegangan total yang terjadi tidak boleh melebihi tegangan yang diizinkan. Untuk itu perlu dianalisa besarnya frekuensi natural dan tegangan pada tabung motor roket akibat tekanan yang terjadi. Dalam tulisan ini dibahas mengenai perehitungan getaran dan tegangan yang terjadi pada tabung roket RX 1220 LAPAN dengan propelan jenis HTPB akibat beban tekanan.

2. LANDASAN TEORI

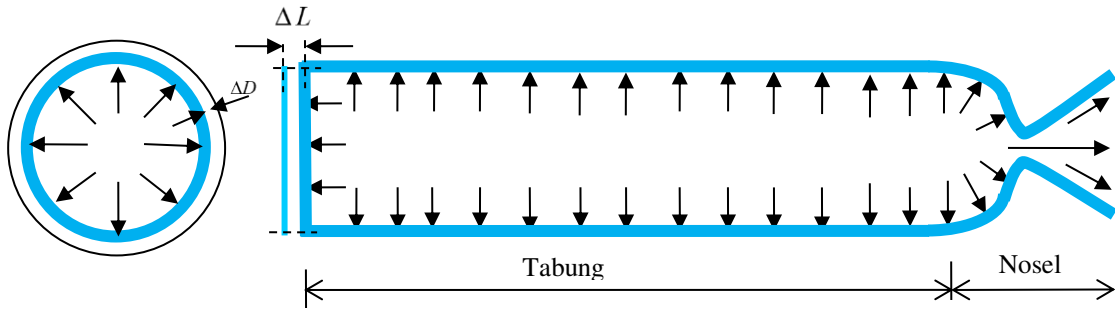
2.1. Tegangan Pada Tabung

Teori membran sederhana dapat digunakan untuk memprediksi perkiraan tegangan dalam tabung roket propelan padat, dalam hal ini diasumsikan tidak ada kasus lentur di dinding tabung. Untuk silinder sederhana radius (R), dan ketebalan (d), dengan (P) tekanan ruang, dan *longitudinal stress* (σ_l) adalah setengah dari tegangan tangensial atau (σ_θ)

$$\sigma_\theta = \frac{P R}{d} \dots\dots\dots(1)$$

2.2. Kekakuan Tabung Arah Radial

Struktur tabung motor roket diberi tekanan dalam sebesar P dan akan mengalami penambahan diameter



Gambar 1: Tabung motor roket RX 320 yang mengalami perpanjangan arah radial dan axial akibat tekanan

P = tekanan dalam tabung ,

L = panjang tabung

Besarnya deformasi tabung arah radial adalah

$$\Delta R = \frac{PR^2}{Ed} \left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

ΔR = pertambahan diameter

P = tekanan dalam tabung

E = modulus elastisitas bahan tabung

d = tebal tabung

R = radius dalam tabung

ν = poison rasio

σ_{θ} = tegangan tangensial

dan kekakuan tabung arah radial adalah

$$k_1 = \frac{F_1}{\Delta R}$$

Maka besar gaya yang menekan luas arah radial :

$$F_1 = A_1 x P \dots \dots \dots (3)$$

2.3. Kekakuan Tabung Arah Axial

Struktur tabung motor roket diberi tekanan dalam sebesar P dan akan mengalami pertambahan panjang sebesar:

$$\Delta X = \frac{PLD}{4Ed} (1 - 2\nu) = \frac{\sigma_l L}{E} (1 - 2\nu) \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

ΔX = Pertambahan panjang arah axial

σ_l = Tegangan arah axial

dan kekakuan tabung arah tangensial adalah

$$k_2 = \frac{F_1}{\Delta X}$$

maka besar gaya yang menekan luas arah longitudinal:

$$F = A_2 x P \dots\dots\dots (5)$$

2.4. Amplitudo Getaran

Untuk menghitung Amplitudo getaran yang terjadi pada tabung motor roket digunakan persamaan:

$$X = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{1 - (1(-\omega/\omega_n))^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}}$$

Dalam penyelesaian faktor redaman diabaikan maka didapat amplitudo getaran sebesar:

$$X = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{1 - (1(-\omega/\omega_n))^2}}$$

Dimana:

$$k = \frac{GxI_p}{l}$$

k = kekakuan kolom dari tabung

G = modulus geser dari aluminium

I_p = momen inersia profil dari tabung roket

2.5. Frekuensi Natural Arah Axial dan Radial Tabung RX 1220

Dengan data sebagai berikut : modulus elastisitas (E) : 69×10^9 N/m², diameter kolom (d): 10 mm, massa payload (m_o): 12.5 kg, density (ρ) alumunium : 2,770 kg/m³ dapat menghitung frekuensi natural arah axial dan radial dari tabung motor roket RX 1220 dengan menggunakan Metode Energi Rayleigh, yaitu :

Besar frekuensi arah radial:

$$\omega_{n,radial} = \sqrt{\frac{0,8 EA}{l^2(\rho Al(0,001587) + \frac{m_o}{256})}}$$

Dimana:

ρ = density dari bahan tabung

E = Modulus Elastistas dari tabung

l = panjang tabung

A = luas profil Tabung

m_o = massa propelan

Besar frekuensi arah axial :

$$\omega_{n,axial} = \sqrt{\frac{E(\pi / l)^2}{\rho}}$$

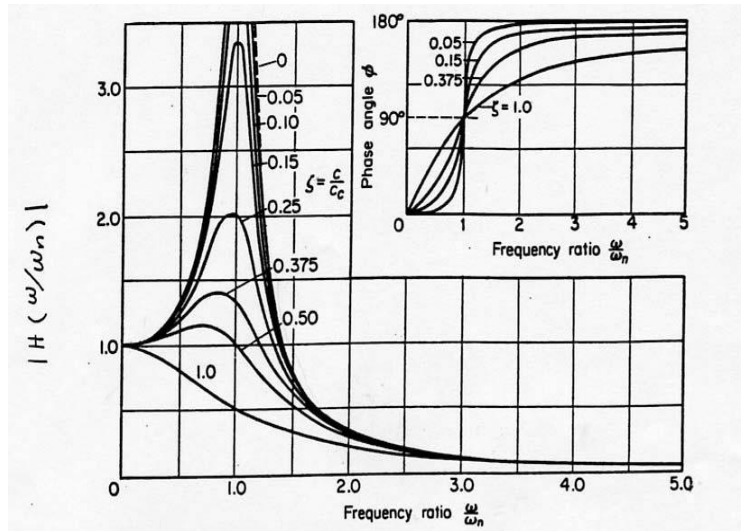
Dimana:

ρ = density dari bahan tabung

E = Modulus Elastistas dari tabung

l = panjang tabung

Struktur muatan roket RX 1220 sangat aman terhadap gangguan gaya paksa karena frekuensi natural struktur muatan lebih besar dari frekuensi kerja roket dan bekerja pada daerah rasio frekuensi $\omega/\omega_n < 0,3$ dan hubungan antara ratio amplitudo dengan ratio frekuensi terhadap faktor redaman dapat dijelaskan pada gambar 2 (*ref*: 2) dibawah ini :

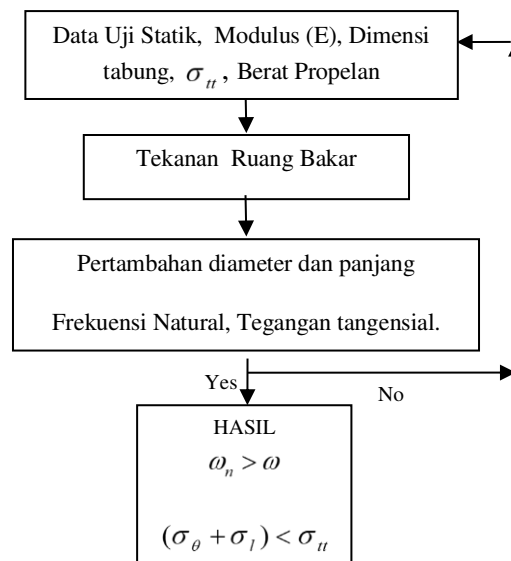


Gambar 2: Respon Frekuensi

3. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam merancang struktur tabung Roket RX 1220, pertama kali dilakukan adalah mencari data besar Modulus elastisitas $E = 68.9 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, uji statik roket RX 1220, dimensi tabung dan tegangan yang diijinkan dari bahan tabung motor roket, kemudian mendapatkan tekanan ruang bakar dan menghitung pertambahan arah radial dan longitudinal setelah itu dihitung frekuensi natural dari struktur tabung motor roket roket RX 1220, tegangan tangensial dan tegangan longitudinal.

Gambar 3. diperlihatkan *flow chart* merancang struktur tabung motor roket RX 1220 akibat beban tekanan.



Gambar 3 : Diagram Alir Perancangan Struktur Tabung Roket RX 1220

4. PENGOLAHAN DATA

Dari data Tabung Roket RX 1220 dengan bahan tabung AL 6061 dengan data, direncanakan sebagai berikut:

$$R = 54.25 \text{ mm},$$

$$R_o = 57.9 \text{ mm},$$

$$d = 3.65 \text{ mm},$$

$$L = 2,093.4 \text{ mm},$$

$$E = 69 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

Berdasarkan hasil uji statik didapat $P = 60 \text{ bar} = 60 \text{ kg/cm}^2$, dan tegangan yang diijinkan (σ_{it}) = $2 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

4.1. Tegangan yang terjadi

Untuk mengetahui tegangan tangensial dan longitudinal digunakan persamaan 1 diatas yaitu

$$\sigma_{\theta} = \frac{P R}{d} = \frac{6 \times 10^6 \times 0.05425}{0.00365} = 8.92 \times 10^7$$

$$\text{Maka, } \sigma_l = 0,5\sigma_{\theta} = 4.46 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

Tegangan total $\sigma_{tot} = \sigma_l + \sigma_{\theta} = 1.34 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, diketahui untuk Tegangan yang diijinkan dari bahan tabung $\sigma_{it} = 2 \times 10^8 \text{ Pa}$, maka:

$$SF = \frac{\sigma_{it}}{\sigma_{tot}} = \frac{2 \times 10^8}{1.34 \times 10^8} = 1.79$$

4.2. Pertambahan Diameter dan Panjang Tabung

Untuk mengetahui pertambahan tabung arah radial digunakan persamaan (2 dan 4) diatas yaitu untuk arah axial :

$$\Delta R = \frac{PR^2}{Ed} \left(1 - \frac{\nu}{2}\right)$$

$$\Delta R = \frac{4.46 \times 10^7 \times 2.0934}{69 \times 10^9} (1 - 2 \times 0.33) = 8.85 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Maka perpanjangan diameter adalah $\Delta R = 0.0885 \text{ mm}$

Sedangkan untuk pertambahan axial adalah:

$$\Delta X = \frac{PLD}{4Ed} (1 - 2\nu) = \frac{\sigma_i L}{E} (1 - 2\nu) = 0,0004599 \text{ m} = \underline{0,46 \text{ mm}}$$

Maka perpanjangan tabung arah axial adalah $\Delta L = \Delta X = 0.46 \text{ mm}$

4.3. Amplitudo Getaran

Dalam perancangan ini dihitung amplitudo getaran pada arah axial pada berbagai frekuensi kerja dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah ini

$$X = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{1 - (1 - (\omega/\omega_n))^2}}$$

Dari perhitungan ini didapat :

Tabel (1)

ω/ω_n	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
X (mm)	0.465	0.48	0.505	0.548	0.613	0.719	0.902	1.278	2.421

4.4. Frekuensi natural

Untuk mengetahui besar frekuensi natural dari tabung arah axial digunakan persamaan

$$\omega_{n,axial} = \sqrt{\frac{E(\pi/l)^2}{\rho}}$$

maka didapat

$$\omega_{n,axial} = 31746 \text{ rad/ detik dan } f_{n,axial} = 5055 \text{ Hz}$$

Untuk menghitung besar frekuensi natural dari tabung arah radial digunakan persamaan

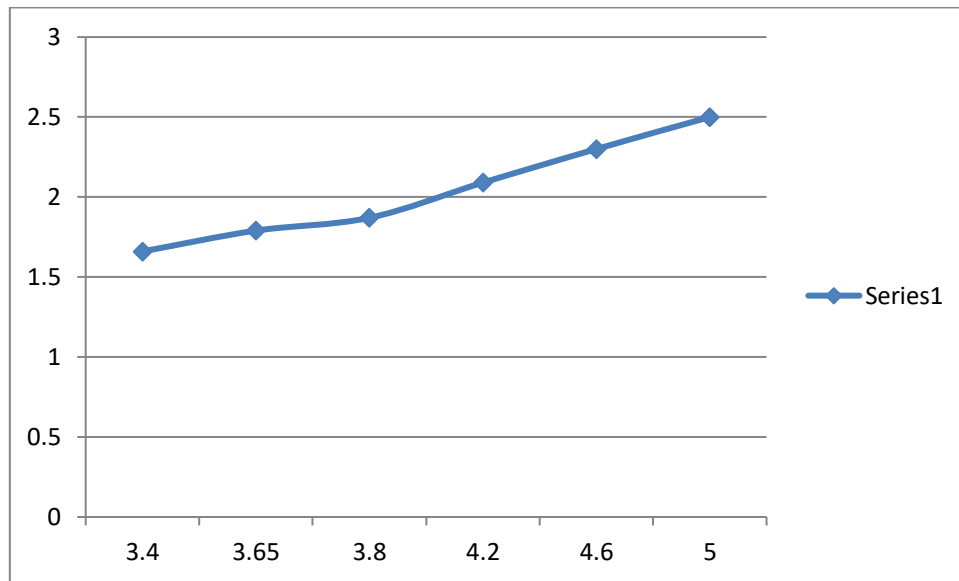
$$\omega_{n,radial} = \sqrt{\frac{0,8 EA}{l^2(\rho Al(0,001587) + \frac{m_0}{256})}}$$

Dari hasil perhitungan didapat besar

$$\omega_{n,radial} = 16420 \text{ rad/detik} \text{ dan } f_{n,radial} = 2614 \text{ Hz}$$

Kedua frekuensi ini jauh lebih besar daripada frekuensi tertinggi paksaan diharapkan. Hal ini menunjukkan bahwa rasio frekuensi akan sangat kecil, akibatnya, respon frekuensi kompleks akan tetap kecil juga. Menggunakan frekuensi tertinggi paksa kemungkinan 2000 Hz, rasio frekuensi adalah:

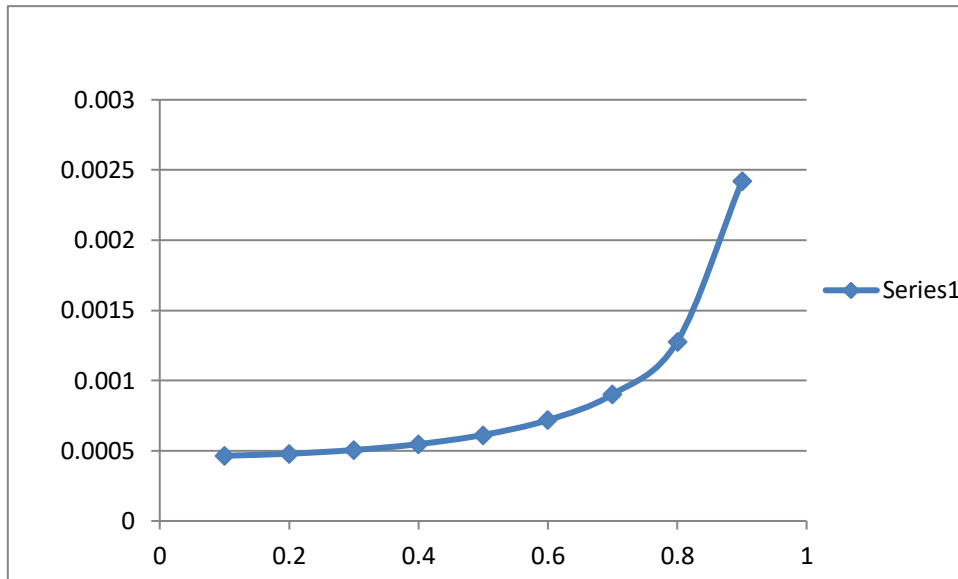
5. PEMBAHASAN



Gambar 4 : Grafik 1, tebal tabung terhadap faktor keamanan (safety factor)

Grafik diatas menerangkan mengenai perancangan tabung motor roket RX 1220 dengan bahan AL 6061 dengan tegangan yang diijinkan (σ_{ii}) = 500 MPa, mengalami tekanan hasil pembakaran sebesar 60 kg/cm², tabung mengalami tegangan arah tangensial (σ_{θ}) dan tegangan arah longitudinal (σ_l), tegangan total (σ_{tot}) kedua arah tidak boleh melebihi tegangan yang diijinkan dari bahan tabung. Hasil perhitungan dengan tebal tabung 3.65 mm didapat :

$$\sigma_{\theta} = 8.92 \times 10^7 \text{ N/m}^2, \sigma_l = 4.46 \times 10^7 \text{ N/m}^2, \sigma_{tot} = \sigma_l + \sigma_{\theta} = 1.34 \times 10^8 \text{ N/m} \text{ dan } \text{safety factor} = 1.79$$



Gambar 5 : Grafik 2, ratio frekuensi arah axial terhadap amplitudo

Grafik 2 : Menjelaskan amplitudo terhadap ratio frekuensi arah longitudinal, disini terlihat makin besar frekuensi kerja roket maka makin besar pula amplitudo arah axial yang terjadi.

Hasil perhitungan terhadap tabung motor roket dengan diameter luar $d_o = 115.8$ mm dan $d_i = 108.5$ mm dengan bahan tabung AL 6061 T6 yang mengalami tekanan sebesar 60 kg/cm^2 , mengalami amplitudo getaran $X_1 = 0.0465$ mm dan ratio frekuensi $\omega/\omega_n = 0,1$. Hasil ini sama dengan pertambahan diameter tabung yaitu $\Delta L = 0.046$ mm. dan amplitudo semakin membesar pada saat frekuensi kerja mendekati nilai frekuensi natural atau pada kondisi ratio frekuensi $\omega/\omega_n = 0,9$ yaitu sebesar 2.4 mm.

6. KESIMPULAN

Perhitungan terhadap tabung motor roket RX 1220 didapat hasil sebagai berikut :

1. Hasil perhitungan terhadap frekuensi natural arah axial dari tabung motor roket RX 1220 didapat $\omega_{n,axial} = 31746$ rad/detik, sedangkan besar frekuensi natural dari tabung arah t digunakan persamaan $\omega_{n,radial} = 16420$ rad/detik, hal ini cukup aman bagi tabung terhadap gangguan getaran karena frekuensi kerja roket maksimum hanya sebesar $\omega = 12560$ rad/detik.
2. Perancangan tabung motor RX1220 dengan bahan tabung AL 6061 T6, tegangan yang diijinkan sebesar $\sigma_{it} = 2 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, tekanan dalam tabung motor roket $P = 60 \text{ kg/cm}^2$, dan tebal tabung 3.65 mm, didapat besar tegangan pada tabung arah tangensial $\sigma_\theta = 8,92 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ dan tegangan pada tabung arah longitudinal $\sigma_l = 4.46 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ dengan faktor keamanan $SF = (\sigma_{it} / \sigma_{tot}) = 1.79$. (cukup aman) berdasarkan referensi (7)
3. Besar amplitudo maksimum yang terjadi adalah $X = 2.4$ mm, cukup aman karena pada frekuensi kerja maksimum roket yaitu 2000 Hz dibawah besar frekuensi natural arah radial $f_{n,radial} = 2614$ Hz dan frekuensi natural arah axial $f_{n,axial} = 5055$ Hz.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sutrisno selaku Kepala Pusat Teknologi Roket LAPAN yang telah mendukung kegiatan ini dan teman-teman Struktur Mekanika Roket LAPAN yang telah mensupport penelitian ini.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi makalah ini merupakan tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] John Hannah And R.C. Stephens “ *Mechanics Of Machines* “ Second Edition, Edward Arnold Ltd, London 1972.
- [2] Singiresu S. Rao “ *Mechanical Vibrations* “ Addison-Wesley Publishing Company, Third Edition California 1995
- [3] George P. Sutton and Oscar Biblarz “*Rocket Propulsion Elements* “Copyright © 2001 by John Wiley & Sons. Published simultaneously in Canada.
- [4] Robert L. Norton “ *Design Of Machinery* “ McGraw-Hill Book Company, Third Edition 2003.
- [5] R.C. Hibbeler “ *Engineering Mechanics Dynamics* “ Third Edition Prentice-Hall Inc. Singapore 2004.
- [6] Luke Voss, Tony Allais, Sean King, Jeff Parkins “ *Plans and Specifications of A Suborbital Rocket Payload* “AKPV Engineering University of Wyoming 2009
- [7] Structural Design Requirements And Factors of Safety For Spacef Light Hardware._ - 2011 (<https://ntrs.nasa.gov/archive/.../20110023499.pdf>) by KS Bernstein
- [8] Hindawi Publishing Corporation International Journal of Aerospace Engineering Volume 2012, Article ID 173129, 13 pages doi:10.1155/2012/173129
- [9] J.P. Chopade P.G. R.B. Barjibhe “ *Free Vibration Analysis of Fixed Free Beam with Theoretical and Numerical Approach Method* “ International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET) Vol. 2 Issue 1 February 2013. ISSN: 2319 – 1058
- [10] “The mass normalisation of the displacement and strain mode shapes in a strain experimental modal analysis using the mass-change strategy “journal of Sound and Vibration, Volume 332, December 2013.
- [11] T Kritsana, P. Sawitri, P. Teeratas “ A Finite Element Method Simulation for Rocket Motor Material Selection ” World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering Vol:8, No:9, 2014
- [12] Sheikh Naunehal Ahamed, Jadav Vijay Kumar, Mohammed Mushraffuddin, Parimi Shrawini. “ Modeling And Analysis Of Rocket Outer Shell ” INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH VOLUME 3, ISSUE 4, APRIL 2014 ISSN 2277-8616 270 IJSTR©2014 www.ijstr.org
- [13] David R. Greatri “ Multisized Inert Particle Loading for Solid Rocket Axial Combustion Instability Suppression “ *Research Article*