

Perancangan kekuatan sirip roket RX 450 seri 18.01 akibat pengaruh beban getaran

Design of RX 450 series 18.01 rocket fin strength due to the effect of vibration load

Agus B Djatmiko¹⁾, Fauzhia Rahmasari²⁾, Erma Yuniati²⁾, Guntur T Budiarto²⁾

¹⁾Peneliti Organisasi Riset Penerbangan dan Antariksa BRIN,

²⁾Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Jayabaya, Jakarta - Indonesia

Email: agusbudi60@gmail.com

Abstrak

Setiap struktur rekayasa seperti halnya pada sirip roket, mempunyai massa dan elastisitas, maka struktur tersebut mempunyai potensi untuk menimbulkan getaran. Pada umumnya terjadinya getaran pada struktur rekayasa adalah tidak diinginkan, oleh karena itu struktur sirip roket harus mampu menerima getaran yang terjadi. Percepatan pengganggu (*g force*) yang ditimbulkan oleh proses pembakaran pada roket dapat menyebabkan getaran dengan amplitudo yang besar (resonansi) yang mengakibatkan kerusakan pada struktur sirip roket, sehingga sirip roket tidak dapat bekerja seperti yang diinginkan. Untuk itu perlu diteliti agar sirip roket dapat menerima beban getaran yang terjadi. Beban tersebut menyebabkan terjadinya getaran pada sirip roket, oleh karena itu penting untuk merancang kekuatan sirip roket dengan nilai frekuensi natural dari sirip roket lebih besar dari frekuensi kerja maksimum roket agar tidak terjadi resonansi. Berdasarkan uji statik didapat getaran terbesar pada roket RX 450 adalah sebesar 10 g, maka sirip roket harus mampu menerima beban *g force* yang terjadi. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui kekuatan sirip roket RX 450 mampu menerima beban getaran yang ditimbulkan oleh roket. Pada perancangan ini digunakan bahan sirip roket RX 450 adalah Al 7075 dengan modulus elastisitas $E = 7.17E+10$. Hasil rancangan terhadap sirip roket RX 450 dengan tebal sirip 15 mm akibat beban getaran, didapat besarnya faktor redaman $\xi = 0,39$ dan frekuensi natural adalah $\omega_n = 7075$ Hz, perancangan sirip roket RX 450 cukup aman terhadap gangguan getaran yang terjadi, karena frekuensi natural hasil perancangan diatas frekuensi kerja paksa maksimum roket yaitu 2000 Hz.

Kata Kunci: frekuensi natural, getaran, sirip roket

Abstract

Every engineered structure, like the fins of a rocket, has mass and elasticity, so the structure has the potential to cause vibrations. In general, the occurrence of vibration in engineered structures is undesirable. therefore the structure of the fins of the rocket must be able to receive the vibrations that occur. The disturbance acceleration (*g force*) caused by the combustion process on the rocket can cause vibration with a large amplitude (resonance) which causes damage to the rocket fin structure, so that the rocket fins cannot work as desired. For this reason, it is necessary to investigate so that the rocket's fins can receive the vibration load that occurs. The load causes vibrations in the fins of the rocket, therefore it is important to design the strength of the fins of the rocket with the natural frequency value of the rocket fins greater than the maximum working frequency of the rocket so that resonance does not occur. Based on the static test, the biggest vibration on the RX 450 rocket is 10 g, then the rocket's fins must be able to accept the *g force* load that occurs. The purpose of the study was to determine the strength of the RX 450 rocket fins capable of receiving vibration loads generated by the rocket. In this design, the RX 450 rocket fin material is Al 7075 with a modulus of elasticity $E = 7.17E+10$. The results of the design of the RX 450 rocket fins with 15 mm thick fins due to vibration loads, obtained the magnitude of the damping factor $\xi = 0,39$ and the natural frequency is $\omega_n = 7075$, the design of the RX 450 rocket fins is quite safe against vibration disturbances that occur, because the natural frequency the results of the design above the maximum forced working frequency of the rocket is 2000 Hz.

Keywords: natural frequency, vibration, rocket fin

1. PENDAHULUAN

Getaran dan guncangan dipelajari menggunakan berbagai teknik dan dianalisis untuk memprediksi kerugiannya berpengaruh pada peralatan dan struktur. Dalam banyak kasus, getaran tidak dapat dihindari tetapi itu akan terjadi dalam batas yang dapat ditoleransi (Balaji, P. S. dkk),. Dalam kasus-kasus lain dimana getaran menjadi tidak dapat ditoleransi, diperlukan analisis sistem untuk efek getaran dan meningkatkan sifat mekanik atau ditempat dimana desain sistem dibatasi dalam meningkatkan sifat mekanik, maka diperlukan menambahkan kekuatan sirip untuk melawan getaran (Peery dan Azar, 1982). Penerapan kekuatan sirip menerima beban getaran membutuhkan memahami komponen kontrol getaran, yaitu, sumber, jalur dan penerima getaran (Cornelisse, dkk, 1979)(Rao, S. S). Sumber getarannya bisa alami atau buatan manusia. Sumber alami termasuk gempa bumi, angin, gelombang laut, dan lain-lain. Dan sumber buatan manusia termasuk getaran akibat operasi proses pembakaran pada motor roket. Mengacu sirip roket yang menerima getaran dari sumbernya. Kontrol getarannya digunakan berdasarkan tingkat getaran yang dapat ditahan penerima tanpa mengalami struktural merusak atau memengaruhi fungsionalitas (Li, K., Gohnert, M)(Thomson, W. T). Kasus dimana tingkat getaran tidak dapat diterima yaitu karena sirip tidak mampu menerima getaran, untuk itu perlu ditingkatkan kemampuan struktur sirip roket.

Setiap struktur rekayasa seperti halnya pada sirip roket, mempunyai massa dan elastisitas, maka struktur tersebut mempunyai potensi untuk menimbulkan getaran. Pada umumnya terjadinya getaran pada struktur rekayasa adalah tidak diinginkan. Oleh karena itu sedapat mungkin getaran tersebut diusahakan untuk diredam(Zahrai, M., Rod, A. F)(Puzyrov, V).. Percepatan pengganggu atau *g force* yang ditimbulkan oleh proses pembakaran pada roket dapat menyebabkan getaran dengan amplitudo yang besar yang mengakibatkan gangguan pada struktur sirip roket, sehingga sirip roket tidak dapat bekerja seperti yang diinginkan.

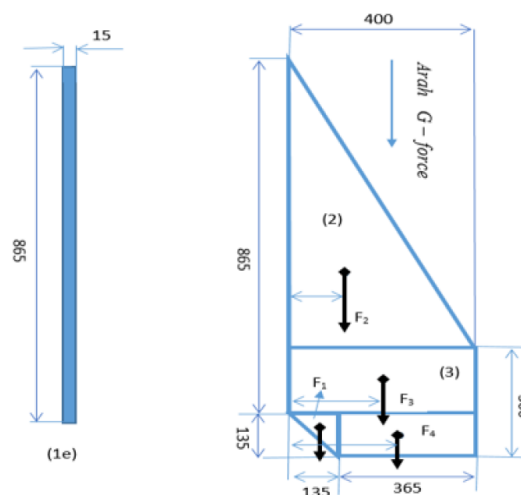
Untuk itu perlu dipelajari agar sirip roket dapat menerima beban getaran yang terjadi. Sirip roket dapat dianggap sebagai benda yang mempunyai distribusi massa dan elastisitas, sirip roket dianggap homogen dan isotropik mengikuti hukum Hooke dalam batas elastik. Untuk menentukan kedudukan tiap partikel dalam benda elastik diperlukan koordinat tak berhingga sehingga benda semacam itu mempunyai derajat kebebasan tak berhingga (Thomson, W. T)(Hibbeler, R. C). 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. Dalam perencanaannya sirip roket tidak boleh bekerja pada frekuensi naturalnya karena dapat menyebabkan roket bergetar (resonansi). Untuk itu perlu dianalisa besarnya frekuensi natural sirip roket akibat *g force* yang terjadi. dari hasil uji statik roket RX 450 pada laboratoriiium Uji Statik Pusat teknologi Roket di rumpin bogor, didapat besar gaya dorong yang terjadi, karena gaya dorong merupakan fungsi dari percepatan atau *g force* sebagai fungsi percepatan pengganggu. (Thomson, W. T)

Tujuan penelitian terhadap kekuatan sirip roket RX 450 adalah untuk mengetahui kekuatan sirip roket menerima beban getaran yang terjadi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

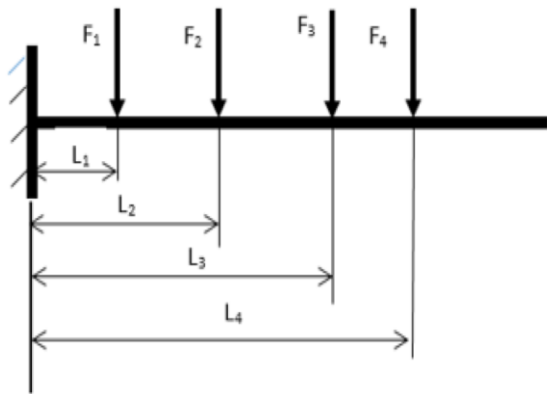
Aliran udara pada sirip roket dapat menghasilkan tiga macam gaya yaitu gaya angkat, gaya hambat dan gaya dorong dari roket tersebut. Gaya dorong dapat menyebabkan getaran yang cukup besar dan dapat menyebabkan kerusakan pada sirip roket dan dudukannya. Pendekatan teori yang digunakan untuk mengetahui kemampuan sirip roket RX 450 menerima beban getaran yaitu mula-mula dicari besar momen yang terjadi pada sirip akibat *g force* setelah itu dapat ditentukan besarnya frekuensi naural dari sirip roket.



Gambar 1. Dimensi sirip RX 450

2.1. Beban Pada Sirip

Model pembebanan *g force* yang ada pada sirip roket RX 450 dapat dilihat pada Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Model pembebanan *g force* pada sirip roket RX 450

Persamaan gaya akibat *g force* adalah sebagai berikut:

$$F = m \times g \text{ force (N)} \quad (1)$$

dimana:

F = gaya akibat *g force*

m = massa sirip roket (kg)

Massa sirip roket dapat dihitung dengan persamaan (2) sebagai berikut:

$$m = V \times \rho \text{ (kg)} \quad (2)$$

dimana:

V = volume sirip roket (m^3)

ρ = *density* dari bahan sirip = 2,810 *ram/cm*³

Volume sirip roket dapat dihitung dengan persamaan (3) sebagai berikut:

$$V = A \times t \text{ (m}^3\text{)} \quad (3)$$

dimana:

A = luas sirip roket (m^2)

t = tebal sirip roket (m)

2.2. Tegangan yang Terjadi

Momen yang ditimbulkan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M = F \times l \text{ (Nm)} \quad (4)$$

dimana:

F = gaya timbul akibat getaran

l = jarak gaya terhadap tumpuan sirip

Tegangan akibat momen yang ditimbulkan dirumuskan seperti Persamaan (5) sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (5)$$

dengan:

$$W = \frac{I}{y} \text{ (m}^3\text{)} \quad (6)$$

dimana:

$$I = \frac{1}{12} bh^3 = \text{momen inersia profil (m}^4\text{)}$$

$$y = \frac{1}{2} h \text{ (m)}$$

2.3. Frekuensi Natural

Untuk mengetahui besar frekuensi natural menggunakan Persamaan (7) sebagai berikut:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

dimana:

k = kekakuan (*stiffness*) dari sirip

m = massa sirip

2.4. Amplitudo yang Terjadi

Untuk mencari besar amplitudo yang terjadi dapat menggunakan Persamaan (8) sebagai berikut:

$$X = \frac{F/k}{\sqrt{[1-(\omega/\omega_n)^2]^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}} \quad (8)$$

dimana:

F = gaya pengganggu (eksitasi)

ξ = faktor redaman

ω/ω_n = rasio frekuensi

2.5. Defleksi yang Terjadi pada Sirip Akibat Beban Gaya Dinamik

Untuk menghitung defleksi yang terjadi dapat menggunakan Persamaan (9) sebagai berikut:

$$\delta_B = \frac{F_R L^3 R}{3EI} \quad (9)$$

dimana:

F_R = gaya resultan pada sirip

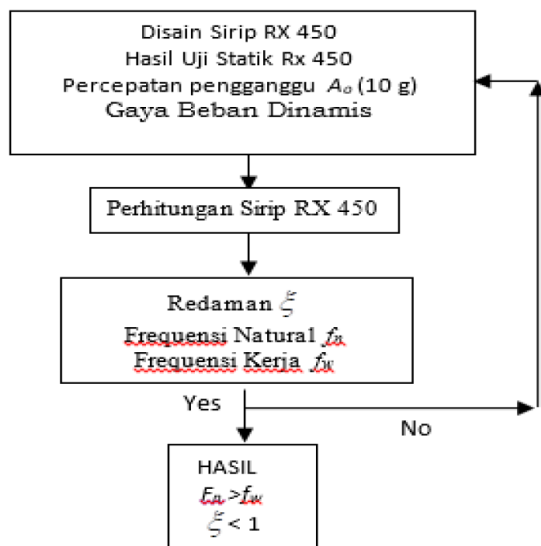
L_R = letak kedudukan gaya resultan

E = elastisitas pada sirip

I = momen inersia profil

Penelitian dimulai dari mencari desain sirip RX 450, mencari data percepatan pengganggu dari hasil uji statik, kemudian analisa gaya akibat beban dinamis. Setelah itu menentukan besar momen pada tumpuan sirip roket, kemudian dicari bahan roket dan terakhir penelitian tegangan yang terjadi pada sirip roket RX 450.

Penelitian dilakukan pada laboratorium Struktur Mekanika Pustekroket Rumpin, Bogor, Jawa Barat. Gambar 3 berikut merupakan diagram alir perancangan sirip roket RX 450.



Gambar 3. Diagram alir perancangan sirip roket RX 450

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Menghitung Volume Sirip

Isi bagian (a) segitiga adalah:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= A \times t = \frac{1}{2} p \times l \times t \\
 &= (0,5 \times 135 \times 135 \times 15) \\
 &= 137 \text{ cm}^3 = 0,000137 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Isi bagian (b) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_2 &= A \times t = \frac{1}{2} p \times l \times t \\
 &= \frac{1}{2} 565 \times 400 \times 15 \\
 &= 1695 \text{ cm}^3 = 0,001695 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Isi bagian (c) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_3 &= A \times t = p \times l \times t \\
 &= 400 \times 265 \times 15 \\
 &= 1590 \text{ cm}^3 = 0,001590 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Isi bagian (d) segi empat adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_4 &= A \times t = p \times l \times t \\
 &= 365 \times 135 \times 15 \\
 &= 739125 \text{ cm}^3 = 0,000739 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Menghitung massa sirip adalah sebagai berikut:

$$\rho = 2,810 \text{ gram/cm}^3 = 2810 \text{ kg/m}^3$$

Berat massa segitiga bagian (a) adalah sebagai berikut:

$$m_1 = V_1 \times \rho = 0,000137 \times 2810 = 0,3 \text{ kg}$$

Berat massa segitiga bagian (b) adalah sebagai berikut:

$$m_2 = V_2 \times \rho = 0,001695 \times 2810 = 3,7 \text{ kg}$$

Berat massa segitiga bagian (c) adalah sebagai berikut:

$$m_3 = V_3 \times \rho = 0,00159 \times 2810 = 3,46 \text{ kg}$$

Berat massa segiempat bagian (d) adalah sebagai berikut:

$$m_4 = V_4 \times \rho = 0,0007392 \times 2810 = 1,61 \text{ kg}$$

3.2. Menghitung Gaya pada Sirip

Dirancang $g \text{ force} = 10g = 10 \times 9,81 = 981 \text{ m/detik}^2$. Gaya bagian (a) segitiga adalah sebagai berikut:

$$F_1 = m_1 \times g \text{ force} = 0,3 \times 981 = 294,3 \text{ N}$$

Gaya bagian (b) segitiga adalah sebagai berikut:

$$F_2 = m_2 \times g \text{ force} = 3,7 \times 981 = 3629,7 \text{ N}$$

Gaya bagian (c) segitiga adalah sebagai berikut:

$$F_3 = m_3 \times g \text{ force} = 3,46 \times 981 = 3394,26 \text{ N}$$

Gaya bagian (d) segiempat adalah sebagai berikut:

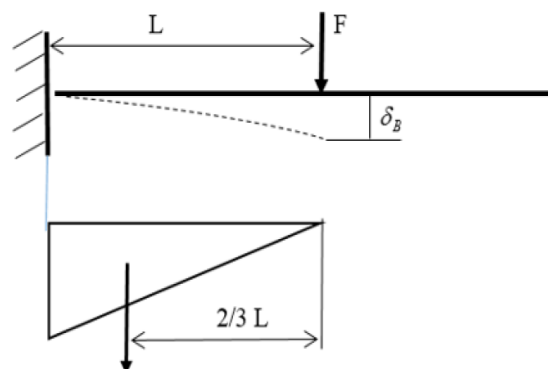
$$F_4 = m_4 \times g \text{ force} = 1,61 \times 981 = 1579,41 \text{ N}$$

Sehingga gaya resultan adalah sebagai berikut:

$$F_R = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 8898,23 \text{ N}$$

3.3. Menghitung Defleksi yang Terjadi pada Sirip Akibat Momen

Dengan pendekatan $\sum M = 0$, didapat letak gaya resultan $L_R = 19,04 \text{ cm}$ dari beban dinamik $g \text{ force}$ pada sirip.



Gambar 4. Sirip yang menerima beban terpusat

Berdasarkan definisi besarnya lendutan di B adalah sebagai berikut:

$$BB' = \delta_B \frac{\text{statis momen luas bidang}}{EI}$$

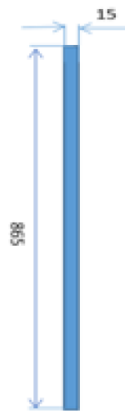
$$\delta_B = \frac{1}{2} \frac{L \cdot F_L \cdot \frac{2}{3} L}{EI} \text{ atau } \delta_B = \frac{FL^3}{3EI} \sigma \sigma_{yield}$$

Dengan pendekatan $\sum M = 0$, didapat letak gaya resultan $L_R = 19,04$ cm dari beban dinamik g force pada sirip.

$$F_R = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ = 294,3 + 3629,7 + 3394,26 + 1579,41 \\ = 8897,67N$$

$$E = 71,7Gpa = 71,7E9N/m^2$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{(0,015)(0,865)^3}{12} = 0,000809m^4$$



Gambar 5. Bentuk profil sirip roket RX 450

Defleksi yang terjadi pada sirip akibat beban dinamik adalah sebagai berikut:

$$\delta_B = \frac{F_R L^3}{3EI} = \frac{8897,67(0,1904)^3}{3(71,7E9)I} = 4,97e - 8m$$

3.4. Menghitung Frekuensi Natural

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

dengan,

$$k = \frac{F_R}{\delta_B} = \frac{8897,67}{4,97E-8} = 1,79e10 N/m$$

$$m = 9,07kg$$

maka,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{1,79e10}{9,07}} = 44435,2$$

$$\text{rad/detik} = 7075 \text{ Hz}$$

3.5. Menghitung Amplitudo yang Terjadi

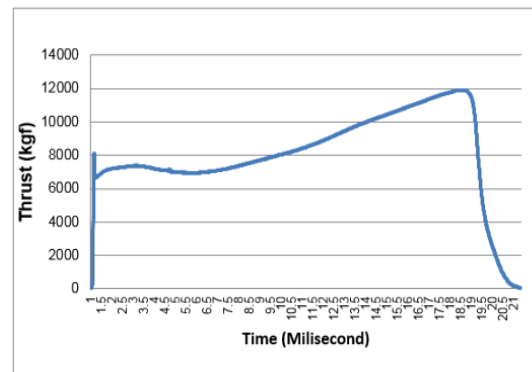
Untuk mencari amplitudo yang terjadi gunakan persamaan (10) sebagai berikut:

$$X = \frac{F/k}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}} \quad (10)$$

Dengan menggunakan Persamaan (10) dengan $F = 8898,23N$ dan $k = 1,79E10N/m$ dimana $\delta_B = 4,58e - 7$ m. Hasil perancangan didapat besarnya amplitude pada saat resonansi yaitu $X = 4,58e - 7$ m pada kondisi faktor redaman $\xi = 0,39$. Hasil perhitungan terhadap kekuatan sirip roket RX 450 akibat pengaruh beban getaran pada pada Tabel 1 sebagai berikut:

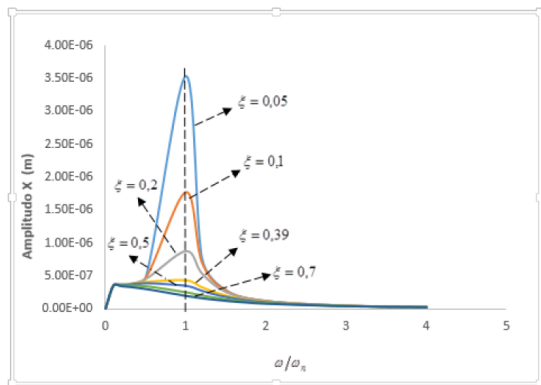
Tabel 1. Hasil perhitungan sirip roket RX 450 menerima beban getaran

No.	Properties	Dimensi
1	Tebal sirip (b)	15 mm
2	Gaya resultan (F_R)	8897,67 N
3	Defleksi sirip (δ_B)	4,97e-8 m
4	Amplitudo	4,97e-8 m
5	Faktor redaman (ξ)	0,39
6	Frekuensi natural (ω_n)	44435,32 rad/det = 7075 Hz
7	Kekakuan sirip (k)	1,79e10 N/m



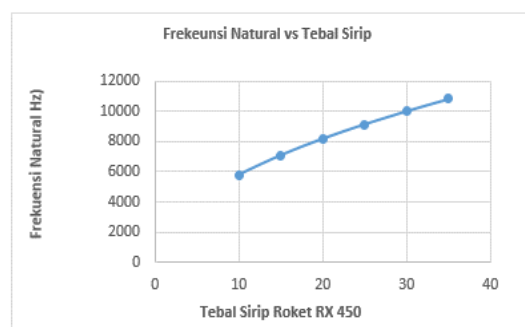
Gambar 6 Uji statik untuk Roket RX 450

Gambar 6 adalah hasil uji statik roket RX 450 pada laboratorium uji statik Pusat Teknologi Roket di Rumpin, Bogor. Hasil pengujian didapat gaya dorong ($thrust$) maksimum 12000 kg terjadi pada 19 detik waktu pembakaran, dengan massa roket yang tersisa seberat 122 kg maka g force setara dengan 10 g . Data ini yang digunakan untuk menghitung sirip roket RX 450 akibat beban g force yang terjadi. Hasil pengujian didapat juga nilai frekuensi kerja roket antara 0 sampai dengan 2000 Hertz.



Gambar 7. Hubungan amplitudo terhadap rasio frekuensi

Gambar 7 menerangkan hubungan antara amplitudo terhadap rasio frekuensi dari sirip Roket RX 450. Berdasarkan data dari sirip roket RX 450. Dilakukan perhitungan dengan menggunakan Persamaan (8) terhadap sirip RX 450 dengan beban dinamik sebesar $10 g$ force, hasil perhitungandidapat gaya resultan yang bekerja padasirip adalah $F_R = 8897,67$ N dimana F_R merupakan gaya harmonik, kemudia dihitung defleksi sirip akibat beban resultan didapat $\delta_B = 4,97 e - 8$ m. Berangkat dari data defleksi ini di temukan amplitudo pada saat resonansi sama dengan besar deefleksi yang terjadi, dengan menggunakan Persamaan (8) ditemukan besarnya Amplitudo $X = 4,97 e - 8$ m pada kondisi faktor redaman $\xi = 0,39$, untuk berbagai faktor redaman.



Gambar 8 : grafik Frekuensi Natural terhadap tebal sirip

Gambar 8 menerangkan hubungan antara frekuensi natural dari sirip Roket RX 450 dengan tebal sirip, nilai frekuensi natural dari struktur sangatlah penting karena dapat menunjukkan kekuatan suatu struktur tersebut terhadap gangguan getaran yang terjadi. Terlihat makin tebal sirip roket, maka makin besar nilai dari frekuensi natural sirip tersebut, pada penelitian ini digunakan tebal sirip 15 mm dimana mempunyai frekuensi natural sebesar $\omega_n = 7075$ Hz, hal ini cukup aman buat sirip roket RX 450, frekuensi natural karena diatas frekuensi kerja paksa maksimum roket yaitu 2000 Hz

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian terhadap sirip roket RX 450 LAPAN akibat beban dinamik g force dapat disimpulkan sebagai berikut: (a) dengan tebal sirip $t = 15$ mm dan beban dinamik sebesar g force = $10g$, didapat letak dan besar gaya resultan, letaknya sekitar $LR = 19,04$ cm dari tumpuan sirip dan besarnya gaya resultan adalah $F_R = 8898.23$ N; (b) digunakan bahan sirip dari Al 7075 dengan $E = 7.17E + 10$, dimana tumpuan sirip mempunyai profil tebal sirip sirip $t = 15$ mm dan tinggi profil $h = 865$ mm dengan beban $F_R = 8898.23$ N, maka didapat besar defleksi pada sirip sebesar $4,97 e - 8$ m; (c) setelah dihitung besarnya defleksi, maka dapat ditentukan besarnya amplitudo pada saat resonansi yaitu $X = \xi_B = 4,97 e - 8$ m, kondisi ini terjadi pada saat faktor redaman $\xi = 0,39$. (d) dengan kekakuan sirip $k = 2,52e10$ N/m² dan massa sirip roket $m = 9,07$ kg, maka didapat besarnya frekuensi natural sebesar $\omega_n = 8395.289$ Hz, hal ini cukup aman bagi sirip roket RX 450 menerima gangguan getaran yang terjadi karena frekuensi kerja roket antara 0 s/d 2000 Hz.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Fakultas Teknologi Industri, Universitas Jayabaya yang telah memberikan pendanaan untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Balaji, P. S., Leblouba, M., Rahman, M. E., Ho, L. H., 2016. Static lateral stiffness of wire rope isolators. *International Journal of Mechanic Based Design of Structur and Machine*, 44(4).
- Bogdan Sapinski., 2009. "Magnetorheological dampers in vibration control of mechanical structures. University of Science and Technology. Krakov, Poland. journals.bg.agh.edu.pl/MECHANICS/2009-01/mech04.pdf
- Cornelisse, J. W., Schoyer, H. F. R., Wakker, K. F., 1979. Rocket propulsion and spaceflight dynamics. Pitman Publishing Limited, London.
- Hibbeler, R. C., 2004. Engineering Mechanics Dynamics, Third Ed. Prentice-Hall Inc., Singapore.
- Kuinian Li, Mitchell Gohnert., 2010 "Lever mechanism for vibration isolation" peer-reviewed & open access journal issn: 1804-1191. www.pieb.cz ati – applied technologies & innovations volume 1 | issue 1 | april 2010.
- Ledezma, D. F., Ferguson, N. S., Brennan, M. J., 2012. An experimental switchable stiffness device for shock isolation. *Journal of Sound and Vibration*, 331(23): 4987-5001.

- Li, K., Gohnert, M., 2010. Lever mechanism for vibration isolation. *ATI-Applied Technologies & Innovations*, 1(1).
www.peb.cz
- Peery, D. J., Azar, J. J., 1982. Aircraft structures, second ed. McGraw-Hill Inc, New York.
- P. S. Balaji, M. E. Rahama, Leboula Moussa, lau hieng ho. (2015) vibration isolation of structures and equipment using wire rope isolators. international journal of modern trends in engineering and research (www.ijmter.com)-issn no.:2349-9745
- Puzyrov, V., Awrejcewicz, J., 2017. On the optimum absorber parameters: revising the classical results, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 55(3): 1081-1089. Warsaw DOI: 10.15632/jtam-pl.55.3.1081.
- Rao, S. S., 1995. Mechanical Vibrations, Third Ed. Addison-Wesley Publishing Company, California.
- Tengli. P. N., 2011. A study on vibration problems of solid propellant rocket motor. *Mechanical Engineering*, PES Institute of Technology, Bangalore.
- Thomson, W. T., 1981. Theory of vibration with applications, second ed. Prentice-Hall Inc., California
- Volodymyr Puzyrov & Jan Awrejcewicz., 2017. "on the optimum absorber parameters: revising the classical results " journal of theoretical and applied mechanics 55, 3, pp. 1081-1089, warsaw
doi: 10.15632/jtam-pl.55.3.1081.
- Zahrai, M., Rod, A. F., 2009. Effect of impact damper on SDOF system vibrations under harmonic and impulsive excitations, *Journal of Physics Conference*, Series 181.
www.ltpaobserverproject.com