

Analisa Uji Getar LAPAN-TUBSAT

Widodo Slamet

Bidang Teknologi Mekanika dan Elektronika Dirgantara

Pusat Tenologi Elektronika Dirgantara

LAPAN

E-mail : widodos@lapanrb.org

Abstrak

Pada saat diluncurkan, sebuah satelit akan mengalami getaran yang diakibatkan oleh getaran roket. Oleh karena itu satelit perlu menjalani uji getar. Hasil uji getar akan menunjukkan kekuatan satelit dalam menghadapi getaran dan akan terlihat frekuensi natural satelit.

LAPAN-TUBSAT adalah satelit mikro hasil kerja sama antara LAPAN dan Technical University Berlin (TU Berlin). Satelit ini akan diluncurkan menggunakan roket PSLV seri C7 milik ISRO, sebuah lembaga antariksa India. Uji getar dilakukan berdasarkan spesifikasi getaran yang dikeluarkan oleh roket peluncurnya. Pengukuran dilakukan menggunakan akselerometer, berjumlah 12 salah satunya digunakan sebagai kontrol. Akselerometer diletakkan pada posisi kritisnya. Getaran yang dibangkitkan oleh shaker berupa getaran sinus dan getaran random. Hasil yang diperoleh berupa frekuensi natural. Frekuensi natural ini akan dilihat perubahannya pada pengulangan uji getar. Jika frekuensi natural berubah melebihi toleransinya maka satelit tersebut dianggap mengalami kerusakan dan harus dilakukan perbaikan.

Kata kunci : Getaran, satelit, frekuensi natural, moda sinus, moda random

Pendahuluan

1. Latar Belakang

Sebuah satelit akan dibawa oleh roket untuk diluncurkan pada orbitnya. Roket yang sedang meluncur ke antariksa akan bergetar karena adanya motor roket. Getaran ini diteruskan kepada satelit. Untuk memastikan bahwa satelit tidak mengalami kerusakan akibat getaran tersebut maka perlu adanya pengujian getaran terhadap satelit.

LAPAN-TUBSAT adalah satelit hasil kerja sama antara LAPAN dan Technik Universitet Berlin, Jerman. Satelit ini merupakan satelit survilance untuk mengindra bumi, dalam hal ini adalah Indonesia. Roket yang meluncurkan LAPAN-TUBSAT adalah roket PSLV seri C7 milik ISRO, India.

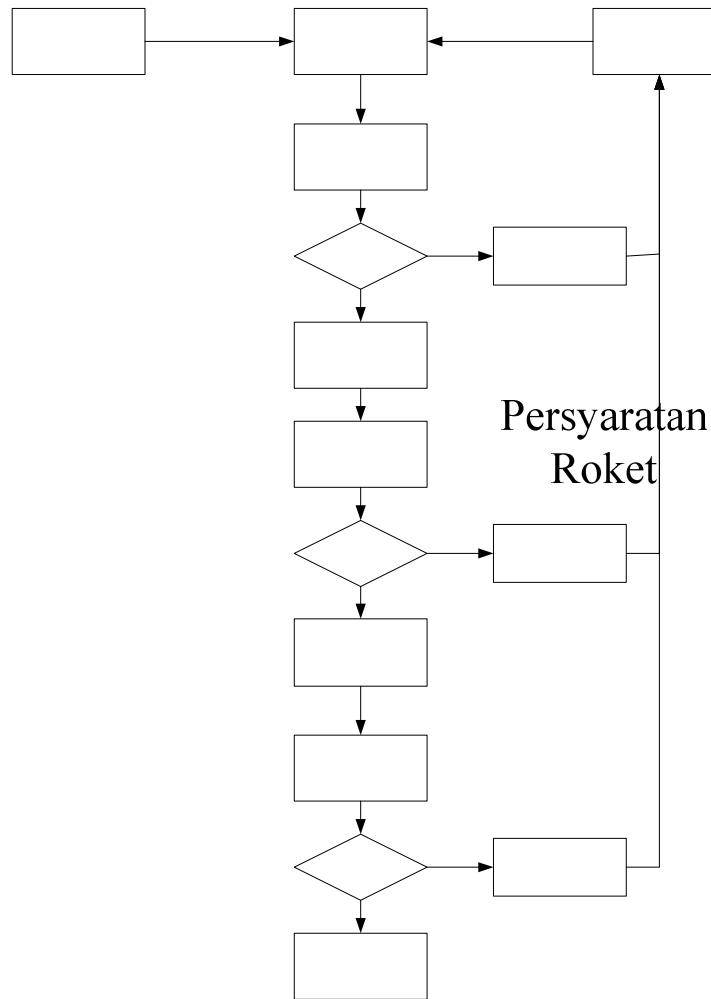
Uji getar LAPAN-TUBSAT telah dilakukan oleh Astrofreinwerk, sebuah perusahaan pengujian di Jerman yang merupakan anak perusahaan DLR, lembaga antariksa Jerman, yang telah memperoleh pengakuan dari berbagai lembaga antariksa. Makalah ini akan membahas hasil pengujian tersebut.

Ada dua tujuan uji getar terhadap LAPAN-TUBSAT yaitu, pertama mencari nilai frekuensi natural, dan kedua melihat kerusakan yang ditimbulkan oleh getaran. Nilai frekuensi ini penting karena roket peluncurnya mempersyaratkan adanya nilai minimal frekuensi natural satelit untuk melihat kompatibilitas mekanik antara satelit dengan peluncurnya. Sedangkan kerusakan akibat getaran dapat dilihat dari perubahan nilai frekuensi naturalnya. Kerusakan juga bisa dilihat secara fisik berupa berfungsi atau tidaknya instrumen per sub sistem yang dibawa.

2. Metoda Uji Getar

Dalam mencari frekuensi natural dilakukan penyapuan frekuensi dari 4 Hz hingga 2000 Hz. Jika ditemukan frekuensi natural satelit lebih besar dari persyaratan roket, maka dilanjutkan dengan uji getar moda sinus. Setelah itu, dilakukan penyapuan lagi untuk dilihat perubahan frekuensi naturalnya. Jika perubahan yang terjadi tidak melebihi $\pm 5\%$ maka bisa dilanjutkan ke uji getar random. Jika tidak, berarti ada kerusakan, dan harus diperbaiki dan uji getar diulang dari awal. Setelah uji getar random dilakukan

penyapuan lagi untuk melihat perubahan frekuensi naturalnya. Jika perubahan yang terjadi tidak melebihi $\pm 5\%$ maka bisa dikatakan satelit telah memenuhi persyaratan getaran roket. Metoda ini dapat dibambarkan melalui diagram alair pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir metoda uji getar LAPAN-TUBSAT

Teori Getaran

1. Getaran Moda Sinus

Sebuah satelit di dalam roket saat peluncuran dapat dimodelkan dengan gambar 2. yaitu sebuah massa yang terletak pada suatu landasan dengan konstanta elastisitas dan redaman. Getaran dihasilkan dari adanya gaya luar yang besarnya berubah-ubah secara periodik (sinus).

Persamaan matematika untuk gambar 2 adalah

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

Solusi lengkap untuk persamaan di atas adalah

Shak

Penya
freku

$f_n > r_c$

Getaran

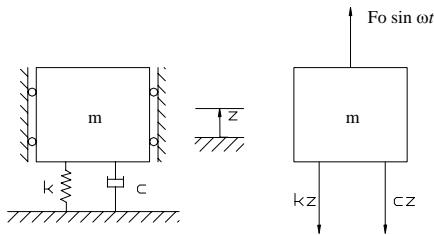
Penya
freku

$$z(t) = \frac{F_0}{k} \frac{\sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} + Z_1 e^{-\xi\omega_n t} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\omega_n t + \phi_1\right) \quad (2)$$

dengan

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ frekuensi natural benda}, c_c = 2m\omega_n, \text{ redaman kritis } \xi = \frac{c}{c_c},$$

$$\text{faktor redaman } \frac{c\omega}{k} = \frac{c}{c_c} \frac{c_c\omega}{k} = 2\xi \frac{\omega}{\omega_n}$$



Gambar 2. Model getaran LAPAN-TUBSAT sebagai sebuah benda yang memiliki elastisitas (k) dan redama (c)

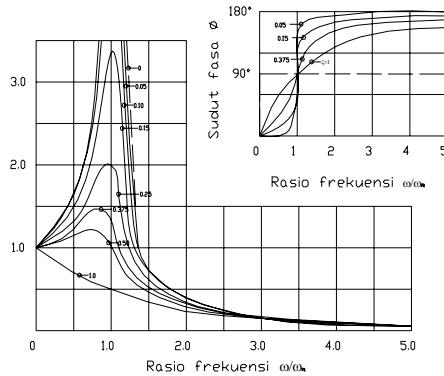
Untuk persamaan amplitudo dan fasa nondimensional menjadi

$$\frac{Zk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (3)$$

dan

$$\tan \phi = \frac{2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (4)$$

Dua persamaan di atas menunjukkan bahwa Zk/F_0 , yang sering disebut sebagai *dynamic load factor* (DLF) dan fasa ϕ merupakan fungsi dari perbandingan ω/ω_n dan faktor redaman ξ . Grafik dari persamaan (3) dan (4) dapat dilukiskan dengan gambar 3. Dari gambar grafik tersebut, faktor redaman mempunyai pengaruh yang sangat besar terhadap amplitudo dan fasa pada daerah frekuensi resonansi. Frekuensi natural tampak pada puncak kurva di mana $\omega/\omega_n = 1$ atau $\omega = \omega_n$.



Gambar 3. Respon getaran berupa dynamic load factor (DLF) susut fasa getaran

2. Getaran Random

Peluncuran menyebabkan fluktuasi tekanan secara random pada satelit. Oleh karena itu uji getar random bersifat wajib. Untuk mengukur gaya lingkungan random, dimulai dengan terminologi respon rata-rata kuadrat, ditunjukkan pada persamaan berikut

$$\overline{x(t)}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t) dt \quad (5)$$

Yang mana $\overline{x(t)}^2$ nilai rata-rata sebuah respon *time history*, $x(t)$ dan T adalah lamanya waktu. Dengan mensubstitusi transformasi Fourier inverse pada salah satu $x(t)$ akan menghasilkan bentuk persamaan

$$\overline{x(t)}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x \left[\int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \right] dt \quad (6)$$

di mana f merupakan frekuensi, t waktu dan $j = \sqrt{-1}$. dengan mengambil T berhingga, dapat dipertukarkan integrasi tersebut di atas dan akan diperoleh bentuk kesimetrisan transformasi Fourier sesuai dengan teorema Parseval berikut

$$\overline{x(t)}^2 = \int_0^{\infty} \left[\frac{2}{T} X(f) X(f)^* \right] df \quad (7)$$

yang mana $X(f)^*$ kompleks konjugate dari $X(f)$. Pernyataan dalam kurung pada persamaan di atas adalah *power spektral density* (PSD). PSD merupakan karakteristik, berupa kurva, dari getaran random. Dalam hal ini, "power" bentuk umum yang merepresentasikan akselerasi, kecepatan, perpindahan (*displacement*), regangan (*strain*) dan sebagainya.

Untuk memahami secara fisis PSD dimisalkan ada alat yang dapat mengukur nilai rata-rata kuadrat akselerasi dan sebuah pembangkit frekuensi yang dapat diatur. Dimulai dari frekuensi nol, diukur rata-rata kuadrat akselerasinya, dan secara perlahan frekuensi dinaikkan hingga batas terentu, hasilnya di plot sebagai sebuah grafik. Kata "density" menyatakan suatu turunan atau kemiringan fungsi. Hasil pengukuran komulatif rata-rata kuadrat akselerasi dan perhitungan PSD dapat dilihat pada gambar 3. Puncak dari plot PSD menunjukkan bahwa pada frekuensi tersebut getaran lebih intense.

Uji Getar Lapan-Tubsat

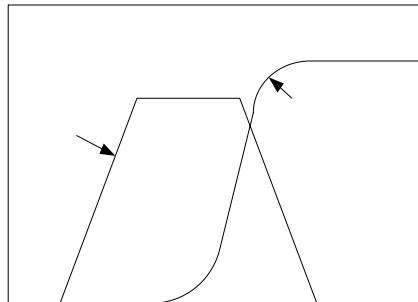
1. Persyaratan Roket

- o Batasan Frekuensi

Untuk memastikan kompatibilitas dinamik dengan peluncurnya, ada batasan frekuensi natural yang harus dimiliki oleh satelit, yaitu:

- | | |
|---------------|-----------|
| arah aksial | : > 90 Hz |
| arah laletral | : > 45 Hz |

Arah aksial adalah arah sumbu satelit yang sejajar dengan arah gerak roket. Sedangkan arah lateral adalah arah sumbu satelit yang tegak lurus dengan sumbu roket.



Gambar 3. Grafik umum pengukuran pengukuran komulatif rata-rata kuadrat akselerasi dan PSD

- **Penentuan Frekuensi Natural**

Frekuensi sapuan : 4 – 2000 Hz

Akselerasi : 0,2 g

Sweep rate : 2 oktav/ menit

- **Persyaratan Uji Getar Moda Sinus dan Random**

Tabel di bawah ini menunjukkan persyaratan yang berupa bilangan-bilangan untuk di *setting* pada peralatan uji getar. Tabel I adalah persyaratan untuk uji getar moda sinus sedangkan tabel II adalah persyaratan uji getar random. Toleransi yang diperbolehkan diperlihatkan pada tabel III. Ada dua tingkatan uji yaitu uji kualifikasi dan uji akseptansi. Pada uji getar LAPAN-TUBSAT uji kualifikasi tidak dilakukan.

Tabel I. Persyaratan uji getar moda sinus

Sumbu	Frekuensi	Level
Longitudinal	5 Hz	10 mm
	10 .. 100 Hz	2,5 g
Lateral	5 Hz	10 mm
	8 .. 100 Hz	1,25 g
Sweep rate	4 oktav/menit	

Tabel II. Persyaratan uji getar random

Sumbu	Frekuensi	Level
Semua sumbu	20 Hz	0,002 g ² /Hz
	110 Hz	0,002 g ² /Hz
	250 Hz	0,034 g ² /Hz
	1000 Hz	0,034 g ² /Hz
	2000 Hz	0,009 g ² /Hz
Semua level	6,7 g _{rms}	
Durasi	1 menit per sumbu	

Tabel III. Toleransi pengujian

Parameter Pengujian	Toleransi
Frekuensi getaran	± 2 %
Akselerasi getaran random PSD g _{rms}	± 3,0 dB
	± 1 dB
Durasi	0 .. + 10 %
Sweep rate	± 5 %
Beban statik	10 %

2. Peralatan Uji Getar

Peralatan uji getar berupa shaker yang menggetarkan satelit. Dari getaran yang ditimbulkan oleh shaker dapat diukur akselerasinya. Pengukuran dilakukan melalui akselerometer yang diteruskan ke komputer. Dengan menggunakan software VibControl m+p, pengukuran diubah dalam bentuk grafik.

- **Shaker**

Merek dagang

Ling Electronic B335 yang dilengkapi dengan *slip table*

Spesifikasi

Gaya nominal	: 80 kN
Beban maksimum	: 450 kg
Bandwidth frekuensi	: 5 ... 3000 Hz
Akselerasi maksimum	: 1400 ms^{-2}
Kecepatan maksimum	: 1,8 m/s
Displacement maksimum	: 25,4 mm



(a)



(b)

Gambar 4. Meja getar yang digetarkan oleh sebuah *shake* (a) dan komputer sebagai alat ukur dan alat kontrolnya (b)

- **Unit Kontrol**

VibControl m+p International, yang berupa seperangkat alat komputer beserta *software*nya.

- **Akselerometer**

Merek dagang : DeltaShear®

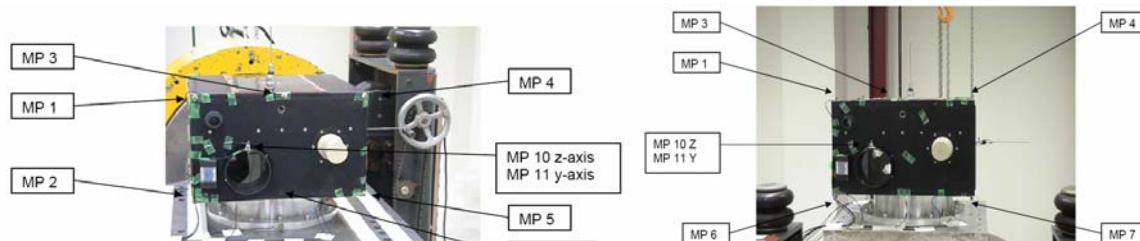
Type : 4371, dengan konektor yang mampu digunakan untuk pengukuran tingkat tinggi

3. Pelaksanaan Uji Getar

Uji getar dilaksanakan dengan menempatkan satelit di atas meja getar. Arah getar dan frekuensinya disesuaikan dengan persyaratan roket. Untuk mengubah arah getar, tinggal mengubah posisi shaker terhadap meja getar.

Akselerometer yang berjumlah 12, dua diantaranya digunakan sebagai kontrol, diletakkan pada posisi-posisi kritis satelit. Posisi kritis adalah posisi-posisi yang diperkirakan akan mengalami kerusakan, misalnya pada sambungan-sambungan struktur dan instrumen satelit. Contoh posisi akselerometer dapat dilihat pada gambar 5.

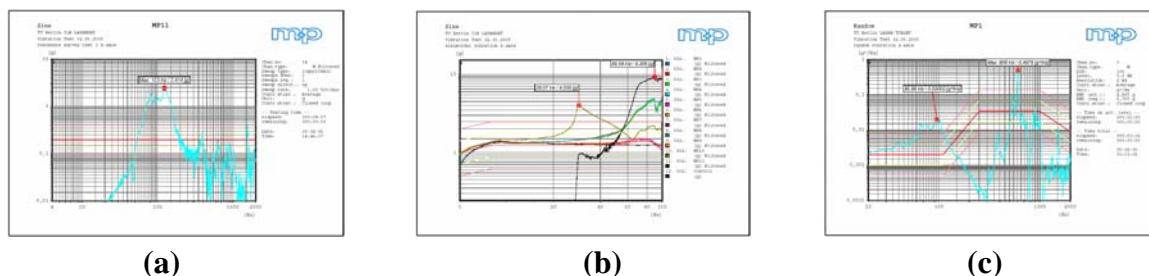
Pengukuran dilakukan melalui akselerometer yang diamati menggunakan komputer dengan software VibControl m+p. Oleh software ini besaran yang terukur adalah percepatan, dengan satuan g, pada moda sinus dan "density" dengan satuan g^2/Hz . Kedua besaran tersebut merupakan fungsi frekuensi.



Gambar 5. Pemasangan LAPAN-TUBSAT di atas meja getar, arah getar sumbu Y (a) dan arah getar sumbu z (b)

Hasil Pengukuran dan Analisa

1. Hasil Pengukuran



Gambar 6. Cuplikan dari hasil pengukuran getaran, resonance search (a), Getaran sinus (b), getaran random (c)

2. Data Yang Diperoleh

Hasil pengukuran menghasilkan data frekuensi natural untuk tiap-tiap akselerometer, yang diletakkan pada posisi kritis dan disebut MP (*Meusseurement Point*). Tabel IV berikut ini adalah cuplikan dari beberapa data pada MP tertentu.

Tabel IV. Data frekuensi natural pada resonance search, getaran sinus, dan random.

Sumbu	MP	Sebelum sinus	Setelah sinus/sebelum random	Setelah random
z	MP4	$f_n = 144 \text{ Hz}$	$f_n = 148 \text{ Hz}$	$f_n = 148 \text{ Hz}$
	MP11	$f_n = 99 \text{ Hz}$	$f_n = 102 \text{ Hz}$	$f_n = 100 \text{ Hz}$
x	MP3	$f_n = 79 \text{ Hz}$	$f_n = 74 \text{ Hz}$	$f_n = 75 \text{ Hz}$
	MP10	$f_n = 82 \text{ Hz}$	$f_n = 78 \text{ Hz}$	$f_n = 78 \text{ Hz}$
y	MP3	$f_n = 73 \text{ Hz}$	$f_n = 72 \text{ Hz}$	$f_n = 72 \text{ Hz}$
	MP10	$f_n = 52 \text{ Hz}$	$f_n = 53 \text{ Hz}$	$f_n = 53 \text{ Hz}$

3. Analisa

1. Respon getaran berupa grafik sesuai dengan perkiraan. Berdasarkan teori getaran terdapat beberapa puncak respon. Satu akselerometer memunculkan satu puncak yang menunjukkan nilai frekuensi natural.
2. Nilai besaran frekuensi natural semua akselerometer menunjukkan bilangan yang memenuhi syarat yang ditetapkan oleh roket peluncurnya, dalam hal ini PSLV C7. Nilai frekuensi natural terendah adalah 99 Hz untuk arah longitudinal. Nilai ini cukup memenuhi syarat karena persyaratannya adalah lebih besar dari pada 90 Hz. Sedangkan hasil nilai terendah pada

pengukuran frekuensi natural pada arah lateral adalah 52 Hz. Nilai ini juga memenuhi syarat, karena pada arah lateral persyaratan frekuensi naturalnya adalah lebih besar dari pada 45 Hz.

3. Perubahan frekuensi natural setelah uji getar moda sinus dan random ditunjukkan pada tabel V berikut ini

Tabel V. Perubahan nilai frekuensi natural setelah getaran sinus dan random

Sumbu	MP	Perubahan f_n setelah sinus	Perubahan f_n setelah random random
z	MP4	2,8 %	0,0 %
	MP11	3,0 %	2,0 %
x	MP3	6,3 %	1,4 %
	MP10	4,8 %	0,0%
y	MP3	1,4 %	0,0 %
	MP10	1,9 %	0,0 %

Dari tabel di atas, terdapat satu pengukuran, yaitu akselerometer MP3 pada uji getar sinus arah getar sumbu x, perubahan frekuensi naturalnya melebihi 5%. Namun demikian perubahan ini sangat kecil bilak dibandingkan dengan pengukuran-pengukuran yang lain yang jumlahnya sangat banyak, 10 akselerometer yang digetarkan dua kali tiap sumbu. Dengan demikian ada satu kerusakan pada 30 kali pengukuran.

4. Pada uji getar random terdapat beberapa hasil respon yang melebihi toleransinya. Hal ini sangat mengkawatirkan pada saat peluncurannya. Hal ini bisa diatasi jika toleransi pengukuran diperbesar, misalnya dari $\pm 3,0$ dB menjadi $\pm 5,0$ dB.

Kesimpulan

Uji getar merupakan uji yang wajib dilakukan oleh sebuah satelit yang akan diluncurkan oleh sebuah roket. Pada uji getar akan diperoleh nilai frekuensi natural dan juga dapat dilihat kekuatan satelit dalam menghadapi getaran roket. Kerusakan dapat dilihat dari perubahan nilai frekuensinya, dan secara fisik dapat dilihat dari berfungsi atau tidaknya semua sub sistemnya.

Dari teori getaran, uji getar akan menghasilkan grafik yang berupa akselerasi terhadap frekuensi. Akselerasi diukur oleh akselerometer yang selanjutnya ditampilkan melalui layar komputer dengan menggunakan software. Grafik tersebut akan menghasilkan puncak-puncak kurva yang merupakan nilai frekuensi naturalnya.

Ada dua jenis uji getar, yaitu getaran moda sinus dan getaran random. Setelah menjalani uji getar, baik sinus maupun random, dapat dilihat perubahan frekuensi natural satelit. Jika perubahan tersebut tidak melebihi 5 % (yang ditentukan sebelumnya), maka satelit dianggap tidak mengalami kerusakan. Selain perubahan frekuensi naturalnya, kerusakan setelah uji getar dilihat pula pada berfungsi atau tidaknya semua sub sistemnya. Dalam hal uji getar LAPAN-TUBSAT hasil yang diperoleh cukup baik.

Daftar Pustaka

1. Dasgupta, S., 2002, *Spacecraft Structure and Thermal System*, Training on Sistem level Aspects of Spacecraft Technology, PUSTEKELEGAN LAPAN, Bogor.
2. Ramakrishnan, S., 2004, *Polar Satellite Launch Vehicle User's Manual*, ISRO, Departemen of Space, Goverment of India, Bengalore
3. Rao, Singiresu S., 1990,. *Mechanical Vibrations*, second edition, AddisonWesley Publishing Co., Massachusetts,
4. Widodo, 2000, *Respon Dinamik Struktur Elastik*, UII Press, Jogjakarta.