

KARAKTERISTIK DINAMIKA STRUKTUR SATELIT MIKRO LAPAN-TUBSAT

"Robenus Heru Triharjanto

'Sugiarmadji HPS

*) Peneliti Bidang Sruktur Mekanika Pustekwagan, LAPAN

ABSTRACT

The TUBSAT-LAPAN micro satellite is planned to be launched using PSLV rocket. The design constraints of the mechanical system of the satellite are able to accommodate structural requirement for PSLV, which are 1" resonance frequency in the rocket longitudinal axis > 90 Hz and 1* resonance frequency in the lateral axis > 45 Hz. Therefore, the structural dynamic characteristic data of the satellite is important to be evaluated, such as natural frequency and mode shapes of the satellite structures. The normal modes analysis made is done using Finite Element Methods commercial software NASTRAN.

To simplify the FEM modeling, the satellite components inside the compartments is replaced by a dummy load simulating their contribution to satellite mass, center of gravity and inertia, which was made by the same material as the satellite's structure, e.i Al-AUoy 2024T351. Meanwhile, the FEM modeling for both the UHF antenna used the Stainless Steel materials as the real antenna.

The analysis results show that the lowest local natural frequency of the satellite occurs on the UHF antenna. The 1st natural frequency of the antenna UHF structures in lateral direction is 52,29 Hz. The 1" natural frequency of the satellite in lateral direction is 104.09 Hz and 106.41 Hz. The 1st natural frequency in longitudinal direction is 151.47 Hz. Completing the satellite integration, vibration test was done to the satellite. The test shows that the 1st global frequency is 72-75 Hz in the lateral direction and 148 Hz in longitudinal direction.

Structural dynamic characteristic of TUBSAT-LAPAN micro satellite in "free flying" condition are also analyzed using "no-constraint" condition to check the safe separation clearance scenario. The results show that the 1* natural frequencies for satellite structures (combination) become very small, less than 0.00032 Hz. But, the lowest of the 1" natural frequency for UHF antenna structures is almost constant, 52.30 Hz in lateral direction.

ABSTRAK

Data karakteristik dinamik sangat diperlukan dalam peluncuran guna mengetahui apakah komponen-komponen satelit tahan terhadap getaran yang terjadi. Untuk itu, analisis karakteristik dinamik struktur satelit mikro TUBSAT-LAPAN dilakukan untuk memperoleh data tentang response dari struktur satelit terhadap gaya dinamis (getaran). Persyaratan frekuensi modus getar dari wahana peluncur PSLV adalah *resonance frequency* pertama ke arah sumbu longitudinal roket harus > 90 Hz, sedangkan dalam arah sumbu lateral roket harus > 45 Hz. Karakteristik dinamika struktur satelit akan dilakukan melalui analisis modus normal struktur dengan bantuan perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga (Finite *EL*emen *M*ethods - FEM) NASTRAN.

Pemodelan FEM dari struktur satelit mikro TUBSAT-LAPAN secara tepat rumit, karena komponen-komponen satelit mempunyai geometri yang unik dan material yang berbeda dengan material yang digunakan untuk struktur satelit. Untuk penyederhanaannya, diasumsikan bahwa seluruh komponen yang ada di dalam satelit digantikan dengan suatu *dummy load*, yang dapat menghasilkan pusat masa dan

inersia yang sama bagi satelit. *Dummy load* ini dimodel dengan material bahan sama dengan dinding, yaitu Al-Alloy 2024 T351. Sedangkan untuk struktur antena UHF tetap dengan material asli yakni *Stainless Steel*.

Natural frequency pertama dari modus getar lokal terjadi pada struktur antena UHF satelit di frekuensi 52,29 Hz dan 52,31 Hz ke arah sumbu lateral. *Global frequency* pertama dari modus getar satelit adalah 104,09 Hz dan 106,41 Hz ke arah gerakan sumbu lateral, dan 151,47 Hz ke arah gerakan sumbu longitudinal. Dari analisis ini ditunjukkan bahwa harga modus getar yang terendah dari satelit mikro TUBSAT-LAPAN, baik dalam arah longitudinal maupun lateral, masih lebih tinggi dari persyaratan yang diminta, sehingga tidak akan mengalami resonansi saat peluncuran.

Dengan hasil analisis ini maka desain struktur satelit menjadi matang dan satelit siap untuk diintegrasikan. Setelah satelit terintegrasi, dilakukan uji dinamik (getar) untuk memeriksa validitas dari asumsi yang dipakai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *global frequency* pertama dari satelit adalah 72-75 Hz ke arah lateral dan 148 Hz ke arah longitudinal.

Model FEM yang dibuat untuk melihat bentuk deformasi [*mode shape*] dan satelit saat mengalami getaran, agar otoritas peluncur dapat melakukan analisis *clearance* antara satelit dengan komponen roket atau *payload* yang lain. Sehingga, untuk melihat kondisi dinamik pada "terbang-bebas", yakni saat satelit memisahkan diri dari roket. Struktur satelit mikro TUBSAT-LAPAN juga dianalisis pada kondisi *no-constraint*. Hasil analisis menunjukkan bahwa besarnya *natural frequency* pertama menjadi rendah sekali, yaitu > 0.00032 Hz. Harga *natural frequency* pertama dari struktur antena 52.30 Hz ke arah lateral.

1 PENDAHULUAN

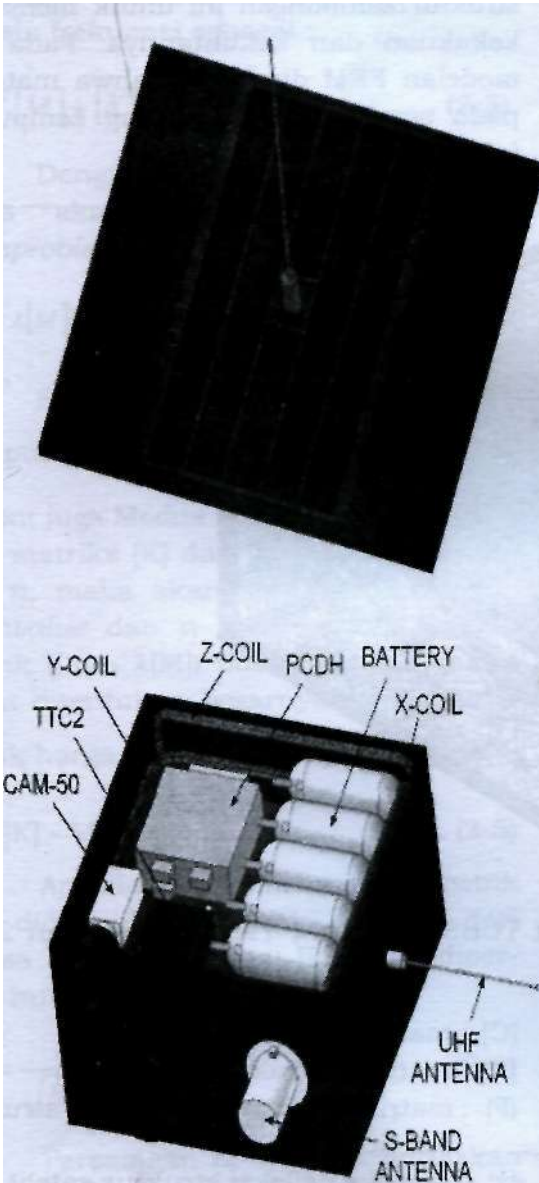
Dalam proyek kerjasama antara LAPAN dengan Institute für Luft und Raumfahrt T.U. Berlin, Jerman telah dikembangkan satelit mikro TUBSAT-LAPAN untuk keperluan pemantauan lingkungan. Satelit ini berbentuk kotak dengan ukuran dimensi lebar 450 mm, panjang 450 mm dan tinggi 275 mm. Berat total satelit sebesar 56,7 kg. Satelit dengan muatan 2 buah kamera dan muatan telekomunikasi ini akan diluncurkan pada awal tahun 2006 ini dengan menggunakan wahana peluncur roket PSLV di India.

Untuk peluncuran LAPAN-TUBSAT, diperlukan data karakteristik dinamik dari struktur satelit. Hal ini untuk mengetahui apakah struktur dan komponen-komponen satelit yang ada di dalamnya akan tahan terhadap getaran yang terjadi pada wahana peluncur, yang disebabkan oleh sistem propulsi dan beban aerodinamik. Data karakteristik dinamik, seperti frekuensi pribadi (*natural frequency*) dan modus deformasi [*mode shapes*], dapat diperoleh dengan cara

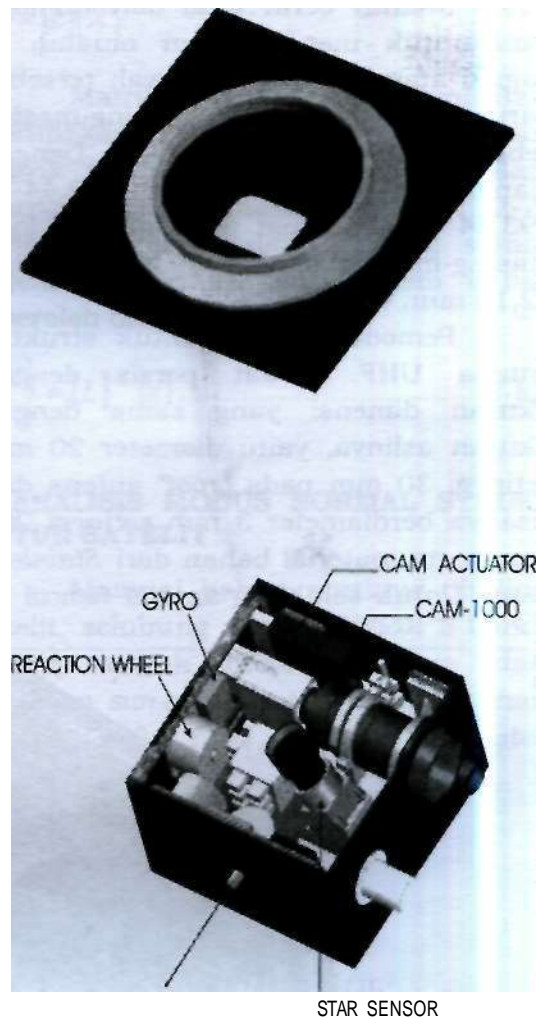
analisis modus normal [*normal modes*] ataupun melalui suatu pengujian dinamik struktur satelit di laboratorium [*sine-sweep survey*]. Untuk memperoleh data karakteristik dinamik struktur satelit dilakukan analisis modus normal struktur dengan bantuan perangkat lunak berbasis *Finite Element Methods* (FEM) NASTRAN versi Windows 4.5.

Pembuatan model FEM dari struktur satelit mikro TUBSAT-LAPAN secara tepat per komponen adalah sulit, karena komponen-komponen satelit mempunyai geometri yang unik dan bahan yang berbeda-beda. Untuk penyederhanaan dalam pemodelan FEM, diasumsikan bahwa seluruh komponen yang ada di dalam satelit digantikan dengan suatu "*dummy load*", yang mensimulasikan kontribusinya terhadap berat, pusat masa, dan inersia. *Dummy load* ini dibuat dengan material yang sama dengan struktur satelit, yaitu Al-Alloy 2024 T351. Sedangkan untuk pemodelan FEM struktur untuk kedua antena UHF menggunakan material yang sebenarnya, yakni *Stainless Steel*. Pemodelan FEM dibuat untuk struktur

satelit sesuai dengan kondisi sebenarnya, yaitu ada dua lubang pada dinding arah sumbu Z^+ untuk kamera, dan satu buah lubang pada arah sumbu Y^+ untuk star-sensor. Sisi tersebut juga merupakan tempat dudukan "separation ring" (dudukan satelit pada roket peluncur). Di samping itu, terdapat 1 (satu) selubung antenna helical S-band, 2 (dua) baffle lensa yang keluar dari lubang kamera di dinding arah sumbu Z^* , dan 1(satu) dudukan sun sensor pada dinding arah sumbu Y^- .



Gambar1-1(a): Kompartemen satelit bagian atas



Gambar1-1(b): Kompartemen satelit bagian bawah

2 MODUS NORMAL STRUKTUR SATELIT TUBSAT-LAPAN

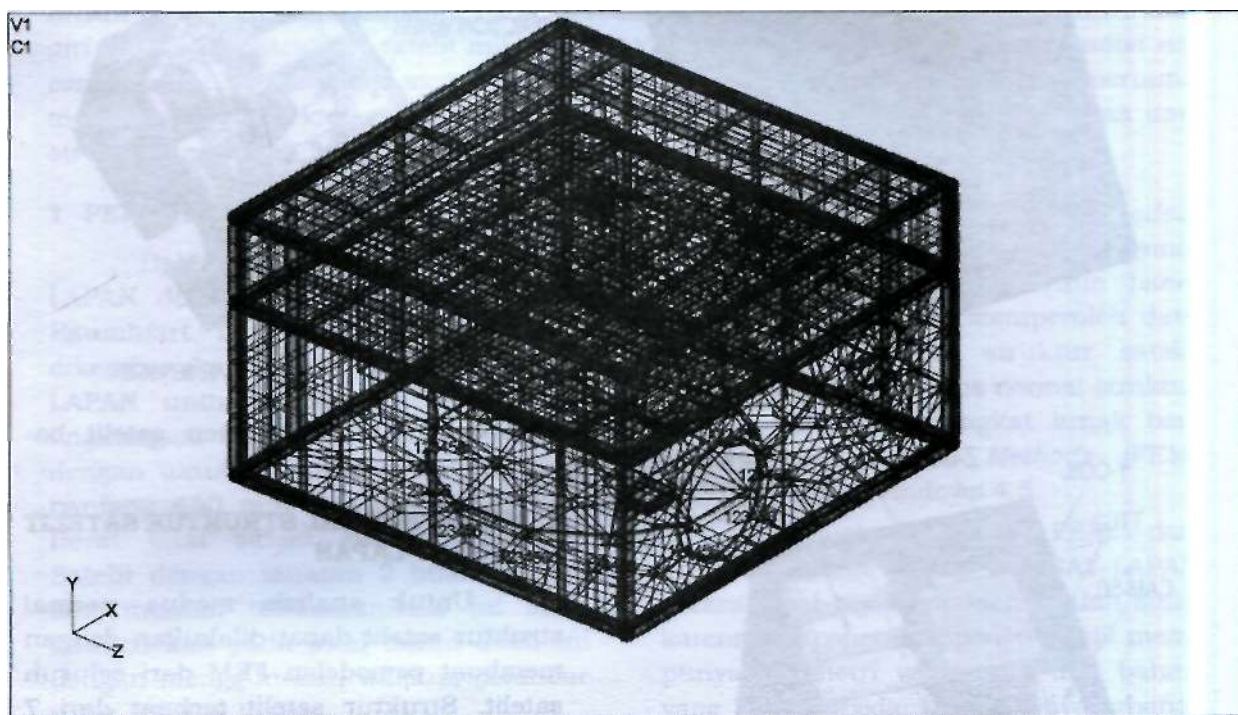
Untuk analisis modus normal struktur satelit dapat dilakukan dengan membuat pemodelan FEM dari seluruh satelit. Struktur satelit terbuat dari 7 buah plat dengan tebal 10 mm. Bentuk konfigurasi satelit LAPAN-TUBSAT adalah seperti dalam Gambar 1-1 (a) dan Gambar 1-1(b), dimana komponen-komponen satelit diletakkan dalam 2 kompartemen, atas dan bawah. Karena material dari komponen-komponen satelit tersebut tidak sama, maka untuk penyederhanaan dalam pemodelan FEM, isi satelit diganti dengan "dummy load" yang bahannya sama dengan bahan struktur satelit, yaitu Al-Alloy 2024

T351. Namun berat total dari *dummy-load* untuk menggantikan muatan di bagian atas dan bagian bawah tersebut harus tetap sama, yaitu masing-masing seberat 9,3 kg dan 17,02 kg. Dengan diambil luas alas ukuran 293,44 x 293,44 mm, didapat tebal *dummy load* masing-masing adalah 39,42 mm dan 72,15 mm.

Pemodelan FEM untuk struktur antenna UHF dibuat persis dengan ukuran dimensi: yang sama dengan ukuran aslinya, yaitu diameter 20 mm setinggi 30 mm pada "roof" antenna dan sisanya berdiameter 3 mm setinggi 200 mm, serta material bahan dari *Stainless Steel*. Untuk selubung antenna *helical S-*

band, canopy pada lubang kamera, dan dudukan sun sensor menggunakan bahan Al-Alloy 2024 T351. Hasil pemodelan FEM adalah seperti yang terlihat pada Gambar 2-1. Jumlah keseluruhan elemen yang dihasilkan dari pemodelan FEM adalah 1982 elemen dan 2812 nodal.

Sambungan pada struktur LAPAN-TUBSAT (sisi antardinding) dilakukan dengan baut dan pin. *Margin safety* yang cukup besar diberikan pada disain struktur sambungan ini untuk menjamin kekakuan dan kekuatannya. Pada pemodelan FEM dianggap bahwa material pada sambungan terhubung sempurna (*shared nodal points*).



Gambar 2-1: Pemodelan FEM struktur satelit TUBSAT-LAPAN, 1982 elemen dan 2812 nodal

Untuk analisis modus normal, tinjau persamaan getaran dari struktur satelit akibat beban luar $F(t)$ yang secara umum dapat dituliskan dalam time-domain sebagai persamaan diferensial orde-dua :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \dots\dots\dots (2-1)$$

Keterangan:

[M]: matriks massa elemen

- [C] : matriks redaman (*damping*)
- [K] : matriks kekakuan (*stiffness*)
- {F} : matriks beban luar pada struktur satelit
- {x} : matriks defleksi struktur satelit

Parameter modal dari getaran struktur dapat dianalisis dengan menggantikan matriks {x} dalam domain frekuensi :

$$\{x\} = \{\dot{X}\} \sin \omega t$$

$$\{\dot{x}\} = \omega \{\ddot{X}\} \cos \omega t \dots\dots\dots (2-2)$$

$$\{\ddot{x}\} = -\omega^2 \{\ddot{X}\} \sin \omega t$$

Keterangan :

$\{\ddot{X}\}$ - matriks amplitudo getaran dari nodal

ω - frekuensi getaran struktur

Untuk struktur yang tidak teredam dan tidak ada beban luar, maka diperoleh persamaan getaran dalam domain frekuensi sebagai :

$$(-\omega^2 [M] + [K]) \{\ddot{X}\} = \{0\} \dots\dots\dots (2-3)$$

Dengan menggantikan $\lambda = \omega^2$, maka akan didapatkan persamaan *eigenproblem* :

$$([K] - \lambda [M]) \{\ddot{X}\} = \{0\} \dots\dots\dots (2-4)$$

Setiap harga *eigenvalue* λ akan mempunyai *eigenvector* $\{\ddot{X}\}$ atau biasanya

disebut juga Modus Normal (*Normal Mode*). Jika matriks $[K]$ dan $[M]$ adalah matriks $n \times n$, maka akan selalu diperoleh n -*eigenvalue* dan n -*eigenvector*. Apabila matrik $([K] - \lambda[M])$ tidak singular, maka dapat ditentukan besarnya *eigenvalue* λ untuk harga $\{\ddot{X}\} = \{0\}$ dari determinan :

$$\det ([K] - \lambda[M]) = 0 \dots\dots\dots (2-5)$$

Apabila matriks massa $[M]$ simetrik dan didefinisikan matrik diagonal dari massa tersebut sebagai $[L]$, akan diperoleh hubungan :

$$L_B = \frac{1}{\sqrt{M_B}} \dots\dots\dots (2-6)$$

Persamaan (2-4) dapat dituliskan kembali sebagai persamaan "*standard eigenproblem*"

$$([A] - \lambda [I]) \{x\} = \{0\} \dots\dots\dots (2-7)$$

Keterangan :

$$[A] = [L][K][L]$$

$$[I] = [L]^{-1}[L]$$

$$\{x\} = [L] \{\ddot{X}\}$$

Matrik $[I]$ adalah matrik unit dan merupakan diagonal matrik, sedangkan matrik $\{x\}$ merupakan *eigenvector* dari matrik $[A]$. Persamaan (2-4) dan (2-7) mempunyai *eigenvalue* λ_i yang sama. *Eigenvector* semula dari sistem dapat diperoleh dari hubungan :

$$\{\ddot{X}\} = [L]^{-1} \{x\} \dots\dots\dots (2-8)$$

3 ANALISIS MODUS NORMAL STRUKTUR SATELIT

Material bahan struktur dinding satelit, selubung antena *helical* S-band, canopy untuk lubang kamera dan dudukan *sun-sensor* menggunakan bahan *Al-Alloy* 2024 T351, dengan parameter mekanik :

$$E = 7.61545E10 \text{ N/m}^2,$$

$$\nu = 0,33,$$

Limit Stress :

$$\textit{tension} = 2.8958E8 \text{ N/m}^2 ;$$

$$\textit{compression} = 2.7579E8 \text{ N/m}^2 ;$$

$$\textit{shear} = 2.62E8 \text{ N/m}^2 ,$$

$$\textit{mass density} = 2768.41 \text{ kg/m}^3,$$

Sedangkan untuk struktur antena UHF digunakan material *Stainless Steel*, dengan parameter mekanik :

$$E = 1.965E11 \text{ N/m}^2,$$

$$\nu = 0,27,$$

Limit Stress :

$$\textit{tension} = 9.9974E8 \text{ N/m}^2 ;$$

$$\textit{compression} = 9.5837E8 \text{ N/m}^2 ;$$

$$\textit{shear} = 6.55E8 \text{ N/m}^2 ,$$

$$\textit{mass density} = 7834.6 \text{ kg/m}^3.$$

Karena satelit dipasang pada dudukan berupa ring yang dihubungkan dengan 12 baut, kemudian disambungkan pada dudukan di roket peluncur, maka pada nodal-nodal daerah ke 12 baut tersebut dari model FEM kondisinya di constraint "*fixed supported*" atau arah Tx, Ty, Tz, Rx, Ry, dan Rz (arah 123456).

Pada struktur satelit keseluruhan (ada 2 buah antena UHF, 1 selubung antena *helical* S-band, canopy lubang

untuk kamera dan kedudukan *sun-sensor*) diperoleh harga modulus getar struktur satelit mikro TUBSAT-LAPAN ini sebagai berikut :

- $\omega_1 = 52,29$ Hz (1st modus getar antenna pada dinding Y⁺ arah bid.-xy)
- $\omega_2 = 52,292$ Hz (1st modus getar antenna pada dinding Y⁺ pada arah bid.-xz)
- $\omega_3 = 52,30$ Hz (1st modus getar antenna pada dinding X⁺ arah bid.-xz)
- $\omega_4 = 52,31$ Hz (1st modus getar antenna pada dinding X⁺ pada arah bid.-xy)
- $\omega_5 = 104,09$ Hz (1st modus getar struktur satelit dalam arah sumbu-x)
- $\omega_6 = 106,41$ Hz (1st modus getar struktur satelit dalam arah sumbu-z)
- $\omega_7 = 151,47$ Hz (1st modus getar struktur satelit dalam arah longitudinal/sumbu-y)
- $\omega_8 = 328,89$ Hz (2nd modus getar kedua antenna arah lateral)
- $\omega_9 = 328,892$ Hz (2nd modus getar antenna pada dinding Y⁺ arah lateral)
- $\omega_{10} = 328,98$ Hz (2nd modus getar antenna pada dinding X⁺ arah lateral)
- $\omega_{11} = 329,03$ Hz (2nd modus getar kedua antenna pada arah lateral)
- $\omega_{12} = 407,52$ Hz (1st modus getar dinding struktur pada Y⁺ dalam arah sumbu y)
- $\omega_{13} = 557,34$ Hz (1st modus getar satelit pada dinding Y⁺ ke arah sumbu-z)
- $\omega_{14} = 583,07$ Hz (1st modus getar satelit pada dinding Y⁺ arah sumbu-x)
- $\omega_{15} = 787,01$ Hz (2nd modus getar satelit dalam arah sumbu-y)

Terlihat bahwa modulus getar yang paling rendah terjadi pada struktur lokal satelit di antenna UHF ke arah lateral dengan frekuensi 52,29 Hz. Sementara modulus getar satelit secara keseluruhan yang pertama adalah pada frekuensi 104 dan 106 Hz ke kedua arah lateral 151,47 Hz ke arah longitudinal. Jadi, karakteristik dinamik struktur satelit TUBSAT-LAPAN ini sudah memenuhi persyaratan roket peluncur PSLV, yaitu untuk 1st *global resonance frequency* dengan harga harus > 45 Hz untuk arah lateral dan >90 Hz untuk arah longitudinal. Hal ini diberikan

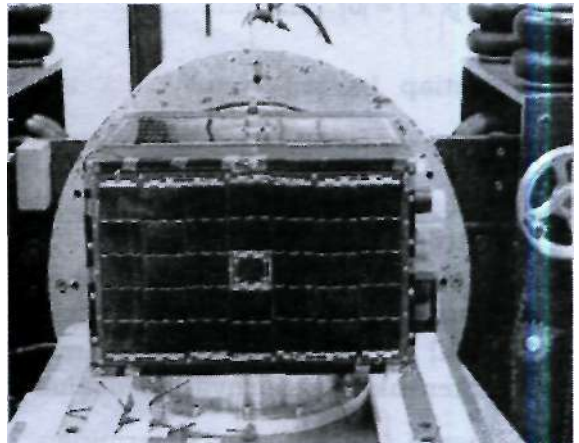
untuk menjamin bahwa struktur satelit tidak rusak bila terjadi getaran dari roket peluncur.

Bentuk modulus normal (*normal mode shape*) dari 1st modus getar struktur dinding satelit TUBSAT-LAPAN dalam arah lateral dan longitudinal adalah seperti yang ditunjukkan dalam Gambar-2-1 sampai dengan Gambar 4-3.

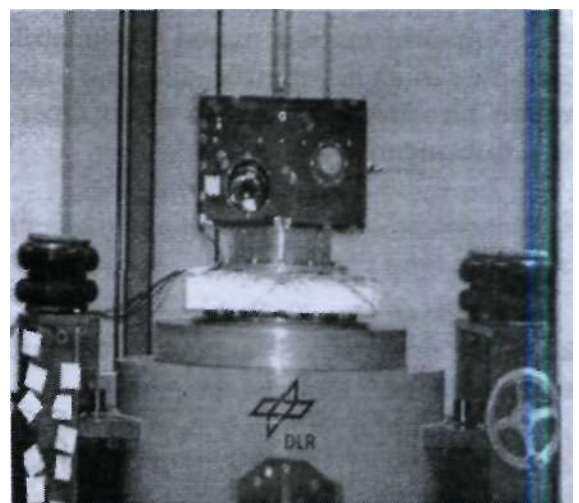
4 UJI GETAR

Uji getar dilakukan setelah integrasi satelit selesai dilakukan, dengan tujuan untuk memverifikasi kemampuan LAPAN-TUBSAT dalam menghadapi beban mekanik selama peluncuran, juga untuk mengukur frekuensi pribadi dari satelit.

Uji getar dilakukan di fasilitas milik DLR/Astrofeinwerk di Berlin, Jerman, pada bulan Mei 2005.



Gambar 4-1: Uji getar arah lateral



Gambar 4-2: Uji getar arah longitudinal

Kondisi test yang diminta oleh otoritas peluncur, yakni, ISRO, untuk uji getar sinusoid adalah sebagai berikut:

Tabel 4-1: PERSYARATAN UJI GETAR SINUS

	Frequency (Hz)	level
Axial axis (y)	5	8 mm (0 to peak)
	10-100	2,5 g
Lateral axis (x & z)	5	10 mm
	8-100	1,5g
Sweep rate		4 octave/min

Dan untuk uji getar random adalah :

Tabel 4-2: PERSYARATAN UJI GETAR RANDOM

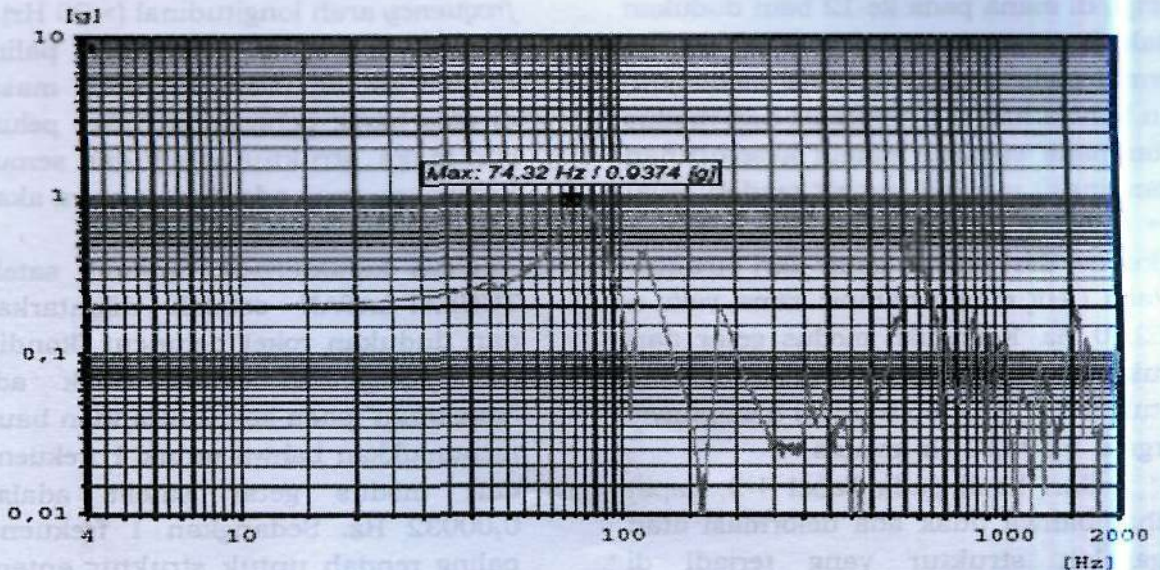
Axis	Frequency	level
x, y, z	20	0,002
	110	0,002
	250	0,034
	1000	0,034
	2000	0,009
level		6,7 grms
duration		1 min/axis

Sebanyak 11 *accelerometer* dipasang pada dinding luar satelit untuk membaca respon dinamik. Pada LAPAN-TUBSAT, muatan Sony camera mempunyai sistem peredam tersendiri, maka dipasang 2 *accelerometer* pada lensanya.

Test survei resonansi dilakukan dengan melihat bacaan *accelerometer* saat digetaran 0.2 g pada frekuensi 4-20.000 Hz dengan laju kenaikan 2 oct/min. Hasilnya adalah sebagai berikut:

Tabel 4-3: HASIL SURVEY RESONANSI

Axis	Accelerometer Position	Before Sine test	After Sine/Before Random test	After Random test
X	Main Structure	f0 = 79 Hz/ Q = 4	f0 = 74 Hz/ Q = 4	f0 = 75 Hz/ Q = 4
	Camera Baffle	f0 = 82 Hz/ Q = 9 f0 = 148 Hz/ Q =	f0 = 78 Hz/ Q = 10	f0 = 78 Hz/ Q = 10
Y	Main Structure	6 f0 = 99 Hz/ Q =	f0 = 148 Hz/ Q = 5 f0 = 102 Hz/ Q =	f0 = 148 Hz/ Q = 5 f0 = 100 Hz/ Q =
	Camera Baffle	10	15	14
Z	Main Structure	f0 = 73 Hz/ Q = 3	f0 = 72 Hz/ Q = 3	f0 = 72 Hz/ Q = 3
	Camera Baffle	f0 = 52 Hz/ Q = 5	f0 = 53 Hz/ Q = 5	f0 = 53 Hz/ Q = 5



Gambar 4-3: Plot hasil survey resonansi pada sumbu-x

5 PEMBAHASAN

Dari hasil analisis pemodelan FEM struktur satelit TUBSAT-LAPAN secara keseluruhan diperoleh harga f^{st} frequency (paling rendah) dari modus getar dalam arah lateral terjadi pada struktur antena UHF, yaitu pada frekuensi 52,29 Hz sampai dengan 52,31 Hz. Sedangkan harga 1 frekuensi modus getar dari struktur satelit keseluruhan dalam arah lateral adalah 104,09 Hz dan 106,41 Hz. Harga frekuensi lokal antena UHF satelitpun masih di atas harga persyaratan roket peluncur untuk f^{st} resonance frequency arah lateral (> 45 Hz).

Harga f^{st} frequency dari modus getar dalam arah longitudinal adalah 151,47 Hz. Harga ini juga jauh di atas persyaratan f^{st} resonance frequency arah longitudinal (>90 Hz).

Jadi, dengan pemodelan FEM struktur dinding satelit-bus dan antena UHF satelit TUBSAT-LAPAN, frekuensi paling rendah masih di atas harga persyaratan dari roket peluncur PSLV India. Struktur dinding satelit-bus dan komponen-komponen satelit yang ada di dalamnya masih aman terhadap f^{st} resonance frequency dari roket peluncur.

Untuk melihat karakteristik dinamik struktur satelit setelah dilontarkan dari kedudukan roket peluncur, maka perlu dilakukan analisis modus getar struktur satelit untuk kondisi terbang-bebas (*free-flying*), di mana pada ke-12 baut kedudukan tidak di *constraint*. Hasil analisis modus normal pada kondisi tersebut menunjukkan bahwa harga 1 frekuensi dari modus getar pada struktur satelit keseluruhan (kombinasi) menjadi sangat rendah, yaitu $f_0 = 0,00032$ Hz ke bawah. Sedangkan 1 frekuensi dari modus getar dari struktur antena UHF masih hampir sama, yaitu $f_0 = 52,30$ Hz. Kemudian modus getar dari struktur satelit keseluruhan/kombinasi untuk order yang lebih tinggi mempunyai harga $f_0 = 396,81$ Hz ke atas.

Dari hasil pada Tabel 4-3, dapat dilihat bahwa tidak ada deformasi atau kegagalan struktur yang terjadi di LAPAN-TUBSAT. Sedikit perubahan pada

frekuensi resonansi dari kamera Sony kearah sumbu x adalah karena sistem peredam mengalami kesetimbangan baru. Resonansi local di frekuensi 28 Hz diketahui terjadi pada *reaction wheel*, namun hal tersebut sudah diantisipasi oleh sistem peredam yang terdapat didalamnya. Uji fungsional pada semua komponen satelit setelah uji vibrasi menunjukkan bahwa tidak ada degradasi fungsi karena getaran. Demikian juga frekuensi resonansi telah diverifikasi, yakni jauh diatas persyaratan PSLV.

6 KESIMPULAN

Dari analisis modus getar struktur satelit TUBSAT-LAPAN dengan bahan Al-Alloy 2024 T351 dan antena dari bahan *Stainless Steel* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- o Pada pemodelan FEM satelit LAPAN-TUBSAT diperoleh harga 1 frekuensi dari modus getar dari struktur lokal antena paling rendah adalah 52,29 Hz dalam arah lateral, dan 1 frekuensi secara global adalah 104,09 Hz dalam arah lateral. Harga 1 frekuensi struktur antena dan satelit masih di atas harga persyaratan roket peluncur f^{st} resonance frequency arah lateral, yaitu > 45 Hz. Sementara, 1 frekuensi dalam arah longitudinal adalah 151,47 Hz. Harga ini di atas persyaratan f^{st} resonance frequency arah longitudinal (> 90 Hz).
- o Karena frekuensi resonansi paling rendah satelit TUBSAT-LAPAN masih di atas harga persyaratan roket peluncur, maka, struktur satelit dan semua komponen yang ada di dalamnya akan aman dalam peluncuran PSLV.
- o Analisis karakteristik dinamik satelit TUBSAT-LAPAN setelah dilontarkan dari kedudukan roket peluncur (kondisi *free flying*), di mana tidak ada *constraint* pada ke-12 tumpuan baut, menunjukkan bahwa untuk 1 frekuensi dari modus getar satelit adalah 0,00032 Hz. Sedangkan 1 frekuensi paling rendah untuk struktur antena UHF adalah 52,30 Hz.

Dari uji getar satelit LAPAN-TUBSAT disimpulkan bahwa:

- Hasil pemodelan FEM mendekati hasil pengukuran frekuensi resonansi LAPAN-TUBSAT, keduanya menunjukkan bahwa LAPAN-TUBSAT memenuhi persyaratan operasi PSLV
- Perbedaan frekuensi yang terjadi karena pemodelan tiak menggunakan material *property* yang persis sama dengan LAPAN-TUBSAT, terutama pada komponen-komponenya dimana dimodel sebagai masa pejal.
- Telah dibuktikan bahwa LAPAN-TUBSAT akan mampu bertahan dalam kondisi yang diantisipasi dalam peluncuran dengan safety margin 1,25 (*qualification level*)

DAFTAR PUSTAKA

Cook.R.D., Malkus.D.S., and Plesha,M.L, 1984. *Concepts and Application of Finite Element Analysis*, 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York-USA.

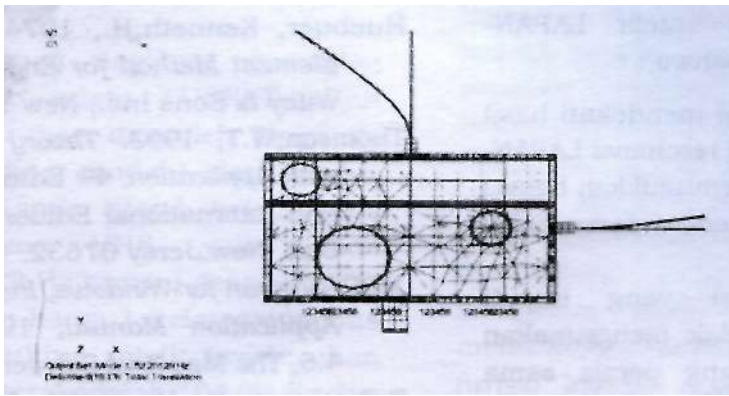
Huebner, Kenneth.H., 1974. *The Finite Element Method for Engineers*, John Wiley & Sons Inc., New York.

Thomson.W.T, 1993. *Theory of Vibration with Application*, 4th Edition, Prentice-Hall International Edition, Englewood Cliff, New Jersey 07632.

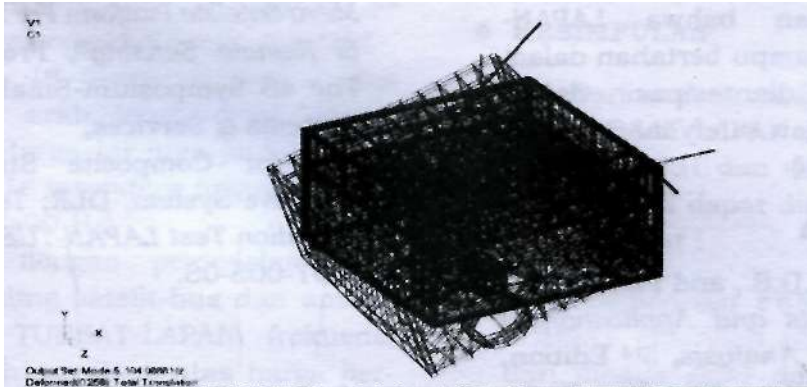
MSC/Nastranfor Windows, Installation and Application Manual, 1994. Version 4.5, The Mac.Neal Schwendler Co..

Triharjanto, R.; Hasbi, W.; Widipaminto, A.; Mukhayadi, M.; Renner, U., September 2004. *LAPAN-TUBSAT : Micro-Satellite Platform For Surveillance & Remote Sensing*", Proceeding of The 4S Symposium-Small Satellites Systems & Services,

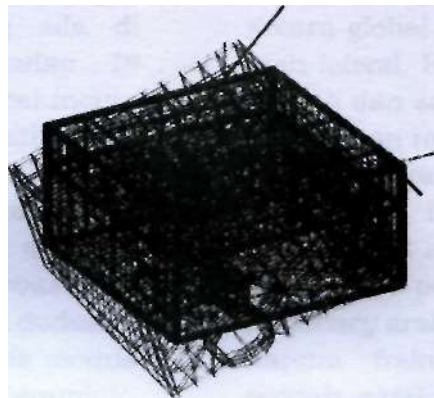
Institute for Composite Structure & Adaptive System, DLR; *Test Report : Vibration Test LAPAN-TUBSAT*, DLR-MDT-005-05.



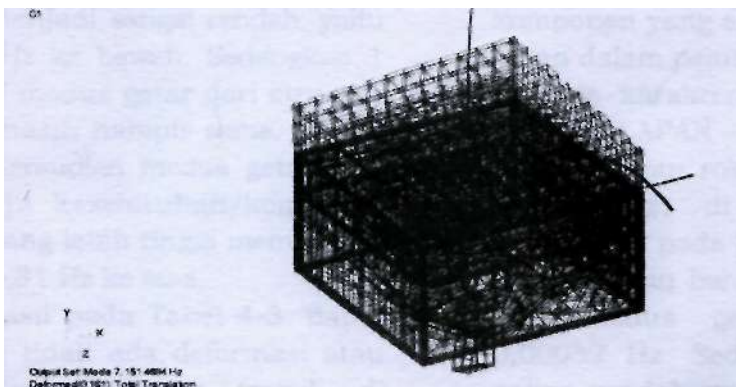
Gambar 1: Modus normal untuk frekuensi 52.29 Hz (1st modus getar untuk struktur antena UHF dalam arah bidang- xy)



Gambar 2: Modus normal untuk frekuensi 104,09 Hz (1st modus getar dalam arah lateral terhadap sumbu-x)



Gambar3: Modus normal untuk frekuensi 106,41 Hz (1st modus getar dalam arah lateral terhadap sumbu-z)



Gambar 4: Modus normal untuk frekuensi 151,47 Hz (1st modus getar dalam arah longitudinal terhadap sumbu-y)