

ANALISIS KARAKTERISTIK DINAMIK STRUKTUR ROKET BERTINGKAT RX-420/RX-250 PADA KONDISI "FREE- FLYING" DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Setiadi

Peneliti Pusat Teknologi Wahana Dirgantara, LAPAN
e-mail : seti1159@biz.net.id

ABSTRACT

In this research, the dynamics characteristic data analysis was be carried out on the two stages rockets RX-420/RX-250 structures by using a software based on Finite Element Methods. This analysis is conducted on "free-flying" condition. The RX-420 rocket motor used as booster and the RX-250 rocket motor as sustainer of that two stages rocket, respectively. During structures dynamics analysis, the liner, inhibitor and rocket propellant structures mode shapes also calculated. Normal mode analysis results show that the 1st natural frequencies two stages rocket structures are $\omega \leq 8.45076E-4$ Hz for the first up to sixth mode shapes. Influences on payload structures will detect at the 1st natural frequencies of the rocket structures on $\omega = 14,50862$ Hz and $\omega = 47,08226$ Hz, in lateral or vertical directions. The 1st natural frequencies of the fins structures are $\omega = 55.50$ Hz to $\omega = 56.97$ and $\omega = 71,22$ Hz to $\omega = 73,83$ Hz which depict of the rocket booster and sustainer fins structures, respectively. In longitudinal, lateral and rotational directions, the 1st natural frequencies on the whole propellant rocket structures are of $\omega = 75,14$ Hz to $\omega = 77.30$ Hz.

ABSTRAK

Dalam penelitian ini dilakukan analisis *karakteristik* dinamik struktur roket pada roket bertingkat RX-420/RX-250 ketika kondisi roket sedang terbang bebas lepas dari peluncur roket (*Free-Flying*), dengan bantuan perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga. Pada roket bertingkat ini motor roket RX-420 digunakan sebagai "*booster*", sedangkan untuk "*sustainer*" digunakan motor roket RX-250. Dalam analisis ini modus getar dari struktur *liner*, *propelan* dan *inhibitor* ikut dihitung. Hasil analisis modus normal, harga frekuensi alami modus-getar orde satu untuk struktur roket bertingkat ini pada bentuk modus pertama sampai bentuk modus ke enam harganya $\omega \leq 8.45076E-4$ Hz. Pengaruh modus getar dari struktur roket bertingkat ini terhadap struktur muatan akan terasa pada harga $\omega = 14,50862$ Hz dan $\omega = 47,08226$ Hz, baik dalam arah *lateral* maupun *vertikal*. Harga natural frekuensi modus getar orde satu untuk struktur sirip dari *booster* berada pada harga $\omega = 55.50$ Hz s/d $\omega = 56.97$, sedangkan harga frekuensi alami modus getar orde satu untuk struktur sirip dari *sustainer* berada pada harga $\omega = 71,22$ Hz s/d $\omega = 73,83$ Hz. Untuk struktur *propelan booster* dan *sustainer* harga 1st frekuensi alami modus getar berada pada $\omega = 75,14$ Hz sampai dengan $\omega = 77.30$ Hz, baik untuk gerakan arah *longitudinal*, vertikal dan rotasi.

Kata kunci: *Karakteristik dinamik, RX-420/RX-250, Frekuensi alami, Metode elemen hingga*

1 PENDAHULUAN

Uji terbang roket RX-420 telah dilakukan pada tanggal 2 Juli 2009, di Instalasi Uji Terbang LAPAN, Pameungpeuk, Garut, Jawa Barat. Roket yang berdiameter 400 mm dan panjang 6,2 m tersebut

merupakan roket terbesar yang dibuat dan diluncurkan oleh LAPAN dalam 10 tahun terakhir. Dengan bobot mendekati 1000 kg, RX-420 diprediksi terbang dengan jarak jangkauan hingga 101 km, dan prediksi ketinggian 53 km. Keber-

hasilan peluncuran ini menjadi pembuka jalan menuju Raket Pengorbit Satelit (RPS) atau *Satellite Launch Vehicle* (SLV) yang direncanakan LAPAN meluncur pada tahun 2014. Dalam konfigurasi RPS ini, RX-420 merupakan struktur utama. Berkaitan dengan desain aerodinamik roket, maka masih harus ada koreksi di sana-sini mengingat laju terbang roket masih kurang mulus.

Motor roket RX-420 merupakan salah satu motor roket terbaru yang saat ini sedang dikembangkan di LAPAN. Material tabung motor roket tersebut menggunakan *Stainless Steel* 17.7PH. Terakhir sebelum uji terbang dilakukan, persediaan tabung motor roket yang ada adalah diameter 400 mm (masuk kategori RX-420) dan 240 mm (masuk kategori RX-250). Untuk mengejar pencapaian ketinggian terbang ataupun jangkauan-terbang, motor roket RX-420 ini akan dicoba digabungkan dengan motor roket RX-250 sebagai *sustainer*, menjadi roket bertingkat RX-420/RX-250. Panjang roket bertingkat ini total menjadi 8.851 mm.

Hal yang menarik untuk diteliti di sini adalah perlu mengetahui data karakteristik dinamik dari struktur seluruh roket bertingkat ini, terutama harga-harga *eigenvalues* dan *eigenvector* pada modus getar order-satu (1^{st} *natural frequency*) dari struktur roket, agar komponen-komponen muatan roket (*payload*) yang akan dibawa roket cukup aman terhadap kemungkinan terjadinya 1^{st} resonansi getaran orde satu.

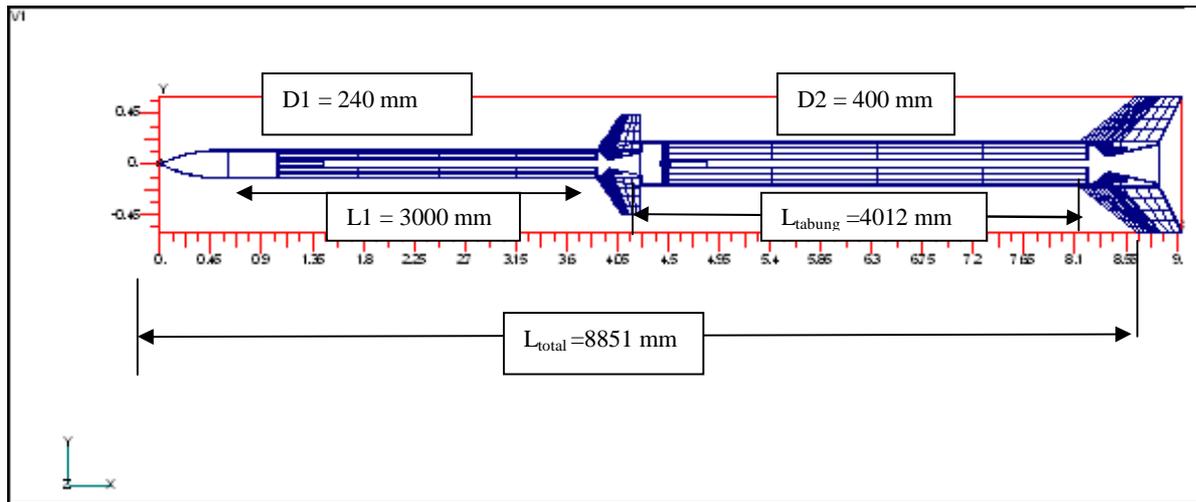
Dari pandangan sisi struktur, sebagai roket bertingkat RX-420/RX-250 pengaruh yang sangat terasa adalah terjadinya penurunan harga kekakuan struktur gabungan roket bertingkat ini dibandingkan dengan harga kekakuan dari masing-masing struktur roket. Hal ini disebabkan rasio panjang dan diameter roket atau harga ($\text{Length}/\text{Diameter}-L/D$) roket bertingkat menjadi lebih besar. Analisis karakteristik dinamik struktur roket ini akan dilakukan ketika kondisi roket sedang terbang bebas lepas dari peluncur roket (*Free-Flying*), dengan

bantuan perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga.

Data karakteristik dinamik struktur roket sebenarnya dapat diperoleh selain dengan analisis dinamika struktur, yaitu juga dapat dilakukan dengan uji-dinamik model struktur roket. Namun demikian, harga-harga *eigen* dan modus getar seluruh struktur roket bertingkat ini dengan lebih cepat dan lebih murah biayanya dapat diperoleh dengan melakukan analisis Modus Normal menggunakan bantuan perangkat lunak *Nastran* versi Windows (MSC/Nastran for Windows, 1994). Hasil analisis ini sangat diperlukan, terutama pada tahap perancangan awal struktur roket, untuk memperoleh rancangan konfigurasi yang optimal.

2. LANDASAN TEORI MODUS NORMAL STRUKTUR

Konfigurasi keseluruhan struktur roket bertingkat RX-420/RX-250 yang akan dianalisis adalah seperti yang terlihat dalam Gambar 2-1. Dalam analisis modus normal diambil material struktur tabung *booster* roket RX-420 dari bahan *Stainless Steel* 17.7PH dengan panjang $L = 4012$ mm, diameter OD = 400 mm dan tebal $t = 3$ mm. Untuk material struktur nosel dan *cap* roket digunakan Baja Karbon S-45C. Material tabung dudukan sirip, keempat buah sirip dan sepatu sirip serta struktur *igniter* dari bahan Aluminium Al-6061T651. Untuk struktur *sustainer* roket RX-250, tabung motor yang digunakan juga dari material *Stainless Steel* 17.7PH, dengan panjang $L = 3000$ mm, diameter OD = 240 mm dan tebal $t = 2,04$ mm. Untuk material struktur nosel dan *cap* digunakan Baja Karbon S-45C. Material tabung dudukan sirip, keempat buah sirip dan sepatu sirip serta struktur *igniter* dari bahan Aluminium Al-6061T651. Material struktur *nose-cone* terbuat dari bahan *Glass-Fiber Reinforced Plastics* (GFRP). Panjang total roket bertingkat ini sebesar 8.851 mm. Dalam analisis struktur di sini material bahan *liner* dan *inhibitor* akan ikut diperhitungkan.



Gambar 2-1: Konfigurasi struktur roket bertingkat RX-420/RX-250

Analisis Modus Normal pada struktur roket bertingkat RX-420/RX-250 dilakukan dengan membuat pemodelan pada seluruh struktur (Huebner, Kenneth, H., 1974; Cook, R.D., Malkus, D. S., and Plesha, M.I., 1984) seperti yang terlihat pada Gambar 2-2. Jumlah keseluruhan elemen yang dihasilkan dari model Metode Elemen Hingga ini adalah 12.980 elemen dan 18.400 nodal.

Untuk analisis Modus Normal, tinjau persamaan getaran dari struktur roket dengan kondisi tidak teredam dan tidak ada beban luar, dalam domain frekuensi dapat dituliskan persamaan diferensial orde-dua :

$$[M] \cdot \{\ddot{X}\} + [K] \cdot \{X\} = 0 \quad (2-1)$$

dengan:

[M] = matriks massa elemen

[K] = matriks kekakuan (*stiffness*)

$\left\{ \begin{matrix} \ddot{X} \\ X \end{matrix} \right\}$ = matriks amplitudo getaran dari nodal

Dengan mengambil nilai $X_i = a_i \sin(\omega t - \alpha)$, dimana : $i = 1, 2, \dots, n$
Atau dalam notasi vector:

$$\{X\} = \{a\} \sin(\omega t - \alpha) \quad (2-2)$$

a_i disini adalah *amplitudo* getaran dari koordinat ke- i , dan n adalah jumlah derajat kebebasan, sedangkan ω adalah frekuensi getaran struktur. Dengan mensubstitusikan persamaan (2-2) ke dalam persamaan (2-1) memberikan persamaan sebagai berikut:

$$[[K] - \omega^2 [M]] \{a\} = \{0\} \quad (2-3)$$

Formulasi persamaan (2-3) adalah masalah matematis yang dikenal sebagai "*eigenproblem*". Solusi *nontrivialnya*, yaitu solusi dimana tidak semua harga $a_i = 0$, memerlukan determinan dari faktor-faktor matriks $\{a\}$ sama dengan nol (Paz Mario, 1987 ; Pepper, D.W., Heinrich, J. C, 1992), oleh karena itu

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (2-4)$$

Pada umumnya jawaban persamaan (2-4) mempunyai bentuk persamaan polynomial derajat n dalam besaran ω^2 , yang harus mempunyai n buah harga ω^2 , yang memenuhi persamaan (2-4) tersebut. *Polynomial* ini dikenal sebagai *persamaan karakteristik* dari sistem, dimana setiap harga ω^2 yang memenuhi persamaan (2-4), kita dapat menyelesaikan persamaan (2-3) untuk mendapatkan konstanta-konstanta a_1, a_2, \dots, a_n .

Dengan mengambil gerak harmonis pada persamaan (2-3), dan menggantikan $[f] = [K]^{-1}$, akan didapat:

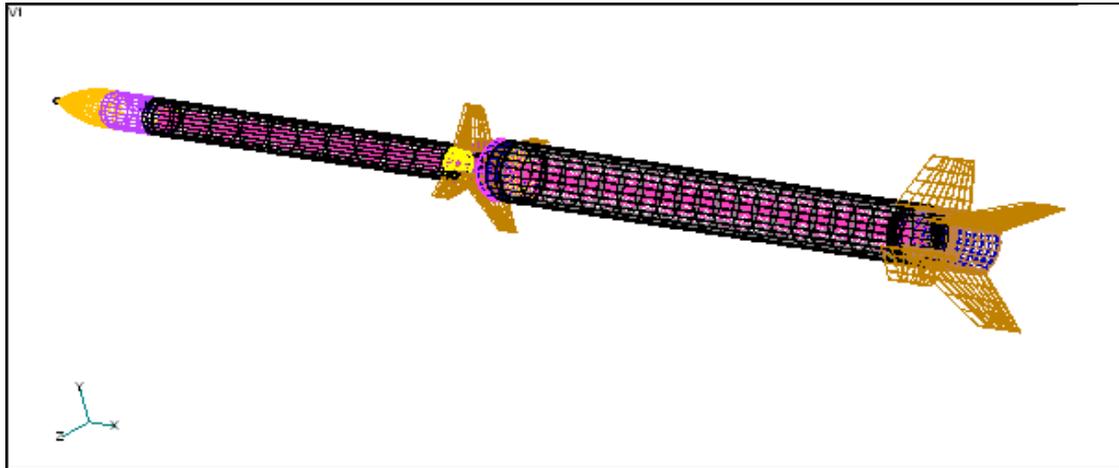
$$\{a\} = \omega^2 [f] [M] \{a\} \quad (2-5)$$

atau

$$1/\omega^2 \{a\} = [D] \{a\}, \quad (2-6)$$

di mana $[D]$ dikenal dengan nama *matriks dinamis* (dynamic matrix) yang didefinisikan sebagai berikut:

$$[D] = [f] [M] \quad (2-7)$$



Gambar 2-2: Pemodelan FEM struktur roket bertingkat RX-420/RX-250, dengan 12.980 elemen dan 18.400 nodal

Persamaan (2-6) dapat juga dituliskan sebagai berikut.

$$[[D] - 1/\omega^2 [I]] \{a\} = 0, \quad (2-8)$$

$[I]$ adalah matriks satuan dengan diagonal utamanya mempunyai elemen-elemen satu dan elemen-elemen lainnya nol. Untuk solusi nontrivial dari persamaan (2-8), diperlukan determinan dari koefisien matriks $[a]$ sama dengan nol, yaitu

$$|[D] - 1/\omega^2 [I]| = 0, \quad (2-9)$$

Persamaan (2-9) adalah polynomial derajat n dengan besaran $1/\omega^2$. Polynomial ini adalah persamaan karakteristik dari sistem untuk formula fleksibilitas. Untuk setiap satu harga dari n buah solusi dengan besaran $1/\omega^2$ dari persamaan (2-9), bisa diperoleh dari solusi persamaan (2-8), yang merupakan konstanta-konstanta dari amplitudo a_i (Paz Mario, 1987).

3 ANALISIS HARGA EIGEN PADA STRUKTUR

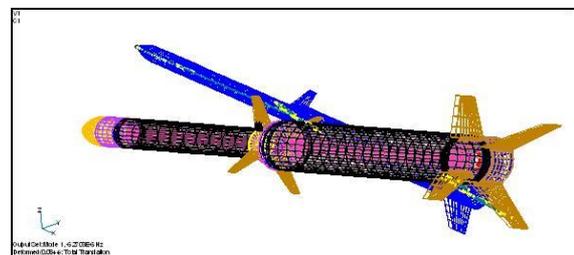
Analisis harga *eigen* struktur roket pada kondisi terbang-bebas (*Free Flying*) dilakukan dengan tidak membuat "*constraint*" pada model struktur roket bertingkat tersebut. Kemudian dengan menggunakan perangkat lunak *Nastran* versi *Windows* untuk analisis Modus Normal struktur, besarnya harga *eigen* dari struktur roket dapat dianalisis (MSC/*Nastran for Windows*, 1994),

terutama pada beberapa modus getar untuk frekuensi yang rendah.

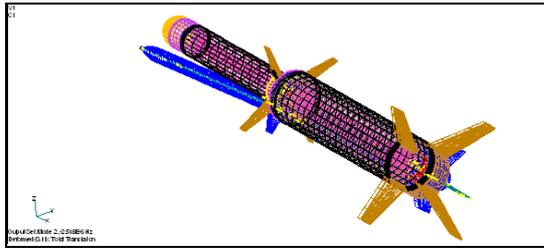
Hasil analisis harga *eigen* struktur roket bertingkat ini, digambarkan pada Gambar 3-1 sampai 3-10.

Selanjutnya gerakan pada bagian struktur sirip, *propelan*, *booster* dan *sustainer*, dijelaskan seperti di bawah ini:

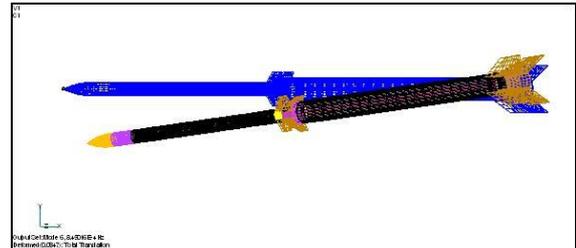
- $\omega = 55.50228$ Hz s.d 56.9765 Hz (gerakan struktur sirip roket *booster*)
- $\omega = 71.7058$ Hz s.d 73.8290 Hz (gerakan struktur sirip roket *sustainer*)
- $\omega = 75.1424$ Hz s.d 75.1964 Hz (gerakan lentur dan rotasi *order-satu* pada struktur *propelan booster*).
- $\omega = 76.9762$ Hz s.d 77.2995 Hz (gerakan lentur dan rotasi *order-satu* pada struktur *propelan sustainer*)
- $\omega = 78.2271$ Hz s.d $\omega = 78.2860$ Hz (gerakan lentur *order-dua* arah 45° terhadap bid-XY dari seluruh struktur *sustainer* dan *booster* roket)



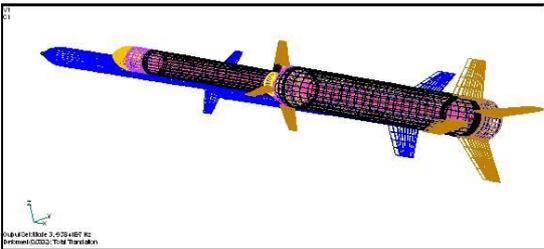
Gambar 3-1: Bentuk-modus untuk *eigenvalue* $\omega = -6.2703E-6$ Hz gerakan seluruh struktur roket dalam arah 45° terhadap bid. XZ, dengan bertumpu pada daerah tabung *booster*



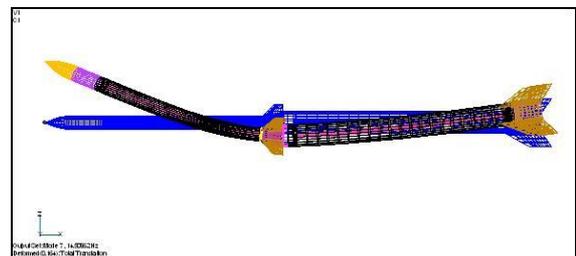
Gambar 3-2: Bentuk-modus untuk harga $\omega = 2.518E-6$ Hz, gerakan lentur seluruh struktur roket dalam bid.XY disertai rotasi thd sb-X



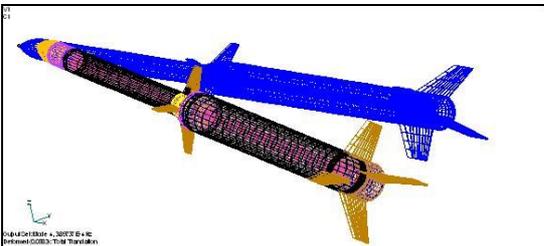
Gambar 3-6: Bentuk-modus untuk $\omega = 8.4501E-4$ Hz, dari gerakan seluruh struktur roket arah 45° terhadap bid-XY, dengan bertumpu pada daerah bagian belakang tabung booster



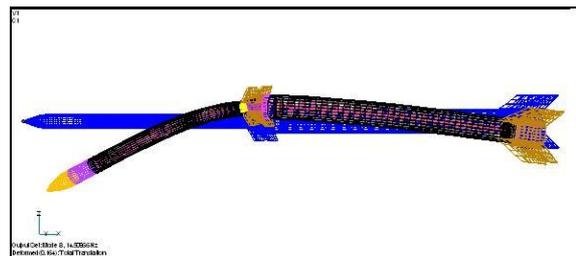
Gambar 3-3: Bentuk-modus untuk harga $\omega = -9.7841E-7$ Hz, berbentuk gerakan arah longitudinal dalam arah sb-X seluruh struktur roket dan sedikit rotasi terhadap sb-X



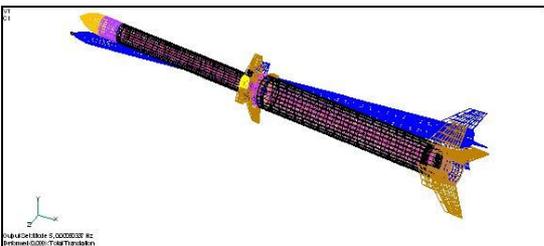
Gambar 3-7: Bentuk-modus untuk $\omega = 14,50862$ Hz, dari gerakan lentur seluruh struktur roket arah 45° terhadap bid-XY, terutama struktur dari sustainer, dengan bertumpu pada daerah tabung sustainer dan booster



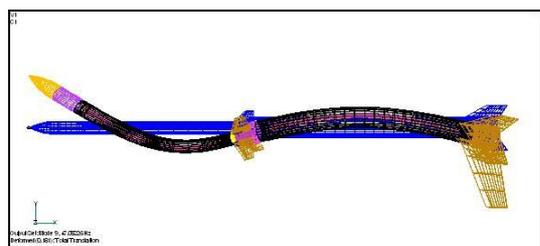
Gambar 3-4: Bentuk-modus untuk harga $\omega = 3.8973E-4$ Hz, berbentuk gerakan lentur seluruh struktur roket pada arah 45° terhadap bid-XY dan bertumpu pada daerah nose-cone



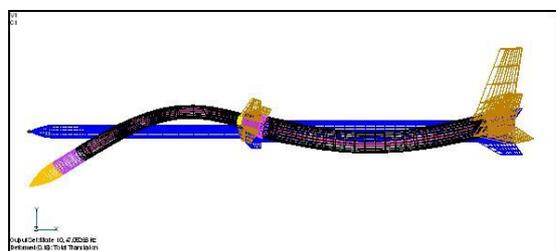
Gambar 3-8: Bentuk-modus untuk $\omega = 14,50886$ Hz, dari gerakan seluruh struktur roket arah 45° terhadap bid-XZ, dengan bertumpu pada daerah tabung sustainer dan booster



Gambar 3-5: Bentuk-modus untuk harga $\omega = 5.0337E-4$ Hz, gerakan letur arah 45° dalam bid-XZ pada seluruh struktur roket, dengan tumpuan pada daerah sambungan antara booster dan sustainer



Gambar 3-9: Bentuk-modus untuk eigenvalue $\omega = 47,08226$ Hz, dari gerakan lentur seluruh struktur roket arah 45° terhadap bid-XY, terutama struktur dari *sustainer*, dengan bertumpu pada daerah tabung *sustainer* dan *booster*



Gambar 3-10: Bentuk-modus untuk eigenvalue $\omega = 47,08268$ Hz, dari gerakan lentur seluruh struktur roket arah 45° terhadap bid-XZ, terutama struktur dari *sustainer*, dengan bertumpu pada daerah tabung *sustainer* dan *booster*

4 PEMBAHASAN HASIL ANALISIS MODUS NORMAL

Untuk kondisi "terbang bebas" setelah keluar dari peluncur roket, harga frekuensi alami modus getar orde satu untuk seluruh struktur roket bertingkat RX-420/RX-250 ini sampai bentuk modus (*modes shapes*) ke enam menjadi sangat rendah sekali, yaitu $\omega \leq 8.4501E-4$ Hz. Hal ini menunjukkan bahwa untuk kondisi terbang bebas komponen-komponen muatan sangat aman pada *modus-modus* getar pada orde rendah terhadap terjadinya resonansi getaran dari struktur roket.

Pengaruh getaran dari struktur roket terhadap struktur muatan roket akan terasa pada modus getar pada harga frekuensi alami orde satu $\omega = 14,50862$ Hz

dan $\omega = 14,50886$ Hz, serta $\omega = 47,08226$ Hz dan $\omega = 47,08268$ Hz, dalam arah *lateral* maupun *vertikal*. Harga frekuensi alami modus getar orde satu dari seluruh struktur roket bertingkat ini terlihat menurun sekali dibandingkan harga eigen masing-masing *struktur sustainer* maupun *booster* (struktur roket RX-420 $\omega = 61,21$ Hz dan struktur roket RX-250 $\omega = 60,64$ Hz). Hal ini terutama disebabkan harga kekakuan struktur roket bertingkat ini menurun karena harga L/D roket membesar menjadi 25,9. Sebelumnya untuk struktur roket RX-250 harga $L_1/D_1 = 15,3$ dan roket RX420 harga $L_2/D_2 = 10,94$.

Dari hasil analisis struktur roket bertingkat secara keseluruhan diperoleh massa total struktur roket sebesar 1053,06 kg. Gambar 3-1 sampai dengan Gambar 3-10 menunjukkan bentuk *modus* getar pada harga-harga eigen dari $\omega = -6.2703E-6$ Hz sampai dengan $\omega = 47,08268$ Hz.

Untuk keamanan struktur muatan roket (*payload*), harga frekuensi alami orde satu dari struktur komponen-komponen muatan roket harus mempunyai harga di atas 100 Hz, agar tidak terjadi resonansi dengan struktur roket bertingkat ini.

5 KESIMPULAN

Dari perhitungan harga *eigen* seluruh struktur roket bertingkat RX-420/RX-250 ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Untuk kondisi "terbang bebas", harga frekuensi alami modus getar orde satu untuk seluruh struktur roket bertingkat ini, pada bentuk modus pertama sampai bentuk modus (*modes shapes*) ke enam menjadi sangat rendah sekali, yaitu $\omega \leq 8.4501E-4$ Hz. Hal ini menunjukkan bahwa komponen-komponen muatan roket menjadi sangat aman terhadap terjadinya *resonansi getaran* dari struktur roket.
- Pengaruh getaran dari struktur roket terhadap struktur muatan roket akan terasa pada modus getar pada harga

frekuensi alami orde satu $\omega = 14,50862$ Hz dan $\omega = 14,50886$ Hz, serta $\omega = 47,08226$ Hz dan $\omega = 47,08268$ Hz, dalam arah *lateral* maupun *vertikal*. Harga 1st frekuensi alami modus getar dari seluruh struktur roket bertingkat ini terlihat menurun sekali dibandingkan harga *eigen* masing-masing *struktur sustainer* maupun *booster* (struktur roket RX-420 $\omega = 61,21$ Hz dan struktur roket RX-250 $\omega = 60,64$ Hz). Hal ini terutama disebabkan harga kekakuan struktur roket bertingkat ini menurun karena harga L/D roket menjadi bertambah besar.

- Dari hasil analisis struktur roket bertingkat secara keseluruhan diperoleh massa total sebesar 1053,06 kg. Harga frekuensi alami modus getar orde satu dari struktur sirip *roket booster* sebesar $\omega = 55.50228$ Hz s.d 56.9765 Hz. Sedangkan harga frekuensi alami *modus getar* orde satu dari struktur sirip *roket sustainer* sebesar $\omega = 71.7058$ Hz s.d 73.8290 Hz. Untuk struktur *propelan roket* didapatkan harga frekuensi alami *modus getar* orde satu sebesar $\omega = 75.1424$ Hz s.d 75.1964 Hz untuk *roket booster* dan $\omega = 76.9762$ Hz s.d 77.2995 Hz untuk *roket sustainer*. Oleh karena itu untuk keamanan struktur

muatan roket (*payload*), harga frekuensi alami orde satu dari struktur komponen-komponen muatan roket harus mempunyai harga di atas 100 Hz, agar tidak terjadi resonansi dengan struktur roket bertingkat ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Cook, R. D., Malkus, D. S., and Plesha, M. I., 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.
- Paz Mario, 1987. *Structural Dynamic Theory and Computation*. 2nd Edition. Alih bahasa oleh A.P. Manu. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Pepper, D.W., Heinrich, J.C., 1992. *The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications*, Hemisphere Publishing Co., Washington-Philadelphia-London.
- "MSC/Nastran for Windows, Installation and Application Manual", Version 1.0, The Mac.Neal Schwendler Co., 1994.