

KARAKTERISTIK DINAMIK STRUKTUR ROKET RKN BERTINGKAT PADA KONDISI TERBANG-BEBAS (*FREE FLYING*)

Sugiarmadji HPS

Peneliti Pusat Teknologi Wahana Dirgantara, LAPAN
e-mail: sugiarmaji@yahoo.com

ABSTRACT

Dynamic Characteristic Data of a rocket structure, such as eigenvalues and eigenvectors (mode shapes), are needed to protect the payload components' safety to the 1st frequency resonance of rocket structures. Here, dynamic characteristic data analysis for the RKN Two-Stages rocket structures will be conducted by using a software based on a Finite Element Methods-FEM. On "free-flying" conditions, normal mode analysis results show that the 1st natural frequency of the RKN rocket from the first up to sixth mode shapes are of $\omega \leq 5.56895E-4$ Hz. It means that payload components are safe to the 1st natural frequency of the rocket structures. The 1st natural frequency of rocket structures will give influence to the payload components in lateral and vertical directions at higher than $\omega = 134$ Hz.

Key words: *Eigenvalues, Eigenvector, Normal Modes, Natural Frequency*

ABSTRAK

Data karakteristik dinamik struktur suatu roket, seperti besarnya "*eigenvalues*" dan "*eigenvectors*" (*mode shapes*), penting sekali diketahui untuk keamanan terhadap struktur muatan yang dibawa oleh roket tersebut. Hal ini terutama untuk dapat menghindari terjadinya resonansi yang mungkin terjadi, antara frekuensi-alami dari struktur muatan terhadap frekuensi-alami dari struktur roket. Untuk melakukan analisis karakteristik dinamik akan digunakan perangkat lunak berbasis Metoda Elemen Hingga. Dari hasil analisis modus normal struktur roket RKN bertingkat untuk kondisi "terbang bebas", nilai frekuensi-alami modus-getar orde-1 untuk seluruh struktur roket pada bentuk-modus pertama sampai bentuk-modus ke enam nilainya cukup rendah sekali, yaitu $\omega \leq 5.56895E-4$ Hz. Hal ini menunjukkan bahwa komponen muatan sangat aman sekali terhadap terjadinya resonansi modus getar dari struktur roket. Pengaruh modus getar dari struktur roket terhadap struktur muatan akan mulai terasa pada nilai $\omega = 134,48$ Hz ke atas.

Kata Kunci: *Eigenvalues, Eigenvector, Modus Normal, Frekuensi Alami*

1 PENDAHULUAN

Motor roket RKN berdiameter 203 mm merupakan salah satu motor roket terbaru yang saat ini dicoba dikembangkan oleh LAPAN. Di sini material tabung motor roket menggunakan Aluminium Alloy Al-6061T651. Untuk mengejar pencapaian ketinggian terbang ataupun jangkauan-terbang, motor roket RKN dibuat bertingkat dengan motor roket berdiameter yang

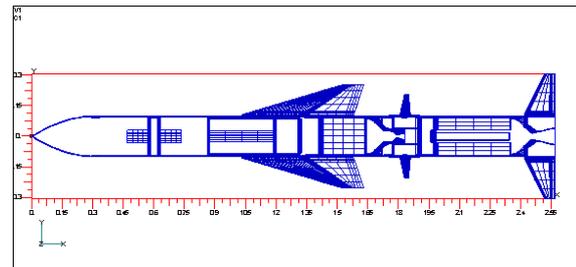
sama sebagai *sustainer*, menjadi roket RKN bertingkat. Tabung motor *sustainer* dari roket RKN yang digunakan juga dari material Aluminium Alloy Al-6061T651. Panjang roket-RKN bertingkat ini total menjadi 2.570 mm. Roket bertingkat RKN dilengkapi dengan Tabung Separasi berisi Parasut dan 2 (dua) buah Tabung Muatan (*Payload*), yang masing-masing membawa muatan seberat 5 kg.

Hal yang menarik untuk diteliti adalah perlu mengetahui data karakteristik dinamik dari struktur seluruh roket RKN bertingkat ini, terutama nilai eigen (*eigenvalues*) dan vektor eigen (*eigenvector*) pada modus getar orde-1 (*1st natural frequency*) dari struktur roket, agar komponen muatan roket yang akan dibawa roket cukup aman terhadap kemungkinan terjadinya resonansi getaran orde-1. Analisis karakteristik dinamik struktur roket dilakukan ketika kondisi roket sedang terbang bebas, lepas dari peluncur roket (*Free-Flying*), dengan bantuan perangkat lunak berbasis Metoda Elemen Hingga (FEM), Nastran versi Windows. Untuk memudahkan analisis, maka masing-masing muatan, sistem parasut dan sistem gyro penggerak sirip Canard akan digantikan dengan "*lump masses*".

Data karakteristik dinamik struktur roket sebenarnya dapat diperoleh selain dengan analisis dinamika struktur juga dapat dilakukan dengan uji-dinamik model struktur roket. Namun demikian, nilai eigen dan modus getar seluruh struktur roket bertingkat ini akan lebih cepat dan jauh lebih murah biayanya dengan melakukan analisis modus normal menggunakan bantuan perangkat lunak Nastran tersebut. Hasil analisis sangat diperlukan, terutama pada tahap perancangan-awal (*preliminary design*) struktur roket, untuk memperoleh rancangan konfigurasi yang optimal, terutama untuk memberikan batas nilai frekuensi alami orde-1 dari struktur muatan roket. Di samping itu, nilai eigen ini sangat dibutuhkan pada waktu menentukan nilai turunan stabilitas dinamik roket (*dynamic stability derivatives*)

2 MODUS NORMAL STRUKTUR ROKET-RKN

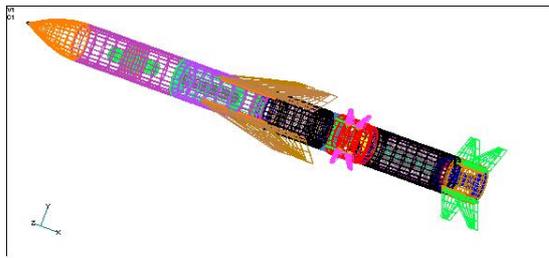
Konfigurasi keseluruhan struktur roket-RKN yang akan dianalisis adalah seperti yang terlihat dalam Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Konfigurasi struktur roket-RKN bertingkat

Dalam analisis modus normal diambil material struktur tabung *booster* roket RKN dari bahan Aluminium Alloy Al-6061T651, dengan panjang $L = 463$ mm, diameter OD = 203 mm dan tebal $t = 6,5$ mm. Untuk material struktur nosel dan cap roket digunakan Baja Karbon S-45C. Material tabungudukan sirip, keempat buah sirip dan sepatu sirip serta struktur igniter dari bahan Aluminium Alloy Al-6061T651. Sedangkan untuk struktur *sustainer*, tabung motor yang digunakan juga dari material Aluminium Alloy Al-6061T651, dengan panjang $L = 302$ mm, diameter OD = 203 mm dan tebal $t = 6,5$ mm. Untuk material struktur nosel dan cap digunakan Baja Karbon S-45C. Material tabungudukan sirip, keempat buah sirip dan sepatu sirip serta struktur igniter dari bahan Aluminium Alloy Al-6061T651. Material tabung payload dan tabung separasi digunakan bahan Aluminium Alloy Al-6061T651. Material struktur nose-cone terbuat dari bahan *GlassFiber Reinforced Plastics* (GFRP). Panjang total roket-bertingkat ini sebesar 2.570 mm. Dalam analisis struktur di sini propelan roket, liner dan inhibitor ikut diperhitungkan.

Analisis modus normal untuk mendapatkan nilai eigen dan vektor eigen pada struktur roket-RKN dilakukan dengan membuat pemodelan FEM seluruh struktur roket (MSC/Nastran for Windows, 2000), seperti yang terlihat dalam Gambar 2-2. Jumlah keseluruhan elemen yang dihasilkan dari Model FEM ini adalah 14.617 elemen dan 21.515 nodal.



Gambar 2-2: Pemodelan FEM struktur roket RKN bertingkat, dengan 14.617 elemen dan 21.515 nodal

Untuk analisis modus normal tinjau persamaan getaran dari struktur roket akibat beban luar $F(t)$. Cook et.al, (1989) menuliskan secara umum kondisi keseimbangan antara beban luar dengan gaya inersia struktur, redaman dan gaya elastik dalam domain-waktu dalam bentuk matrik, sebagai

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

dimana:

- [M] = matriks massa elemen
- [C] = matriks redaman (*damping*)
- [K] = matriks kekakuan (*stiffness*)
- {F} = matriks beban luar
- {x} = matriks defleksi

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

$$\{x\} = \{\ddot{X}\} \sin \omega t \quad (2-2)$$

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

dimana :

- $\{\ddot{X}\}$ = matriks amplitudo getaran dari nodal
- ω = frekuensi getaran struktur

Dengan memasukkan persamaan 2-2 ke dalam persamaan 2-1, dengan kondisi tidak teredam dan tidak ada beban luar, serta menggantikan $\omega^2 = \lambda$, dalam domain frekuensi didapat

$$([K] - \lambda[M])\{\ddot{X}\} = \{0\} \quad (2-3)$$

Persamaan 2-3 ini merupakan pernyataan dasar dari problematik

getaran dan biasa disebut sebagai *eigenproblem* (Cook, et al., 1984; Huebner, Kenneth, H., 1974; Meirovitch, L., 1975).

Setiap nilai eigen λ akan mempunyai vektor eigen $\{\ddot{X}\}$ atau

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

$$\det([K] - \lambda[M]) = 0 \quad (2-4)$$

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

$$L_B = \frac{1}{\sqrt{M_B}} \quad (2-5)$$

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

$$([A] - \lambda[I])\{x\} = \{0\} \quad (2-6)$$

dimana:

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

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

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

Matrik [I] adalah matrik unit dan merupakan diagonal matrik, sedangkan matrik {x} merupakan vektor eigen dari [A].

3 ANALISIS NILAI EIGEN STRUKTUR ROKET-RKN BERTINGKAT

Dengan menggunakan dasar dari persamaan 2-6, analisis nilai eigen struktur roket pada kondisi terbang-bebas dapat dilakukan. Pada model FEM struktur roket, untuk analisis tidak perlu membuat "*constraint*" pada nodal-nodal. Kemudian dengan menggunakan

perangkat lunak Nastran versi Windows 4.5 untuk analisis modus normal struktur, besarnya nilai eigen dari struktur roket dapat dianalisis terutama pada beberapa modus getar untuk frekuensi yang rendah.

Hasil analisis nilai eigen struktur roket-bertingkat ini adalah sebagai berikut:

$\omega_1 = -3.9138E-6$ Hz (gerakan rotasi seluruh struktur roket disertai sedikit translasi arah 45° terhadap bid-XZ)

$\omega_2 = -2.1026E-7$ Hz (gerakan rotasi seluruh struktur roket terhadap sb-X)

$\omega_3 = 3.1325E-4$ Hz (gerakan translasi dalam arah 45° terhadap bid-XZ seluruh struktur roket, disertai sedikit rotasi terhadap sb-X)

$\omega_4 = 3.30894E-4$ Hz (gerakan translasi dalam arah 45° terhadap bid-XY seluruh struktur roket)

$\omega_5 = 3.88966E-4$ Hz (gerakan mengayun seluruh struktur roket dalam bid-XY dengan bertumpu pada daerah nosel sustainer roket)

$\omega_6 = 5.5689E-4$ Hz ((gerakan mengayun seluruh struktur roket dalam bid-XZ dengan bertumpu pada daerah sirip tengah).

$\omega = 134,4796$ Hz (gerakan lentur/bending orde-1 dalam arah 45° seluruh struktur tabung roket dan 2 sirip booster terhadap bid-XZ.)

$\omega = 134,4932$ Hz (gerakan lentur/bending orde-1 dalam arah 45° seluruh struktur tabung roket dan 2 sirip *booster* terhadap bid-XY)

$\omega = 168,57$ Hz s.d $\omega_7 = 172,09$ Hz (gerakan lentur orde-1 seluruh struktur sirip roket *booster*)

$\omega = 201,19$ Hz s.d $\omega_7 = 209,56$ Hz (gerakan lentur orde-1 seluruh struktur propelan roket *booster* dan *sustainer*)

$\omega = 217,5686$ Hz (gerakan lentur orde-2 seluruh struktur roket dalam arah 45° terhadap bid-XZ)

$\omega = 217,5701$ Hz (gerakan lentur orde-2 seluruh struktur roket dalam arah 45° terhadap bid-XY)

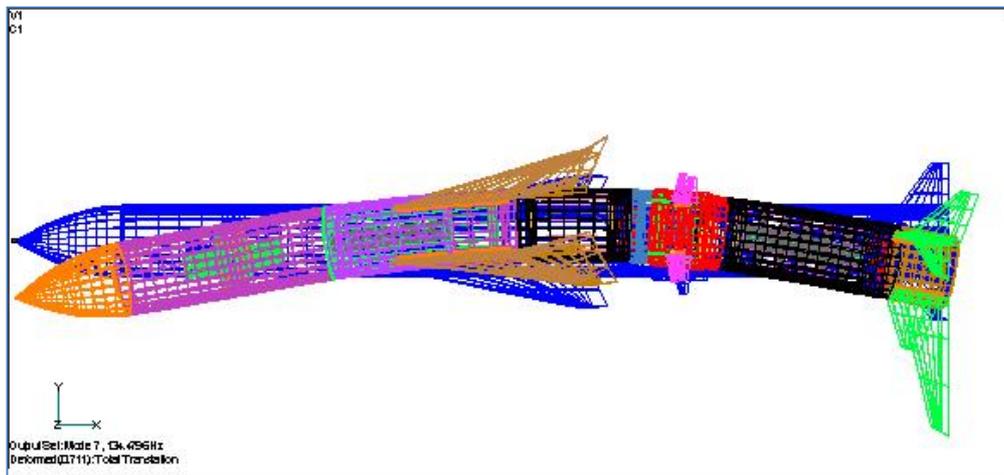
$\omega = 229,20$ Hz ke atas (gerakan lentur orde-2 dan order lebih tinggi seluruh struktur propelan *booster* dan *sustainer* roket).

4 PEMBAHASAN HASIL ANALISIS MODUS NORMAL

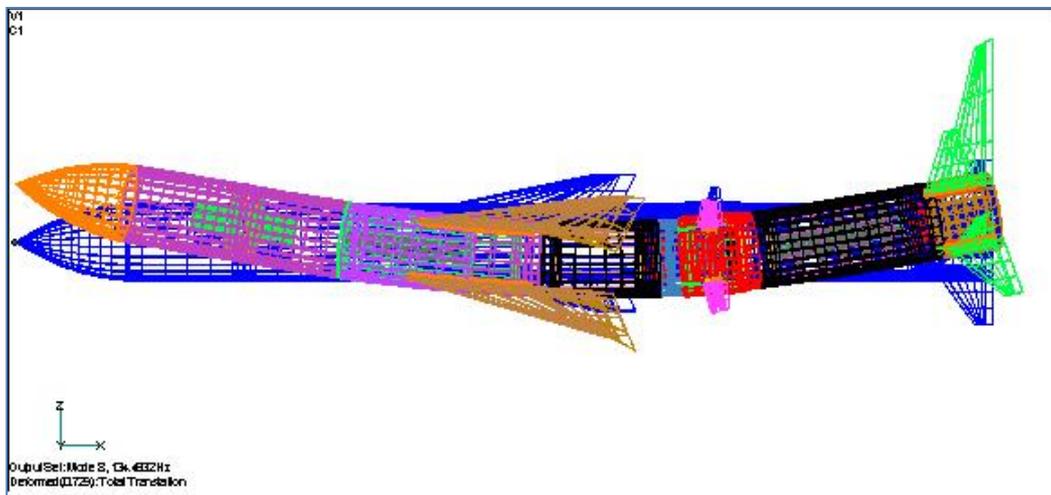
Untuk kondisi terbang bebas, nilai frekuensi-alami orde-1 modus-getar untuk seluruh struktur roket-RKN dari modus pertama sampai bentuk-modus keenam menjadi sangat rendah sekali, yaitu $\omega \leq 5.5689E-4$ Hz. Hal ini menunjukkan bahwa untuk kondisi terbang-bebas komponen muatan sangat aman pada modus getar pada order rendah terhadap terjadinya resonansi getaran dari struktur roket. Jadi, nilai eigen untuk bentuk modus pertama sampai keenam di sini dapat diabaikan, karena terlalu rendah nilainya.

Untuk orde-1, pengaruh modus getar dari struktur roket terhadap struktur muatan akan terasa pada harga $\omega = 134,4796$ Hz dan $\omega = 134,4932$ Hz, baik dalam arah lateral maupun vertikal. Nilai frekuensi-alami orde-1 modus getar untuk struktur sirip *booster* akan berada pada nilai $\omega = 168,21$ Hz s.d $\omega = 172,09$ Hz. Untuk struktur propelan *booster* dan propelan *sustainer* nilai frekuensi-alami orde-1 modus getar berada pada $\omega = 201,19$ Hz s.d $\omega = 209,58$ Hz. Nilai orde-2 dari struktur roket bertingkat RKN ini akan terasa pada nilai $\omega = 217,57$ Hz.

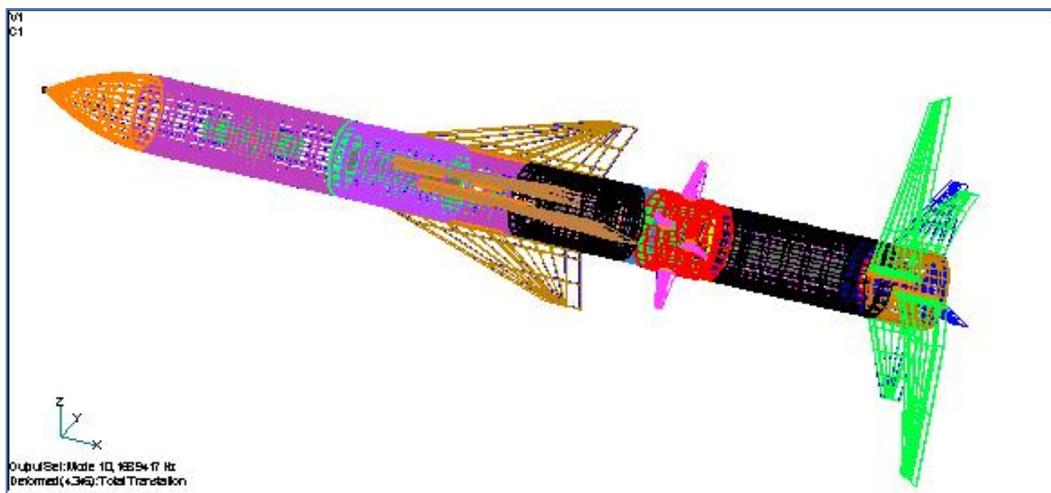
Dari hasil analisis struktur roket RKN bertingkat secara keseluruhan diperoleh massa total struktur roket sebesar 98,75 kg. Gambar 4-1 sampai dengan Gambar 4-5 menunjukkan bentuk-modus getar pada nilai eigen dari $\omega = 134,48$ Hz sampai dengan $\omega = 217,57$ Hz.



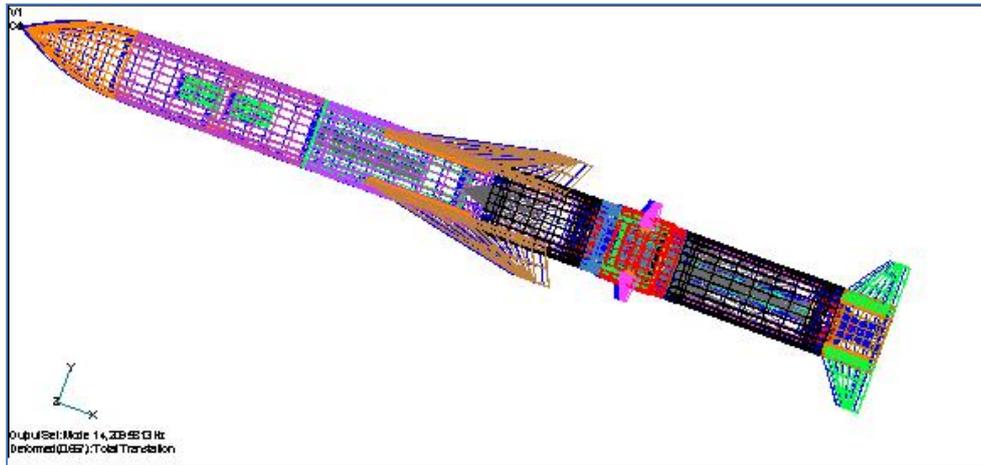
Gambar 4-1: Bentuk-modus untuk nilai eigen $\omega = 134,48$ Hz, bentuk dari gerakan lentur (*bending*) seluruh struktur tabung roket dan 2 buah sirip *booster* dalam arah 45° terhadap bid-XY



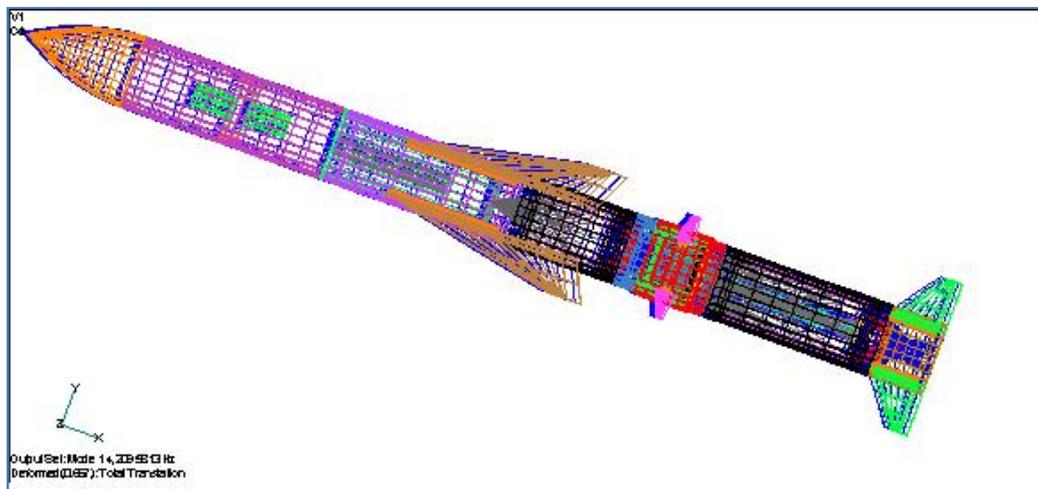
Gambar 4-2: Bentuk-modus untuk nilai eigen $\omega = 134,49$ Hz, bentuk dari gerakan lentur seluruh struktur tabung roket dan 2 buah sirip *booster* dalam arah 45° terhadap bid-XZ



Gambar 4-3: Bentuk-modus untuk nilai eigen $\omega = 168,94$ Hz, bentuk dari gerakan lentur struktur keempat sirip *booster* roket



Gambar 4-4: Bentuk-modus untuk nilai eigen $\omega = 209,58\text{Hz}$, bentuk dari gerakan struktur propelan roket *booster* dan *sustainer*, disertai sedikit gerakan seluruh struktur roket dalam arah longitudinal (sb-X)



Gambar 4-4: Bentuk-modus untuk nilai eigen $\omega = 217,57 \text{ Hz}$, bentuk dari gerakan lentur orde-2 seluruh struktur roket dalam arah 45° terhadap bid-XY

Untuk keamanan struktur muatan roket, frekuensi-alami orde-1 dari struktur komponen muatan roket sebaiknya mempunyai nilai sama dengan $\omega = 100 \text{ Hz}$ atau kurang, agar tidak terjadi resonansi dengan struktur roket.

5 KESIMPULAN

Dari perhitungan nilai eigen seluruh struktur roket-RKN bertingkat dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Untuk kondisi terbang bebas, harga frekuensi-alami orde-1 modus-getar untuk seluruh struktur roket pada bentuk-modus pertama sampai

bentuk-modus keenam sangat rendah, yaitu $\omega \leq 5.56895\text{E-}4$. Oleh karena itu, nilai eigen ini dapat diabaikan pengaruhnya terhadap struktur muatan roket.

- Pengaruh modus getar dari struktur roket terhadap struktur muatan akan terasa pada nilai eigen $\omega = 134,48 \text{ Hz}$ ke atas, baik dalam arah lateral maupun vertikal.
- Untuk menghindari terjadinya resonansi dengan struktur tabung roket, maka struktur muatan roket harga frekuensi-alami orde-1 dari struktur komponen muatan roket sebaiknya mempunyai harga sama atau kurang dari 100 Hz .

DAFTAR RUJUKAN

MSC/Nastran for Windows, Installation and Application Manual", Version 4.5, The Mac.Neal Schwendler Co., 2000.

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.

Meirovitch, L., 1975. *Elements of Vibration Analysis*, College of Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.