

ANALISIS DEFLEKSI DAN TEGANGAN STRUKTUR ROKET RX-320 PADA WAKTU *HANDLING* DENGAN METODE ELEMEN HINGGA (FEM)

Sugiarmadji HPS, Setiadi

Peneliti Bidang Struktur Mekanika, Pusat Teknologi Wahana Dirgantara, LAPAN

ABSTRACT

Structural analysis of effects of rocket handlings on the rocket itself is recommended, for example, during the rocket's center of gravity measurement or when the rocket is about to be placed on its launcher. Generally in those handling occasions, the rocket is lifted by using a hoist and clamps. The rocket structural analysis of deflections and stresses induced can be obtained by using a finite element method based software.

For rocket RX-320, results of structural deflection and stress analysis due to the rocket handling show that the maximum shear stress occurred, τ_{maks} , is 85.188,71 Pa. Thus, rocket motor case is capable of withstanding the handling load. The amount of shear stress occurred can affect liner and propellant bonding inside the case.

The maximum deflection of 5.1903E-3 occurred at the node 25373 which is located at nosecone tip. The deflections around the motor case is very small therefore their effects on the liner and propellant can be neglected. However, the rocket handlings still must be carried out with a great care to avoid damaging the liner and propellant.

Keywords: *Stress and deflection, Rocket handling, Finite Element Methods*

ABSTRAK

Analisis kekuatan struktur pada waktu *handling* roket perlu dilakukan, seperti ketika akan menjalani penimbangan untuk mencari letak c.g (*center of gravity*) roket ataupun ketika roket diletakkan di atas launcher. Roket biasanya diangkat dengan menggunakan katrol yang dilengkapi dua buah *clamp*. Analisis defleksi dan tegangan yang terjadi akan dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak berbasis Metoda Elemen Hingga (*Finite Element Methods/FEM*).

Hasil analisis defleksi dan tegangan struktur roket RX-320, menunjukkan terjadinya tegangan geser maksimum sebesar $\tau_{maks} = 85.188,71$ Pa. Oleh karena itu bahan tabung masih aman sekali terhadap beban yang bekerja. Tegangan geser ini dapat mempengaruhi lapisan liner dan propelan roket.

Besarnya defleksi maksimum pada struktur roket adalah sebesar 5.1903E-3 mm yang terjadi pada nodal no. 25373. Lokasi ini berada di ujung struktur *nose cone*. Besarnya defleksi di daerah struktur tabung, harganya relatif kecil. Oleh karena itu, pengaruh terjadinya defleksi terhadap propelan dan liner masih bisa diabaikan. Namun demikian, selama menjalani *handling*, roket harus diperlakukan dengan hati-hati, sehingga propelan dan liner tidak mengalami keretakan.

Kata Kunci: *Tegangan dan lendutan, Handling roket, Metode Elemen Hingga*

1 PENDAHULUAN

Roket RX-320 dengan menggunakan bahan tabung material *Stainless Steel A-304* pada struktur motor roket merupakan salah satu produk roket baru yang sedang

dikembangkan oleh LAPAN. Ukuran diameter luar tabung yang digunakan adalah $D = 320$ mm, dengan ketebalan tabung $t = 6.5$ mm. Pada waktu roket menjalani *handling*, kemungkinan bisa terjadi defleksi dan tegangan geser yang

cukup signifikan pada daerah motor roket, terutama pada daerah tabung roket. Hal ini bisa mengakibatkan keretakan pada lapisan liner maupun propelan roket yang ada di dalamnya, yang dapat menyebabkan pembakaran propelan menjadi tidak sempurna nantinya. Oleh karena itu, analisis kekuatan struktur roket pada waktu *handling*, seperti ketika akan menjalani penimbangan untuk mencari letak c.g (*center of gravity*) roket ataupun pada waktu akan diletakkan di atas peluncur roket, penting untuk dilakukan. Semua komponen roket pada waktu *handling* ini sudah terpasang semua di dalamnya, termasuk propelan, igniter dan payload roket.

Pada waktu *handling*, roket biasanya diangkat menggunakan katrol atau *crane* dengan 2 (dua) buah *clamp* yang ditempatkan di sebelah kiri dan kanan suatu lokasi yang diperkirakan merupakan letak c.g roket, dengan jarak antar *clamp* sebesar 1.500 mm, seperti

yang terlihat dalam Gambar 1-1. Dengan mengatur posisi kedua *clamp* tersebut sedemikian rupa di daerah tabung motor roket, maka akan diperoleh posisi yang setimbang dari roket, akibat gaya berat dari masing-masing komponen struktur roket yang ada. Pada posisi setimbang ini, maka titik tengah antar kedua *clamp* tersebut merupakan titik c.g roket.

Analisis tegangan dan defleksi yang terjadi pada waktu *handling* dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga, dengan membuat pemodelan *FEM* struktur roket RX-320 dari seluruh komponen yang ada, yaitu tabung roket, *cap*, *nozzle* lengkap dengan lapisan *graphite*, sirip dan dudukannya, igniter, tabung payload dan *nose cone*. Kemudian, analisis dapat dilakukan dengan pembebanan yang terjadi, yaitu berupa gaya berat dari masing-masing struktur komponen-komponen tersebut.



Gambar 1-1: Penempatan roket ke atas *launcher*

2 ANALISIS TEGANGAN DAN DEFLEKSI STRUKTUR ROKET DENGAN METODE ELEMEN HINGGA (FEM)

Untuk menganalisis defleksi dan tegangan yang terjadi pada elemen struktur akibat pembebanan berat sendiri struktur, tinjau elemen solid segiempat dari struktur komponen roket. Pada elemen yang isotropis, untuk kondisi bidang tegangan (*plane stress*), hubungan tegangan-regangan dalam bentuk matriks, dapat ditulis secara keseluruhan sebagai:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_{yx} \\ \sigma_{zx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [F] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2-1)$$

di mana:

$$[F] = \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ & & & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ & & & & (1-2\nu)/2 & 0 \\ \text{Simetri} & & & & & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Keterangan

- σ = tegangan elemen
- ϵ = regangan elemen
- E = modulus elastisitas material
- ν = rasio Poisson dari material
- $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{zx}$ = regangan geser
- G = modulus geser

dan bila digunakan hubungan

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2-3)$$

Dari persamaan (2-1) dan (2-2) dapat diperoleh matrik tegangan/regangan (*stress/strain matrix*):

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [F] \quad (2-4)$$

Besarnya defleksi nodal (*nodal displacement*) pada ke empat titik nodal dari elemen solid dapat dinyatakan sebagai:

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2-5)$$

Di sini terdapat 3 derajat kebebasan pada tiap nodal, atau 12 derajat kebebasan per elemen.

Besarnya gaya pada nodal-nodal elemen dalam bentuk matriks dapat dituliskan sebagai

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (2-6)$$

di mana:

- $\{d\}$ = matriks defleksi pada nodal-nodal dari persamaan (2-5)
- $[k]$ = matriks kekakuan elemen yang besarnya dapat dituliskan sebagai
- $\{f\}$ = matriks gaya pada nodal

$$[k] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dV \quad (2-7)$$

di mana :

- $[D]$ = matriks tegangan/regangan dari persamaan (2-4)
- V = volume elemen
- $[B]^T$ = transpose dari matriks $[B]$

$$[B] = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4] \quad (2-8)$$

di mana:

$$B_1 = \begin{bmatrix} N_{1,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{1,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{1,z} \\ N_{1,y} & N_{1,x} & 0 \\ 0 & N_{1,z} & N_{1,y} \\ N_{1,z} & 0 & N_{1,x} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

Sub matriks B_2 , B_3 dan B_4 dapat ditentukan dengan mengubah indeks i pada harga N_i dengan harga 2, 3 dan 4. Sedangkan harga N_1 , N_2 , N_3 dan N_4 ditentukan dari fungsi bentuk dengan menggunakan koefisien α_i , β_i , γ_i , dan δ_i (di mana: $i = 1, 2, 3$, dan 4) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{(\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z)}{6V} \\ N_2 &= \frac{(\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z)}{6V} \\ N_3 &= \frac{(\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z)}{6V} \\ N_4 &= \frac{(\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z)}{6V} \end{aligned} \quad (2-10)$$

dengan (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) dan (x_4, y_4, z_4) adalah koordinat nodal-nodal dari elemen solid.

Dengan memberikan gaya dari masing-masing berat struktur komponen roket pada nodal-nodal yang ada dari elemen-elemen struktur, maka dari hubungan gaya dan defleksi pada persamaan 2-6 akan diperoleh besarnya defleksi dari setiap nodal yang ada. Demikian pula, besarnya tegangan geser yang terjadi dari pembebanan yang ada dapat ditentukan dengan menggunakan hubungan pada persamaan 2-1.

3 PERHITUNGAN DEFLEKSI DAN TEGANGAN PADA STRUKTUR ROKET RX-320 PADA WAKTU HANDLING

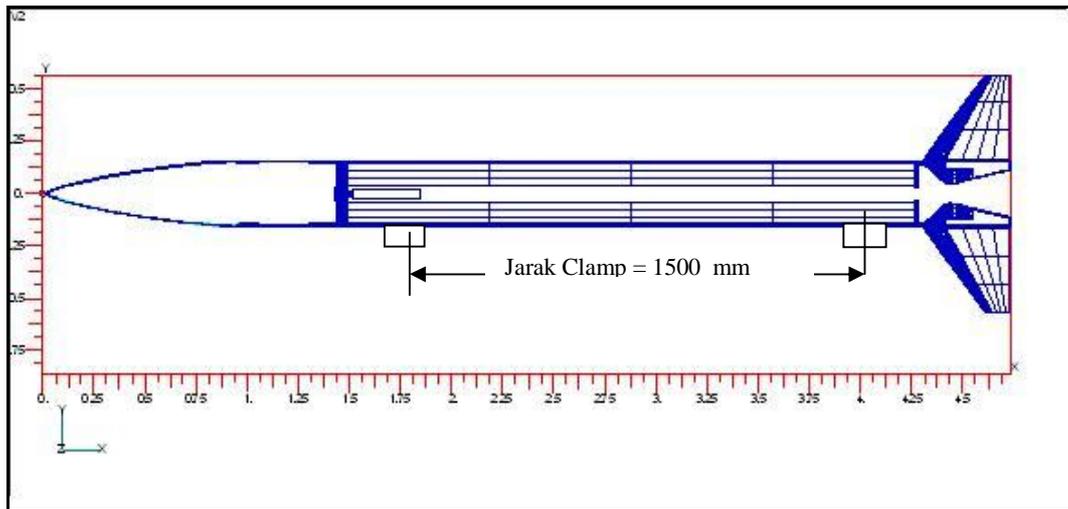
Konfigurasi keseluruhan struktur roket RX-320 yang akan dianalisis adalah seperti yang terlihat dalam Gambar 3-1. Material struktur tabung roket dibuat dari bahan *stainless steel* A-304 dengan diameter luar $D = 320$ mm, panjang $L = 3.000$ mm, dan tebal $t = 6.5$ mm. Untuk material struktur nozzle dan cap digunakan Baja Karbon S-45C. Kontur dari *nozzle* dibuat dengan menambahkan lapisan penahan panas

dari material *Graphite*. Tabung muatan digunakan material Aluminium 6061-T651 dan struktur *nose cone* dari material komposit GFRP (*Glass Fiber Reinforced Plastics*). Struktur keempat sirip roket dan tabung penumpunya menggunakan material Aluminium-6061-T651.

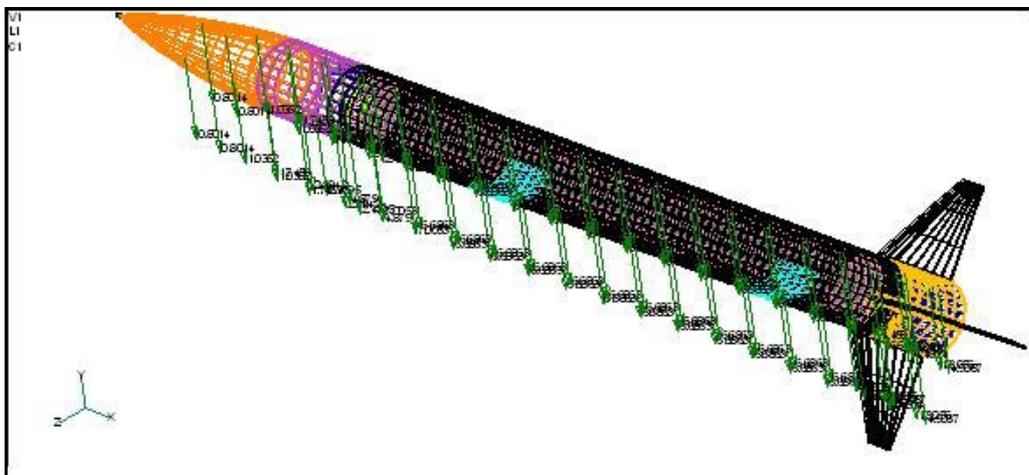
Analisis tegangan dan defleksi seluruh struktur komponen Roket RX-320 dilakukan dengan membuat Model *FEM* seperti yang terlihat dalam Gambar 3-2. Jumlah keseluruhan elemen yang dihasilkan dari pemodelan *FEM* ini adalah 8944 elemen dan 12741 nodal.

Untuk memudahkan analisis, model *FEM* struktur roket ini akan di "*constraint pinned*" pada arah T_x , T_y , T_z (arah 123) pada nodal-nodal di mana posisi kedua *clamp* ditempatkan. Ukuran kedua *clamp* ini adalah 110 x 170 mm, yang ditempatkan pada jarak sekitar 1500 mm. Sebagai referensi koordinat (0,0) adalah posisi ujung *Nose-Cone* roket. Pada kondisi kesetimbangan struktur roket, posisi nodal-nodal yang di *constraint* adalah:

- Jarak 2144,22 mm : No 22507 s.d 23299, selang 132,
- Jarak 2187,5 mm : No 22508 s.d 23300, selang 132,
- Jarak 2230,78 mm : No 22509 s.d, 23301 selang 132,
- Jarak 2274,06 mm : No 22510 s.d 23302, selang 132,
- Jarak 2317,34 mm : No 22511 s.d 23303, selang 132,
- Jarak 3702,34 mm : No 22543 s.d 23335, selang 132,
- Jarak 3745,62 mm : No 22544 s.d 23336, selang 132,
- Jarak 3788,9 mm : No 22545 s.d 23337, selang 132,
- Jarak 3832,18 mm : No 22546 s.d 23338, selang 132,
- Jarak 3875.46 mm : No 22547 s/d 23339, selang 132.



Gambar 3-1: Konfigurasi struktur roket RX-320



Gambar 3-2: Pemodelan *FEM* seluruh struktur komponen roket RX-320, dengan 8944 elemen dan 12741 nodal

Pembebanan yang terjadi diberikan oleh gaya berat dari masing-masing komponen struktur roket, yaitu karena berat struktur tabung, berat propelan dan liner serta inhibitor, cap, nozzle dan graphite, igniter, tabung muatan dan payload, nose cone, sirip dan kedudukan sirip. Tabel 3-1 menunjukkan besarnya masing-masing pembebanan dari komponen roket.

Tabel 3-1: PEMBEBANAN KOMPONEN ROKET

No.	KOMPONEN ROKET	BERAT(Kg)
1	Tabung (Stainless Steel A-304)	148,81
2	Propelan (HTPB), Liner, Inhibitor	200,56
3	Cap (Baja Karbon (C-45))	29,27
4	Nozzle (Baja Karbon	70,02

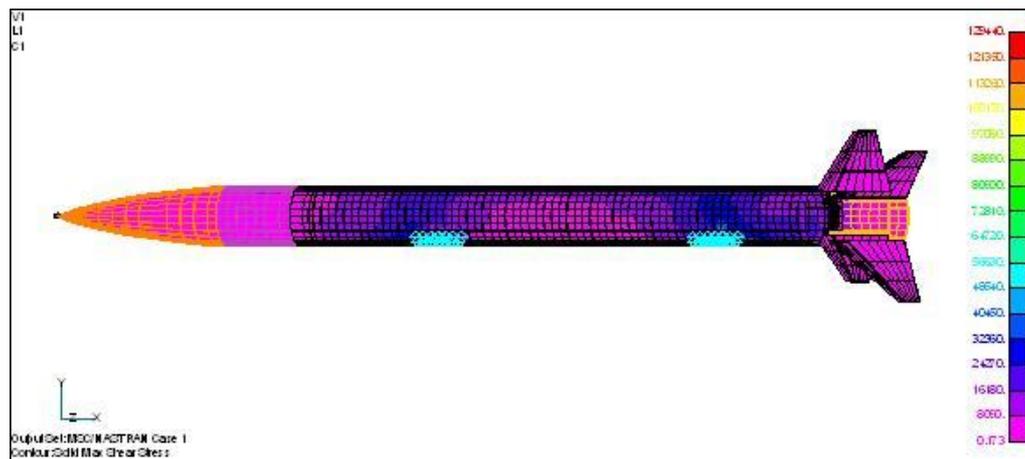
	C-45 , Graphite)	
5	Igniter (Aluminium Al-6061)	1,3
6	Tabung Payload (Aluminium Al-6061)& Payload	9,35
7	Nose Cone (GFRP)	12,82
8	Tabung kedudukan sirip & Sirip (aluminium Al-6061)	19,63
	TOTAL	491,76

Dalam analisis pembebanan akibat berat dari masing-masing komponen struktur roket diasumsikan menjadi beban merata pada setiap stasiun lokasi nodal-nodal, dengan referensi lokasi ditentukan dari posisi ujung *nose cone* roket sebagai koordinat (0,0). Besarnya gaya yang terjadi pada nodal-nodal adalah sebagai berikut:

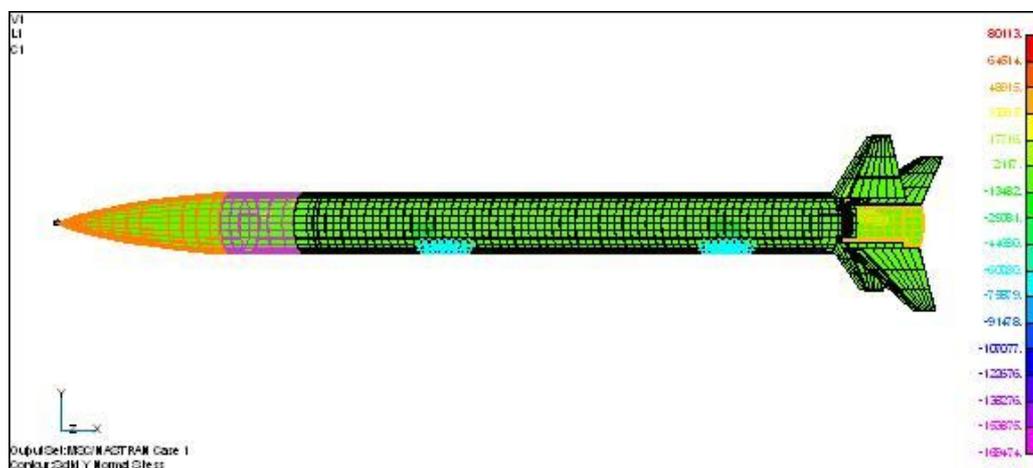
- Lokasi x = 288 mm dan 479,6 mm:
Gaya F1 = 1,3652 Newton/nodal
- Lokasi x = 600 mm
Gaya F2 = 4,2 Newton/nodal
- Lokasi x = 771,6 mm
Gaya F3 = 2,755 Newton/nodal
- Lokasi x = 880 mm
Gaya F4 = 6,7435 Newton/nodal
- Lokasi x = 974 mm
Gaya F5 = 4,52 Newton/nodal
- Lokasi x = 1086,8 mm
Gaya F6 = 20,5643 Newton/nodal
- Lokasi x = 1312,4 mm s/d 3794 mm,
selang 225,6 mm : Gaya F7 = 20,03
Newton/nodal
- Lokasi x = 3814 mm
Gaya F8 = 8,72 Newton/nodal
- Lokasi x = 3938 mm
Gaya F9 = 16,63 Newton/nodal

- Lokasi x = 4116,5 mm
Gaya F10 = 11,92 Newton/nodal

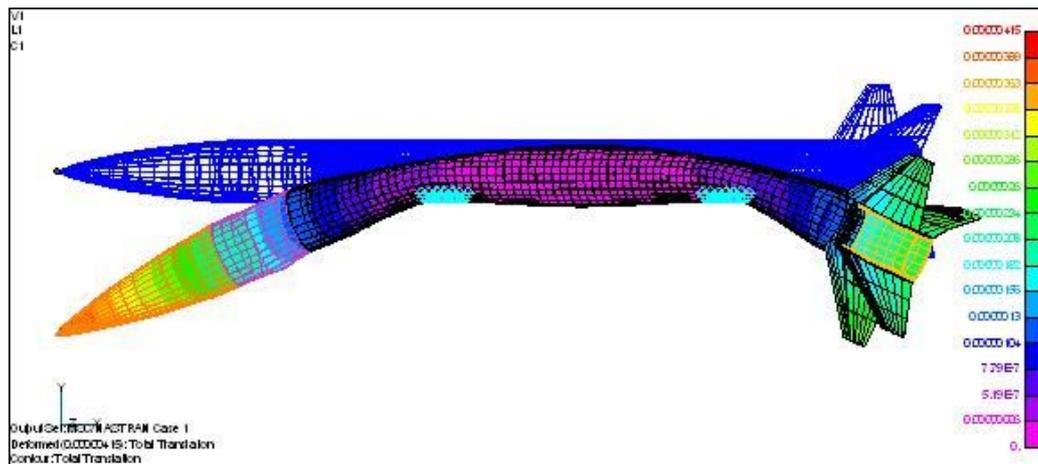
Dengan menggunakan perangkat lunak untuk analisis tegangan dan defleksi yang berbasis Metode Elemen Hingga diperoleh distribusi besarnya tegangan geser, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3-3. Harga tegangan geser maksimum adalah $\tau_{maks} = 85.188,71 \text{ N/m}^2$ (=Pa), yang terjadi pada elemen di lokasi antara 3788,9 mm dan 3832,2 mm dari posisi ujung *nose cone*. Harga tegangan normal maksimum dalam arah sumbu-y (*bending*) yang terjadi adalah sebesar $\sigma_{maks} = 312,69 \text{ N/m}^2$. Distribusi harga tegangan dalam arah *bending* pada seluruh struktur roket adalah seperti yang terlihat dalam Gambar 3-4.



Gambar 3-3: Distribusi tegangan geser pada seluruh struktur roket RX-320 pada kondisi "handling" (diangkat dengan *clamp* di dua tempat sejauh 1,5 m)



Gambar 3-4: Distribusi tegangan normal sumbu-y (*bending*) pada seluruh struktur roket RX-320



Gambar 3-5: Distribusi defleksi dalam arah sumbu-y pada seluruh struktur roket RX-320

Besarnya defleksi maksimum δ_{maks} adalah sebesar $= 5.1903E-3$ mm yang terjadi pada nodal no. 25373 di lokasi 0 mm dari posisi ujung *nose cone*. Dari distribusi lenturan yang terjadi terlihat bahwa struktur di daerah tabung roket tidak mengalami defleksi yang signifikan (Gambar 3-5).

4 PEMBAHASAN HASIL ANALISIS

Hasil analisis tegangan geser dan defleksi struktur roket RX-320 pada waktu menjalani *handling*, dimana roket menggunakan material tabung Stainless Steel A-304 dengan tebal $t = 6,5$ mm, menunjukkan bahwa bahan tabung sangat aman terhadap terjadinya tegangan geser maksimum sebesar $\tau_{\text{maks}} = 85.188,71$ N/m². Harga limit geser dari material Stainless Steel A-304 adalah sebesar 398,29 MPa. Tegangan geser yang terjadi akan membebani lapisan liner (dari bahan komposit) dan propelan yang ada di dalam struktur tabung. Untuk mengetahui seberapa jauh pengaruh terjadinya tegangan geser terhadap lapisan liner dan propelan ini diperlukan data sifat mekanik dari propelan komposit dan liner yang digunakan.

Besarnya defleksi maksimum pada struktur roket adalah sebesar $5.1903E-3$ mm yang terjadi pada nodal no. 25373 di lokasi 0 mm dari posisi ujung *nose cone*. Lokasi terjadinya

defleksi maksimum ini berada di daerah struktur *nose cone*, di luar daerah struktur tabung. Apabila posisi kedua *clamp* digeser ke arah depan (ke arah *nose cone*) sejauh 129,8 mm, maka hasil analisis menunjukkan bahwa defleksi maksimum masih tetap di daerah *nose cone*. Defleksi di daerah struktur tabung harganya tetap relatif sangat kecil. Demikian juga harga tegangan geser maksimum yang terjadi akan naik menjadi $\tau_{\text{maks}} = 103.673,0$ N/m².

Oleh karena propelan roket tidak terlalu dipengaruhi oleh terjadinya defleksi di daerah struktur tabung, maka terjadinya defleksi masih bisa diabaikan pengaruhnya terhadap propelan dan liner. Namun demikian, selama menjalani *handling* roket harus benar-benar diperlakukan dengan hati-hati, sehingga propelan dan liner tidak mengalami keretakan.

5 KESIMPULAN DAN SARAN

Dari analisis tegangan dan defleksi struktur Roket RX-320 pada waktu menjalani *handling* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- o Hasil analisis tegangan pada struktur Roket RX-320, di mana roket menggunakan material tabung *stainless steel* A-304 dengan tebal $t = 6,5$ mm, menunjukkan bahwa bahan tabung cukup aman terhadap terjadinya tegangan geser maksimum sebesar

- $\tau_{maks} = 85.188,71$ Pa. Harga limit tegangan geser dari material *stainless steel A-304* adalah sebesar 398,29 MPa,
- o Besarnya defleksi maksimum pada struktur roket adalah sebesar 5.1903E-3 mm yang terjadi pada nodal no. 25373 di lokasi 0 mm dari posisi ujung *nose cone*. Lokasi ini berada di daerah struktur *nose cone* roket, di luar daerah struktur tabung. Penggeseran lokasi kedua *clamp* ke arah *nose cone* (ke depan) sejauh 129,8 mm ternyata tidak memindahkan lokasi defleksi maksimum ke daerah struktur *nose cone*. Defleksi struktur di daerah tabung harganya tetap relatif sangat kecil. Oleh karena itu, terjadinya defleksi pada struktur tabung tidak berpengaruh terhadap kondisi liner dan propelan roket,
 - o Untuk mengetahui kepastian kondisi propelan dan liner tidak mengalami keretakan selama menjalani *handling* roket, sebaiknya perlu dilakukan

pemeriksaan NDT (*Non Destructive Test*) pada struktur roket setelah proses *handling*, terutama di daerah lokasi propelan roket.

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.
- MSC/Nastran for Windows, 1994. *Installation and Application Manual*, Version 1.0, The Mac. Neal Schwendler Co.
- Pepper, D.W., Heinrich, J. C., 1992. *The Finite Element Method : Basic Concepts and Applications*, Hemisphere Publishing Co., Washington-Philadelphia-London.