

# PERANCANGAN TABUNG MOTOR ROKET RX-150-LPN BERDASARKAN ANALISIS PERHITUNGAN DAN EKSPERIMEN

Atik Bintoro

Peneliti Pusat Teknologi Wahana Dirgantara

## ABSTRACT

The rocket motor tube is primary construction of rocket motor, this function is as combustion propellant chamber. The inner pressure will be produced in the tube during the combustion process running and produce structural stress. That's why the tube design is necessary to look the tube endurance of the structural stress. Beside this, the structural weight factor often become constrains, cause the supply of the material structural has light and strength property was limited. With concern for the structural stress and the structural weight, it has been design the tube of RX150-LPN rocket motor, by analysis and experiment method. The analysis method was run affinity by finite element method, and the experiment method affinity by static test of the rocket motor tube. The design has purposed to find the strength and stiffness tube construction and was made the material light relative property. From the design was found characteristic of the product design is in tin of wall = 3mm, inner diameter = 15 cm, length of tube = 1,4 m, material = alloy steel AISI HI 1, weight = 17 kg and the prototype has endurance with 35 kg/cm<sup>2</sup> on inner pressure.

## ABSTRAK

Tabling motor roket merupakan konstruksi utama motor roket yang berfungsi sebagai wadah terjadinya proses pembakaran bahan bakar. Proses pembakaran ini akan menghasilkan tekanan dalam yang dapat menimbulkan tegangan struktur. Oleh sebab itu dalam perancangan tabling motor roket perlu diperhatikan kemampuan tabung terhadap besar tegangan tersebut Di samping itu raktor berat struktur juga sering menjadi kendala karena keterbatasan persediaan material yang bersifat ringan dan kuat. Dengan memperhatikan pengaruh tegangan yang terjadi dan berat tabung tersebut, telah dirancang strukmr tabung motor roket RX150-LPN, melalui metode analisis teknik dan eksperimen. Analisis struktur tabung dilakukan dengan pendekatan melalui perhitungan elemen hingga. Sedangkan metode eksperimen melalui uji statik tabung motor roket. Perancangan tabung ini bertujuan untuk memporolch konstruksi yang kuat, kaku dan terbuat dari material yang relatif ringan. Dan perancangan ini dipcroleh prototipe tabung motor roket dengan tebal dinding 3 nun, diameter dalam = 15 cm, panjang = 1,4 m, bahan = baja paduan AISI HI 1, berat = 17 kg dan mampu menahan tekanan dalam sebesar 35 kg/cm<sup>2</sup>.

## I. PENDAHULUAN

Salah satu konstruksi utama roket RX150-LPN adalah konstruksi tabung motor roket. Konstruksi ini berfungsi sebagai wadah terjadi nya proses pembakaran bahan bakar padat yang akan menghasilkan tekanan dalam dan gaya dorong roket. Tekanan dalam yang dihasilkan dapat mencapai 30 kg/cm<sup>2</sup>. Tekanan ini dapat menimbulkan tegangan tabung yang mampu merusak kekuatan struktur tabung. Seberapa besar tegangan yang terjadi serta bagaimana pengaruhnya terhadap struktur tabung motor

roket, dapat diketahui melalui kajian teknik maupun melalui pengujian atau eksperimen. Kajian teknik dapat dilakukan berdasarakan pendekatan perhitungan struktur tabung dengan metode elemen hingga. Sedangkan kajian eksperimen dapat dilakukan dengan memberikan tekanan pada benda uji tabung motor roket yang mewakili kondisi sebenarnya. Sebagai langkah validasi, maka hasil kajian melalui kedua metode tersebut dibandingkan, kemudian ditentukan nilai penyimpangannya. Dalam penelitian ini, nilai penyimpangan yang diijinkan yaitu kurang dari 5%. Benda uji yang digunakan adalah konstruksi

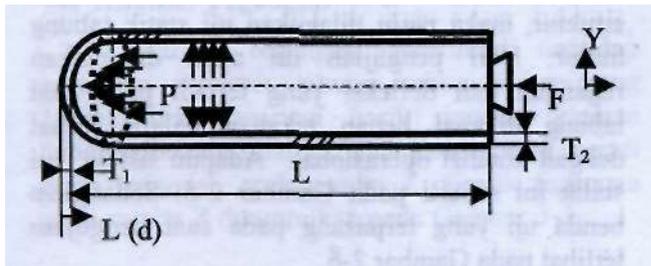
tabling yang terbuat dari baja paduan AISI HI 1 dengan sifat bahan sebagai berikut : Komposisi kimia : 0,35% C, 5 % Cr, 0,4 % V, dan 1,5 % Mo. Kekuatan tank :  $1,793 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  Modulus elastisitas :  $1,999 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  dan Berat jenis =  $8318,75 \text{ kg/m}^3$ . Sedangkan ukuran tabung motor roket sebagai benda uji adalah : panjang = 1,4 m, diameter = 15 cm, tebal = 3 mm. Tekanan yang terjadi di dalam benda uji tabung motor roket diberikan sebesar  $35 \text{ kg/cm}^2$ . Diharapkan melalui penelitian ini dapat diperoleh konstruksi tabung motor roket RX150-LPN yang bersifat kuat, kaku dan relatif ringan.

## 2. METODE PERANCANGAN TABUNG MOTOR ROKET RX150-LPN

Perancangan tabung motor roket RX150-LPN, dilakukan berdasarkan hasil kajian analisis teknik melalui metode elemen hingga yang divalidasi dengan pengujian statik tabung motor roket.

### 2.1 Pendekatan Metode Elemen Hingga

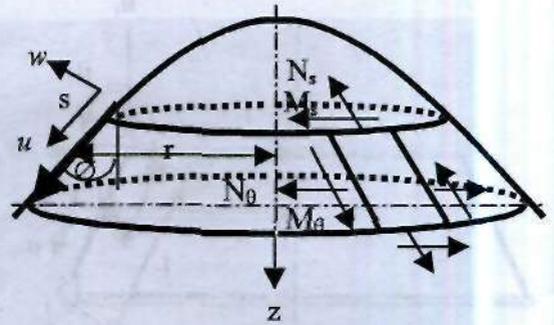
Diagram distribusi tekanan pada struktur tabung motor roket seperti pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1 Distribusi gaya pada tabung motor roket

Keterangan : P = tekanan; F = gaya dorong ;  
T = tebal tabung

Karena perbandingan antara tebal dinding dan diameter tabung motor roket relatif kecil, maka dalam pendekatan ini, struktur tabung motor roket dianggap sebagai struktur cangkang tipis (shell). Untuk mengetahui distribusi tegangan pada struktur ini, berdasarkan metode elemen hingga, yaitu dengan memperhatikan elemen-elemen perubahannya (displacement) di titik tengah permukaan struktur tersebut. Kemudian diuraikan menjadi komponen  $w$  dan  $u$  dalam arah tangensial dan normal, seperti pada Gambar 2-2.



Gambar 2-2 : Tegangan pada cangkang asi-simetris

Menurut Kirchhoff-Love, terdapat empat buah komponen regangan pada struktur cangkang asi-simetris, yaitu

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ \epsilon_\theta \\ \chi_s \\ \chi_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} du/ds \\ (w \cos \phi + u \sin \phi)/r \\ -d^2w/ds^2 \\ \frac{\sin \phi}{r} \frac{dw}{ds} \end{Bmatrix} \dots\dots(2-1)$$

Regangan dari persamaan (2-1) merupakan hasil dari tegangan yang terjadi, yaitu

$$\sigma = \begin{Bmatrix} N_s \\ N_\theta \\ M_s \\ M_\theta \end{Bmatrix} = D\epsilon \dots\dots\dots(2-2)$$

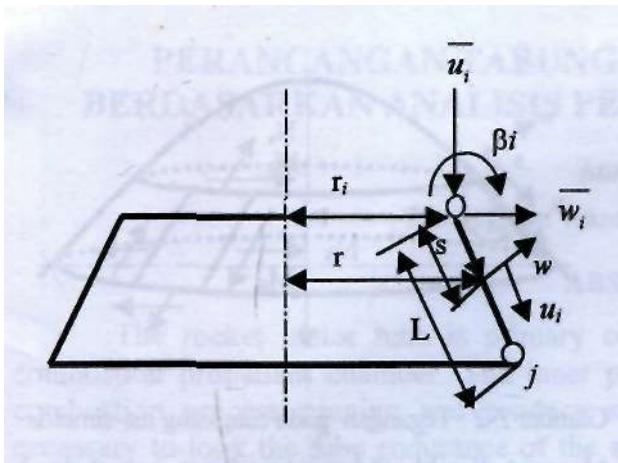
Untuk cangkang isotropik, matrik D adalah

$$D = \frac{Et}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & 0 \\ \nu & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t^2/12 & \nu t^2/12 \\ 0 & 0 & \nu t^2/12 & t^2/12 \end{bmatrix} \dots\dots(2-3)$$

Distribusi tegangan pada struktur cangkang dapat diketahui dengan membagi cangkang tersebut dalam beberapa titik nodal perpindahan struktur (the nodal displacement), misalnya pada titik  $i$  dan  $j$ , seperti pada Gambar 2-3.

Gambar 2-3 menunjukkan bahwa perpindahan titik nodal  $i$  dapat dinyatakan dalam tiga komponen, yaitu

$$\alpha_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ w_i \\ \beta_i \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2-4)$$



Gambar 2-3 : Sebuah elemen cangkang asi-simetris

Elemen dengan dua nodal, *ij*, akan mempunyai enam derajat kebebasan. Untuk posisi *s*, elemen perpindahannya dapat dinyatakan sebagai *a'*, di mana

$$a' = \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (2-5)$$

jika *u* merupakan perubahan linier dan *s* dan *w* maka akan diperoleh enam buah konstanta yang tidak diketahui. Konstanta ini dapat ditentukan melalui harga titik nodal dari *u*, *w* dan *p*, melalui koordinat lokal, yaitu

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = Na' \dots \dots \dots (2-6)$$

Sedangkan keenam konstanta tersebut adalah

$$\begin{Bmatrix} u_i \\ w_i \\ (dw/ds)_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & + \sin \phi & 0 \\ - \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{w}_i \\ \beta_i \end{Bmatrix} = \lambda a_i \dots \dots \dots (2-7)$$

dengan :  $u = \alpha_1 + \alpha_2 s$  ;

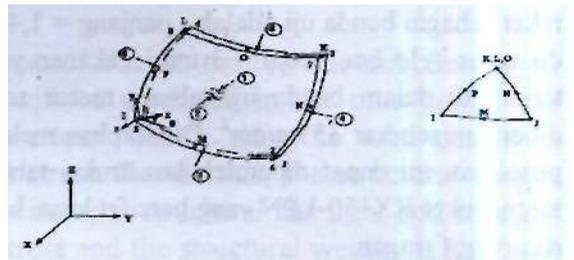
$$w = \alpha_3 + \alpha_4 s + \alpha_5 s^2 + \alpha_6 s^3 \dots \dots \dots (2-8)$$

Sehingga koordinat lokal *u* dapat ditulis menjadi

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-3s^2+2s^3 & L(s^2+s^3) \\ s & 0 & 0 \\ 0 & 3s^2-2s^3 & -s^2+s^3 & L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ w_i \\ u_j \\ w_j \\ (dw/ds)_i \\ (dw/ds)_j \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (2-9)$$

$$\text{dengan : } s = s/L \dots \dots \dots (2-10)$$

Perhitungan dengan pendekatan elemen hingga di atas, dapat diselesaikan melalui bantuan perangkat lunak dengan memodelkan struktur sebagai Elemen *Shell*, dengan 8 titik nodal, seperti pada Gambar 2-4.

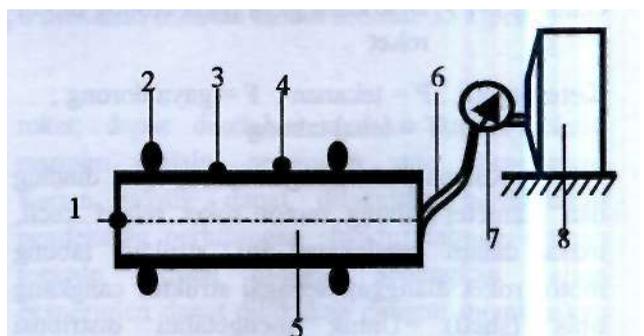


Gambar 2-4 : Elemen *Shell* dengan 8 titik nodal

Jenis elemen ini sesuai untuk perhitungan struktur yang berbentuk kurva cangkang tipis. Elemen ini mempunyai 8 titik *node* yang bertranslasi menuju arah *x*, *y* dan *z*, serta berputar sesuai arah sumbu *x*, *y* dan *z*. Adapun kemampuan simulasi dari elemen ini adalah untuk kondisi: kekakuan, lendutan dan regangan struktur.

## 2.2 Metode Pengujian Statik Struktur Tabung

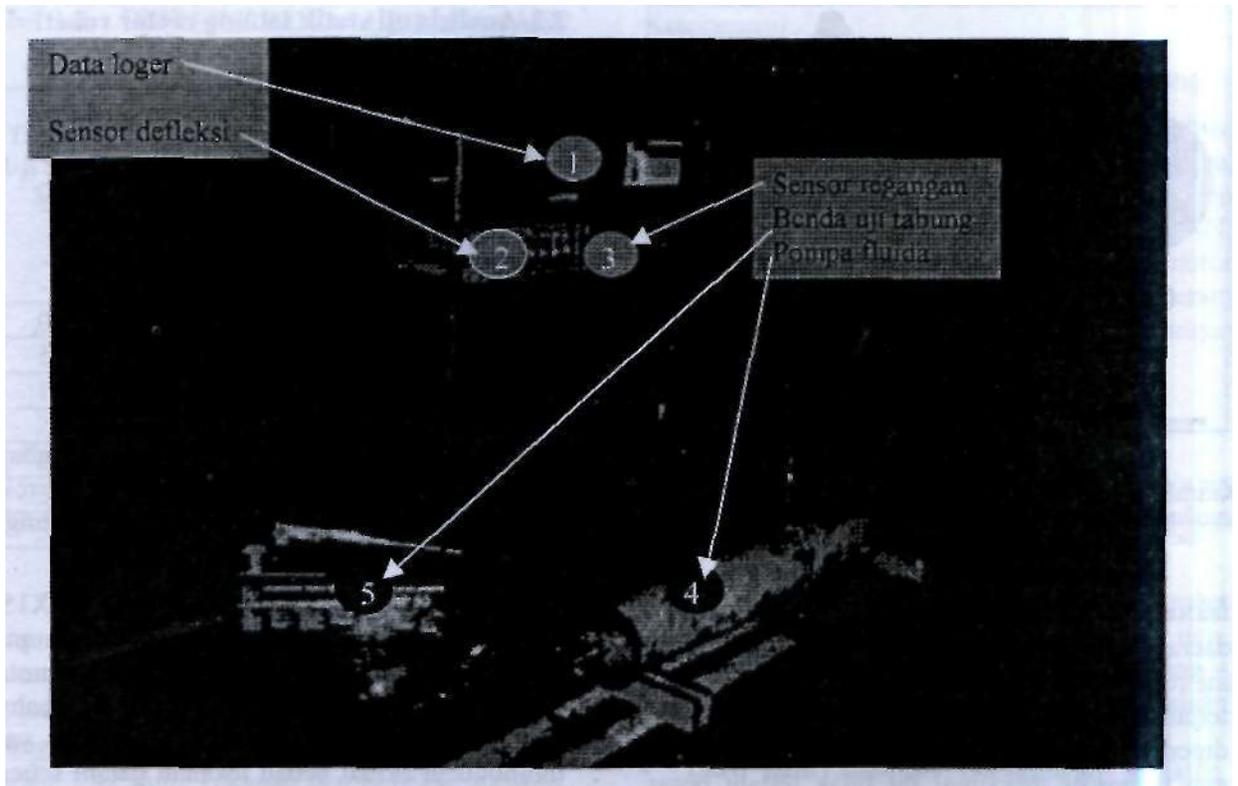
Sebagai langkah validasi hasil perhitungan struktur, maka perlu dilakukan uji statik tabung motor. Dari pengujian ini akan didapatkan regangan dan defleksi yang terjadi pada saat tabung dikenai beban tekanan dalam sesuai dengan kondisi operasional. Adapun sistem uji statik ini seperti pada Gambar 2-5. Sedangkan benda uji yang terpasang pada saat pengujian terlihat pada Gambar 2-6.



Gambar 2-5 : Skema uji statik tabung motor roket

Keterangan :

- |                                  |                      |
|----------------------------------|----------------------|
| 1. Strain gauge                  | 5. Fluida bertekanan |
| 2. Penumpu                       | 6. Saluran fluida    |
| 3. Tabung motor roket            | 7. Pengukur tekanan  |
| 4. Strain gauge / dial indicator | 8. Pompa fluida      |

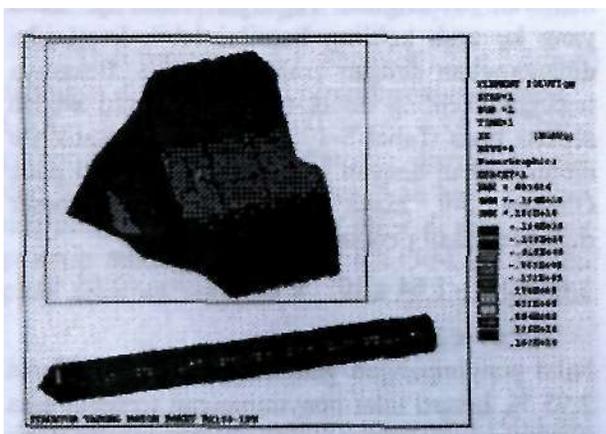


Gambar 2-6 : Pelaksanaan uji statik tabung motor roket

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Analisis Tegangan

Analisis tegangan dilakukan terhadap tegangan struktur tabung motor roket yang terbesar. Berdasarkan hasil simulasi elemen hingga diketahui bahwa tegangan terbesar terjadi pada tegangan arah sumbu Z. Grafik tegangan arah sumbu Z ditampilkan pada Gambar 3-1.



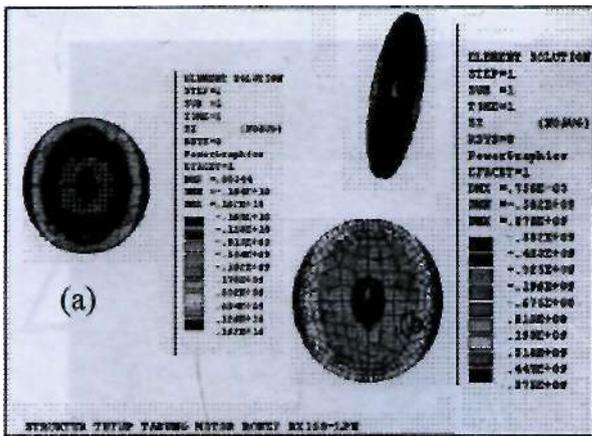
Gambar 3-1 : Tegangan arah sumbu Z

Gambar 3-1 memperlihatkan bahwa distribusi tegangan merambat mulai dari bagian pangkal yakni bagian tabung yang berrutup sampai dengan bagian ujung, yaitu bagian ujung tabung

yang terbuka, tanpa tutup. Tegangan terbesar untuk masing-masing arah tegangan terjadi pada bagian pertemuan antara tabung dengan tutupnya, baik untuk tegangan arah sumbu X, Y maupun sumbu Z. Nilai maksimal tegangan ke arah sumbu X masih di bawah tegangan arah Y maupun Z. Besar masing-masing tegangan maksimal adalah sumbu Y dan Z =  $1,64 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ , sedangkan untuk sumbu X adalah  $0,206 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ . Tegangan maksimal ini terlihat pada gambar dengan pencitraan berwarna merah. Sedangkan tegangan terkecil terdapat pada selimut tabung, berkisar antara  $0,17 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  sampai dengan  $0,17 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ . Tanda negatif pada gambar hasil simulasi hanya menunjukkan arah berlawanan dengan arah tegangan dan tidak menunjukkan besaran tegangan.

#### 3.2 Analisis Defleksi

Analisis lendutan atau defleksi dilakukan untuk mengetahui besarnya lendutan struktur tabung motor roket karena beban tekan sebesar  $35 \text{ kg/cm}^2$ . Dari Gambar 3-2 (a) terlihat bahwa distribusi defleksi terjadi pada seluruh permukaan tabung secara bervariasi. Defleksi maksimum terjadi pada bagian tutup tabung motor roket, sebesar 3,4 mm, yaitu terjadi pada daerah tegangan maksimal.



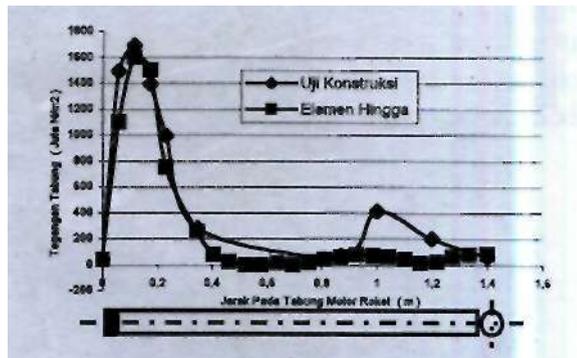
Gambar 3-2 : Tegangan pada tutup tabung motor roket setelah dipertebal 5 mm

Dari analisis tegangan diketahui bahwa faktor keamanan terkecil 1,09, yakni terjadi pada daerah tutup tabung motor roket. Tentunya angka ini relatif berbahaya terhadap beban tekan yang terjadi, apalagi beban-beban yang lain tidak diperhitungkan. Untuk mengatasi agar lendutan dan tegangan maksimal ini tidak terlalu besar, maka pada bagian pertemuan antara struktur tabung motor roket dengan tutupnya perlu dipertebal. Dalam kasus ini diambil penebalan 5 mm. Hasil perhitungan penambahan tebal ini dapat dilihat pada Gambar 3-2 (b). Dari Gambar di atas terlihat bahwa distribusi tegangan maupun lendutan pada struktur tutup tabung yang telah mengalami penebalan sampai dengan tebal total 5 mm, terjadi pada seluruh permukaan tutup tabung. Tekanan dalam sebesar  $35 \text{ kg/cm}^2$  atau sebesar  $3,43 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  telah menyebabkan terjadinya lendutan sebesar 0.7 mm dengan tegangan terbesar pada arah sumbu Z adalah  $5,82 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ . Angka lendutan dan tegangan ini relatif aman untuk menerima beban tekan tersebut. Karena jika tegangan maksimal ini dibandingkan dengan tegangan ijin bahan, maka akan didapatkan faktor keamanan sebesar :

$$\frac{1,793 \times 10^9}{5,82 \times 10^8} = 3,08$$

angka keamanan struktur sebesar 3,08 ini menunjukkan bahwa struktur tabung tersebut aman terhadap beban tekan yang terjadi. Untuk mengetahui validitas dari perhitungan simulasi di atas, perlu dilakukan analisis uji statik tabung motor roket RX150-LPN, melalui pemberian tekanan pada benda uji tersebut.

### 3.3 Analisis uji statik tabung motor roket



Gambar 3-3 : Distribusi tegangan arah membujur hasil uji statik tabung motor roket RX150-LPN dan hasil perhitungan simulasi elemen hingga

Hasil uji statik tabung motor roket RX150-LPN ditampilkan pada Gambar 3-3, di samping itu juga ditampilkan hasil perhitungan simulasi elemen hingga. Dari Gambar ini terlihat bahwa distribusi tegangan selama uji statik, yang ditimbulkan akibat beban tekanan dalam sebesar  $3,47 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ , bergerak naik mulai titik nol sampai sekitar 1,4 cm. Pada daerah ini tegangan tabung mencapai nilai maksimal, yaitu  $1,69 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ . Setelah itu tegangan tabung menurun dan naik kembali pada jarak 0,87 m dari titik nol dan mencapai harga  $412 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ . Kenaikan ini diperkirakan karena pengaruh tutup tabung pada titik 1,4 m sebagai saluran fluida untuk memperoleh tekanan dalam, seperti pada Gambar benda uji. Melewati jarak 0,87 m sampai dengan ujung tabung 1,4 m tegangan benda uji terus menurun. Sedangkan Tegangan hasil uji statik yang ke arah keliling bernilai lebih kecil jika dibandingkan dengan arah membujur. Besarnya tegangan keliling untuk tekanan tertentu adalah seperti pada Tabel 3-1. Jika hasil uji statik ini dibandingkan dengan hasil simulasi seperti pada Gambar 3-9, maka untuk tegangan terbesar diperoleh hasil penyimpangan sebesar :

$$\frac{1,69 \times 10^9 - 1,64 \times 10^9}{1,69 \times 10^9} \times 100 \% = 2,95 \%$$

Nilai penyimpangan yang terjadi hanya bernilai 2,95 %, berarti nilai penyimpangan tersebut bisa ditoleransi, sehingga analisis hasil uji statik dinyatakan bisa diterima dan bisa dilanjutkan pada tahapan analisis defleksi pada saat uji statik. Defleksi yang terjadi pada saat uji statik dapat dilihat pada Tabel 3-1.

Tabel 3-1 : DEFLEKSI BENDA UJI PADA SAAT UJI STATIK

Tekanan Uji Statik MPa	Defleksi di Tengah Selimut Tabung Mm	Tengah Tutup Tabung	
		Defleksi mm	Tegangan keliling MPa
0,5	0.001	3,20	62,685
1,0	0.015	3,26	68,3
1,5	0.018	3,30	120
2,0	0.021	3,40	214
2,5	0.022	3,46	4525
3,0	0.025	3,1	1064,5
3,5	0.027	3,6	1435,8

Seperti yang telah diketahui bahwa beban tekan struktur tabung adalah  $35 \text{ kg/cm}^2$  atau sekitar  $3,43 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ , dengan beban sebesar ini, menurut perhitungan simulasi elemen hingga, tabung motor roket mengalami defleksi maksimal sebesar 3,42 mm. Tekanan dan defleksi ini akan dibandingkan dengan hasil uji statik tabung, seperti pada Tabel di atas. Terlebih dahulu dihitung secara interpolasi untuk menentukan defleksi yang ditimbulkan pada tekanan  $3,43 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ , dengan susunan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{3 - 3,43}{3,43 - 3,5} = \frac{3,1 + X}{X + 3,6} \dots\dots\dots(3-1)$$

Keterangan:

X= defleksi hasil uji statik pada tekanan  $3,43 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ .

Dari persamaan 3-1 diperoleh :  $X = 3,3 \text{ mm}$ , sehingga diperoleh hasil penyimpangan sebesar :  $(3,4 - 3,3) / 3,4 \times 100 \% = 2,94 \%$ . Nilai penyimpangan ini bisa diterima, karena kurang dari 5 %. Selanjutnya berdasarkan hasil analisis dan pengujian tabung motor roket di atas, dibuat prototip tabung motor roket RX150-LPN seperti pada Gambar3-4.

### 3.4 Analisis Berat Tabung

Berat tabung motor roket RX150-LPN dapat diketahui melalui penimbangan langsung maupun dihitung melalui persamaan sederhana sebagai berikut:

$$WT = W_s + WTT \dots\dots\dots(3-2)$$

Keterangan:

$W_s$  = Berat selimut;  $WTT$  = Berat tutup tabung

Dari persamaan di atas diketahui bahwa berat tabung = 17 kg ; sedangkan untuk tabung lama mempunyai berat 26 kg dengan tebal 3 mm [Dokumen Teknik Bidang Struktur-LAPAN, 1998] atau 41 % dari berat total struktur motor roket yang lama [Triharjanto R. H., 2001]. Berarti pengurangan berat tabung hasil perancangan adalah  $26 - 17 = 9 \text{ kg}$ .

## 4. KESIMPULAN

Dari uraian perancangan teknik tabung motor roket RX150-LPN di atas, dapat disimpulkan sebagai berikut

- Sifat-sifat konstruksi tabung motor roket hasil rancangan adalah : Tebal dinding 3 mm, diameter luar tabung = 15 cm, dan panjang = 1,4 m dengan bahan terbuat dari baja paduan AISI HI 1 dan beratnya 17 kg.
- Dari hasil simulasi perhitungan struktur, Tegangan maksimal yang terjadi pada tabung motor roket adalah  $1,64 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ .
- Nilai penyimpangan antara hasil pengujian statik tabung dengan hasil simulasi, adalah
  - Penyimpangan tegangan = 2,95 %
  - Penyimpangan defleksi = 2,94 %
- Prototip tabung motor roket RX150-LPN hasil perancangan, dapat digunakan sebagai salah satu acuan pembuatan tabung motor roket.

## DAFTAR PUSTAKA

Abraham,LH. 1962, *Structural design of Missile and Spacecraft*, McGraw-Hill Book, New York

Earl R. Parker, 1967, *Material Data Book For Engineers and Scientist*, McGraw-Hill Book Company, New York

Timoshenko S., Woinowsky S., Krieger 1988, *Teori Pelat dan Cangkang* Terjemahan S. Hindarko, Penerbit Erlangga, Jakarta

Zienkiewicz, 1977, *The Finite Element Methode*, McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, England

\_\_\_\_\_, 1997, *Ansys GUI Help Manual, Ansys Release 5.4.*, SAS IP., Inc., Urbana

\_\_\_\_\_, 1998, *Dokumen Teknik Bidang Struktur dan Mekanika Roket dan Satelii*, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, LAPAN, Bogor

\_\_\_\_\_, 1998, *Doku men Teknik Laboratorium Uji Statik Motor Roket*, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, LAP AN, Bogor



Gambar 3-4.: Prototip tabung motor roket RX1 50-LPN dan peneliti