



# Majalah

# LAPAN

---

NO. 86

TAHUN KE XXII

BULAN JULI 1998

ISSN 0126-0480

- ANALISIS DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN TEGANGAN PADA DINDING TABUNG MOTOR ROKET RX 250  
Ediwan, Ganda Samosir 1
- ✓ PERGESERAN LAPISAN E SPORADIS DI ATAS SUMEDANG  
Sri Suhartini 8
- ✓ PENGARUH TEMPERATUR ATMOSFER BAWAH TERHADAP FREKUENSI MINIMUM IONOSFER  
Mumen. T, Buldan. M, M. Sjarifuddin 14
- ✓ PENENTUAN MUF PADA SAAT TERJADI GANGGUAN GEOMAGNET  
Mumen. T, M. Sjarifudin, Habirun, Jiyo 19
- PENGARUH VARIABILITAS AKTIVITAS DAN IRRADIANSI MATAHARI JANGKA PANJANG PADA SUHU PERMUKAAN LAUT (SST) DI SEKITAR EKUATOR  
Wilson Sinambela, L. Muh. Musafar Kilowasid, Waluyo Eko Cahyono, dan Maspul Aini. Kambri 24
- VARIASI RADIASI EXTREEM ULTRA VIOLET MATAHARI DAN PENGARUHNYA PADA LAPISAN ATMOSFER ATAS BUMI  
Suratno 32

---

DITERBITKAN OLEH :

**LEMBAGA PENERBANGAN DAN ANTARIKSA NASIONAL**

Jl. Pemuda, Persil No. 1, Jakarta 13220, INDONESIA

# Analisis Distribusi Temperatur Dan Tegangan Pada Dinding Tabung Motor Roket RX 250

Ediwan, Ganda Samosir \*)

## ABSTRACT

Static test for motor rocket RX-250 was conducted at Static Test Laboratory of LAPAN Rumpin in order to measure the amount of thrust measured by the motor rocket. During the test, it was observed that the motor rocket cylinder failed at internal pressure of 120 atmosphere at the fourth second of supposed six-second-long burning time. While according to the theoretical analysis result, the maximum allowable internal pressure for this motor rocket tube was 130 atmosphere. The motor rocket tube was 2 m long with wall thickness of 1 cm and cap thickness of 1.1 cm.

This paper analysis the cause of motor rocket tube failure. The analysis is emphasised on the effect of excessive thermal stress on one area due to imperfection of propellant connection such that the ignition fire has reached the wall of the motor rocket earlier than expected. The thermal analysis used the result from previous research on the material properties of al alloy used in the current motor rocket at different temperatures.

## RINGKASAN

Uji statik motor roket RX-250 telah dilakukan di laboratorium uji statik LAPAN Rumpin, untuk mengetahui besarnya gaya dorong dari motor tersebut. Dalam pengujian tersebut ternyata motor roket yang terbuat dari tabung paduan aluminium pecah pada tekanan sekitar 120 atmosfer pada detik keempat dari enam detik yang direncanakan. Panjang tabung motor roket 2 m, tebal dinding tabung 1 cm dan tebal penutup tabung motor roket 1,1 cm. Tekanan maksimum yang diijinkan menurut perhitungan teoritis untuk bahan tabung motor jenis tersebut diatas adalah 130 atmosfer.

Dalam tulisan ini akan dilakukan analisis penyebab tabung motor tersebut diatas pecah. Analisis akan dititik beratkan pada pengaruh tegangan termal yang berlebihan pada satu lokasi, karena penyambungan propelan yang kurang sempurna, sehingga api merambat menyentuh dinding tabung motor bagian dalam sebelum waktunya, yang mengakibatkan menurunnya kekuatan pada tempat tersebut. Disamping itu, analisis tegangan termal akan didukung dengan data hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai sifat-sifat material paduan aluminium yang digunakan untuk tabung motor tersebut pada berbagai temperatur.

## 1. PENDAHULUAN

Motor roket yang dipengaruhi panas akan mengalami tegangan dan regangan termal. Tegangan dan regangan termal dapat dihitung dengan pendekatan teoritik maupun dikaji secara eksperimen.

Dalam tulisan ini akan dibahas perhitungan distribusi temperatur dan tegangan secara teoritis terhadap tabung motor roket RX 250 bahan paduan aluminium yang pernah gagal (meledak), sewaktu uji statik tahun 1996

dengan menggunakan rumus Fungsi kesalahan Gauss (Error Function), sehingga dapat diketahui sebab-sebab ledakan tersebut. Untuk mengamati perubahan temperatur dan pengaruhnya terhadap dinding ruang bakar dengan pendekatan bahwa akan terjadi pembakaran dengan sempurna secara linier, dimana perpindahan panas akibat pembakaran akan terjadi kenaikan temperatur dengan tiba-tiba, melebihi batas titik cair bahan dari tabung.

\*) Peneliti Bidang Struktur dan Mekanika, Pusat Roket & Satelit-LAPAN

**2. DASAR TEORI**

Dalam analisa perpindahan panas suatu sistem persamaan keseimbangan energi harus memenuhi konservasi energi :

$$E_{in} + E_g = E_{out} + E_s \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan :

$E_{in}$  = Energi mengalir ke dalam per waktu

$E_g$  = Energi yang dibangkitkan per waktu

$E_{out}$  = Energi mengalir ke luar per waktu

$E_s$  = Perubahan energi yang tersimpan per waktu.

Ilmu perpindahan panas adalah suatu cabang ilmu pengetahuan yang mempelajari bagaimana energi dalam bentuk panas berpindah dari suatu benda ke benda lain disebabkan perbedaan temperatur di antara benda-benda tersebut.

Dengan menguasai ilmu perpindahan panas kita dapat merencanakan alat atau bahan penukar panas yang terbaik dengan data yang ditentukan, misalnya alat tersebut harus kompak, ringan dan murah tanpa mengurangi tujuannya.

Cara-cara energi ini berpindah dari suatu benda ke benda lainnya yang temperaturnya lebih rendah, sampai sekarang belum ditemukan suatu teori yang dapat merangkum seluruh gejala perpindahan energi ini. Ada tiga teori secara umum yang menjelaskan perpindahan energi dengan gejala yang berbeda yaitu konveksi, konduksi dan radiasi.

**2.1 Perpindahan Panas Dan Konduksi**

Aliran energi panas dengan mode konduksi yang menembus penampang silinder panjang atau dinding homogen di antara permukaan isothermal yang berbeda temperaturnya, (Gambar 2-1).

Dari persamaan Fourier, aliran panas konduksi stasioner pada setiap lintasan panas dinyatakan:

$$q = - k A \frac{dT}{dr} \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan:

$q$  = jumlah panas yang dipindahkan

$k$  = konduktivitas termal

$A$  = luas bidang aliran panas

$\frac{dT}{dr}$  = gradien temperatur pada dinding tabung

Dari persamaan keseimbangan energi didapat :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan :

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (\text{cm}^2/\text{s})$$

$\alpha$  = coefisien diffusivitas thermal

$\rho$  = massa jenis

$c$  = panas jenis

Dengan menganggap sifat-sifat material adalah tetap  $g''=0$  maka persamaan diferensial untuk distribusi temperatur  $T(r,t)$  adalah :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots (2-4)$$

sarat batas  $T(0,t) = T_c - T_i$

$T(r,t) = 0$

dengan :

$T_c$  = temperatur ruang bakar

$T_i$  = temperatur tiap ketebalan/titik atur jari-jari

Persoalan ini dapat diselesaikan dengan teknik transformasi Laplace (Holman, 1981)

$$T(r,t) = T_i - (T_c - T_i) \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{c \cdot x}{\alpha \cdot t}} \right) \dots\dots\dots (2-5)$$

dapat juga ditulis,

$$\frac{T(r,t) - T_i}{T_c - T_i} = \operatorname{erf} \cdot \frac{x}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t}} \dots\dots\dots (2-6)$$

**2.2. Penetrasi Temperatur**

Perubahan temperatur  $(T-T_i)$  sebagai fungsi jarak dan waktu yang disebabkan oleh

kenaikan distribusi temperatur permukaan propelan  $T_c$  pada  $T_i$  sebagai titik awal ( $T-T_i$ ) adalah sebagai berikut :

$$\frac{(T - T_i)}{(T_c - T_i)} = \text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot t}} \right) \dots\dots\dots (2-7)$$

Distribusi dinding dari sumbu tabung  $T_c$  sampai  $T_i$  dan sering ditulis :

$$\frac{T_i}{T_c} = 1 - \text{Erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot t}} \right) \dots\dots\dots (2-8)$$

dengan  $n = \frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot t}}$

dari sini terlihat bahwa penetrasi adalah kedalaman / ketebalan ( $r$ )

### 2.3. Distribusi Temperatur

Dalam analisa pada propelan dan dinding ruang bakar, Prediksi temperatur dianggap merupakan sistem dimensi satu dengan harga karakteristik difusivitas termal liner

$$\alpha_{\text{liner}} = 0.0226 \text{ cm}^2/\text{s} \text{ (Holman, 1981)}$$

$$t_{\text{liner}} = 0.4 \text{ cm}$$

dengan :  $t = 0.2$  sampai  $4$  detik

$$T = 2000 \text{ }^\circ\text{F}$$

Bila temperatur dinding pada waktu ( $t$ ), maka dapat dihitung penetrasi  $dT$  dengan selang waktu  $t = 0.2$  detik. Waktu rambatan pada propelan diasumsikan terjadi kenaikan temperatur 1-2 % akibat semakin luasnya propelan terbakar.

$$T_c = 0.02 \cdot T = 0.02 \cdot 2000 = 2040$$

$$n = \frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot t}} = \frac{0.4}{2\sqrt{0.0226 \cdot (0.2)}} = 2.975$$

maka,  $T_i = 2040 \cdot (1 - \text{Erf}(n))$   
 $= 2040 \cdot (1 - 0.999)$   
 $= 2.04 \text{ }^\circ\text{C} = 35.6 \text{ }^\circ\text{F}$

Perubahan temperatur pada titik atur secara kasar pada 4 detik terakhir untuk ketebalan liner (tinggal linier saja) dapat dilihat pada Tabel 3-1 dan untuk distribusi temperatur tiap ketebalan tabung dapat dilihat pada Tabel 3-2.

## 3. UJI LABORATORIUM

Uji laboratorium untuk bahan tabung dilakukan dengan memeriksa struktur mikronya, kekerasannya serta uji tarik seperti yang diperlihatkan pada lampiran. Sedangkan sifat fisik bahan akan dibahas tersendiri beserta perhitungan tegangan dan hasilnya.

### 3.1 Analisis Bahan Tabung

Untuk pembakaran dalam, propelan berfungsi sebagai pelindung atau isolasi bagi dinding ruang bakar, disamping liner. Jadi yang diamati adalah perambatan panas pada liner dan dinding tabung dengan diameter tabung 250 mm, (Gambar 3-1) bahan paduan aluminium 2024-T3, titik cair paduan aluminium  $670^\circ\text{C}$  (Abraham, 1962) serta telah diuji tarik dengan kuat tarik pada titik luluh  $4000 \text{ kg/cm}^2$  dan kekerasan 149 HV (Gambar 3-2), demikian juga pada temperatur tinggi dan material yang gagal (Gambar 3-3 dan Gambar 3-4). Untuk memprediksi pengaruhnya terhadap kekuatan dinding tersebut, pendekatannya adalah dengan menganggap propelan sebagai bidang datar yang terbakar dimulai dari bagian dalam dengan anggapan proses pembakaran sempurna sampai habis.

Pada tabung perpindahan panas yang dominan adalah hantaran (konduksi) sehingga perpindahan panas lain seperti konveksi dan radiasi dianggap kecil dan diabaikan.

### 3.2. Perhitungan Tegangan Termal

Distribusi temperatur yang terjadi di dalam ketebalan dinding tabung ruang bakar akan menimbulkan tegangan, yang disebut

tegangannya thermal. Pendekatan dari tabung adalah silinder berlubang pada arah sumbu dengan jari-jari luar  $b$  dan jari-jari dalam  $a$  sehingga didapat distribusi tegangan (Boley And Weiner, 1982).

Radial :

$$\sigma_r = \frac{\alpha \cdot E(T_1 - T_0)}{2(1-\nu)} \left( -\log \frac{r}{a} + \frac{b^2(r^2 - b^2)}{r^2(b^2 - a^2)} \log \frac{b}{a} \right) \dots\dots(3-1)$$

Keliling :

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha \cdot E(T_1 - T_0)}{2(1-\nu)} \left( 1 - \log \frac{r}{a} - \frac{b^2(r^2 - b^2)}{r^2(b^2 - a^2)} \log \frac{b}{a} \right) \dots\dots(3-2)$$

dengan  $\alpha$  = coefisien of thermal expansion

Dari rumus diatas didapat tegangan rata-rata yang terjadi pada setiap ketebalan seperti yang diperlihatkan pada Tabel 3-3.

**3.3. Hasil Perhitungan**

Dari hasil perhitungan distribusi temperatur pada liner, tabung dan perhitungan tegangan termal dapat dilihat pada Tabel 3-1, Tabel 3-2 dan Tabel 3-3 sebagai berikut :  
Tabel 3-1 di bawah ini memperlihatkan distribusi temperatur sampai akhir pembakaran yaitu dari 0.2 detik sampai 4 detik.

Tabel 3-1 DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA LINER

T (detik)	n	Erf (n)	Ti (°C)	Ti (°F)
0.2	2.9750	0.999	2.040	35.6
0.4	2.1035	0.997	6.12	43.0
0.6	1.7175	0.984	33.00	91.0
0.8	1.4874	0.964	73.85	165.0
1.0	1.3300	0.938	125.00	257.0
1.2	1.2144	0.911	182.00	360.0
1.4	1.1240	0.881	243.00	470.0
1.6	1.0517	0.859	288.00	550.0
1.8	0.9916	0.841	324.36	615.0
2.0	0.9407	0.816	374.80	707.0
2.2	0.8970	0.795	418.20	784.0
2.4	0.8580	0.776	457.00	855.0
2.6	0.8250	0.753	502.00	936.0
2.8	0.7950	0.742	526.00	979.0
3.0	0.7681	0.717	576.00	1068.8
3.2	0.7437	0.705	602.00	1115.6
3.4	0.7215	0.691	629.00	1164.0
3.6	0.7012	0.678	657.00	1215.0
3.8	0.6825	0.663	688.00	1270.0
4.0	0.6652	0.649	715.00	1319.0

Tabel 3-2 adalah hasil perhitungan distribusi temperatur untuk ketebalan tabung sampai akhir pembakaran yaitu 0.2 detik sampai 1 detik. Dengan data tabung aluminium untuk perhitungan distribusi temperatur :

$\alpha = 0.457$  cm /s (Holman, 1981), tebal = 1 cm sehingga didapat distribusi temperatur tiap ketebalan tabung seperti Tabel 3-2 di bawah ini.

Tabel 3.2 : DISTRIBUSI TEMPERATUR TABUNG

X (cm)	t (detik)	n	Erf (n)	T °C	T °F
0.2	0.2	0.331	0.365	238.0	460.0
0.2	0.4	0.234	0.264	276.0	529.0
0.2	0.6	0.191	0.222	291.0	555.0
0.2	0.8	0.165	0.179	307.8	586.0
0.2	1.0	0.148	0.157	316.0	600.8
0.4	0.2	0.662	0.649	131.6	269.0
0.4	0.4	0.534	0.543	171.0	340.0
0.4	0.6	0.382	0.409	221.0	430.0
0.4	0.8	0.331	0.35	243.0	469.0
0.4	1.0	0.296	0.308	259.5	499.0
0.6	0.2	0.992	0.835	61.87	144.0
0.6	0.4	0.702	0.678	120.75	250.0
0.6	0.6	0.573	0.572	160.57	321.0
0.6	0.8	0.496	0.512	183.03	362.0
0.6	1.0	0.444	0.466	200.00	392.0
0.8	0.2	1.323	0.938	23.25	73.8
0.8	0.4	0.935	0.810	71.25	160.2
0.8	0.6	0.763	0.717	105.86	222.5
0.8	0.8	0.661	0.649	131.25	268.2
0.8	1.0	0.592	0.588	154.50	310.0
1.0	0.2	1.654	0.980	7.51	46.0
1.0	0.4	1.169	0.899	37.70	100.0
1.0	0.6	0.955	0.818	68.25	155.0
1.0	0.8	0.827	0.755	91.87	197.0
1.0	1.0	0.739	0.704	111.0	232.0

Tabel 3-3 adalah hasil perhitungan tegangan termal tiap ketebalan rata-rata dengan data bahan tabung untuk perhitungan tegangan termal : (Holman, 1981).

- $\alpha = 13.5 \cdot 10^{-6}$  (coefisien of thermal expansion)
  - $E = 7.24 \cdot 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>
  - $\nu = 0.3$
  - $b = 13.5$  cm
  - $a = 12.5$  cm
- (Gambar 3-5)

Dari data di atas dimasukkan ke rumus (3-1) dan (3-2), hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3-3 di bawah ini.

Tabel 3-3 : DISTRIBUSI TEGANGAN

r (cm)	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_\theta$ (kg/cm <sup>2</sup> )
12.6	0.12226443	271.23
12.8	0.26312	262.64
13.0	0.3233799	285.54
13.2	0.20295	223.54
13.4	0.08868	217.32

#### 4. PEMBAHASAN HASIL

Dari hasil prakiraan distribusi temperatur di atas, akan lebih mudah memperkirakan penyebab terjadinya kegagalan. Sebagai contohnya hasil prakiraan distribusi temperatur liner pada 2 detik terakhir pembakaran (Tabel 3-1), temperatur yang diterima tabung hanya 375 °C.

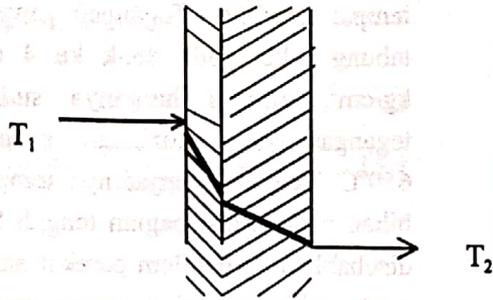
#### 5. KESIMPULAN

Dilihat dari hasil perhitungan pada Tabel 3-1, bahwa temperatur tabung pada detik ke 4 adalah 715°C. Sedangkan dari hasil uji lab bahwa struktur material tabung pada Gambar 3-3 terlihat bahwa titik leleh dari material sudah mulai pada temperatur 650°C, dan tegangan izin material tabung 150 kg/cm<sup>2</sup>.

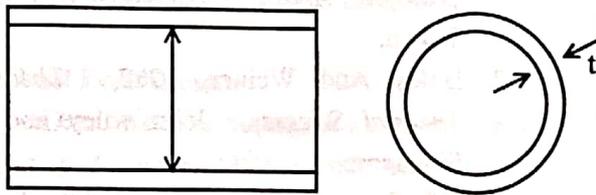
Sehingga dapat disimpulkan bahwa penyebab tabung pecah karena pengaruh temperatur yang berlebihan pada satu lokasi yang menyebabkan turunnya kekuatan tabung motor roket pada tempat tersebut. Tegangan yang terjadi pada tabung roket pada detik ke 4 adalah 217,2 kg/cm<sup>2</sup>, dimana harganya sudah melebihi tegangan yang diizinkan pada temperatur 650°C. Penyebab terjadinya temperatur berlebihan pada lokasi bagian tengah tabung motor disebabkan karena lem perekat antara propelan retak, sehingga api langsung menyentuh dinding tabung.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Alan Adams, 1984, *Computer-Aided Heat Transfer Analisis*, McGraw-Hill, LTD Tokyo.
2. Boley And Weiner, 1982, *Theory of Thermal Stresses*, John wiley and Son, Singapore.
3. E.R Parker 1967, *Material Missiles and SpaceCraft*, University Barkley California.
4. J.P Holman, 1981, *Heat Transfer*, McGraw-Hill Book, Inc, New York.
5. L.H Abraham, 1962, *Structural Design of Missiles and SpaceCraft*, McGraw-Hill Book, New York.
6. Suchas.V, 1980, *Numerical Heat transfer*, McGraw Hill , New York.

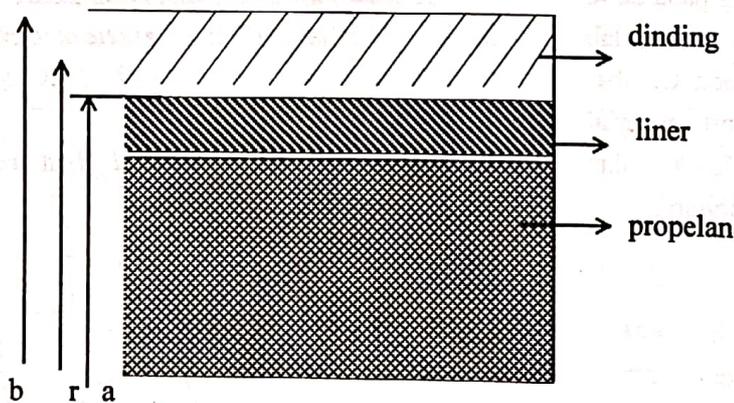


Gambar 2-1 : PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI ANTARA DUA PERMUKAAN ISOTERMAL.



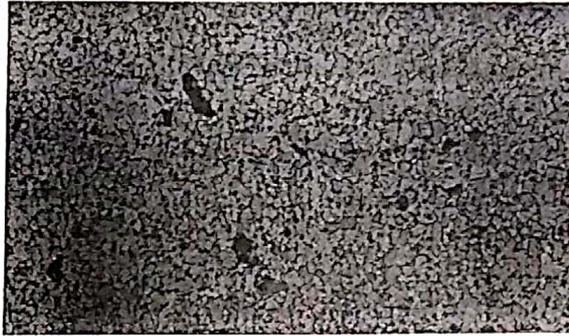
Keterangan gambar :  
 d=diameter tabung = 25cm  
 t=tebal tabung = 1 cm

Gambar 3-1 : BENTUK TABUNG



Keterangan gambar:  
 a=jari-jari dalam  
 b=jari-jari luar  
 r=titik atur jari-jari

Gambar 3-5 : GEOMETRI TABUNG



Gambar 3-2 : SAMPEL MATERIAL INDUK (500X) KEKERASAN 149HV  
ATAU 4000 KG/CM<sup>2</sup>



Gambar 3-3 : SAMPEL MATERIAL INDUK YANG DIPANASKAN 650°C  
SELAMA 30 MENIT .KEKERASAN 86 HV ATAU 200 KG/CM<sup>2</sup>



Gambar 3-4 : SAMPEL MATERIAL YANG GAGAL KEKERASANNYA 80 HV  
ATAU 150 KG/CM<sup>2</sup>