

ANALISIS TEORITIK TEBAL MINIMUM TABUNG ROKET RX250-LPN DAN PENGARUHNYA TERHADAP TRAYEKTORI

Oleh : Setiadi^{*)}
Wigati^{**)}

Abstrak

Telah sekian kali LAPAN berhasil meluncurkan roketnya seperti RX-150, RX-180 dan RX-250. Setiap kali peluncuran diperlukan adanya data teknis, misalnya untuk struktur adalah diameter tabung, tebal, bahan dan tekanan yang bekerja. Sedangkan untuk prediksi trayektori diperlukan data berat total roket, gaya dorong, isp dan waktu pembakaran.

Tulisan ini akan membahas upaya mendapatkan tebal yang minimum dari tabung roket RX250-2000LPN berdasarkan tekanan yang bekerja. Tebal minimum yang didapatkan akan lebih kecil dari tebal aktual, sehingga berat tabungnya pun akan lebih kecil dibandingkan berat tabung aktual.

Perbedaan berat yang terjadi tentu akan mengubah bentuk prediksi trayektorinya, selanjutnya untuk mendapatkan prediksi trayektori, akan dicoba memakai perangkat lunak yang ada.

1. PENDAHULUAN

Untuk kesekian kalinya LAPAN telah meluncurkan roketnya. Peluncuran yang dilaksanakan pada tanggal satu Juli 1997, merupakan peluncuran yang pertama dari empat kali peluncuran yang direncanakan pada tahun ini.

Roket yang diluncurkan sebanyak dua buah, bertingkat satu yaitu RX250-2000LPN dan RX250-3000LPN. Diameter tabung 248 mm, bermuatan transponder dengan tujuan untuk uji coba radar L-Band buatan negara Cina dan sekaligus menguji kinerja motor roket berbahan bakar propelan HTBP (Hydroxy Terminated Poly Butadiene). Kedua roket tersebut dapat meluncur dengan baik, hanya saja masih terdapat perbedaan ketinggian terbang antara prediksi dengan data dari radar. Perbedaan ketinggian terbang ini pula yang menjadi inspirasi penulisan paper ini.

Terlepas dari nilai keberhasilan dan kekurangan peluncuran roket tersebut, yang akan dibahas dalam tulisan ini dititik beratkan pada upaya kemungkinan pengurangan berat tabung motor roket dan bagaimana pengaruhnya terhadap prediksi trayektorinya. Pengurangan berat dapat dilakukan dengan mengurangi ketebalan tabungnya, dengan demikian selanjutnya perlu ditinjau aspek kekuatan struktur dan perubahan bentuk trayektori.

^{*)} Staf Bidang Struktur Mekanika ROSAT

^{**)} Staf Bidang Kendali ROSAT

Berdasarkan input data teknis roket seperti diameter tabung, tebal, bahan dan tekanan yang bekerja akan dapat dihitung kekuatan struktur tabung. Demikian pula jika diketahui data berat motor roket, propelan, payload, gaya dorong, impuls spesifik dan waktu pembakaran akan dapat diprediksi bentuk trayektorinya.

Secara umum dapat dimengerti bahwa pengurangan berat dapat mempertinggi terbang roket dan yang tidak kalah pentingnya adalah menjadikan struktur tersebut lebih ekonomis. Disini akan dilakukan analisis teori perhitungan antara tebal tabung terhadap tegangan kritisnya untuk berbagai nilai tekanan ruang bahan bakar khususnya untuk roket RX250-2000LPN, sehingga diharapkan didapat tebal yang minimum. Analisis kekuatan struktur dilakukan berdasarkan teori struktur selaput tipis atau cangkang (shell) silinder bundar. Sedangkan untuk mendapatkan prediksi trayektori yang lebih akurat digunakan perangkat lunak yang ada seperti Aerolab.

2. PEMBAHASAN TEORI DASAR

2.1. Struktur Selaput Tipis / Cangkang

Struktur selaput tipis didefinisikan sebagai struktur permukaan bidang lengkung ber dinding tipis, yang salah satu dimensinya yaitu : tebalnya jauh lebih kecil dibandingkan dimensi lainya yaitu arah panjang, arah lebar dan jari-jari kelengkungannya.

Permukaan dinding yang membagi ketebalan lengkung sama besar disebut bidang tengah, dan jika bentuk bidang tengah dan ketebalan cangkang ditentukan, maka bentuk geometris struktur cangkang tersebut akan dapat dinyatakan secara lengkap. Struktur ini dapat berupa satu permukaan yang melengkung, berbidang banyak atau yang berlipat-lipat.

Dari sifat geometrinya yang sangat langsing di mana ketebalan jauh lebih kecil dibandingkan jari-jari kelengkungan dan juga karena mempunyai kekakuan lentur yang kecil maka menjadikan gaya aksial sebagai sistem pemikul beban utama dibandingkan tegangan lentur akibat momen, sifat struktur cangkang yang memikul beban sepenuhnya dengan menimbulkan hanya tegangan-tegangan yang langsung bekerja dalam bidang permukaan struktur cangkang itu sendiri dikenal sebagai sifat sebuah "membrane". Gaya-gaya membrane akan mungkin terjadi bilamana perbandingan tebal dengan jari-jari kelengkungannya sama dengan atau kurang dari $1/20$.

Gambar-1 dan gambar-2 masing-masing menunjukkan geometri struktur cangkang putar dan gaya-gaya dalam yang bekerja.

2.2. Struktur Cangkang Silinder Bundar

Tabung roket khususnya roket RX250-2000LPN ini dapat dianggap sebagai struktur cangkang silinder bundar karena mempunyai kulit yang tipis dibandingkan jari-jari tabung. Secara ringkasnya tahapan-tahapan teori yang perlu dibahas adalah :

- Teori struktur cangkang silinder bundar, yang membahas keseimbangan elemen gaya-gaya menurut sumbu x,y dan z.
- Struktur cangkang silinder bundar dengan beban simetris terhadap sumbunya, akan diperoleh persamaan dengan proyeksi gaya terhadap arah longitudinal (sumbu -x) dan tangensial N_x , N_ϕ , M_x dan M_ϕ .
- Tegangan dalam pada struktur cangkang silinder tabung roket. Disini teori membrane saja tidak cukup akurat. Karena kondisi tepi menyebabkan terjadi ketidaksinambungan, jadi akibat momen lentur diperhitungkan.

Inti dari paper ini tidak untuk membahas teori struktur cangkang silinder, dengan demikian disini cukup dituliskan rumus-rumus yang perlu untuk memperoleh tegangan pada tabung.

$$\text{Momen arah sumbu -x} \quad : \quad M_x = \frac{Q_0}{\beta} \cdot \xi(\beta x) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Momen arah tangensial} \quad : \quad M_t = \nu \cdot M_x \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Gaya normal arah sumbu -x} : N_x = p \cdot R / 2 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Gaya normal arah tangensial} : N_t = p \cdot R \dots\dots\dots (4)$$

Selanjutnya tegangan dalam yang terjadi adalah :

$$\text{Tegangan arah sumbu -x} : \sigma_x = \frac{p \cdot R}{2t} + \frac{6 \cdot M_x}{t^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Tegangan arah tangensial} : \sigma_t = \frac{p \cdot R}{t} - \frac{E \cdot W_x}{t} - \frac{6 \cdot \nu M_x}{t^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{Tegangan Resultan / kritis} : \sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_t^2}$$

Dimana :

$$Q_0 = \text{ gaya geser} = \beta^3 \cdot D \cdot p \cdot R^2 \cdot (1 - \nu / 2) / E \cdot t$$

$$\beta = \text{ konstanta deformasi} = \sqrt[4]{E \cdot t / 4 \cdot R^2 \cdot D}$$

$$\xi(\beta x) = \text{ notasi dengan nilai} = e^{-\beta x} \cdot \sin \beta x$$

$$D = \text{ kekakuan lentur} = E \cdot t^3 / 12 \cdot (1 - \nu^2)$$

p = tekanan yang bekerja pada tabung

R = jari-jari tabung

ν = poisson ratio

E = Modulus Elastisitas Bahan

t = tebal tabung

$$W_x = \text{defleksi arah sumbu } -x = \frac{Q_0}{2 \cdot \beta^3 \cdot D} \cdot \theta(\beta x)$$

$$\theta(\beta x) = \text{notasi dengan nilai} = e^{-\beta x} \cdot \cos \beta x$$

2.3. Trayektori Balistik

Lintas terbang roket tanpa ada faktor kendali merupakan lintasan balistik, perhitungan lintasan atau trayektori merupakan kegiatan menentukan kemampuan terbang roket dengan mempertimbangkan faktor-faktor penentu kinerja.

Posisi roket saat akan meluncur ditentukan dengan kordinat x & z dari pusat massanya. Sehingga persamaan gerak roket dalam 2 dimensi adalah :

$$\frac{d X_i}{dt} = v \cos \gamma$$

$$\frac{dz_i}{dt} = v \sin \gamma$$

$$\frac{d V_x}{dt} = \frac{1}{M} (T - D) \frac{v \sin \gamma}{v} - g$$

$$\frac{d V_z}{dt} = \frac{1}{M} (T - D) \frac{v \cos \gamma}{v} - g$$

Thrust atau gaya dorong roket didapat dari data uji statik roket atau bila secara teoritis dapat ditentukan dengan persamaan

$$T = \left(\frac{dW_p}{dt} \right) I_{sp} + (P_e - p_o) A_c$$

Sedangkan gaya hambat D diberikan sebagai

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_d$$

dan luas penampang $S = \frac{1}{4} (\pi d^2)$

Massa roket akan berubah saat motor mulai menyala atau saat roket mempunyai thrust, sehingga massa roket adalah suatu fungsi massa terhadap waktu

$$M = \left(\frac{W_0 + W_p - \frac{dW_p}{dt} \cdot t}{g} \right)$$

Setelah burn out massa akan menjadi $M = W_0/g$

Dalam perhitungan ini kondisi atmosfer yang digunakan ialah kondisi di atas 10 km yaitu :

$$T = 216.8^{\circ} \text{ K}$$

$$P = P_0 (0.2234) e^{-\frac{z - h_r}{L}}$$

$$\rho = \frac{P}{gRT}$$

dimana

$$z = \text{ketinggian}$$

$$k = 2.2554 \times 10^{-5} \text{ k/m}$$

$$g = 9.81 \text{ m/dt}^2$$

$$h_r = 10^4 \text{ meter}$$

$$L = 6344.5 \text{ m}$$

Untuk membatasi ketelitian perhitungan maka :

- a. Medan gravitasi dianggap homogen
- b. Thrust roket selama pembakaran adalah konstan
- c. Sudut serang selama penerbangan kecil (dalam batas linier)

3. PERHITUNGAN TEORITIK STRUKTUR TABUNG DAN PREDIKSI TRAYEKTORI

3.1. Data Geometri Struktur dan Beban

$$\text{Tebal tabung} = t = 9 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter luar} = 248 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter dalam} = 230 \text{ mm}$$

$$\text{Jari-jari tabung} = 239 \text{ mm.}$$

Beban yang bekerja merupakan tekanan ruang bakar (pressure) p sebesar 48 kg/cm^2 . Nilai ini diambil berdasarkan hasil uji statik dengan bahan bakar HTPB.

3.2. Data Bahan Tabung

Bahan yang dipakai Aluminium Alloy 2024T3, dengan tegangan ijin $\sigma_v = 4620 \text{ kg/cm}^2$

Modulus Elastisitas Bahan = $E = 0,7 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

Poisson Ratio = $\nu = 0,30$.

Prinsip kekuatan dari struktur ini adalah bahan tegangan yang terjadi pada kulit tabung haruslah lebih kecil dari tegangan ijin bahan tabung. Dengan memperhatikan adanya faktor thermal, getaran dan homogenitas bahan maka perlu diberi faktor keamanan sebesar 1,5. Dengan demikian maka dapat diasumsikan tekanan yang bekerja pada ruang bakar = $1,5 \times 48 \text{ kg/cm}^2 = 70 \text{ kg/cm}^2$.

Selanjutnya dilakukan perhitungan sesuai dengan teori dan rumus yang ada hingga didapat grafik yang merupakan hubungan tebal tabung dengan tegangan kritis kulit tabung. Terlihat pada grafik lengkung dengan variasi ketebalan tabung dan variasi tekanan untuk 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 kg/cm^2

Diasumsikan tekanan yang bekerja 70 kg/cm^2 , lalu dari grafik dengan menghubungkan lengkung tekanan 70 kg/cm^2 , dengan ordinat 4620 kg/cm^2 didapat suatu titik potong, selanjutnya dari titik ini ditarik garis vertikal sampai memotong absis tebal kulit tabung. Didapat suatu nilai tebal tabung sebesar 3,2 mm.

Dari hasil yang didapat secara perhitungan tersebut di atas, jika dikalikan dengan faktor keamanan 1,5 didapat ketebalan sebesar $3,2 \times 1,5 = 4,8 \text{ mm}$. Berdasarkan data teknis, tebal tabung roket yang diluncurkan (RX250-2000LPN) adalah sebesar 9 mm. Sehingga sesungguhnya tabung itu masih dapat ditipiskan lagi, yang artinya dapat mengurangi berat struktur.

3.3. Data Trayektori

Sebagai data masukan dalam perhitungan adalah data teknis roket yaitu :

Berat total	: 232 kg
Berat propelan	: 99 kg
Berat payload	: 30 kg
Isp	: 210 detik
Waktu pembakaran	: 6 detik
thrust	: 3600 kg
sudut elevasi	: 80°

Hasil perhitungan merupakan grafik lintas terbang dengan waktu terbang = 151 det dan mencapai ketinggian maksimum 25,19 km. Besarnya kecepatan maksimum adalah 2.8654 mach serta range = 16,25 km

4. DISKUSI HASIL PERHITUNGAN

4.1. Pengurangan Berat

Menurut data berat tabung roket RX250-2000LPN = 52 kg. Dari analisis perhitungan kekuatan tabung didapat bahwa sesungguhnya tebal tabung yang diperlukan cukup 4,8 mm, sedangkan tebal aktual tabung 9 mm. Tebal 4,8 mm menjadikan berat tabung = $4,8 \times 52/9 = 27,73$ kg atau 53,3% nya, sehingga berat tabung dapat direduksi sebesar 24,27 kg atau 46,7%.

Berat total roket aktual (berat struktur + propelan + payload dll) = 232 kg dengan adanya pengurangan berat sebesar 24,27 kg maka beratnya menjadi 207,73 kg atau dalam prosen menjadi 89,5%, sehingga berat total roket dapat direduksi sebesar 10,5%.

4.2. Perubahan Prediksi Trayektori

Setelah dilakukan pengurangan berat roket sebesar 24,27 kg (berat propelan + berat payload tetap), perhitungan kembali prediksi trayektori menghasilkan grafik lintas terbang dengan waktu terbang 157,77 detik, lebih lama 6,77 detik atau 4,5% nya dan kecepatan maksimum = 3,2523 mach, lebih besar 0,3869 mach atau 13,5% nya. Ketinggian maksimum (apogee) = 28.003 km, lebih tinggi 2,81 km atau 10,8% nya dan range sebesar 17.8 km lebih jauh 1,55 km atau 9,5% nya.

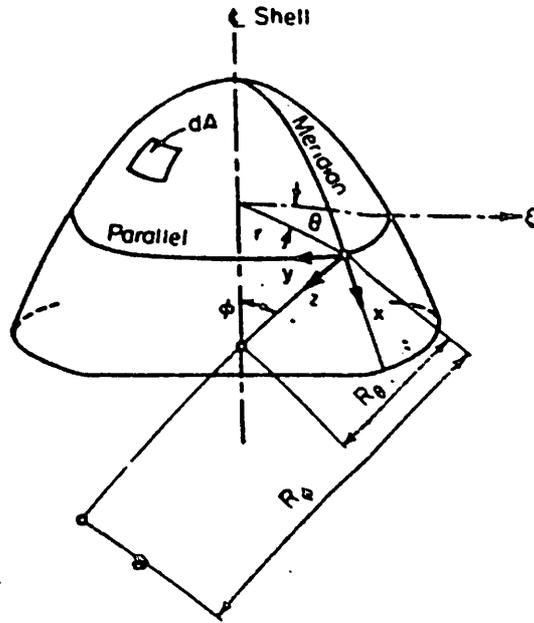
5. KESIMPULAN

- Berdasarkan data geometri struktur dan bahan tabung serta asumsi tekanan yang bekerja = 70 kg/cm^2 , maka tebal tabung roket RX250-2000 LPN ini dapat dikurangi dari 9 mm menjadi 4,8 mm.
- Pengurangan tebal tabung tersebut di atas, menjadikan berat tabung dan berat total roket berkurang atau ada reduksi. Untuk berat tabung dapat direduksi sebesar 46,7% dan untuk berat total roket dapat direduksi sebesar 10,5%.
- Jika diambil tebal tabung minimum / ekonomis (4,8 mm), maka secara prediksi ketinggian terbang secara prediksi lebih besar 10,8 %. Dimana nilai Isp, waktu bahan dan thrust ditentukan besarnya, berturut-turut 210 det, 6 detik dan 3600 kg.

KEPUSTAKAAN

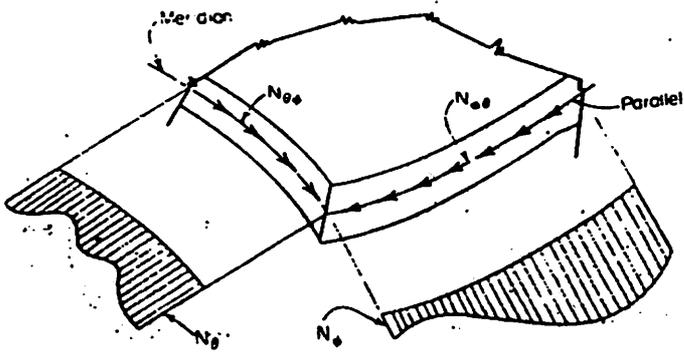
1. Abraham Lewis H 1962, **Struktural Design of Missiles and Space craft**, New York. Mc-Graw Hill Book company Inc.
2. Aerolab, 1987, **"A Planar Trajectory Program"**.
3. Baker E.H kovalevsky L. Rish F.L, 1972 **" Struktural Analysis of Shells"** Mc Graw-Hill Book Company, Inc, New York.
4. Cornellise J.W, 1979, **" Rocket Propulsion and Space Flight Dynamic"**, Pitterson, London.
5. Thimoshenko and Krieger 1984 **Theory of Plates and Shells**, Mc-graw Hill New York USA.
6. Wilbur L, Hankey, 1988, **" Reentry Aerodynamics"**, AIAA Education Series.

LAMPIRAN

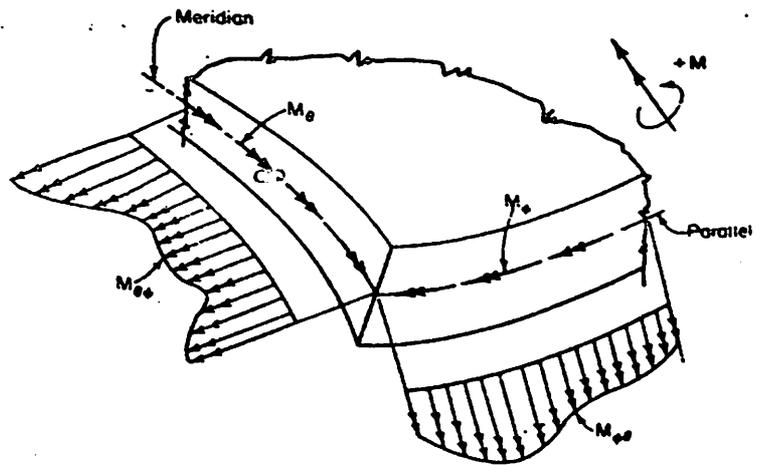


Gambar-1 Struktur cangkang putar

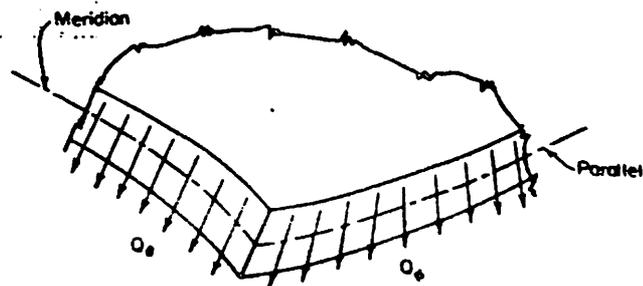
Gambar-2 Gaya dalam membrane



Gambar-2a Gaya aksial dan gaya geser sejajar bidang

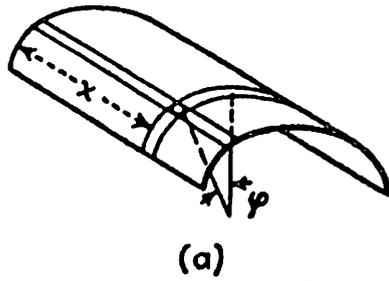


Gambar-2b Gaya geser tegak lurus bidang

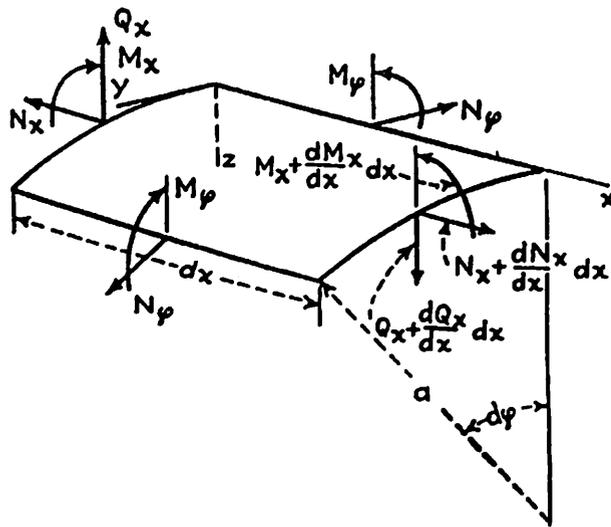


Gambar-2c Momen lentur dan momen puntir

LAMPIRAN



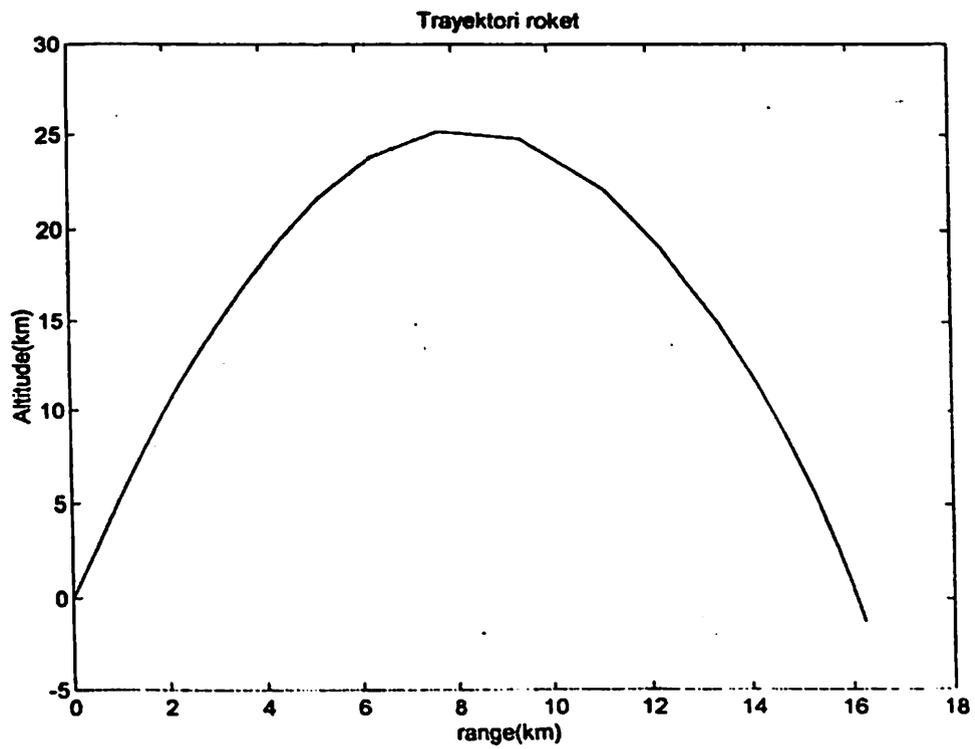
Gambar-3a Rusuk cangkang sejajar sumbu-x



Gambar-3b Gaya yang bekerja pada sisi-sisi elemen

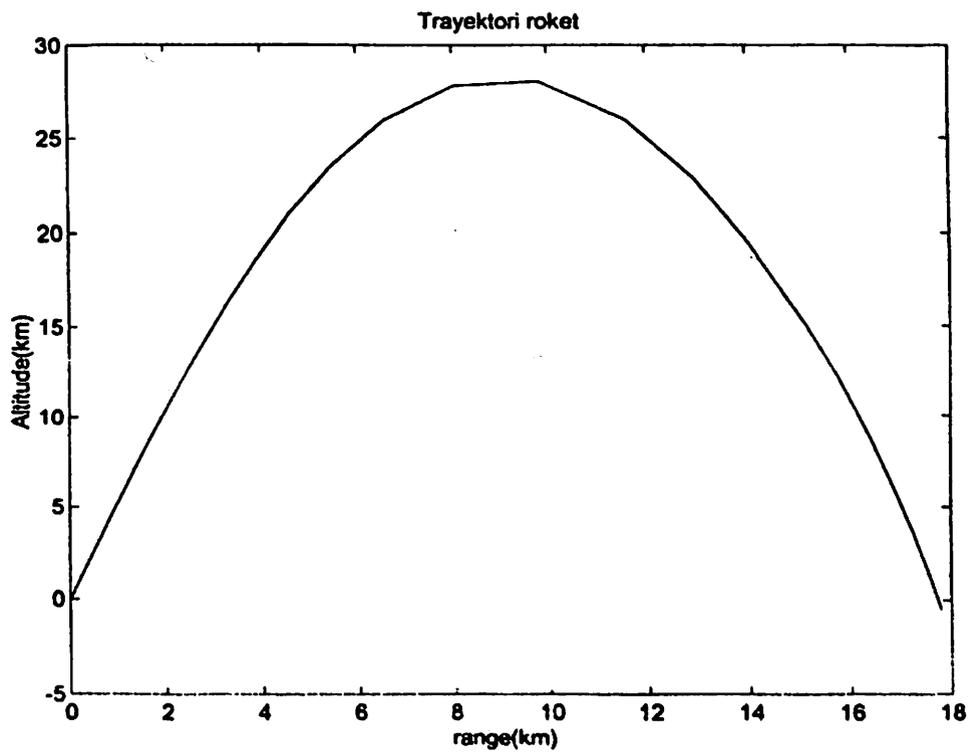
Gambar-3 Elemen struktur cangkang silinder bundar

LAMPIRAN



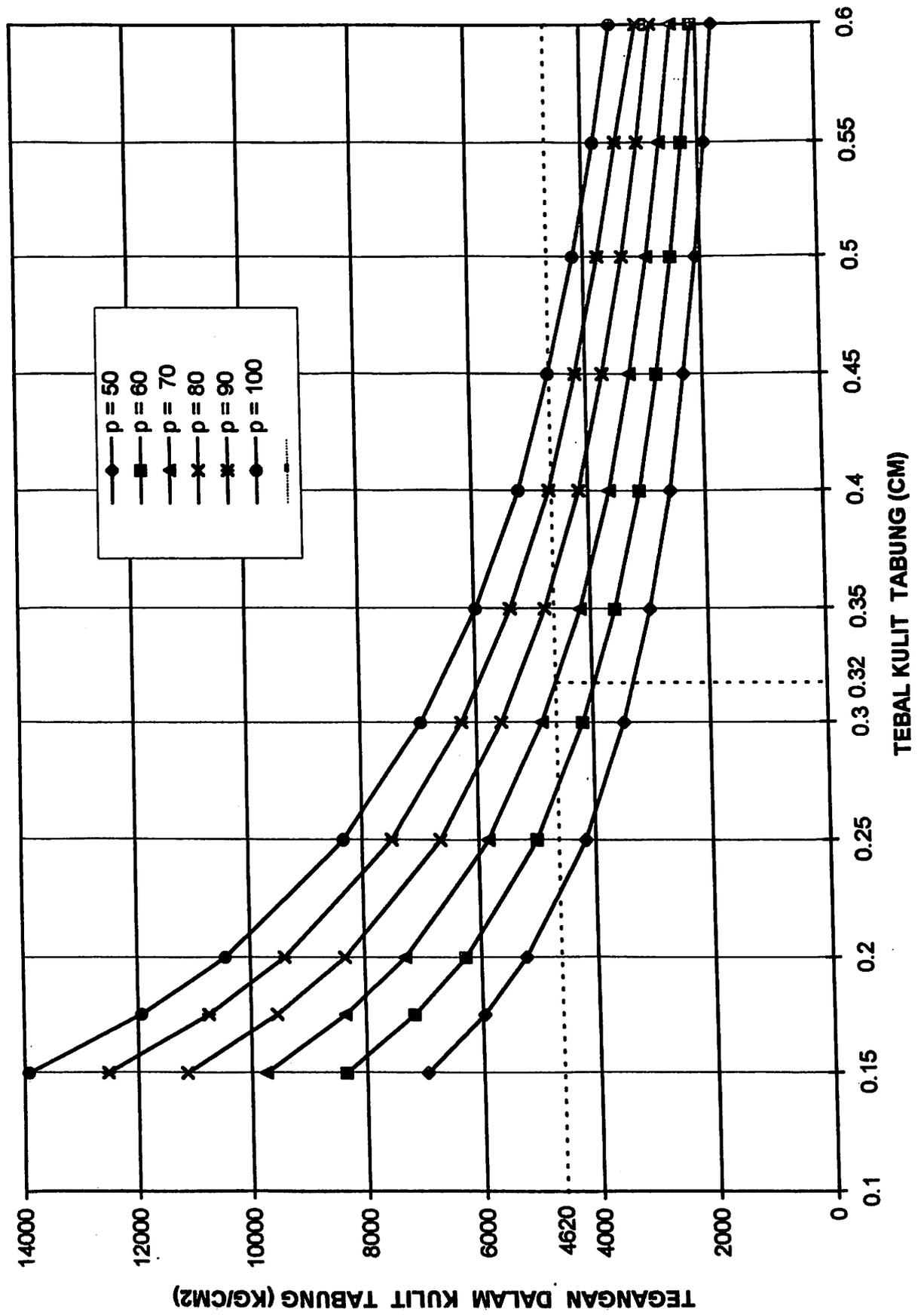
Gambar-4a Prediksi trayektori roket sesuai data teknis

C D



Gambar-4b Prediksi trayektori roket setelah pengurangan berat tabung

**GRAFIK TEBAL VS TEGANGAN DALAM TABUNG
TABUNG ROKET RX-250 ALLUMINIUM ALLOY**



KARAKTERISTIK ROKET RX 250 - 2000 I.PN



WAHANA

Berat Payload (kg)	:	30
Berat Total (kg)	:	232
Panjang Total (m)	:	4.475

MOTOR ROKET

Berat Total (kg)	:	202
Berat Struktur (kg)	:	103
Berat Propelan (kg)	:	99
Panjang Propelan (mm)	:	199
Diameter Luar (mm)	:	248
Gaya Dorong (kg)	:	3600
Waktu Pembakaran (det)	:	6
Spesifik Impuls (det)	:	210
Jenis Propelan	:	HTPB

ELEMEN TRAYEKTORI

Apogee (km)	:	25.19
Elevasi (der)	:	80
Percepatan (g)	:	11.7
Kecepatan (M)	:	2.865
Jarak Horizontal (km)	:	16.25