

ANALISIS TEGANGAN PADA GEOMETRI STRUKTUR NOSECONE RX420-LPN YANG BERBENTUK CANGKANG KERUCUT PUTAR DAN ELIPS PUTAR

Oleh :

Setiadi ^{*)}
Salam Ginting ^{**)}

Abstrak

Struktur cangkang merupakan struktur kulit tipis dimana dimensi ketebalannya jauh lebih kecil dibandingkan dimensi arah memanjang maupun arah melintang. Struktur nose cone pada roket juga merupakan struktur cangkang, karena ketebalannya jauh lebih kecil dibandingkan ukuran panjang maupun diameternya.

Dalam tulisan ini analisis struktur cangkang diterapkan pada struktur nose cone roket RX420-LPN untuk mengetahui distribusi gaya dalam dan tegangannya. Beban luar yang bekerja diasumsikan sebagai beban terbagi rata.

Geometri dari nose cone ini adalah conical dome (kerucut putar) seperti pada roket kappa dan sebagai alternatif dicoba bentuk elliptical domes (elips putar).

Hasil distribusi tegangan normal pada kedua bentuk tersebut dianalisis, baik pada arah melingkar (hoop) maupun arah tangensialnya (meridian), ternyata ada peralihan tegangan pada arah hoop yakni dari tekan ke tarik, sehingga perlu dicermati terhadap kekuatan bahan.

1. PENDAHULUAN

Pada dasarnya setiap geometri struktur merupakan benda tiga dimensi, yang mana untuk menghitung gaya dalam dan tegangan yang terjadi memerlukan teori elastis tiga dimensi, namun demikian teori tersebut tidak harus diterapkan pada setiap struktur, sering kali dilakukan pendekatan melalui penyederhanaan dan asumsi. Dalam perhitungan perencanaan suatu struktur, jenis struktur cangkang (shell) pada umumnya lebih rumit dibandingkan dengan jenis struktur lainnya seperti beam, truss, frame dan pelat.

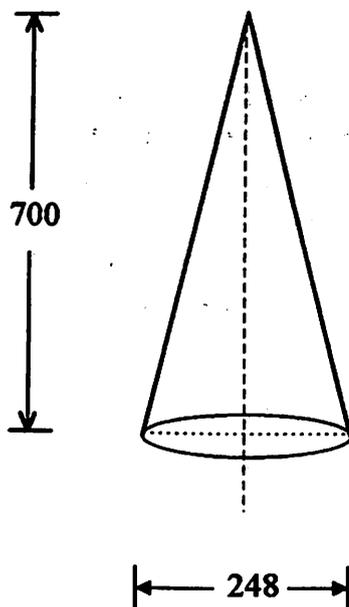
Struktur cangkang merupakan struktur "kulit tipis" dengan permukaan berbentuk lengkung yang dapat didefinisikan sebagai pelat lengkung yang memiliki ketebalan jauh lebih kecil dibandingkan dengan besaran-besaran ataupun dimensi lainnya, seperti dimensi arah memanjang, arah melintang dan jari-jari kelengkungannya. Selanjutnya permukaan bidang yang membagi ketebalan lengkung sama besar disebut bidang

^{*)} Peneliti Bidang Struktur Mekanika Roket dan Satelit

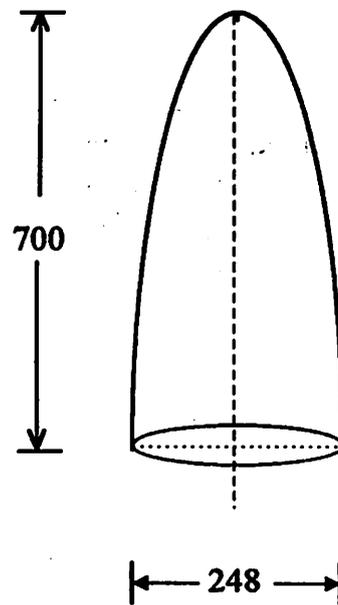
^{**)} Peneliti Bidang Struktur mekanika Roket dan Satelit

tengah, dan jika bentuk bidang tengah dan ketebalan cangkang ditentukan, maka bentuk geometris struktur cangkang tersebut akan dapat dinyatakan secara lengkap.

Struktur roket sesungguhnya juga merupakan struktur cangkang, karena struktur roket tersebut mempunyai kulit yang tipis dan bentuk geometrinya merupakan gabungan dari permukaan lengkung, misalnya seperti bentuk nosecone (hidung roket) dengan tabungnya. Selanjutnya bentuk geometris strukturnya teratur yaitu merupakan bidang lengkung yang terjadi karena perputaran pada satu sumbu (shell of revolution). Hidung roket RX420-LPN merupakan jenis struktur cangkang yang mempunyai bentuk geometris conical domes seperti pada roket kappa, dan sebagai alternatif di coba dengan bentuk elliptical domes.



Gambar-1 Geometri struktur cangkang berbentuk kerucut putar.



Gambar-2 Geometri struktur cangkang Berbentuk elips putar.

2. PEMBAHASAN TEORI DASAR

2.1. Penyederhanaan Dan Asumsi

Toeri elastisitas tiga dimensi berlaku umum termasuk untuk struktur cangkang, namun dalam kenyataannya persamaan elastisitas tersebut menjadi rumit. Analisa masih akurat dengan penyederhanaan bidang tengah, dimana sistem persamaan tiga dimensi dengan tiga variabel bebas direduksi menjadi dua variabel bebas, sebagai koordinat dan bidang tengah struktur cangkang. Selain dari penyederhanaan tersebut di atas, digunakan pula asumsi teori defleksi kecil yaitu adanya hubungan langsung antara tegangan dengan regangan dan anggapan bahwa material elastis linear serta homogen.

2.2. Besaran-besaran Geometris Struktur Cangkang.

Sebelum membicarakan teori cangkang, perlu didefinisikan atau ditentukan besaran-besaran yang membentuk cangkang tersebut. Telah disebutkan sebelumnya bahwa Struktur cangkang putar terbentuk oleh kurva yang diputar terhadap sumbu tertentu. Lengkung yang diputar tersebut "meridian" dan bidangnya sendiri disebut "bidang meridian". Bidang-bidang normal terhadap sumbu putar akan memotong permukaan cangkang berupa lingkaran-lingkaran yang sejajar (parallel circles) dan lengkung tersebut disebut "parallel". Jadi Meridian dan Parallel merupakan "principal curvature" suatu cangkang.

Selanjutnya ditentukan :

ϕ = sudut antara sumbu cangkang dengan garis normal cangkang pada titik yang ditinjau (meridian angle)

θ = sudut antara R_0 dengan garis yang didefinisikan sebutlah ζ .

Jadi letak lengkung suatu meridian terhadap bidang gambar (datum) dinyatakan dengan sudut θ , sedangkan sudut ϕ merupakan sudut antara suatu garis normal dengan sumbu putar struktur tersebut.

Pengertian radius curvature adalah sebagai berikut :

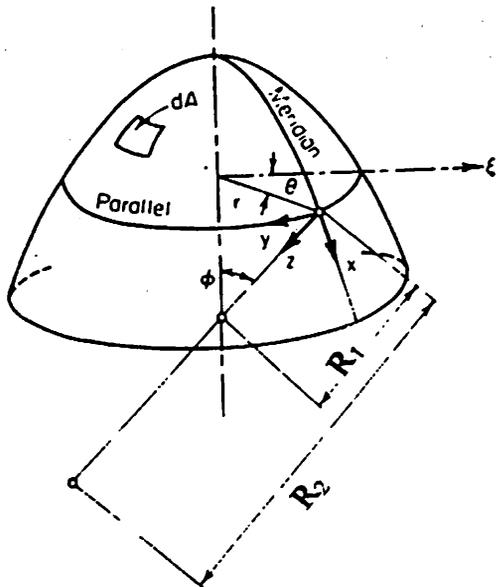
R_0 = jarak antara suatu titik pada bidang tengah dengan sumbu putar (radius of curvature of the parallel)

R_1 = jari-jari lengkung meridian, yaitu panjang garis yang terbentuk oleh perpotongan dua garis normal

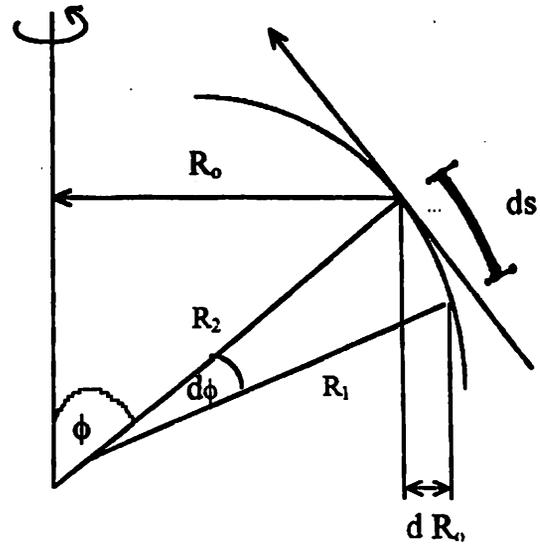
R_2 = panjang segmen garis normal pada lengkung meridian, diukur dari titik potong garis tersebut dengan sumbu putar dan bidang tengah (length of the normal between any point on the middle surface and of rotation)

Kelangsingan dari cangkang didefinisikan sebagai perbandingan antara tebal t dan jari-jari terkecil permukaan cangkang t/R min.

Sifat cangkang yang memikul beban sepenuhnya dengan menimbulkan hanya tegangan-tegangan yang langsung bekerja dalam bidang permukaan cangkang itu sendiri dikenal sebagai sifat sebuah membrane. Gaya-gaya membrane akan mungkin terjadi bilamana tebal cangkang tipis sekali, yaitu t/R 1/20



Gambar-3 Struktur cangkang putar



Gambar-4 Hubungan geometris elemen struktur cangkang

Dari gambar didapat hubungan geometris :

$$R_0 = R_2 \sin \phi$$

2.3. Gaya-gaya Dalam Pada Membrane dan Keseimbangannya.

2.3.1. Gaya-gaya dalam

Secara umum gaya dalam membrane yang bekerja pada suatu struktur cangkang adalah :

- N_θ = Gaya aksial persatuan panjang pada bidang tengah dengan arah sejajar sumbu paralel (sumbu X) = Gaya normal Hoop.
- N_ϕ = Gaya aksial persatuan panjang pada bidang tengah dengan arah sejajar sumbu meridian (sumbu Y) = Gaya normal Meridian.
- $N_{\phi\theta}$ = Gaya geser persatuan panjang pada bidang tengah arah garis singgung terhadap bidang tengah paralel.
- $N_{\theta\phi}$ = Gaya geser persatuan panjang pada bidang tengah meridian.
- Q_θ dan Q_ϕ = Gaya geser persatuan panjang pada bidang tengah dengan arah tegak lurus bidang (paralel).

$M\phi$ dan $M\theta$ = Bending momen persatuan panjang.

$M\phi\theta$ dan $M\theta\phi$ = Bending puntir persatuan panjang.

2.3.2. Keseimbangan Gaya Membrane

Dari 10 gaya dalam yang ada yaitu :

$N\phi$, $N\theta$, $N\phi\theta$, $N\theta\phi$, $Q\phi$, $Q\theta$, $M\phi$, $M\theta$, $M\phi\theta$ dan $M\theta\phi$

kemudian dengan mengadakan 6 kesetimbangan :

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum F_z = 0 \quad \text{dan}$$

$$\sum M_x = 0, \quad \sum M_y = 0, \quad \sum M_z = 0$$

Maka masih akan ada 4 gaya dalam yang belum diketahui dimana : X, Y dan Z adalah komponen beban.

$$R_1 \frac{\partial N\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial(N\phi\theta \cdot R_0)}{\partial \phi} + N\theta\phi \cdot \frac{\partial R_0}{\partial \phi} - Q\theta \cdot R_1 \cdot \sin \phi + X R_0 \cdot R_1 = 0$$

$$\frac{\partial(N\phi \cdot R_0)}{\partial \theta} + R_1 \frac{\partial \phi\theta\phi}{\partial \theta} - N\theta \cdot \frac{\partial R_0}{\partial \phi} - Q\phi \cdot R_0 + Y \cdot R_0 \cdot R_1 = 0$$

$$R_1 \frac{\partial Q\theta}{\partial \theta} - \frac{\partial(Q\phi \cdot R_0)}{\partial \phi} + N\theta \cdot R_1 \cdot \sin \phi + N\phi R_0 + Z \cdot R_0 \cdot R_1 = 0$$

$$-\frac{\partial(M\phi \cdot R_0)}{\partial \phi} + M\theta \cdot \frac{\partial R_0}{\partial \phi} + R_1 \cdot \frac{\partial M\theta\phi}{\partial \theta} + Q\phi \cdot R_0 \cdot R_1 = 0$$

$$R_1 \frac{\partial M\theta}{\partial \theta} + M\theta\phi \frac{\partial R_0}{\partial \phi} + \frac{\partial(M\phi\theta \cdot R_0)}{\partial \phi} + Q\theta \cdot R_0 \cdot R_1 = 0$$

$$N\phi\theta R_0 \frac{\partial \theta}{\partial \theta} \cdot R\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \phi} - N\theta\phi \cdot R\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \phi} \cdot R_0 \frac{\partial \theta}{\partial \theta} = 0 \rightarrow N\phi\theta = N\theta\phi$$

Dalam kesetimbangan elemen struktur, variabel $M\theta$, $M\phi$, $M\theta\phi$ dan $M\phi\theta$ saling meniadakan, selanjutnya untuk struktur cangkang tipis maka besaran $Q\phi$ dan $Q\theta$ dapat diabaikan, sehingga :

$$M\phi = M\theta = M\phi\theta = M\theta\phi = Q\phi = Q\theta = 0$$

Maka sisa yang belum diketahui :

$N\phi$, $N\theta$, $N\phi\theta$ dan $N\theta\phi$

$$R_0 = R_2 \cdot \sin \phi$$

Dimana : $N\phi\theta = N\theta\phi$; $\cos \phi \approx \frac{\partial R_0}{R_1 \cdot \partial \phi} \rightarrow \frac{\partial R_0}{\partial \phi} = R_1 \cdot \cos \phi$

sehingga bentuk persamaan menjadi :

$$R_1 \cdot \frac{\partial N\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial(N\phi\theta R_0)}{\partial \phi} + N\phi\theta \cdot R_1 \cdot \cos \phi + X \cdot R_0 \cdot R_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial(N\phi \cdot R_0)}{\partial \phi} + R_2 \cdot \frac{\partial N\phi\theta}{\partial \theta} - N\theta \cdot R_1 \cdot \cos \phi + Y \cdot R_0 \cdot R_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{N\phi}{R_1} + \frac{N\theta}{R_2} + Z = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

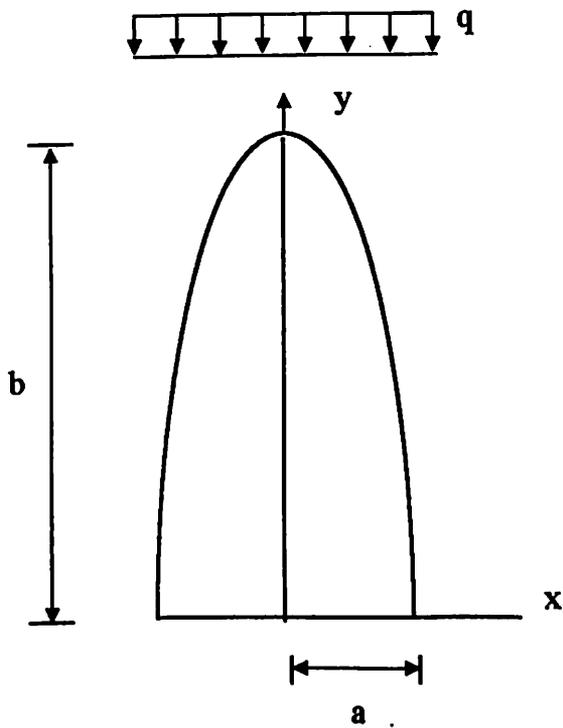
3. PERENCANAAN GEOMETRIS STRUKTUR NOSECONE

Struktur hidung roket (nose cone) merupakan substruktur terdepan dari seluruh struktur roket, yang mana berfungsi sebagai pelindung muatan yang dibawa agar tidak mengalami kerusakan, dengan demikian struktur hidung tersebut harus mampu menahan beban yang bekerja.

Dalam perencanaan ini dipilih dua bentuk yaitu conical domes dan elliptical domes. Dasar pemikiran ini adalah karena conical domes telah dipakai oleh roket kappa, sedangkan elliptical domes di pilih karena pertemuan bentuknya jika dipakai sebagai hidung roket akan kontinyu dengan badan roket atau tabung . Dari kedua bentuk ini masing-masing dicari besar gaya dalamnya serta diagram distribusinya.

3.1. Rumus-rumus yang digunakan

- Elliptical Domes (ellips yang diputar).



Persamaan Lengkung :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

$$\frac{2x dx}{a^2} + \frac{2y dy}{b^2} = 0$$

Sudut yang dibentuk pada suatu titik

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \phi = -\frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{x}{y}$$

$$\text{atau } \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \phi = -\frac{b^2}{a \cdot y} (b^2 - y^2)^{0.5}$$

Gambar-5 Elips putar dengan beban terbagi rata q

Jari-jari kelengkungan

$$R_1 = [b^4 + y^2 (a^2 - b^2)]^{1.5}$$

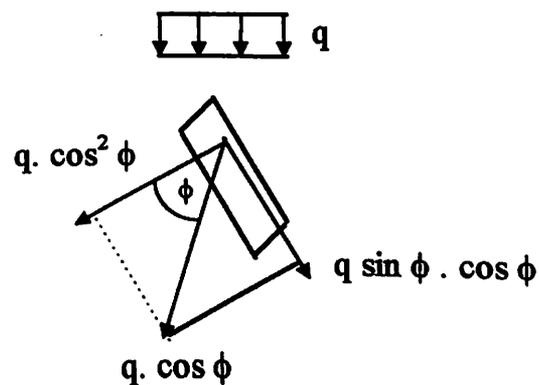
Dalam koordinat polar $R_1 = \frac{a^2}{(a^2 \cdot \sin^2 \phi + b^2 \cdot \cos^2 \phi)^{0.5}}$

Komponen Beban

$$X = q \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi$$

$$Y = 0$$

$$Z = q \cdot \cos^2 \phi$$



Gambar-6 Proyeksi Komponen Beban X dan Z

Dengan menganggap beban luar yang bekerja adalah beban terbagi rata q , maka gaya dalam yang terjadi

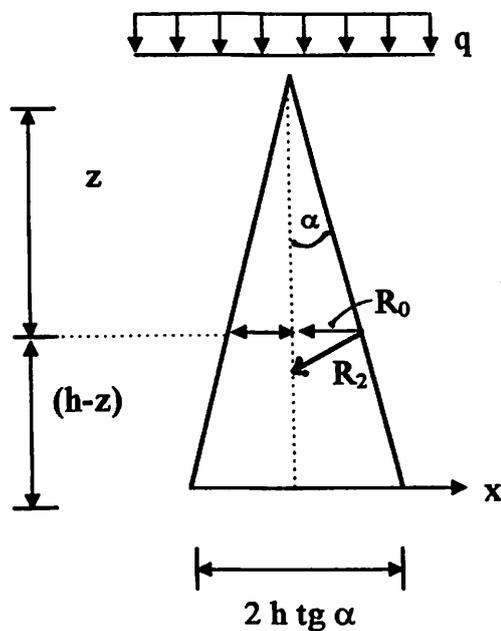
$$N_\phi = -\frac{2}{2} \cdot \frac{a^2 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \phi}}{\sqrt{b^2 + a^2 \cdot \text{tg}^2 \phi}} \quad \text{dan}$$

$$N_\theta = -\frac{2}{2} \cdot \frac{a^2}{b^2} \frac{b^2 - a^2 \cdot \text{tg}^2 \phi}{\sqrt{b^2 + a^2 \cdot \text{tg}^2 \phi} \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \phi}}$$

Gaya-gaya tersebut di atas merupakan gaya normal persatuan panjang, untuk mendapatkan tegangannya maka gaya tersebut dibagi dengan tebalnya, sehingga:

$$\sigma_\phi = N_\phi/t \quad \text{dan} \quad \sigma_\theta = N_\theta/t$$

- Conical Domes (Kerucut yang di putar)



Sudut yang dibentuk pada suatu titik berharga konstan sebesar ϕ .

Yang mana : $\phi = \alpha$

$$\text{tg } \alpha = \frac{x}{z} = \frac{R_0}{z}$$

Jari-jari kelengkungan : $R_1 = \infty$

Gambar-7 Kerucut putar dengan beban terbagi rata q

Dengan menganggap beban luar yang bekerja adalah beban terbagi rata q , dan memakai rumus (1), (2) dan (3) dengan komponen

$X = q \cdot \cos \phi$; $Y = 0$; $Z = q \cdot \sin \phi$, maka di dapat gaya dalam yang bekerja

$$N\phi = -q.z . \frac{tg\alpha}{2.\cos\alpha}$$

$$N\theta = -q.z . tg2\alpha . \sin \alpha$$

3.2 Hasil Perhitungan

Dari rumus-rumus yang disajikan di atas, kemudian memasukkan nilai-nilai parameternya, maka akan didapatkan gaya-gaya dalam yang bekerja.

Beban luar yang bekerja dianggap sebagai beban terbagi rata q ; yang dalam penerapannya dapat saja merupakan gaya aerodinamik. Tebal dari nose konstan sebesar $t = 3$ mm.

- Elliptical Domes : $a = 12,4$ cm ; $b = 70$ cm.

Selanjutnya hasil perhitungan disajikan dalam bentuk tabel seperti di bawah ini :

Tabel 2. Hasil Perhitungan Tegangan

y/b	y (cm)	$\phi (... ^\circ)$	$N\phi$	$N\theta$	$\sigma\phi$	$\sigma\theta$
1	70	00,00	- 1,0983q	- 1,0983q	- 3,661q	- 3,661q
0,95	66,5	61,68	- 2,1994q	- 0,4415q	- 7,331q	- 1,472q
0,90	63	69,91	- 2,8776q	- 0,2599q	- 9,592 q	- 0,866q
0,80	56	76,71	- 3,8222q	- 0,0884q	- 12,741q	- 0,295q
0,70	49	80,15	- 4,4940q	+ 0,0054q	- 14,98q	+ 0,018q
0,60	42	82,45	- 5,0031q	+ 0,0674q	- 16,677q	+ 0,225q
0,50	35	84,16	- 5,3973q	+ 0,1117q	- 17,991q	+ 0,372q
0,40	28	85,58	- 5,6995q	+ 0,1439q	- 18,998q	+ 0,480q
0,30	21	86,81	- 5,9234q	+ 0,1670q	- 19,745q	+ 0,557q
0,20	14	87,93	- 6,0788q	+ 0,1826q	- 20,263q	+ 0,609q
0,10	7	88,98	- 6,1699q	+ 0,1916q	- 20,566q	+ 0,639q
0	0	90,00	- 6,2000q	+ 0,1946q	- 20,667q	+ 0,649q

- Conical Domes : $\alpha \approx 10^\circ$; $h = 70$ cm

Dari rumus di atas distribusi gayanya adalah linier, maka untuk ; $Z = 0$ cm $\rightarrow N\phi = 0 \rightarrow \sigma\phi = 0$

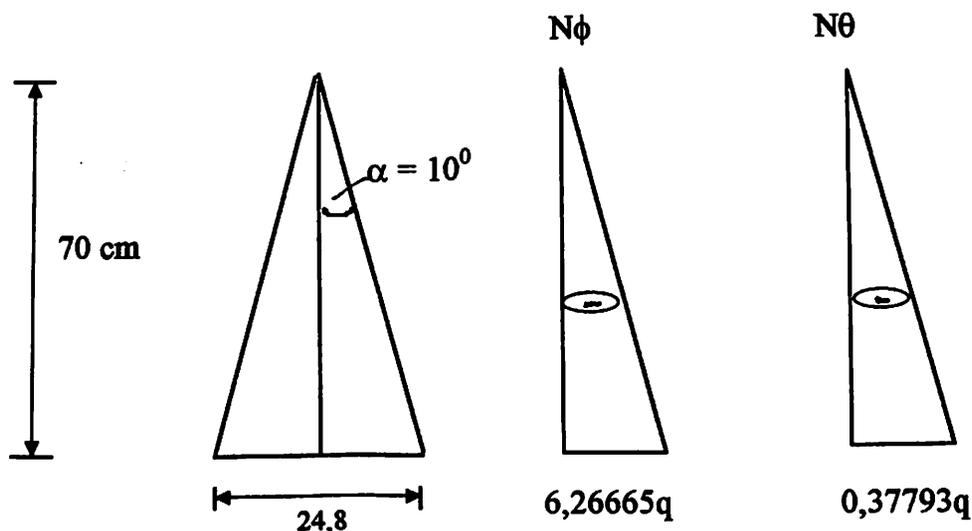
$$N\theta = 0 \rightarrow \sigma\theta = 0$$

$$Z = 70 \text{ cm} \rightarrow N\phi = -q \cdot 70 \frac{\text{tg}10^\circ}{2 \cdot \cos10^\circ} = -6,26665q$$

$$\sigma\phi = N\phi / 0,3 = -20,889q$$

$$N\theta = -q \cdot 70 \text{tg}^2 10^\circ \cdot \sin 10^\circ = -0,37793q$$

$$\sigma\theta = -1,260q$$



Gambar-8 Distribusi gaya normal pada struktur kerucut

4. ANALISIS DAN DISKUSI HASIL PERHITUNGAN

Dalam perhitungan ini beban luar dibatasi sebagai beban terbagi rata saja yang bekerja tegak lurus luasan proyeksi hidung roket dan bernilai konstan. Jika q sebagai beban aerodinamik, maka harga $q = 0,5 \rho \cdot V^2$. dimana : ρ = massa jenis udara, V = kecepatan terbang roket,.

Namun demikian besaran-besaran tersebut di atas tidak dibahas lebih jauh, karena pada akhirnya nilai q itu konstan untuk kecepatan yang tidak berubah. Sehingga tidak mempengaruhi bentuk karakteristik dari diagram distribusi gaya dan distribusi tegangannya.

Dari hasil perhitungan terlihat bahwa tegangan yang terjadi pada ujung hidung roket untuk bentuk elliptical domes sebesar $-3,661q$ baik untuk arah hoop maupun arah meridian dan bersifat tekan, sedangkan untuk bentuk conical domes tegangan yang terjadi = 0 baik arah hoop maupun meridiannya.

Selanjutnya pada pangkal nose yang menyatu dengan tabung, untuk bentuk elliptical domes tegangan arah meridian sebesar $-20,667q$ bersifat tekan dan tegangan arah hoop sebesar $+ 0,649q$ bersifat ditarik, sedangkan untuk bentuk conical domes tegangan arah meridian dan arah hoop berturut-turut sebesar $- 20,889q$ dan $- 1,260q$. Secara ringkas dapat dibuat tabel seperti di bawah ini :

Tabel 3. Tegangan pada ujung dan pangkal nose.

Lokasi Tegangan	Elliptical Domes		Conical Domes	
	$\sigma\phi$	$\sigma\theta$	$\sigma\phi$	$\sigma\theta$
- Ujung Nose cone	$- 3,661q$	$- 3,661q$	0	0
- Pangkal Nose	$- 20,667q$	$+ 0,649q$	$- 20,889q$	$- 1,260q$

$\sigma\phi$ = tegangan arah meridian

$\sigma\theta$ = tegangan arah hoop

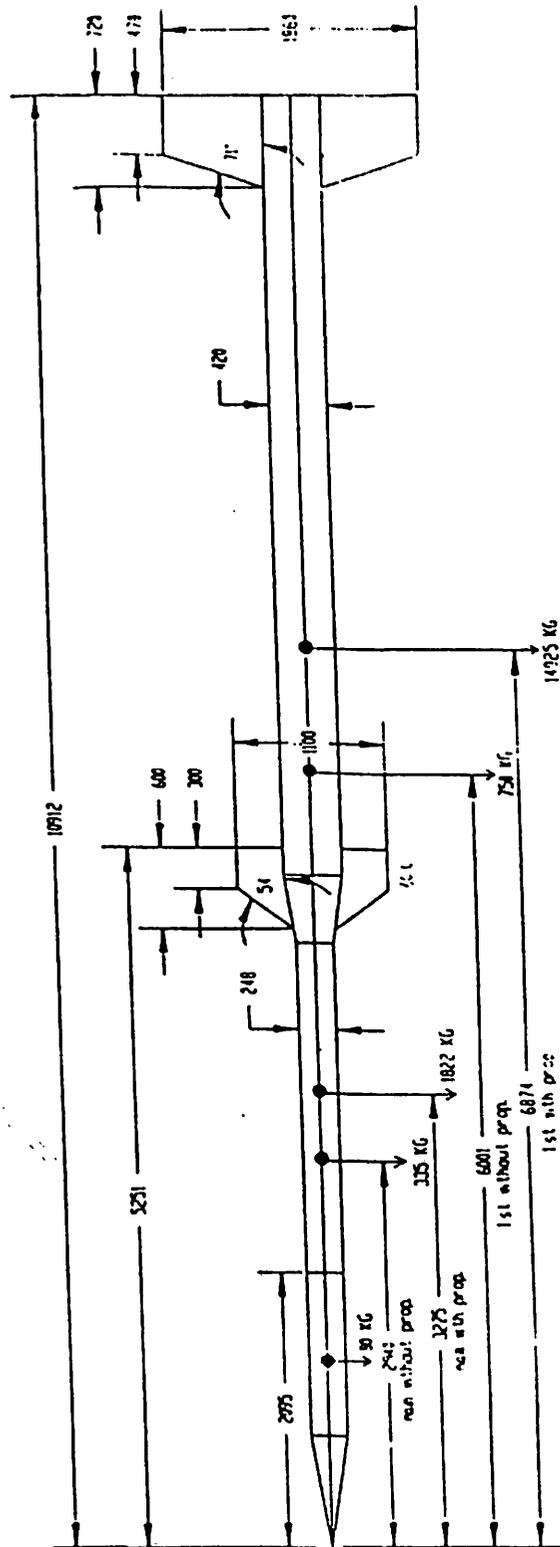
5. KESIMPULAN

Telah dilakukan analisa tegangan pada dua macam geometris struktur nose cone roket RX420LPN yang berbentuk Elips dan Conical. Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada tabel 3, bahwa pada nose berbentuk Elips terjadi tegangan tekan pada ujung nose, baik arah hoop maupun arah meridian. sebesar $-3,661q$. Pada pangkal nose terjadi perbedaan arah tegangan dan besarnya tegangan tahan arah meridian adalah $-20,667q$, sedangkan arah hoop terjadi tegangan tarik sebesar $+ 0,649q$. Pada nose cone yang berbentuk Conical, terlihat bahwa pada ujung nose tegangan arah hoop dan meridian sama-sama nol, sedangkan pada pangkal nose terjadi tegangan tarik masing-masing $-20,889q$ arah meridian dan $-1,260q$ kearah hoop.

Dari hasil perhitungan ternyata besarnya tegangan tekan pada pangkal kedua bentuk nose cone hampir sama, sedangkan pada ujung nose dari bentuk Elips besarnya $- 3,661q$ sedangkan bentuk conical tegangannya sama dengan nol. Perlu diantisipasi tegangan tarik yang terjadi pada pangkal nose yang berbentuk elips, karena tegangan tarik tersebut diperkirakan lebih dominan merusak struktur nose cone, dimana pada pangkal nose tempat bekerjanya tegangan tarik, merupakan daerah sambungan antara nose dan tabung payload.

KEPUSTAKAAN

1. Abraham Lewis H, 1962, "Structural Design of Missiles and Space craft"
New York. Mc Graw - Hill Book company Inc.
2. Baker E.H kovalevsky L. Rish F.L 1972 "Struktural Analysis of Shells"
Mc Graw - Hill Book Company, Inc. , New York.
3. Fampel, Joseph Herman, 1981 "Engineering Design, Asynthesis of Stress
Analysis and Material Engineering" John Willey & Sons Inc. Second
Edition, Canada.
4. Sumartinah E, Ginting S, Witjaksono G, Juli 1995, "Prediksi Stabilitas
Dinamik Roket RX420-LPN Pada Kecepatan Supersonic" Majalah LAPAN
No.74.
5. Thimoshenko and Krieger, 1984 "Theory of Plates and Shells",
Mc Graw - Hill New York USA.



Gambar-9 : Geometri struktur roket RX 420-LPN