

Perancangan Nosel Paraboloida Untuk Berbagai Tekanan Pembakaran

Sri Rukmini Dewi, Ediwan, Siti Prangili*)

*) Peneliti Pusat Teknologi Wahana Dirgantara

ABSTRACT

A nozzle is a part of rocket motor intended to accelerate flow of gases produced by propellant burning in the rocket combustion chamber. One of many method to design an optimum nozzle based on propellant produced by LAPAN data combined with various theoretical propulsion formulas and computer calculation as well, was discussed in this paper. The result showed that nozzle having paraboloid shape had same performance compare with cone but the former was more efficient 20,696 % of its total length.

Although it wasn't calculated quantitatively this design would be able to reduce the rocket gross weight then consequently reduced rocket fuel in turn.

ABSTRAK

Dalam sistem propulsi, nosel merupakan sarana/bagian di mana gas hasil pembakaran mengalami percepatan sehingga menghasilkan gaya dorong, Perancangan mempunyai peranan yang sangat penting, karena propelan yang baik sekalipun tidak akan menghasilkan impuls spesifik yang tinggi tanpa ditunjang oleh dimensi nosel yang optimal. Dengan data propelan yang digunakan dalam penelitian di LAPAN dan beberapa formula dari teori propulsi serta perhitungan komputer, dihasilkan dimensi nosel bentuk paraboloida yang meliputi diameter leher, diameter keluaran dan panjang total nosel yang dapat dipilih untuk suatu propelan dengan tekanan pembakaran tertentu agar menghasilkan impuls spesifik yang maksimal. Bila dibandingkan nosel bentuk kerucut, maka bentuk ini lebih pendek 20,696 %, sehingga dapat lebih menghemat bahan.

Meskipun tidak diperhitungkan secara kuantitatif, hasil rancangan nosel dengan bentuk paraboloida ini dapat mengurangi berat roket secara keseluruhan. Hal ini sangat berarti dalam penggunaan bahan bakar.

1. PENDAHULUAN

Prestasi terpenting dari suatu motor roket kimia tidak hanya ditentukan dari besarnya gaya dorong yang dihasilkan oleh sistem propulsinya, tetapi juga dari iritnya bahan bakar yang dipakai. Hal ini dinyatakan dengan besaran yang dikenal sebagai Impuls Spesifik (Isp), Harga Impuls spesifik berbanding langsung dengan gaya dorong dan berbanding terbalik dengan debit massa propelannya. Jadi Impuls

spesifik yang tinggi akan diperoleh bila pembakaran sedikit massa propelan menghasilkan gaya dorong yang besar.

Semua motor roket kimia (propelan padat, cair maupun hibrid) membutuhkan sifat-sifat kimia, fisika dan internal balistik yang baik dari bahan propelannya. Walaupun demikian, kinerja yang bagus baru dapat dihasilkan bila ditunjang oleh perancangan motor roket yang tepat. Salah satu hal yang sangat berperan

dalam perancangan motor roket adalah penentuan dimensi noselnya.

Mengingat sebuah motor roket hanya dapat digunakan satu kali, sedangkan untuk melakukan penelitian diperlukan bahan yang cukup banyak, maka perlu disiapkan perancangan yang optimal dengan maksud mengurangi biaya penelitian dan tidak kalah pentingnya dalam segi efisiensi waktu.

Dalam rancangan ini dibuat program komputer agar dapat digunakan untuk berbagai masukan data seperti jenis propelan (menyangkut harga γ , C_f dsb.), massa propelan, impuls spesifik dan waktu pembakaran.

2. LANDASAN TEORI

Apapun bentuk propelan, proses transformasi energi dalam motor roket kimia selalu sama yaitu : pembakaran dan dekomposisi dari propelan yang menghasilkan campuran gas pada temperatur tinggi. Phenomena ini umumnya terjadi pada tekanan konstan untuk suatu propelan tertentu, dengan prinsip thermokimia dapat dihitung komposisi kimia, karakteristik gas hasil pembakaran dan temperatur yang dicapai.

Dengan mengetahui komposisi kimia dan besaran di atas memungkinkan untuk mempelajari proses eaksi gas hasil pembakaran melalui nosel, sehingga dapat ditentukan

- parameter-parameter karakteristik aliran gas pada tiap bagian dari nosel dan bagian keluaran;
- gaya dorong yang dihasilkan oleh sistem propulsi motor roket tersebut;
- dimensi nosel yang optimal untuk mendapatkan unjuk kerja yang sebaik-baiknya serta penggunaan propelan yang ekonomis.

Metoda pendekatan dalam perhitungan mekanika fluida di sini adalah dengan menganggap hasil pembakaran merupakan gas ideal

dengan massa molekul (M) dan perbandingan kapasitas panas C_p/C_v (atau γ) konstan serta ekspansi terjadi secara adiabatik reversibel atau isentropik (Entropi konstan).

2.1 Aliran Fluida Dalam Nosel

Berdasarkan hukum kekekalan energi, kontinuitas dan kecepatan suara $a^2 = dP/d\rho$, dapat dibuktikan bahwa karakteristik aliran fluida dalam nosel untuk setiap elemen luasan tegak lurus aliran berlaku :

$$\frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} (1 - M^2) = 0, \text{ persamaan Hugoniot ... (2-1)}$$

Dengan V kecepatan aliran gas, A luas penampang irisan nosel tegak lurus arah aliran dan M = bilangan Mach = V/a.

Pada bagian leher nosel, $dA = 0$, maka $M = 1$ berarti kecepatan aliran sama dengan kecepatan suara (sonik) atau $V = a$, sehingga didapat :

$$\frac{T_{th}}{T_o} = \frac{2}{\gamma + 1} \dots\dots\dots, (2-2)$$

$$\frac{P_{th}}{P_o} = \left| \frac{2}{\gamma + 1} \right|^{\gamma/(\gamma-1)} \dots\dots\dots, (2-3)$$

$$\frac{\rho_{th}}{\rho_o} = \left| \frac{2}{\gamma + 1} \right|^{1/(\gamma-1)} \dots\dots\dots, (2-4)$$

Pada bagian keluaran (exit) di mana bilangan Mach $M = f(\gamma, P_o/P_e)$ maka kecepatan eaksi gas $V_e = g(\gamma, P_o/P_e, T_o, M)$ yaitu :

$$V_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{R}{M} T_o \left| 1 - \frac{1}{(P_o/P_e)^{(\gamma-1)/\gamma}} \right|} \dots\dots\dots (2-5)$$

Perbandingan luas penampang bagian keluaran A_e terhadap luas bagian leher nosel A_{th} dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{A_e}{A_{th}} = \frac{\Gamma}{\sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} (P_o/P_e)^{2\gamma} \{1 - (P_o/P_e)^{(\gamma-1)/\gamma}\}}} \quad (2-6)$$

Dengan :

T = temperatur

P = tekanan

ρ = densitas gas hasil pembakaran

M = masa molekul gas hasil pembakaran

R = konstanta gas ideal

Γ = fungsi Vandekerckhove = $\sqrt{\gamma \{2 / (\gamma + 1)\}^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \dots (2-7)$

Indeks "o" menunjukkan kondisi di dalam ruang bakar.

Indeks "th" menunjukkan kondisi pada leher nosel.

Indeks "e" menunjukkan kondisi di bagian keluaran nosel.

2.2 Parameter-parameter Dalam Sistem Propulsi Motor Roket

Beberapa parameter karakteristik yang berperan dalam perhitungan sistem propulsi adalah koefisien debit C_D ,

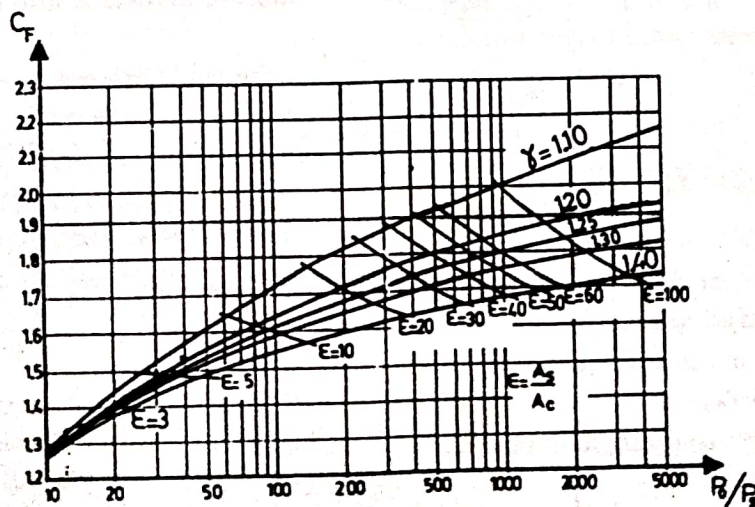
kecepatan karakteristik C^* , koefisien gaya dorong C_F dan impuls spesifik I_{sp} , namun dipakai dalam perhitungan perancangan nosel di sini adalah :

2.2.1 Koefisien gaya dorong C_F

Koefisien gaya dorong adalah suatu koefisien tak berdimensi yang didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya dorong F terhadap hasil kali tekanan ruang bakar P_o dengan luas leher nosel A_{th} dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$C_F = \frac{F}{P_o A_{th}} \dots \dots \dots (2-8)$$

Untuk suatu propelan tertentu (γ diketahui) dan P_e sama dengan tekanan atmosfer, artinya pengukuran gaya dorong sistem propulsi tersebut dilakukan di permukaan bumi (bukan pada ketinggian di mana tekanan udara luar lebih kecil dari 1 atmosfer) maka dalam hal ini C_F hanya merupakan fungsi dari P_o/P_e , Gambar 2-1 menunjukkan C_F sebagai fungsi dari P_o/P_e pada berbagai harga γ dan parameter ϵ (A_e/A_{th}),



Gambar 2-1 : Koefisien gaya dorong C_F sebagai fungsi dari P_o/P_e

2.2.2 Impuls Spesifik Isp

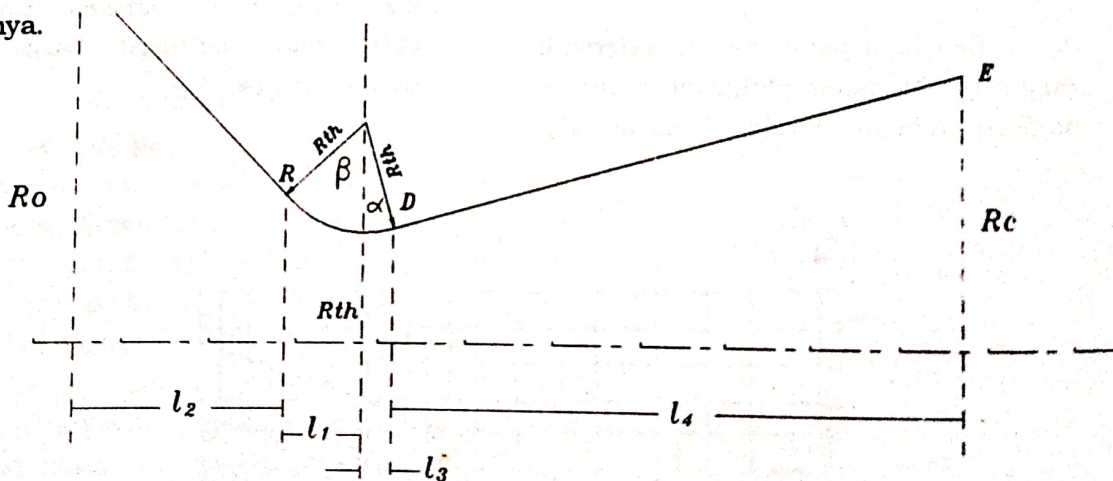
Kinerja suatu motor roket tercermin dari nilai impuls spesifik yang dapat dicapai, Impuls spesifik merupakan besaran yang menyatakan perbandingan antara gaya dorong F terhadap debit massa propelan q dan berdimensi waktu yang umumnya dinyatakan dalam satuan detik.

$$I_{sp} = \frac{F}{q g_0} = \frac{C_F P_0 A_{th}}{q g_0} \dots\dots(2-9)$$

2.3 Gaya Dorong F

Gaya dorong F adalah resultan gaya-gaya tekanan dari gas hasil pembakaran yang bekerja pada bagian dalam ruang propulsif dengan gaya-gaya tekanan di bagian permukaan luar.

Besarnya gaya dorong pada motor roket cair dapat diatur setiap saat dengan mengatur debit massa/aliran propelannya. Sedang pada motor roket padat bentuk kualitatif/tendensi gaya dorong dapat diramalkan dari bentuk geometri (*grain*) propelannya dan secara kuantitatif ditentukan oleh ukuran diameternya.



Gambar 3-1 : Dimensi nosel kerucut

dengan :

- R_{th} = radius leher nosel
- R = 0,5 - 1,5 R_{th}
- α = 12° - 18°, umumnya diambil 15°
- β = 20° - 45°
- R_0 = radius ruang bakar

Secara umum besarnya gaya dorong dapat dinyatakan dengan formula:

$$F = q V_c + (P_c - P_a) A_e$$

di permukaan bumi di mana $P_c = P_a$ maka $F = q V_c \dots\dots\dots(2-10)$

3. BENTUK & DIMENSI NOSEL

Nosel terdiri dari bagian konvergen yang berhubungan langsung dengan ruang bakar, leher nosel dan bagian divergen yang merupakan keluaran dari nosel. Bagian divergen dari nosel mempunyai dua macam bentuk, yaitu kerucut (*conique*) dan paraboloida (*coquetier*). Bila A_{th} dan A_e telah ditentukan, maka dimensi lain dari bagian nosel tersebut adalah sebagai berikut :

3.1 Nosel Kerucut

Nosel bentuk kerucut lebih mudah dalam pabrikasinya, tetapi kurang efisien karena memerlukan bagian divergen yang panjang.

Dari gambar di atas, dengan mengambil

$R = R_{th}$, maka akan didapat :

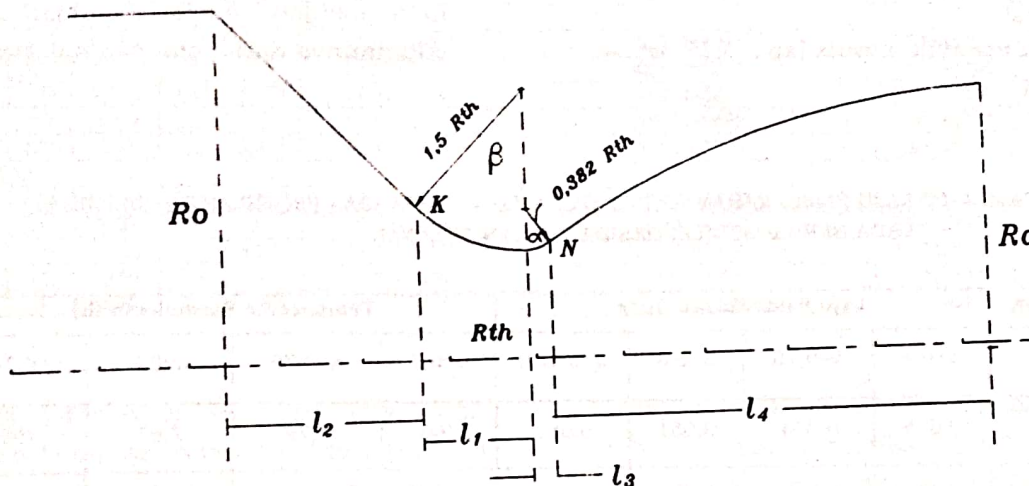
- l_1 = panjang dari titik leher nosel sampai titik K
= $R_{th} \sin \beta$
- l_2 = panjang dari titik K sampai ruang bakar
= $\{ R_o - (2 - \cos \beta) \} \text{ctg } \beta$
- l_3 = panjang dari titik leher nosel sampai titik D
= $R_{th} \sin \alpha$
- l_4 = panjang dari titik D sampai E

$$= \{ R_c - R_{th} (2 - \cos \alpha) \} \text{ctg } \alpha$$

Panjang total nosel l_n = panjang bagian divergen + panjang bagian konvergen = $(l_1 + l_2) + (l_3 + l_4)$

3.2 Nosel Paraboloida

Nosel bentuk paraboloida (*coquetier*), seperti tempat telur ini lebih sulit dalam pabrikasinya, tetapi dengan bentuk ini dapat memperpendek bagian divergennya.



Gb, 3-2 : Dimensi nosel paraboloida

Dari gambar di atas dapat diketahui :

- l_1 = panjang dari titik leher nosel ke titik K
= $\frac{1}{2}$ panjang busur lingkaran dengan radius R_{th} dan sudut pusat 45°
= $R_{th} \sin 45^\circ$
- l_2 = panjang dari titik K sampai dengan ruang bakar
= $\{ R_o - R_{th} (1 + \frac{1}{2} \sin 45^\circ) \} \text{ctg } 45^\circ$
= $R_o - R_{th} (1 + \frac{1}{2} \sin 45^\circ)$
- l_3 = panjang dari titik leher nosel sampai titik awal bentuk paraboloida (N)
= $\frac{1}{2}$ panjang busur lingkaran dengan radius $0,382 R_{th}$ dan sudut pusat $2 \theta_N$
= $0,382 R_{th} \sin \theta_N$
- l_4 = panjang bagian divergen nosel yang berbentuk paraboloida dari titik N sampai titik E (exit),

Kurva parabola yang melalui titik N dan E didekati dengan persamaan $y = a x^2$, maka :

$$\left. \frac{dy}{dx} = 2 a x \right|_{x = (1,382 - 0,382 \cos \theta_N), R_{th}} = \text{tg } (90^\circ - \theta_N) = \text{ctg } \theta_N$$

dengan menghitung harga a pada persamaan di atas, maka kurva parabola akan tertentu,

$$y_1 = a x^2 \Big|_{x = (1,382 - 0,382 \cos \theta_N)} \quad y_2 = a x^2 \Big|_{R_{th} x = R_c}$$

$$\text{Panjang } l_4 = y_2 - y_1$$

Panjang total nosel l_n = panjang bagian divergen + panjang bagian konvergen = $(l_1 + l_2) + (l_3 + l_4)$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Masukan

Perancangan nosel disini diterapkan untuk motor roket padat dengan spesifikasi sebagai berikut :

1. Diameter tabung : 150 mm
2. Panjang propelan : 1000 mm,
3. Bentuk grain : holo
4. Tebal propelan : 4,15 cm
5. Massa propelan : 18,5 kg (dengan asumsi Propelan mengisi 80% volume tabung)
6. Variasi spesifik impuls Isp : 225 dt - 300 dt

7. Variasi tekanan ruang bakar P_0 : 40 atm - 80 atm.
8. Harga C_F merupakan fungsi dari P_0 dilihat dari Gambar 2-1.
9. Laju pembakaran propelan r fungsi dari P_0 untuk propelan dengan aluminasi didapat dari Tabel 4-1 "Perhitungan Laju Pembakaran Propelan Padat Komposit menggunakan model BDP" Publikasi Ilmiah LAPAN. Studi Tentang Energi, Wahana dan Muatan Antariksa, Dengan menyesuaikan satuannya in/s menjadi cm/s demikian juga tekanannya dari psia menjadi atm.

Tabel 4-1 : LAJU PEMBAKARAN DAN TEMPERATUR PEMBAKARAN PROPELAN POLISULFIDA PADA BERBAGAI NILAI OKSIDATOR DAN TEKANAN

Tekanan	Laju Pembakaran In/x				Temperatur Permukaan [K]			
	$\alpha=0,7$	$\alpha=0,75$	$\alpha=0,8$	$\alpha=0,7A^*)$	$\alpha=0,7$	$\alpha=0,75$	$\alpha=0,8$	$\alpha=0,7A^*)$
psia								
200	0,035	0,044	0,051	0,068	766	7,79	7,87	798
300	0,061	0,070	0,077	0,113	794	8,05	8,11	829
400	0,084	0,094	0,101	0,155	8,17	8,23	8,28	849
500	0,105	0,115	0,124	0,191	8,30	8,36	8,40	863
600	0,124	0,136	0,145	0,226	8,41	8,46	8,51	874
700	0,143	0,155	0,166	0,258	8,50	8,55	8,60	884
800	0,161	0,175	0,187	0,290	8,57	8,63	8,68	892
900	0,178	0,193	0,206	0,319	8,64	8,70	8,74	899
1000	0,194	0,211	0,225	0,347	8,70	8,76	8,80	905

*) Mengandung Aluminium

4.2 Hasil Perhitungan

Perhitungan dimensi nosel untuk roket LAPAN dengan diameter 150 mm

dengan data masukan di atas dilakukan dengan program Exel dan menghasilkan dimensi data sebagai berikut :

Tabel 4-2 : PERHITUNGAN JARI-JARI THROAT ROKET RX-150 -1000

Po atm	CF	r cm/s	tb (s)	q kg/s	$\Lambda_{th} = \frac{I_{sp} \cdot g_0 \cdot q}{CF \cdot P_o} \times 10^2$ (Cm ²)	$A_c = \frac{0.648}{\sqrt{12 \left(\frac{1}{P_o}\right)^{1.67} \left(1 - \left(\frac{1}{P_o}\right)^{0.167}\right)}} A_{th}$ (cm)	$R_{th} \sqrt{\frac{A_{th}}{\pi}}$ (cm)	$R_c \sqrt{\frac{A_c}{\pi}}$ (cm)
ISP=225								
40	1,54	0,559	5,9	3,135	11,07786278	66,49945228	1,87829225	4,601974
50	1,57	0,66	5	3,7	10,25961859	72,6575174	1,80759355	4,810336
60	1,59	0,762	4,33	4,273	9,749529699	79,12214354	1,76208562	5,019774
70	1,6	0,889	3,7	5	9,717423495	88,55514775	1,75918187	5,310581
80	1,62	0,94	3,5	5,286	8,878126028	89,4994104	1,68149596	5,338819
ISP=250								
40	1,54	0,559	5,9	3,135	12,30873643	73,88828031	1,97989387	4,850907
50	1,57	0,66	5	3,7	11,39957621	80,73057489	1,90537090	5,070539
60	1,59	0,762	4,33	4,273	10,83281078	87,91349283	1,85740134	5,291306
70	1,6	0,889	3,7	5	10,79713722	98,39460862	1,85434051	5,59784
80	1,62	0,94	3,5	5,286	9,864584476	99,44378933	1,77245237	5,627610
ISP=275								
40	1,54	0,559	5,9	3,135	13,53961007	81,27710835	2,07653021	5,087674
50	1,57	0,66	5	3,7	12,53953383	88,80363238	1,99836986	5,318027
60	1,59	0,762	4,33	4,273	11,91609185	96,70484211	1,94805896	5,549569
70	1,6	0,889	3,7	5	11,87685094	108,2340695	1,94484873	5,871068
80	1,62	0,94	3,5	5,286	10,85104292	109,3881683	1,85896373	5,902287
ISP=300								
40	1,54	0,559	5,9	3,135	14,77048371	88,66593638	2,16886507	5,313902
50	1,57	0,66	5	3,7	13,67949145	96,87668987	2,08722925	5,554498
60	1,59	0,762	4,33	4,273	12,99937293	105,4961914	2,03468122	5,796336
70	1,6	0,889	3,7	5	12,95656466	118,0735303	2,03132825	6,132132
80	1,62	0,94	3,5	5,286	11,83750137	119,3325472	1,94162429	6,164738

Harga jari-jari leher nosel (Rth) dan bagian keluaran nosel (Re) dari tabel di atas selanjutnya digunakan untuk perhitungan dimensi nosel yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4-3 dan Tabel 4-4.

Dimensi nosel yang didapat dari kedua tabel tersebut dibuatkan grafik Gambar 4-1 dan 4-2 sehingga dapat dibandingkan panjang total nosel bentuk paraboloida dan kerucut.

Tabel 4-3 : PANJANG TOTAL NOSEL BENTUK PARABOLOIDA RX-150-1000

$L_1 = R_{th} \sin 45$ (cm)	$L_2 = 7,1 - R_{th}(1 + 1/2 \sin 45)$ (cm)	$L_3 = 0,382 R_{th} \sin 35$ (cm)	a	$Y_1 = a(1,382 - 0,382 \cos 35)$	$Y_2 = a R_c$	$L_4 = Y_2 - Y_1$ (cm)	L_{total} (cm)
a) ISP=225							
1,328	4,558	0,411	0,356	0,380	7,531	7,151	13,447
1,326	4,654	0,397	0,368	0,395	8,549	8,154	14,529
1,245	4,715	0,386	0,379	0,405	9,563	9,157	15,504
1,243	4,719	0,385	0,380	0,406	10,703	10,297	16,645
1,187	4,825	0,368	0,397	0,425	11,321	10,897	17,277
b) ISP=250							
1,400	4,423	0,434	0,337	0,360	7,934	7,578	13,835
1,473	4,521	0,418	0,350	0,374	9,013	8,638	15,050
1,313	4,586	0,407	0,359	0,384	10,068	9,684	15,990
1,311	4,591	0,406	0,360	0,385	11,287	10,902	17,210
1,253	4,701	0,388	0,377	0,403	11,934	11,532	17,875
c) ISP=275							
1,468	4,290	0,455	0,322	0,349	8,326	7,982	14,195
1,413	4,396	0,438	0,334	0,357	9,453	9,095	15,342
1,378	4,463	0,427	0,342	0,366	10,559	10,193	16,461
1,375	4,468	0,426	0,343	0,367	11,834	11,471	17,740
1,314	4,584	0,407	0,359	0,384	12,517	12,133	18,439
d) ISP=300							
1,534	4,165	0,475	0,308	0,329	8,696	8,367	14,540
1,476	4,275	0,457	0,320	0,342	9,873	9,531	15,739
1,439	4,346	0,446	0,328	0,350	11,029	10,673	16,904
1,436	4,351	0,445	0,329	0,351	12,364	12,013	18,245
1,373	4,472	0,426	0,344	0,368	13,074	12,706	18,976

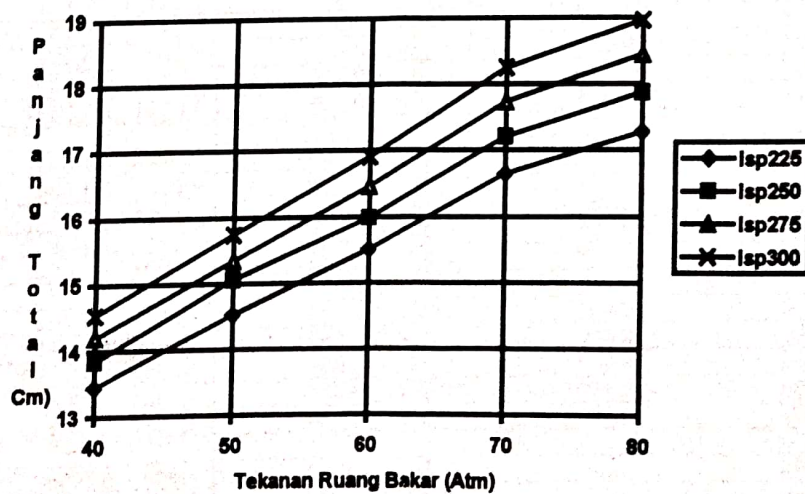
Tabel 4-4 : PANJANG TOTAL NOSEL KRUCUT ROKET RX 150-1000

$L_1=RthSin45$ (cm)	$L_2=7,1-(2-Cos45)Ctg45$ (cm)	$L_3=RthSin15$ (cm)	$L_4=(Re-Rth(2-Cos15)ctg15)$ (cm)	L_{total} (cm)
a) ISP=225				
1,328	5,812	0,486	9,925	17,551
1,326	5,812	0,467	10,981	18,587
1,245	5,812	0,456	11,938	19,451
1,243	5,812	0,455	13,036	20,546
1,187	5,812	0,435	13,448	20,883
b) ISP=250				
1,400	5,812	0,512	10,469	18,193
1,473	5,812	0,493	11,576	19,354
1,313	5,812	0,480	12,580	20,185
1,311	5,812	0,479	13,599	21,202
1,253	5,812	0,458	14,170	21,694
c) ISP=275				
1,468	5,812	0,537	10,979	18,797
1,413	5,812	0,517	12,143	19,885
1,378	5,812	0,504	13,198	20,892
1,375	5,812	0,503	14,409	22,099
1,314	5,812	0,481	14,856	22,464
d) ISP=300				
1,534	5,812	0,561	11,457	19,363
1,476	5,812	0,540	12,677	20,505
1,439	5,812	0,526	13,786	21,563
1,436	5,812	0,525	15,051	22,825
1,373	5,812	0,502	15,525	23,213

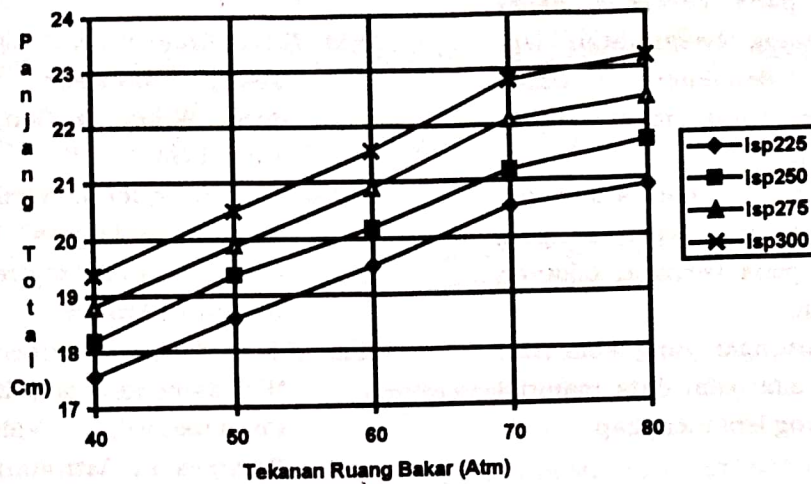
Hasil perhitungan Tabel 4-3 a,b,c,d untuk nosel bentuk paraboloida dan Tabel 4-4 a,b,c,d Untuk nosel bentuk kerucut.

paraboloida dan bentuk kerucut sebagai fungsi dari tekanan ruang bakar untuk berbagai harga spesifik Impuls propelan padat.

Gambar 4-1 dan 4-2 berikut menunjukkan panjang total nosel bentuk



Gambar 4-1 : Panjang total nosel paraboloida



Gambar 4-2 : Panjang Total Nosel Kerucut

4.3 Pembahasan

Dengan membandingkan hasil perhitungan yang tertera pada Tabel 4-3 dan Tabel 4-4 diatas terlihat adanya perbedaan panjang total nosel bentuk paraboloida dan bentuk kerucut yang cukup berarti, Halini ditunjukkan pada Tabel 4-5 berikut.

ISP Detik	P Atm	L _{TotalK} cm	L _{TotalP} cm	ΔL cm
275	40	18,799	14,195	4,602
	50	19,885	15,342	4,543
	60	20,892	16,461	4,431
	70	22,099	17,74	4,359
	80	22,464	18,439	4,025
Rata-Rata		20,827		4,392

Tabel 4-5 : PERSENTASE BERBEDAAN PANJANG TOTAL BENTUK PARABOLOIDA DIBANDINGKAN DENGAN BENTUK KERUCUT

ISP Detik	P Atm	L _{TotalK} Cm	L _{TotalP} cm	ΔL cm
225	40	17,550	13,447	4,103
	50	18,585	14,529	4,057
	60	19,450	15,504	3,946
	70	20,546	16,645	3,901
	80	20,882	17,277	3,605
Rata-Rata		19,403		3,922

ISP Detik	P Atm	L _{TotalK} cm	L _{TotalP} Cm	ΔL cm
300	40	19,63	14,540	4,823
	50	20,505	15,739	4,766
	60	21,563	16,904	4,659
	70	22,825	18,245	4,580
	80	23,213	18,976	4,237
Rata-Rata		21,494		4,613

ISP Detik	P Atm	L _{TotalK} Cm	L _{TotalP} cm	ΔL cm
250	40	18,193	13,835	4,358
	50	19,354	15,050	4,304
	60	20,185	15,990	4,195
	70	21,202	17,210	3,992
	80	21,694	17,875	3,619
Rata-Rata		20,125		4,093

Selisih Panjang total Rata-rata = 20,696 %

5. KESIMPULAN

1. Dari Tabel 4-5 dapat disimpulkan bahwa nosel bentuk paraboloida akan menghemat panjang total

- sekitar 20-21 %, hal ini tidak tercantum pada besarnya harga tekanan ruang bakar atau Isp, dengan demikian dapat mengurangi berat roket secara keseluruhan.
2. Dari Gambar 4-1 dan 4-2 dapat diprediksi secara cepat panjang total nosel pada berbagai tekanan pembakaran.
 3. Untuk perhitungan yang lebih teliti diperlukan sifat-sifat data material propelan yang lebih lengkap.

DAFTAR RUJUKAN

- Bird R.B., Stewart W., Lightfoot E.N. 1965, "Transport Phenomena", John Willey & Son, Inc., New York, USA.
- Dardare J., Mariquet J., Vailhe L., 1987, "Reacteurs- Fusees", Tome II, Les Propulseurs A Poudre, E.N.S.A.E. Toulouse, France.
- Kuo K.K., Martin Summerfield, 1984, "Fundamentals of Solid Propellant Combustion", Volume 90, Progress in Astronautics, Martin Summerfield, Series Editor in Chief.
- Marty D., 1986, "Conception Des Vehicules Spatiaux", Masson, Paris, France.