

Studi Parameter Bahan Nozel RX-250 Untuk Mengoptimasi Berat

Robertus Heru Triharjanto, Salam Ginting*)

*) Peneliti Bidang Struktur dan Mekanika, PUSROSAT-LAPAN

ABSTRACT

Parametric study was done on the material used in the RX-250 rocket nozzle. Three kinds of metal were used in the study to compare the weight of each products. The method used in the computation is the integrated analytical solution. Some formulation from the method can be directly used in the parametric study. Numerical instabilities were found in the first case of the parametric study. It was turned out that the stability analysis can explained some physical phenomena that could happen if the nozzle material was varied. That was, the improvement in the strength and stiffness of the nozzle should be followed by the improvement in the strength and stiffness of the rocket tube and the bolts connecting them.

ABSTRAK

Studi parameter dilakukan untuk bahan pembuat nozel roket RX-250. Tiga macam logam dipakai dalam pengujian ini untuk dilihat berat produknya (nozel). Metoda penghitungan struktur yang dipakai adalah metoda solusi analitis yang telah diintegrasikan. Dari metoda tersebut didapat beberapa formulasi yang dapat langsung dipakai pada studi parameter. Pada kasus pertama studi parameter ditemukan ketidakstabilan numeris dari metoda yang ada. Ternyata analisis kestabilan dapat menerangkan beberapa fenomena fisik yang akan terjadi bila bahan nozel divariasikan. Yakni penambahan kekuatan dan kekakuan nozel harus juga diikuti dengan penambahan kekuatan dan kekakuan tabung roket dan baut penghubungnya.

1. PENDAHULUAN

Berat struktur roket LAPAN hingga saat ini masih menjadi kendala untuk meningkatkan prestasinya. Struktur rasionya 50% [ref 1 dan 5], sementara roket-roket sekelas dari luar negeri struktur rasionya 80% [ref 3]. Untuk menurunkan berat struktur, upaya yang dilakukan antara lain memperbaiki sistim analisa kekuatan struktur, agar tingkat kepercayaannya lebih besar sehingga faktor keamanannya bisa diturunkan, yang akan berakibat berkurangnya material yang terpakai. Selain itu dipelajari kemungkinan

menggunakan bahan yang rasio kekuatan terhadap beratnya (strength to weight ratio) lebih tinggi. Untuk itu, dilakukan studi parameter terhadap bahan yang akan digunakan untuk membuat komponen struktur roket.

Pada makalah ini dibahas tentang studi parameter bahan untuk nozel RX-250. Komponen nozel ini dipilih karena solusi analitis yang sudah diotomatisasi telah tersedia [ref 4]. Dengan tersedianya solusi yang sudah otomatis, studi parameter dapat dilakukan dengan relatif cepat dan dengan kemungkinan kesalahan perhitungan yang minimal.

2. TEORI PEMODELAN NOZEL

Pada studi banding ini diambil kasus nozel RX-250 dengan model seperti pada Gambar 2-1, dimana dalam pemodelan nozel terbagi dalam 5 bagian.

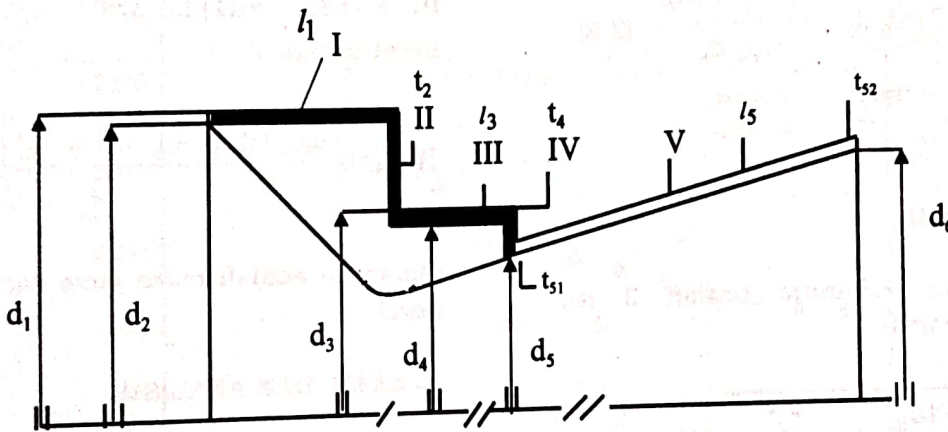
Material yang diperbandingkan adalah Steel yang dimiliki LAPAN, Steel 17-7PH, dan Titanium 8-1-1 dengan sifat tertulis di Tabel 2-1 [ref 2 dan 6].

Dimensi yang ditetapkan untuk nozel tersebut adalah (baut yang dipakai terbuat dari Steel):

$$\begin{aligned} d_2 &= 230 \text{ mm} & d_4 &= 172 \text{ mm} \\ d_5 &= 142 \text{ mm} & d_6 &= 260 \text{ mm} \\ d_p &= 6 \text{ mm} & t_R &= 6 \text{ mm} \\ l_p &= 20 \text{ mm} & l_1 &= 132 \text{ mm} \\ l_3 &= 126 \text{ mm} & l_5 &= 205 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dimana indeks p menandakan baut dan indeks R menandakan tabung roket.

Adapun formulasi yang dipakai dalam penghitungan struktur nozel menuruti notasi pada gambar 1. Sistem perhitungan ini telah dipublikasikan sebelumnya [ref 5].



Gambar 2-1: Geometri penampang nozel RX-250

Tabel 2-1: SIFAT BAHAN YANG DIPAKAI DALAM STUDI PARAMETER

Material	Berat jenis Kg/m ³	Modulus kekakuan GPa	Tegangan luluh GPa
Titanium	4705	117	1,034
Steel 17-7PH	7860	120	0,964
Steel yg dimiliki LAPAN	7900	18,8	0,050

2.1. Bagian I

Untuk bagian I, pada formulasi solusi analitis, didapat persamaan

dengan variabel yang *interdependent*, yakni untuk variabel jumlah baut dan diameter luar bagian I. Jumlah baut yang diperlukan (m) adalah:

$$m = \frac{4FN}{\pi d_p^2} \left(\frac{1}{z} \right) \quad (2-1)$$

$$z = \sqrt{\sigma_{YP}^2 - \frac{E_p N P \sigma_{YP}}{2 \lambda_p} \left[\frac{d_1^2}{E_R t_R} - \frac{d_2^2}{E_N (d_1 - d_2)} \right]}$$

Dimana N adalah faktor keamanan, F dan P adalah gaya axial dan tekanan yang harus ditahan nozel, λ_p adalah panjang baut, m adalah jumlah baut, dan σ_{YP} adalah tegangan luluh.

Diameter luar yang bagian I (d_1) dihitung dengan :

$$d_1 = \frac{m d_p \pm \sqrt{m^2 d_p^2 + \pi q}}{\pi}$$

$$q = \pi d_2^2 - 2 m d_p d_2 + \frac{4(2,3) N F w}{\sigma_{YN} d_p} \quad (2-2)$$

$$w = \frac{\pi d_2 - m d_p}{m}$$

2.2. Bagian II

Tebal minimum bagian II (t_2) dihitung dengan :

$$t_2 = \sqrt{\frac{6 M_{II}}{\pi d_1 \sigma_{YN}} + \frac{F_{II}^2}{\pi^2 d_2^2 \sigma_{YN}^2}}$$

$$M_{II} = F_{II} \cdot \frac{d_1 - d_4}{4} \quad (2-3)$$

$$F_{II} = K t \cdot F \cdot N \cdot A_{II} / (A_{II} + A_{IV})$$

Dimana F adalah gaya axial yang bekerja dan A adalah luas penampang tegak lurus dengan sumbu x pada bagian yang diindikasikan.

2.3. Bagian III, IV dan V

Ketebalan minimum bagian III dihitung dengan formulasi empirik yang mirip dengan bagian I, namun tanpa memperhitungkan baut. Formulasinya adalah :

$$d_3 = \sqrt{\frac{15 \times 9955 \times 4}{\pi \sigma_{YN}} + d_4^2}$$

Kemudian, bagian 4 dihitung seperti bagian 2. Sementara tebal bagian 5 ditentukan bukan oleh perhitungan, hanya dilihat dari kemudahan manufaktur

2.4. Berat Nozel

Berat Nozel dihitung sebagai berikut [4]

Berat bagian I :

$$B_1 = (\pi d_1^2 - \pi d_2^2) l_1 \cdot \rho / 4 \quad (2-4a)$$

Berat bagian II :

$$B_2 = (\pi d_2^2 - \pi d_3^2) t_2 \cdot \rho / 4 \quad (2-4b)$$

Berat bagian III :

$$B_3 = (\pi d_3^2 - \pi d_4^2) l_3 \cdot \rho / 4 \quad (2-4c)$$

Berat bagian IV :

$$B_4 = (\pi d_4^2 - \pi d_5^2) t_4 \cdot \rho / 4 \quad (2-4d)$$

Berat bagian V :

$$B_5 = 2\pi l_3 \left[\frac{d_6 t_{51} + d_5 t_{52}}{2} + \frac{(d_6 - d_5)(t_{52} - t_{51})}{3} \right] \rho \quad (2-4e)$$

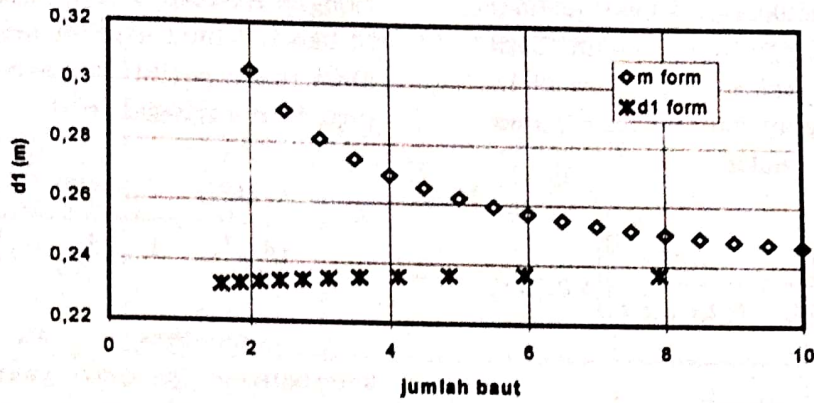
dimana ρ adalah masa jenis dari bahan nozel.

3. HASIL DAN ANALISIS

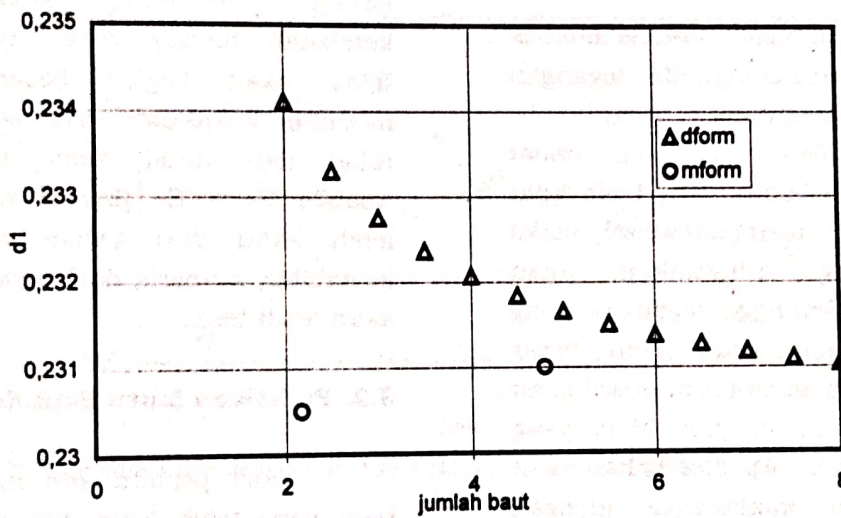
3.1. Variasi Bahan Nozel

Grafik perhitungan tahap I nozel untuk tiga macam bahan nozel (dengan bahan baut yang sama) adalah pada Gambar 3-1, 3-2 dan 3-4, dimana "m form" adalah hasil perhitungan dengan persamaan (2-1), dan "d form" adalah hasil dari persamaan (2-2) :

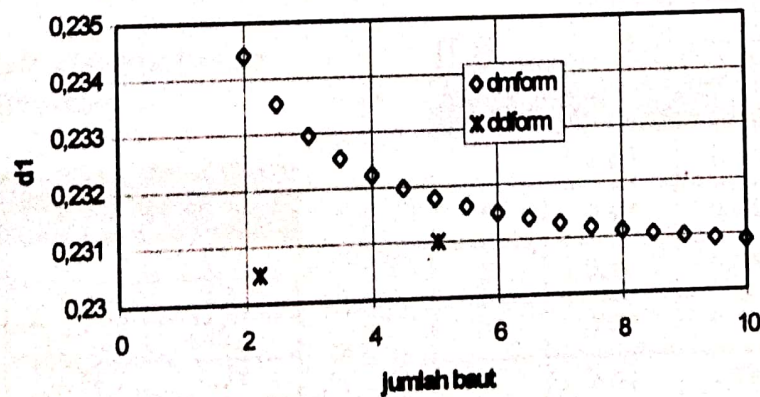
Hasil perhitungan menunjukkan adanya kasus-kasus dimana terjadi ketidakstabilan numeris. Dalam artian ada parameter input yang akan menghasilkan bilangan imajiner yang tidak dimungkinkan dalam perhitungan struktur. Misalnya perhitungan jumlah baut yang dibutuhkan pada kasus Titanium dan Steel 17-7PH (Gambar 3-2 dan 3-4), persamaan (2-1) hanya dua hasil yang berarti, sementara hasil yang lain amat besar, amat kecil, atau imajiner.



Gambar 3-1 : Hasil perhitungan bagian I dari nozel dengan bahan steel yang dimiliki LAPAN



Gambar 3-2 : Hasil perhitungan bagian I nozel dengan bahan Titanium



Gambar 3-3 : Hasil perhitungan bagian I nozel dengan bahan steel 17-7PH

Analisa dilakukan dengan melihat rumus yang menghitung jumlah baut yang diperlukan yakni persamaan (2-1). Dari rumus tersebut dapat dilihat bahwa keterbatasannya adalah :

$$\left(\sigma_{YP}^2 - \frac{E_p NP \sigma_{YP}}{2l_p} \left[\frac{d_1^2}{E_R t_R} - \frac{d_2^2}{E_N (d_1 - d_2)} \right] \right) > 0 \quad (2-5)$$

atau dapat ditulis sebagai :

$$\sigma_{YP} > \frac{E_p NP}{2l_p} \left[\frac{d_1^2}{E_R t_R} - \frac{d_2^2}{E_N (d_1 - d_2)} \right] \quad (2-6)$$

yang berarti kestabilan numeris metoda ini dapat diperbaiki apabila tegangan luluh dari baut yang dipakai besar.

Secara fisik hal ini dapat dipahami apabila bahan yang lebih kuat digunakan untuk membuat nozel, maka ketebalan yang dibutuhkan akan semakin kecil. Sehingga tegangan yang terjadi pada baut akan lebih besar karena gaya yang sama (axial nozel) akan diaplikasikan pada bagian baut yang lebih kecil luasnya. Apabila bahan baut tidak diperbaiki kualitasnya (dengan peningkatan pada tegangan luluh) maka baut akan gagal.

Alternatif lain untuk memperbaiki kestabilan numeris adalah dengan membuat batasan :

$$\left[\frac{d_1^2}{E_R t_R} - \frac{d_2^2}{E_N (d_1 - d_2)} \right] < 0 \quad (2-7)$$

Dengan batasan di atas maka komponen di bawah tanda akar di persamaan (2-1) akan selalu positif. Batasan di atas dapat juga ditulis sebagai :

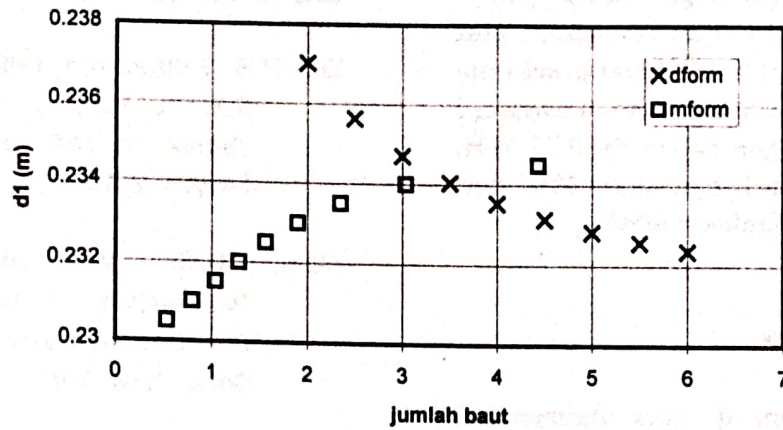
$$\frac{d_1^2}{E_R t_R} < \frac{d_2^2}{E_N (d_1 - d_2)} \quad (2-8)$$

Sementara itu terdapat keterbatasan geometri yakni $d_1 > d_2$. Sehingga Apabila denominatornya sama maka batasan di atas tidak mungkin terpenuhi. Oleh sebab itu denominator sebelah kiri persamaan (2-8) haruslah lebih besar dari denominator sebelah kanan. Diketahui bahwa selisih ketebalan tabung roket dengan nozel tidak akan begitu besar, sehingga modulus kekakuan dari bahan tabung roket dan nozel akan menentukan. Apabila $E_R > E_N$ (bahan tabung roket lebih kaku dari bahan nozel) maka kestabilan numeris dari persamaan (2-1) akan lebih baik.

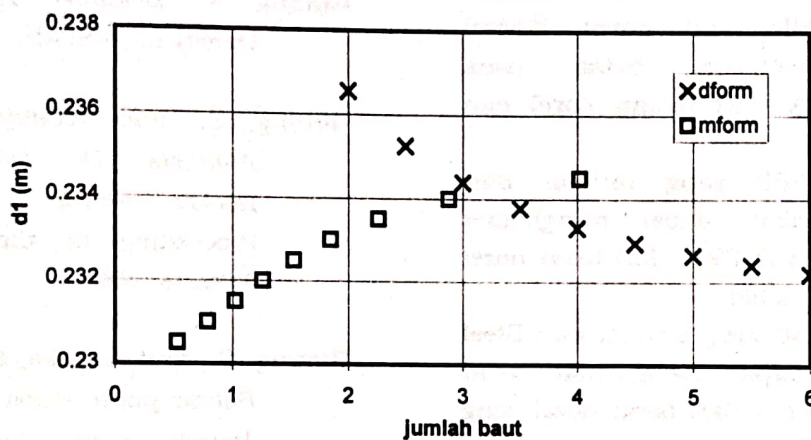
3.2. Perbaikan Mutu Baut dan Tabung

Hasil perhitungan menggunakan baut yang lebih kuat dan tabung roket yang lebih kaku, dengan spesifikasi sebagai berikut :

- pada baut : $E=120$ Gpa ; $\sigma_y=1$ Gpa ; diameter = 5mm
- pada tabung roket : $E=80$ Gpa



Gambar 3-4 : Hasil perhitungan bagian 1 nozel steel 17-7PH dengan baut yang lebih kuat dan tabung roket yang lebih kaku



Gambar 3-5 : Hasil perhitungan bagian 1 nozel Titanium dengan baut yang lebih kuat dan tabung roket yang lebih kaku

3.3. Perbandingan Ketebalan dan Berat

Hasil perhitungan ketebalan minimum bagian-bagian nozel yang dibutuhkan (dimensi dalam mm) adalah sebagai berikut :

Tabel 3-1 : DIMENSI MINIMUM BAGIAN-BAGIAN NOZEL

Bagian	Steel (LPN)	Steel 17-7PH	Titanium
d ₁	240	234	234
t ₂	7,0	1,2	1,1
d ₃	175	172,1	172,1
t ₄	3,5	0,74	0,68
t ₅₁	1,5	0,8	0,7
t ₅₂	1,0	0,6	0,5

Hasil perbandingan berat untuk ketiga material tersebut adalah sebagai berikut (berat dalam kg; berat total belum termasuk berat grafit dan baut) :

Tabel 3-2 : PERBANDINGAN BERAT NOZEL DENGAN TIGA MACAM BAHAN

Bagian	Steel (LPN)	Steel 17-7PH	Titanium
I	3,85	1,512	0,9053
II	0,97	0,158	0,0946
III	0,81	0,027	0,0160
IV	0,20	0,043	0,0237
V	2,50	1,140	0,7190
total	8,34	3,145	1,7600

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa jika dipakai bahan Titanium, maka berat nozel hanyalah 21% dari berat nozel yang kini dipunyai LAPAN. Jika mengganti bahan nozel dengan bahan Steel 17-7PH, maka berat nozel hanyalah 38% dari nozel yang kini dimiliki LAPAN.

4. KESIMPULAN

Dari studi di atas disimpulkan bahwa :

- Ketidakstabilan numerik dari perhitungan di atas adalah gambaran keterbatasan fisik dari sistem. Ketidakstabilan ini dapat diatasi dengan memberi batas pada karakteristik dari bahan nozel dan baut.
- Nozel RX-250 yang terbuat dari Titanium akan dapat menghemat berat sebanyak 79 % dari berat nozel yang kini dimiliki.
- Nozel RX-250 yang terbuat dari Steel 17-7 PH dapat menghemat berat sebanyak 62 % dari berat nozel yang kini dimiliki.

Namun demikian harga Titanium dan juga sifatnya yang sulit dibentuk menjadi kendala dalam produksi.

DAFTAR RUJUKAN

- Tim R.E. Peluncuran 1999 (Triharjanto, R.H. & Markis, Y.K.), *Dokumen Teknik RX-150 SP, SM & KG*. LAPAN, 2000.
- Allen, D.H., and Haisler, W.E., *Introduction to Aerospace Structural Analysis*, John Wiley & Sons, New York., 1985.
- Tanumihardja, S., *Dokumen Teknik Roket Superloki*, Detekgan LAPAN.
- Ginting, S., *Dokumen Teknik RX-250*, Detekgan , LAPAN.
- Ginting, S., and Triharjanto, R., *The Analysis Of Lighter RX-150 Rocket Nozzle Structure*, Proceeding of the 3rd ISASTI, Jakarta, 1998.
- Ginting, S., and Ariyaka, S., *Perhitungan Beban pada Nozel Roket dengan Metoda Grid Hingga*, Majalah LAPAN no.81, April 1997.