

KOMPONEN STRUKTUR MOTOR ROKET RX-420, TINJAUAN ANALISIS DESAIN PLASTIS PENAMPANGNYA

Setiadi

Peneliti Pusat Teknologi Wahana Dirgantara, LAPAN

ABSTRACT

The static test of RX-420 has been successfully done on December 23rd, 2008. The success is, among others, due to the design of the motor's structure. This paper will analyze and the components of motor's structure from the plasticity design theory.

In the structure, if the load is not considered too big, the stress is then in elastic domain. However, if the load is increases, some parts of the structure will experience yield stress, and the structure will have elastic-plastic deformations. Further increase in load will make the entire structure will experience yield stress and collapse.

In this paper, the analysis or design is done in plasticity method which use the simpler mathematics equation, compare to those exist in elasticity method. The analysis and theory will be employed in the structure of RX-420 rocket motor, which its motor tube use 17-7PH steel, and its nozzle and cap use S-45C carbon steel. The output from the analysis will be used for the consideration of safety

ABSTRAK

Belum lama ini telah dilakukan uji statik motor roket RX-420, tepatnya pada tanggal 23 Desember 2008, dan dapat dikatakan berhasil dengan baik. Keberhasilan uji statik tersebut tidak lepas dari keberhasilan rancangan struktur motornya. Dalam tulisan ini akan dicoba menganalisis komponen struktur motornya dari sisi teori desain plastis.

Jika diperhatikan pada suatu penampang struktur, bahwa selama beban yang bekerja tidak terlalu besar, tegangan yang terjadi masih terletak dalam daerah elastis. Tetapi, jika beban ini diperbesar, bagian-bagian tertentu dari penampang tersebut akan mengalami tegangan leleh (*yield stress*), sehingga struktur akan mengalami deformasi elastis plastis. Penambahan beban berikutnya dapat mengakibatkan seluruh serat penampang akan mengalami tegangan leleh, sehingga pada penampang tersebut akan mengalami kondisi plastis, yang mana selanjutnya struktur ini akan runtuh (*collapse*).

Hal penting dalam tulisan ini adalah, analisis atau desain yang dilakukan dengan menggunakan metode plastis akan menggunakan persamaan matematik yang lebih mudah bila dibandingkan dengan persamaan yang ada dalam metode elastis.

Analisis dan teori ini akan diterapkan pada komponen struktur motor roket RX-420, yang tabung motornya terbuat dari bahan *stainless steel* 17-7PH, struktur cap dan noselnya dari baja karbon S-45C. Keluaran yang diperoleh akan dijadikan sebagai pertimbangan untuk faktor keamanan.

Kata kunci : *Metode elastis, Tegangan leleh, Metode plastis, Faktor keamanan*

1 PENDAHULUAN

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), telah mencapai usia 45 tahun pada 27 November 2008 lalu. Sejak tahun 2007 melakukan percepatan dalam pengem-

bangun teknologi peroketan dan satelitnya. Setelah sukses dengan peluncuran roket RX-320 pada pertengahan tahun 2008, LAPAN berhasil melakukan uji statik RX-420 pada tanggal 23 Desember 2008, di Pusat Teknologi Wahana Dirgantara,

Rumpin Tarogong dan berhasil dengan baik. Setelah menyaksikan pelaksanaan uji statik, Menteri Negara Riset dan Teknologi, Kusmayanto Kadiman mengatakan akan terus mendorong LAPAN untuk konsisten mengembangkan roket sesuai dengan kompetensinya, hingga mampu mengorbitkan satelit.

Keberhasilan uji statik tersebut tentu tidak lepas dari keberhasilan rancangan struktur motor roketnya, yang terdiri dari beberapa komponen seperti tabung motor roket, cap dan nosel. Dalam perhitungan rancangan suatu struktur yang aman, biasanya masih terletak dalam batas elastis, untuk itu defleksinya kecil dan tegangan yang terjadi rendah, namun hal ini akan mengakibatkan penggunaan bahan menjadi tidak hemat. Untuk itu di sini dicoba diterapkan teori plastis, yang didasarkan pada konsep kondisi plastis, yang mana nantinya analisis yang digunakan dalam metode ini, menggunakan persamaan matematik yang lebih sederhana, dibandingkan dengan persamaan yang ada dalam metode elastis. Dalam tulisan ini akan dicoba menganalisis rancangan komponen struktur motor roket seri RX-420, yang telah di uji statik, dan direncanakan uji terbangnya pada pertengahan tahun 2009, di pantai selatan Jawa Barat, yaitu daerah Pameungpeuk Kabupaten Garut.

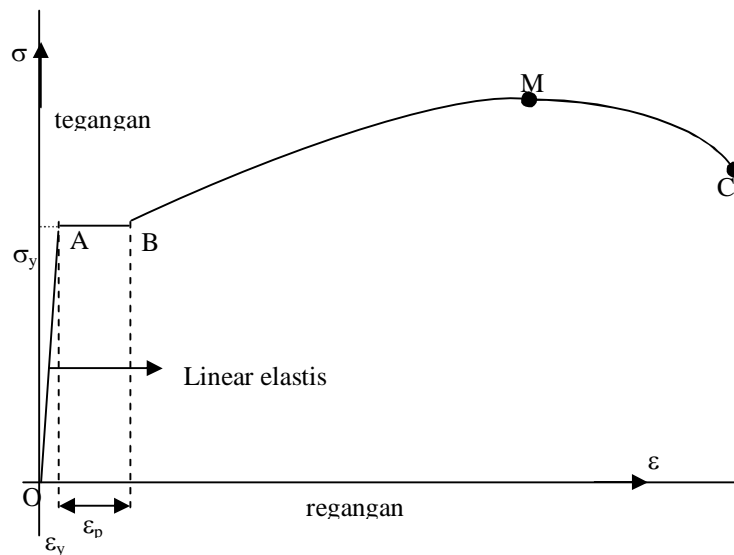
Pada roket berbahan bakar padat, struktur tabung motor roket merupakan tempat propelan berada dan sekaligus sebagai tempat pembakarannya, sehingga bagian ini akan menerima tegangan yang besar, baik dari tekanan gas pembakaran maupun dari temperatur. Oleh karena itu, tabung motor merupakan bagian yang kritis dari struktur roket secara keseluruhan. Kegagalan dalam rancangan struktur roket baik dari sisi material maupun ukuran dimensi akan mengakibatkan kegagalan secara keseluruhan.

Jika suatu komponen struktur, terkena suatu pembebanan, dapatlah diketahui bahwa selama beban yang bekerja tidak terlalu besar, tegangan yang terjadi masih terletak dalam daerah elastis. Tetapi, jika beban ini diperbesar, bagian-bagian tertentu dari penampang tersebut, akan mengalami tegangan leleh (*yield stress*), sehingga struktur akan mengalami deformasi elastis plastis. Penambahan beban berikutnya dapat mengakibatkan seluruh serat penampang mengalami tegangan leleh, sehingga pada penampang ini akan terjadi rotasi yang terus-menerus dengan momen yang tetap besarnya pada penampang tersebut. Hal ini berarti bahwa pada penampang tersebut telah terbentuk suatu sendi plastik, yang selanjutnya dengan jumlah sendi plastik tertentu, struktur akan runtuh, dan salah satu tujuan dari analisis plastis ini adalah untuk menentukan besarnya beban runtuh tersebut. Di samping itu, perlu juga diketahui apa yang terjadi ketika suatu struktur runtuh dan bagaimana pula tingkah lakunya apabila tegangan-tegangan dari materialnya telah melampaui batas elastis.

2 TEORI DASAR TEGANGAN REGANGAN

2.1 Hubungan Tegangan-Regangan

Jika pada suatu batang baja dilakukan pengujian tarik aksial sampai putus pada kondisi temperatur ruang, maka akan didapat suatu diagram hubungan antara tegangan (σ) dengan regangan (ϵ) nya, lihat Gambar 2-1. Regangan merupakan perbandingan antara besarnya perubahan panjang sampel uji tarik terhadap panjang semula yang disimbolkan dengan ϵ , dan tegangan merupakan gaya tarik aksial per satuan luas dari penampang, yang disimbolkan dengan σ .



Gambar-2-1: Hubungan tegangan-regangan untuk baja lunak

Perubahan panjang dapat dirumuskan:

$$L - L_0 = N \cdot L_0 / A \cdot E \quad (2-1)$$

Dengan pengertian,

L_0 = panjang awal batang baja,

L = panjang batang setelah mendapat beban,

N = gaya tarik aksial,

A = luas penampang,

E = Modulus Elastisitas bahan.

Selanjutnya, untuk kondisi elastis :

$$\begin{aligned} (L - L_0) / L_0 &= (N/A) \cdot 1/E \\ \epsilon &= \sigma / E \end{aligned} \quad (2-2)$$

Kondisi elastis adalah jika gaya tarik dilepas, maka ϵ menjadi nol. Hukum Hooke berlaku untuk keadaan tersebut.

Percobaan terhadap baja lunak akan menghasilkan bentuk hubungan tegangan-regangan yang karakteristiknya hampir sama, seperti tampak pada Gambar 2-1. Daerah pertama, yaitu OA, merupakan garis lurus, dan menyatakan daerah linear elastis. Kemiringan garis ini menyatakan besarnya modulus elastis, seperti pada rumus 2-2, $E = \sigma/\epsilon$. Lebih lanjut, tegangan pada titik A disebut sebagai tegangan leleh, dimana regangan pada kondisi ini berkisar 0,0012. Dari percobaan tersebut dapat dilihat bahwa bila regangannya terus bertambah hingga melampaui harga ini,

ternyata tegangannya dapat dikatakan tidak bertambah. Sifat pada daerah AB inilah yang disebut sebagai **plastis**, dimana regangan plastisnya disimbolkan ϵ_p . Lokasi titik B tidaklah tertentu. Tetapi, sebagai perkiraan dapat ditentukan terletak pada regangan 0,014.

Daerah BC merupakan daerah **strain hardening**, dimana hubungan tegangan-regangannya bersifat tidak linear. Di titik M, yaitu pada regangan berkisar 20% dari panjang bahan, tegangannya mencapai nilai maksimum yang disebut sebagai **tegangan tarik ultimit**, kemudian pada titik C material putus.

Selanjutnya dapat dijelaskan, bahwa semakin besar tegangan lelehnya, σ_y , semakin tinggi pula kadar karbon yang diperlukannya. Semakin tingginya tegangan leleh ini, mengakibatkan daktilitas dari material tersebut berkurang. Untuk baja struktur, besarnya ϵ_s kira-kira sepuluh kali ϵ_y , dan E_s besarnya 0,04 E . Dengan demikian, hubungan tegangan-regangan setelah daerah ini adalah sangat datar. Hal ini berbeda dengan **material getas (brittle material)** yang hanya mengalami deformasi plastis yang sangat kecil sebelum material tersebut mencapai titik hancur.

Hubungan tegangan-regangan untuk keperluan analisis ini di

idealisasikan sebagai **hubungan plastis ideal**. Juga diasumsikan bahwa bahan bersifat homogen, pada waktu gaya luar bekerja komponen struktur hanya mengalami lentur murni, yaitu dengan mengabaikan pengaruh gaya lintang dan gaya aksial. Pengaruh faktor ini adalah pengurangan besarnya momen plastis, walaupun umumnya pengurangan ini tidaklah terlalu besar.

2.2 Distribusi Tegangan

Bila suatu komponen struktur menerima suatu beban, maka dari persamaan keseimbangan dapat diperoleh gaya-gaya dalam yang bekerja, termasuk momen maksimum yang terkait dengan tegangan maksimum. Jika besarnya tegangan maksimum belum mencapai tegangan leleh, distribusi tegangan dan regangan dari semua penampang akan berupa garis lurus. Dengan demikian, tegangan dan regangan di suatu serat yang ditinjau berbanding lurus terhadap jarak dari garis netral penampang. Tegangan tarik maksimum pada serat bawah dan tegangan tekan maksimum pada serat atas, adalah :

$$\sigma_{\text{maks}} = \frac{M_{\text{maks}}}{S} \quad (2-3)$$

Keterangan:

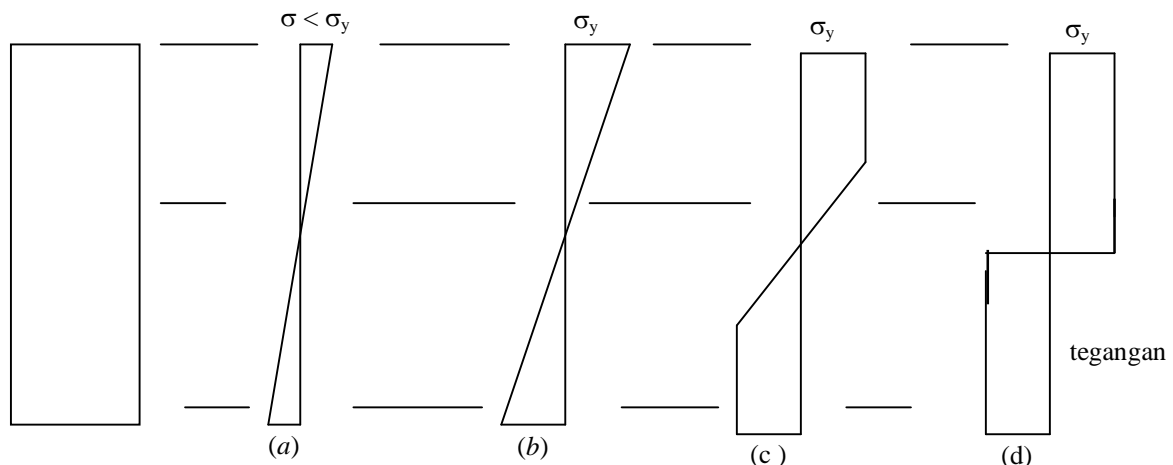
M_{maks} = momen lentur maksimum

S = modulus penampang

Jika beban kerja semakin besar, tegangan di setiap serat penampang turut bertambah pula, keadaan ini dapat kita lihat pada Gambar 2-2. Gambar 2-2b, menunjukkan tegangan pada serat terluar yang telah mencapai kondisi leleh. Keadaan ini terletak di titik A pada Gambar 2-1, dan besarnya momen pada titik ini disebut sebagai momen leleh M_y .

Apabila beban diperbesar lagi, tegangan lelehnya mulai menjalar ke serat sebelah dalam sebagaimana tampak pada Gambar 2-2c. Selanjutnya tidak ada tegangan yang lebih besar dari tegangan leleh, tetapi momen dalam dapat terus bertambah karena resultan gaya dalamnya bertambah besar. Penambahan beban lagi, akan tercapailah keadaan di mana seluruh serat penampang mengalami tegangan leleh lihat Gambar 2-2d.

Momen dalam menjadi maksimum dan merupakan momen plastis. Pada kondisi ini, penampang tadi akan mengalami rotasi yang cukup besar tanpa terjadi perubahan momen, dengan kata lain, di titik tersebut telah terjadi sendi plastis.



Gambar 2-2: Distribusi Tegangan pada serat penampang

3 ANALISIS MOMEN PLASTIS PADA PENAMPANG

Secara praktis langsung dapat dihitung besarnya momen plastis dari setiap penampang. Gambar 3-1 menunjukkan suatu penampang sembarang yang berada dalam kondisi plastis, dimana distribusi tegangannya yang diakibatkan oleh lentur murni, diperlihatkan pada Gambar 3-1b. Selanjutnya dengan memperhitungkan pengaruh lentur saja, maka :

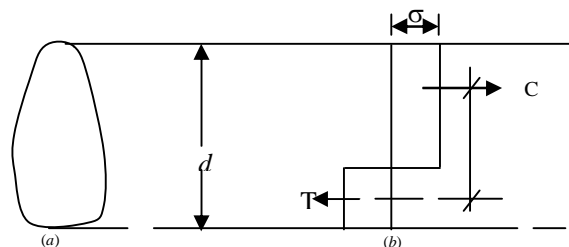
$$C = T \quad (3-1)$$

Keterangan:

C =resultan gaya tekan di atas garis netral, dan

T =resultan gaya tarik di bawah garis netral.

Dengan demikian, diperoleh : *Luas bidang tekan* x $\sigma_y =$ *Luas bidang tarik* x σ_y



Gambar 3-1:Penampang sembarang pada kondisi plastis

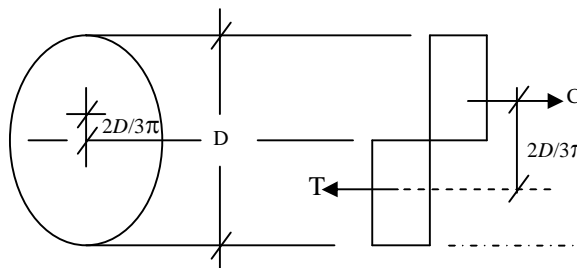
Selanjutnya akan dijelaskan penentuan momen plastis dari suatu penampang, yang sesuai dengan komponen struktur pada tabung motor roket, yaitu bentuk lingkaran dan cincin.

3.1 Penampang Lingkaran

Penampang lingkaran seperti Gambar 3-2, memiliki garis netral yang membagi luasnya menjadi dua bagian yang sama besar. Luas setengah lingkaran di hitung, sebesar $= \pi D^2/8$, di

mana D merupakan garis tengah lingkaran. Jadi,

$$C = T = \pi D^2 \sigma_y / 8 \quad (3-2)$$



Gambar 3-2 : Penampang lingkaran

Lengan momen dalam dihitung sebesar $= 4D/3\pi$. Berdasarkan keseimbangan momen, didapat hasil:

$$M_p = C \cdot 4D/3\pi = D^3 \cdot \sigma_y / 6 \quad (3-3)$$

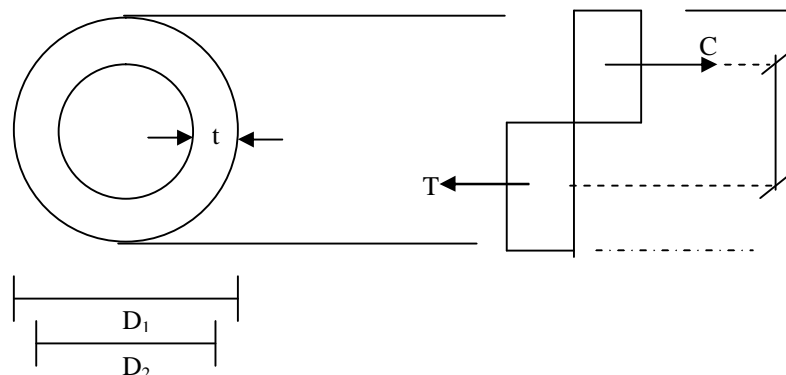
Sehingga, besarnya modulus plastis penampang ini, $Z = D^3/6$. Sedangkan besarnya modulus penampang, adalah besarnya inersia momen dibagi dengan jarak antara garis netral terhadap serat terluar. Besar inersia momen $I = \pi D^4/64$, dan jarak garis netral terhadap serat terjauh $D/2$, jadi besarnya modulus penampang $S = \pi D^3/32$. Sehingga besarnya faktor bentuk f :

$$f = Z/S = 1,7 \quad (3-4)$$

3.2 Penampang Cincin

Penampang cincin seperti Gambar 3-3, juga memiliki garis netral yang membagi luasnya menjadi dua bagian yang sama besar. Luas setengah lingkaran tersebut dapat dihitung, sebesar $= \pi (D_1^2 - D_2^2)/8$, dimana D_1 merupakan garis tengah lingkaran luar dan D_2 merupakan garis tengah lingkaran dalam. Jadi,

$$C = T = \pi (D_1^2 - D_2^2) \cdot \sigma_y / 8 \quad (3-5)$$



Gambar 3-3: Penampang Cincin Dengan Tebal t

Lengan momen dalam dihitung sebesar =

$$\frac{4}{3\pi} \frac{(D_1^2 + D_1 \cdot D_2 + D_2^2)}{(D_1 + D_2)}$$

Berdasarkan keseimbangan momen, di dapat hasil:

$$M_p = C \cdot \frac{4}{3\pi} \frac{(D_1^2 + D_1 \cdot D_2 + D_2^2)}{(D_1 + D_2)} = \frac{\sigma_y \cdot t}{3} (D_1^2 + D_1 \cdot D_2 + D_2^2) \quad (3-6)$$

Sehingga, besarnya modulus plastis penampang ini, $Z = (D_1^2 + D_1 \cdot D_2 + D_2^2) \cdot t / 3$. Sedangkan besarnya modulus penampang, adalah besarnya inersia momen dibagi dengan jarak antara garis netral terhadap serat terluar. Di sini nilai inersia momen $I = \pi (D_1^4 - D_2^4) / 64$, dan jarak garis netral terhadap serat terjauh $D_1/2$, dengan demikian besarnya modulus penampang S dapat dihitung $2I/D_1$. Selanjutnya harga faktor bentuk $f = Z/S$, melalui perhitungan akan didapatkan hasilnya.

3.3 Faktor Beban atau Faktor Keamanan

Faktor keamanan (*safety factor*) dapat dirumuskan dalam beberapa cara. Misal, pada teori elastis, faktor ini dirumuskan sebagai tegangan leleh dibagi dengan tegangan ijin, σ_y/σ ; atau dapat pula dirumuskan sebagai beban pada kondisi tegangan leleh dibagi dengan beban kerja. Beban kerja didefinisikan sebagai beban yang menimbulkan tegangan ijin maksimum.

Rumusan yang digunakan pada teori plastis menyatakan bahwa faktor keamanan merupakan hasil pembagian antara kapasitas beban maksimum dengan beban kerja, yang ekuivalen dengan momen

plastis dibagi momen elastis, M_p/M . Dari uraian sebelumnya, dapat diketahui bahwa momen plastis sama dengan $\sigma_y \cdot Z = \sigma_y \cdot S \cdot f$, dan momen elastis sama dengan $\sigma \cdot S$. Dengan mensubstitusikan harga-harga ini ke dalam persamaan M_p/M , akan didapat :

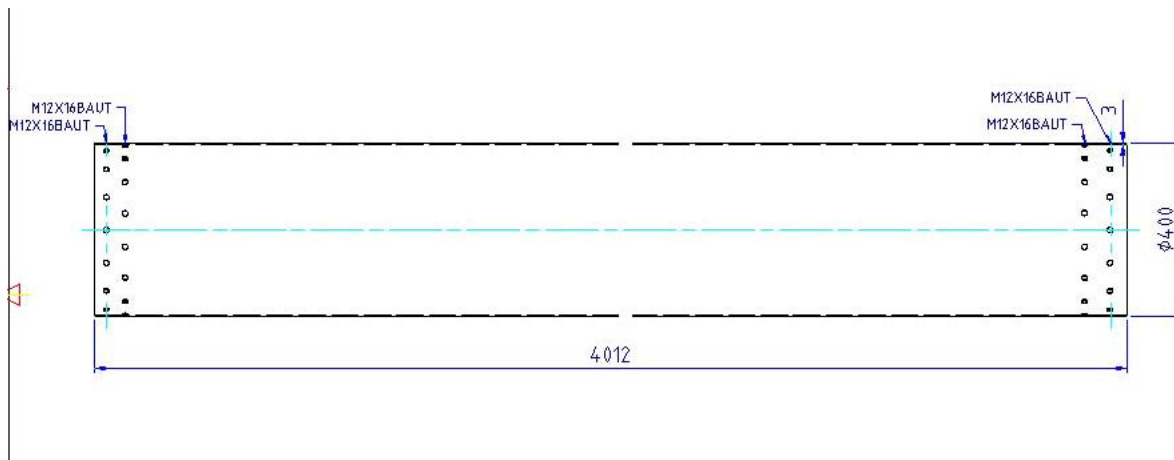
$$\text{Faktor beban atau faktor keamanan} = \frac{\sigma_y \cdot f}{\sigma} \quad (3-7)$$

4 PEMBAHASAN DATA DAN ANALISIS HASIL

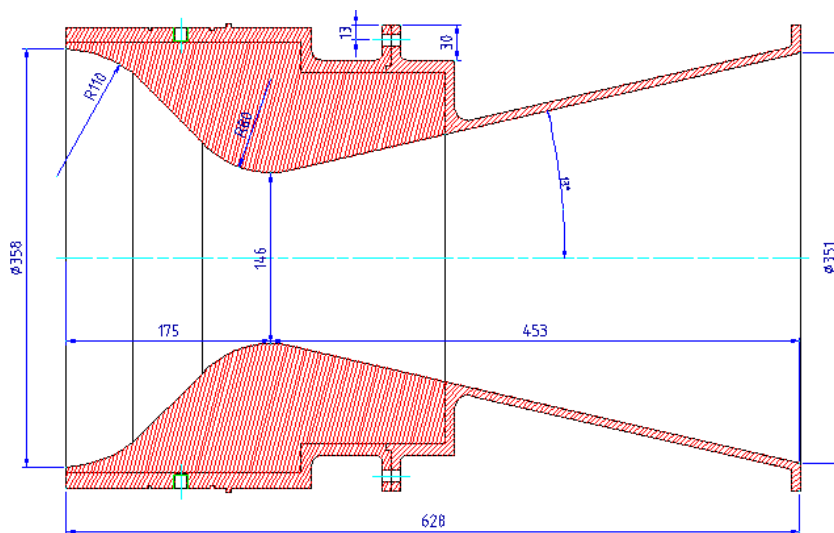
4.1 Data Material dan Beban

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa fokus pembahasan makalah ini adalah pada komponen struktur motor roket diameter 420 mm, dengan demikian akan dibahas struktur tabung motornya, struktur nosel dan cap.

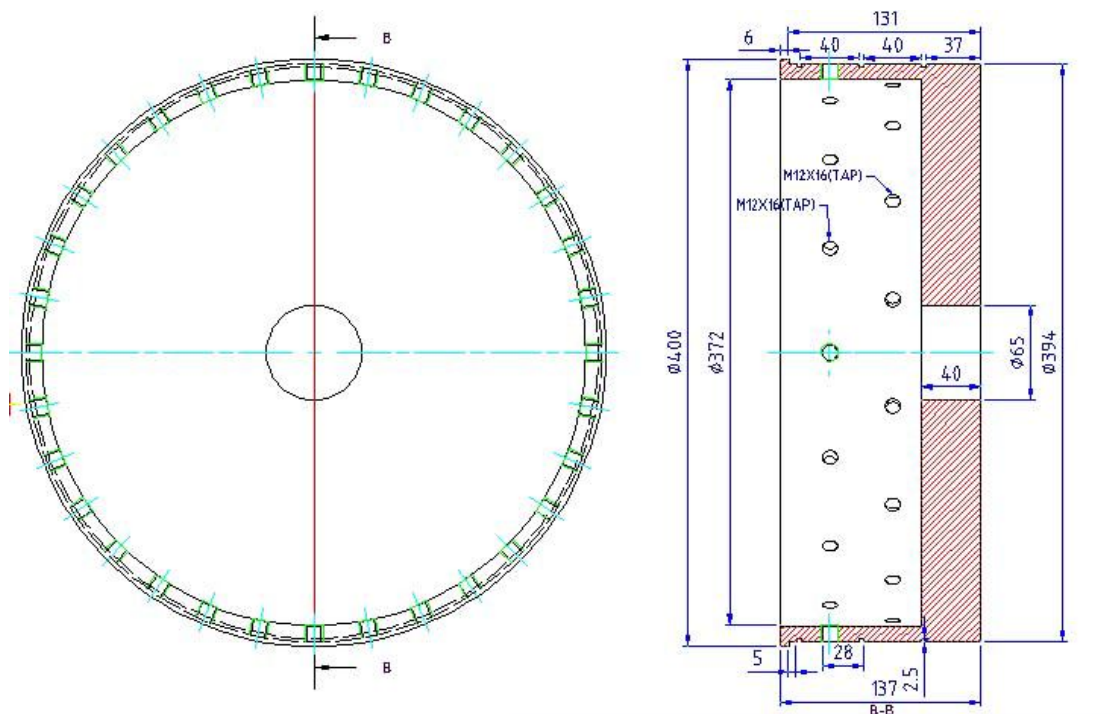
Bahan tabung motor roket dari jenis Stainless Steel seri SS 17-7 PH, yang dari hasil pengujian tabung yang lebih kecil RX-150 dan RX-250 mempunyai nilai tegangan tarik ultimit $\sigma_u = 8100 \text{ kg/cm}^2$, dan tegangan leleh nya $\sigma_y = 3600 \text{ kg/cm}^2$. Ukuran diameter luar $D_1 = 400 \text{ mm}$ dan diameter dalam $D_2 = 394 \text{ mm}$, sedangkan tegangan yang bekerja berdasarkan perhitungan perencanaan di dapat hasil $\sigma = 3333,4 \text{ kg/cm}^2$. Tegangan kerja didapat dari akibat internal *pressure* rencana yang besarnya diambil $p = 40 \text{ kg/cm}^2$, ditambah akibat thermal diasumsikan sebesar 25% nya. Untuk data yang diperoleh dari hasil pengukuran pada waktu uji statik, didapat hasil perhitungan tegangan kerjanya $\sigma = 2133,3 \text{ kg/cm}^2$.



Gambar 4-1: Struktur Tabung Motor Roket RX-2528



Gambar 4-2: Struktur Nosel Motor Roket RX-4237



Gambar 4-3: Struktur Cap Motor Roket RX-420

Untuk komponen struktur lainnya seperti nosel, data dimensi adalah $D_1 = 394$ mm dan $D_2 = 368$ mm, sedangkan cap dimensi nya $D = 394$ mm dengan tebal 40 mm (untuk uji statik). Baik nosel maupun cap bahannya adalah baja karbon S-45C dengan nilai *Ultimate Tensile Strength* $\sigma_u = 6000$ kg/cm² dan $\sigma_y = 3200$ kg/cm².

4.2 Analisis Hasil

Untuk struktur tabung motor roket RX-4237, perhitungan momen plastis penampang dan faktor bentuk dilakukan dengan mengambil bentuk penampang cincin. Dari data dimensi didapat nilai modulus plastis $Z = 472,8$ cm³, dan nilai modulus penampang $S = 368,6$ cm³. Dengan demikian nilai faktor bentuk $f = Z/S = 1,283$. Dari data bahan dan beban yang didapat, setelah dilakukan perhitungan nilai momen plastis penampangnya $M_p = 1702080$ kg.cm, dan faktor keamanan berdasarkan perencanaan $sf = 1,386$, sedangkan berdasarkan hasil uji statik $sf = 1,732$. Namun demikian dengan melihat besarnya nilai tegangan tarik ultimit, faktor keamanan menjadi lebih besar lagi $sf = 3$.

Untuk komponen struktur nosel, dengan mengambil bentuk penampang seperti tabung motor yaitu bentuk cincin, didapat nilai faktor bentuknya $f = 1,316$ dan faktor keamanannya $sf = 1,5$. Sedangkan untuk cap dengan bentuk penampang lingkaran, didapat nilai $f = 1,7$ dan faktor keamanannya $sf = 8$. Nilai faktor keamanan untuk struktur cap ini besar sekali, cenderung over desain karena ketebalan cap juga besar yaitu 4 cm, hal ini dapat terjadi agar benar-benar aman, karena persediaan tabung setelah uji statik tinggal satu batang. Selain itu dari pengalaman sebelumnya untuk kestabilan aerodinamik ketika uji terbang, diperlukan posisi titik berat berada agak ke depan.

Telah dilakukan juga perhitungan untuk mendapatkan faktor bentuk dari penampang cincin, dengan berbagai nilai perbandingan tebal t dan diameter luar

D , khususnya untuk nilai t/D kecil atau sangat kecil, yang harganya berkisar antara 10^{-3} sampai 10^{-9} didapat nilai faktor bentuk 1,274 sampai 1,273.

5 KESIMPULAN

Dari hasil analisis komponen struktur motor roket dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Faktor keamanan berdasarkan faktor bentuk penampang, struktur tabung motor roket yang nilainya sebesar 1,732 sudah cukup memadai baik untuk uji statik maupun uji terbang nanti, apalagi jika berdasarkan nilai tegangan tarik ultimitnya,
- Faktor bentuk untuk komponen struktur tabung motor dan nosel roket nilainya berkisar antara 1,283 sampai dengan 1,316, yang secara rata-rata dapat dikatakan 1,3. Sedangkan untuk cap-nya sebesar 1,7,
- Dari hasil perhitungan untuk nilai t/D yang sangat kecil dapat dikatakan nilai faktor bentuknya sebesar 1,273,
- Untuk mendapatkan nilai faktor keamanan yang diinginkan, selain melihat besarnya faktor bentuk, juga tergantung dari nilai σ_y dari bahan, serta nilai tegangan kerja σ yang berdasarkan beban dan dimensi penampang struktur.

DAFTAR RUJUKAN

- E.H. Baker, L. Kovalevsky, F.L. Rish, 1972. *Structural Analysis of Shells*, Mc Graw Hill Book Company.
- Gambar Teknik Struktur Motor Roket dari "Bidang Struktur Mekanika 2008" Pusat Teknologi Wahana Dirgantara, Pustekwagan, LAPAN.
- M.R. Horne and L.J. Morris, 1981. *Plastic Design of Low Rise Framed*, Granada Publishing Limited.
- Wahyudi L., dan A. Rahim Sjahril, 1992. *Metode Plastik Analisis dan Disain*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

