

Analisis Kekuatan Struktur Model Uji Cap Cembung RX-200 Menggunakan Metode Elemen Hingga

Oleh :

Setiadi*

R. Fitriansyah**

H. Gantina***

Email : seti1159@biz.net.id, rizky@arc.itb.ac.id, hendra.gantina@yahoo.com

Abstrak

Motor roket membutuhkan suatu struktur tabung yang mampu menahan beban tekanan dalam (internal pressure) yang besar akibat hasil pembakaran bahan bakar roket. Modifikasi tabung yang digunakan berupa Cap Cembung pada bagian kepala tabung guna mengurangi konsentrasi tegangan yang terjadi. Makalah ini membahas hasil tegangan-tegangan yang terjadi di sekitar Cap Cembung 203 mm dengan perhitungan numerik menggunakan Abaqus 6.11 dan PATRAN-NASTRAN 2011. Validasi perhitungan dilakukan dengan membandingkan tegangan-tegangan di selimut tabung pada lokasi yang sama dengan metode perhitungan analitik dan numerik menggunakan PATRAN-NASTRAN 2011 dan Abaqus 6.11. Hasil analisis kekuatan struktur ini akan digunakan sebagai bagian proses desain pada motor roket RX-200. Material yang digunakan adalah Aluminium AA6061-T6 dengan diameter luar sebesar 203 mm dan ketebalan 6.5 mm. Struktur ini memiliki tiga komponen utama berupa cap cembung, tabung dan tutup tabung bawah. Analisis kekuatan struktur menggunakan metode elemen hingga untuk mengetahui seberapa besar tegangan yang terjadi akibat tekanan dalam 60 bar agar masih dalam batas aman. Hasil analisis struktur menunjukkan bahwa tekanan dalam yang diberikan memberikan tegangan maksimum berupa tegangan melingkar sebesar 138.2 MPa (Abaqus), 136.93 MPa (PATRAN-NASTRAN) pada cap cembung yang berjarak 76.2 mm (Abaqus), 76.43 (PATRAN-NASTRAN) dari sumbu pusat tabung. Angka keamanan dari tegangan tersebut sebesar 1.99 (Abaqus), 2.01 (PATRAN-NASRAN). Angka keamanan masih dalam keadaan aman karena lebih dari angka keamanan yang ditentukan yaitu sebesar 1.5.

Kata Kunci: tabung, cap cembung, motor roket, tekanan dalam

Abstract

Rocket Motor tube requires a structure that can withstand large internal pressure due to combustion of rocket fuel. Cap dome form is used as a modification of head motor rocket tube to decreasing stress concentration of cap dome and cylinder joint. This paper discusses the stresses in vicinity of cap dome 203 mm using numerical calculation by Abaqus 6.11 and PATRAN-NASTRAN 2011. Validation is done by comparing the calculation at the same location in cylinder tube using analytical method and numerical calculation by PATRAN-NASTRAN 2011 and abaqus 6.11. The analysis results will be used as part of design rocket motor RX-200 process. Aluminum AA6061-T6 is used with an outer diameter of 203 mm and a thickness of 6.5 mm. Rocket motor tube has three main part there are cap dome, cylinder tube and cap tube. Finite element method is used to determine the stresses in vicinity of cap dome and cylinder tube joint due to 60 bar internal pressure so the stresses still in the safe limits. The results show that 138.2 MPa (Abaqus), 136.93 MPA (PATRAN-NASTRAN) circumferential stresses is the maximum stress located at 76.2 mm (Abaqus), 76.43 (PATRAN-NASTRAN) from center axis of tube in cap dome part. So the safety factor for this stress is 1.99 (Abaqus), 2.01 (PATRAN-NASTRAN) and it is still in safe condition considering that the design safety factor is 1.5.

1. PENDAHULUAN

Penelitian motor roket RX 200 sedang dilaksanakan di LAPAN. Roket dengan diameter 200 mm ini merupakan salah satu roket balistik. Seiring perkembangannya masalah yang sering dihadapi adalah kekuatan struktur di motor roket, salah satunya adalah kekuatan antara sambungan tutup berbentuk cap cembung dengan tabung motor roket. Analisis kekuatan struktur perlu dilakukan agar tidak terjadi kegagalan antara sambungan cap cembung dengan tabung mengingat terdapat beberapa desain motor roket yang menggunakan sistem sambungan ulir dan sistem sambungan yang menggunakan bolt dengan gasket. Perhitungan analitik mengenai sambungan cap cembung dan tabung telah dilakukan [4,5] namun masih terbatas pada sambungan cap cembung dan tabung yang masih

* Peneliti Bidang Struktur dan Mekanika, Pustekroket

** Outsourcing di Bidang Struktur

*** Staf Bidang Struktur dan Mekanika, Pustekroket

sederhana, oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan kekuatatan struktur yang lebih akurat menggunakan metode elemen hingga untuk kasus sambungan yang kompleks antara cap dome dan tabung.

Motor roket adalah salah satu bagian yang penting dari roket karena di bagian inilah energi kimia diubah menjadi energimekanik sehingga menghasilkan gaya dorong pada roket. Tabung motor roket ini harus mampu menahan beban tekanan dalam (*internal pressure*) yang cukup besar dari hasil pembakaran bahan bakar roket, Pada kasus ini tegangan termal dapat direduksi dengan memberikan pelapisan yang cukup baik dengan material inhibitor dan liner sebagai lapisan isolasi.

Material yang dipakai pada tabung motor roket ini adalah material aluminium AA6061-T6 dengan diameter luar 203 mm dan tebalnya 6.5 mm. Untuk mengetahui kekuatan struktur tabung diantara sambungan cap cembung dan tabung ini perlu dilakukan perhitungan numerik sebagai bagian proses desain motor roket. Perhitungan tegangan-tegangan secara analitik pada bagian selimut tabung yang dilakukan dalam makalah ini dimaksudkan sebagai validasi guna menghitung tegangan-tegangan yang terjadi di sekitar sambungan cap cembung dan tabung secara numerik. Perhitungan numerik ini dilakukan guna mempersingkat perhitungan dengan metode analitik akibat kompleksnya perhitungan diantara sambungan cap cembung dan tabung yang merupakan daerah diskontinu dengan ketebalan yang berbeda. Tujuan dari makalah ini adalah untuk mengetahui kekuatan struktur tabung motor roket RX-220 berdasarkan perhitungan numerik sehingga proses desain dapat berjalan sebagaimana mestinya hingga tahap optimasi.

2. METODOLOGI

Perhitungan analitik untuk struktur tabung tipis dengan menggunakan teori *thin walled pressure vessel* dilakukan pada bagian selimut tabung guna membandingkannya dengan hasil *FEM (Finite Element Method)* sebagai validasi untuk menghitung tegangan di sekitar sambungan cap cembung secara numerik. Jika hasilnya sesuai maka perhitungan numerik di sekitar sambungan cap cembung dan tabung dapat dilakukan. Data mekanik kekuatan material diambil dari [7]. Data ini diambil sebagai batas kekuatan tabung ketika menerima beban tekanan dalam sebesar 60 bar. Dengan demikian hasil perhitungan tegangan yang terjadi harus lebih kecil dari batas kekuatan luluhnya, dengan *safety factor* yang cukup. Tegangan akibat beban termal belum dimasukkan dalam perhitungannya sehingga analisis kekuatan strukturnya hanya karena beban tekanan dalam saja.

2.1. Perhitungan Analitik

Tegangan yang akan dihitung dan dibandingkan adalah tegangan longitudinal (σ_l), tegangan melingkar (σ_h) dan tegangan radial (σ_r). Perhitungan analitik di selimut tabung dilakukan sebagai validasi untuk menghitung tegangan-tegangan di daerah diskontinu antara selimut tabung dan cap cembung yang membutuhkan koreksi dalam perhitungan tegangan karena tegangan yang terjadi tidak hanya akibat tegangan di membran saja. Tegangan membran akan diikuti dengan tegangan lentur lokal yang didistribusikan secara simetris terhadap sumbu tabung.

Deformasi akan mengalami perbedaan pada daerah diskontinuiti yang memiliki perbedaan ketebalan yaitu antara sambungan tabung $\delta_1 = p.R^2 (1 - \mu/2) / E t_c$ dan cap cembung $\delta_2 = p.R^2 (1 - \mu) \sin\theta / 2.E.t_s$, ketika diberi tegangan dalam. Namun, karena keduanya tersambung dalam struktur yang kontinyu maka keduanya harus berdefleksi dan berotasi bersamaan. Tegangan-tegangan di masing-masing bagian atau di dekat sambungannya disebut dengan tegangan diskontinu. Salah satu cara untuk menghitung tegangan diskontinu ini adalah dengan metode gaya dimana terdapat kondisi kompatibilitas deformasi yang diekspresikan dengan gaya.

Teori membrancukup akurat dipakai pada jarak tertentu dari daerah sambungan. Jika ada tabung dengan jari-jari R dan terjadi tekanan dalam tabung tersebut maka akan menghasilkan gaya longitudinal searah tinggi tabung yang besarnya adalah $N_x = pR/2$ dan tegangan arah melingkar yang besarnya $N_h = pR$. Persamaan ini tidak dapat digunakan pada daerah sambungan karena akan menghasilkan ketidaksinambungan atau diskontinuitas. Oleh karena itu, perlu ada gaya geser yang bekerja Q_o dan momen lentur M_o yang terbagi merata disekeliling tabung sehingga terjadi kesetimbangan.

Persamaan yang dipergunakan dalam menghitung tegangan di selimut tabung adalah sebagai berikut:

1. Tegangan longitudinal

$$\sigma_l = \frac{PD_1^2}{(D_2^2 - D_1^2)}$$

2. Tegangan melingkar (*hoop*)

$$\sigma_h = \frac{PD_1}{2t}$$

3. Tegangan radial

Besar tegangan σ_r berdasarkan perhitungan analitik akan bervariasi dari selimut *pressure vessel* bagian dalam yang besarnya sama dengan tekanan yang terjadi, sampai dengan nol pada bagian luar selimut tabung (jika tekanan atmosfer diabaikan).

$$\sigma_r \approx 0(P)$$

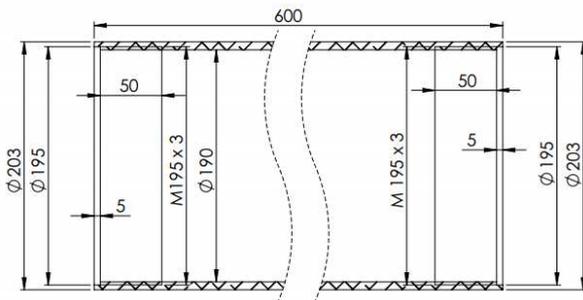
$$\sigma_h, \sigma_l \approx P \left(P \frac{D}{2t} \right)$$

Untuk dinding tipis maka $D \gg t$ sehingga

$$\sigma_h, \sigma_l \gg \sigma_r$$

tegangan radial untuk kasus *thin walled structure* dapat diabaikan.

Besar tekanan yang dipakai sebesar 60 bar dengan material aluminium AA6061-T6. Model tabung yang dipakai untuk perhitungan analitik adalah sebagai berikut:



D_2 = diameter tabung luar = 203 mm
 D_1 = diameter tabung dalam = 190 mm
 t = ketebalan tabung = 6.5 mm

Gambar 2.1 Dimensi selimut tabung

Berikut ini adalah perbandingan tegangan-tegangan yang terjadi di selimut tabung:

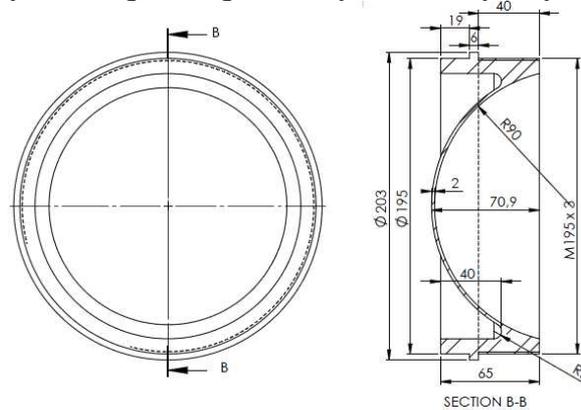
Tabel 2.1 perbandingan tegangan-tegangan di bagian tengah selimut tabung dengan metode analitik dan numerik

σ	Analitik (N/mm ²) (A)	Numerik		$\frac{(B - C)100\%}{B}$	$\frac{(B - A)100\%}{B}$
		Abaqus 6.11 (N/mm ²) (B)	Patran Nastran (N/mm ²) (C)		
σ_l	42.39	42.4	42.4	0.00%	0.02%
σ_h	87.69	87.63	87.8	0.22%	-0.07
σ_r		-2.842	-2.895	2.98%	

Dari hasil ini maka perhitungan tegangan disekitar cap cembung 203 mm dapat dilakukan secara numerik karena perhitungan tegangan secara numerik di selimut tabung sudah sesuai dengan perhitungan analitiknya.

2.2. Analisis Elemen Hingga

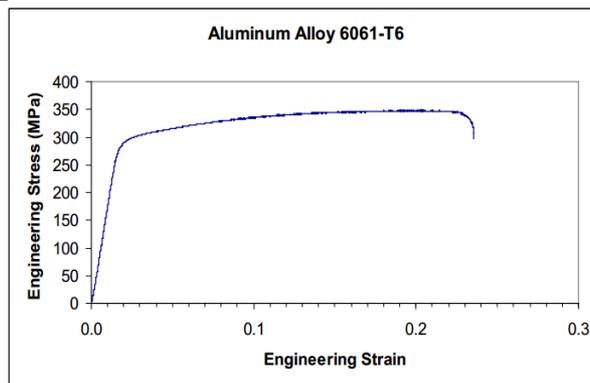
Perhitungan dengan menggunakan simulasi elemen hingga dengan menggunakan perangkat lunak Abaqus 6.11 dan PATRAN-NASTRAN 2011 dilakukan untuk mengetahui besar tegangan di sekitar cap cembung 203mm. Model simulasi tabung dengan cap cembung terdiri dari tiga komponen utama, yang terdiri dari; cap cembung, tabung dan tutup bawah. Seperti pada gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 tabung berdiameter 203 mm dengan tutup cap cembung

Simulasi numerik dilakukan dengan cara memberikan tekanan dalam sebesar 60 bar pada tabung. Kondisi batas diberikan pada tabung berupa delapan titik di ujung-ujung tabung untuk menahan deformasi arah y dan z sehingga deformasi yang dihasilkan sesuai dengan kondisi sebenarnya. Besar elemen yang dipakai sebesar 5 milimeter. Besar elemen ini cukup untuk mewakili simulasi karena hasil yang didapat sudah sesuai dengan perhitungan tegangan secara analitik pada selimut tabung.

Jenis material yang dipakai untuk simulasi adalah material Aluminium AA6061-T6 untuk semua bagian. Kurva tegangan-regangan ditunjukkan pada gambar 2.3 dan sifat materialnya ditampilkan pada tabel 2.2



Gambar 2.3 Kurva tegangan-regangan Aluminium AA6061-T6

Tabel 2.2 Properti material Aluminium AA6061-T6

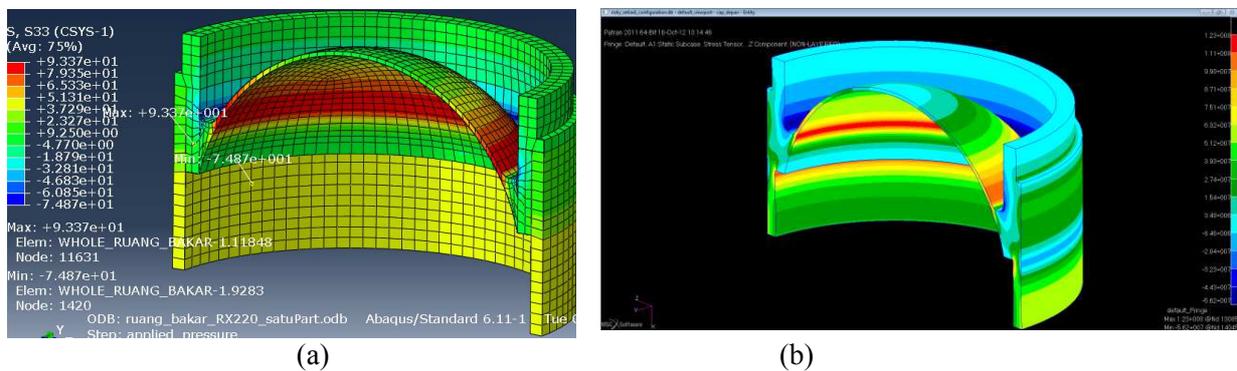
E (Young's Modulus)	68,9 GPa
σ_{ys} (Yield Strength)	276 MPa
σ_u (ultimate strength)	310 MPa
ν (Poisson's Ratio)	0,33
ρ (Massa Jenis)	$2,7 \times 10^3 \text{ kg/mm}^3$

Hasil dari postprocessing berupa tegangan-tegangan disekitar cap cembung yang merupakan daerah kritis dari tabung. Dengan mengetahui tegangan-tegangan di sekitar cap cembung ini diharapkan proses optimasi desain dapat dilakukan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil komparasi perhitungan tegangan pada selimut tabung dengan menggunakan metode analitik dan numerik dipaparkan pada bagian ini. Pada bagian ini juga akan dijelaskan hasil perhitungan numerik dengan metode elemen hingga untuk melihat tegangan di sekitar cap cembung. Berdasarkan hasil perhitungan secara analitik dan numerik tegangan-tegangan di selimut tabung sudah sesuai. Maka prosedur yang di pakai dalam menganalisis tegangan dengan menggunakan metode numerik sudah valid untuk menganalisis tegangan di sekitar cap cembung. Berikut ini disajikan tegangan-tegangan maksimum dan minimum yang terjadi di sekitar cap cembung dengan menggunakan Abaqus 6.11 dan Patran Nastran 2011 x64.

3.1. Tegangan Longitudinal



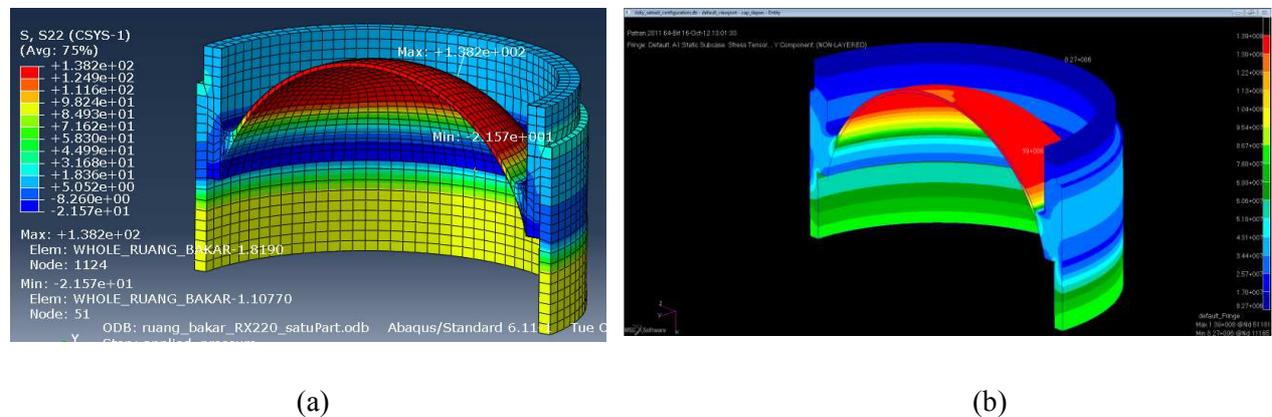
Gambar 3.1 Tegangan longitudinal di sekitar cap cembung (a) Abaqus 6.11 (b) PATRAN-NASTRAN 2011

Tegangan longitudinal terbesar di sekitar sambungan cap cembung pada gambar 3.1(a) sebesar 93.37 MPa dan terletak di cap cembung dengan jarak 76.2 mm tegak lurus dari sumbu pusat keliling tabung. Tegangan longitudinal ini mengecilke arah pusat cap cembung. Besar tegangan di sumbu pusat pangkal cap cembung sebesar -1.642 MPa yang berarti terjadi kompresi di bagian tersebut.

Tegangan longitudinal terbesar di sekitar sambungan cap cembung pada gambar 3.1(b) sebesar 93.35 MPa dan terletak di cap cembung dengan jarak 76.43 mm dari sumbu pusat keliling tabung. Tegangan longitudinal ini semakin kecil menuju arah pusat cap cembung.

Tegangan longitudinal maksimum yang terjadi tidak menyebabkan stuktur mengalami kegagalan.

3.2. Tegangan Melingkar

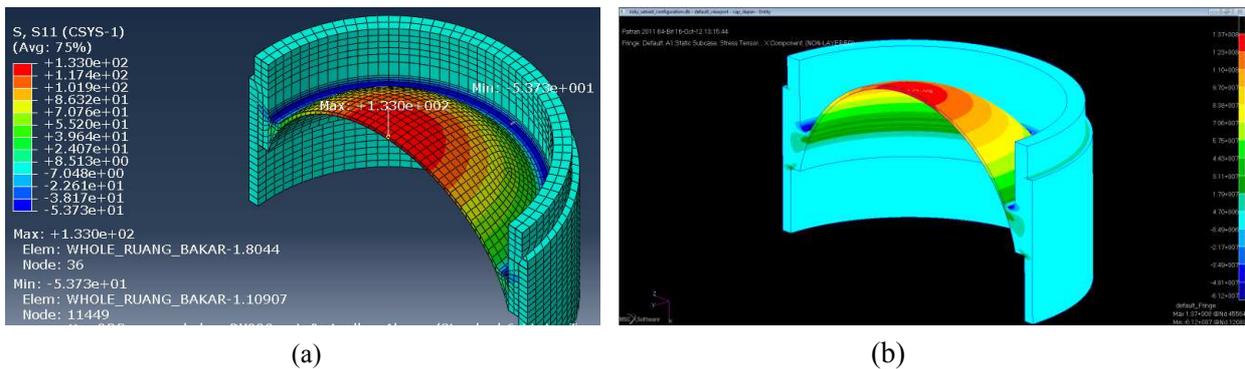


Gambar3.2 Tegangan melingkar di sekitar cap cembung (a) Abaqus 6.11, (b) PATRAN-NASTRAN 2011

Pada gambar 3.2(a) tegangan melingkar yang terjadi pada cap cembung sebesar 138.2 Mpa letaknya berada di cap cembung yang jaraknya sebesar 76.2 mm tegak lurus terhadap sumbu pusat tabung. Tegangan melingkar relatif kecil di bagian pertemuan antara cap cembung dengan tabung karena pada bagian ini tabung memiliki ketebalan yang paling besar namun tegangan ini naik ketika mendekati sumbu pusat tabung. Tegangan melingkar pada sumbu pusat tabung cap cembung sebesar 133 MPa yang artinya tidak ada perubahan signifikan tegangan pada daerah cap cembung. Hal ini menandakan tegangan dominan yang terjadi di cap cembung adalah tegangan melingkar.

Pada gambar 3.2(b) tegangan melingkar yang terjadi pada cap cembung sebesar 136.93 MPa letaknya berada di cap cembung yang jaraknya sebesar 93.35 mm tegak lurus terhadap sumbu pusat tabung. Tegangan melingkar ini merupakan tegangan yang paling besar diantara tegangan prinsipal yang ada sehingga tegangan inilah yang dimasukkan ke dalam perhitungan *safety factor*.

3.3. Tegangan Radial



Gambar 3.3 Tegangan radial di sekitar cap cembung (a) Abaqus 6.11 (b) PATRAN-NASTRAN 2011

Pada gambar 3.3(a) tegangan radial pada cap cembung memiliki nilai yang tidak bisa diabaikan seperti pada selimut tabung. Hal ini karena nilai tegangannya bervariasi dari tegangan minimum sebesar -53.73 MPa sampai tegangan maksimum sebesar 133 MPa pada sumbu pusat tabung. Tegangan radial yang terjadi akibat beban tekanan dalam sebesar 60 bar ini masih dalam keadaan aman dan tidak mengakibatkan kegagalan.

Pada gambar 3.3(b) tegangan radial terbesar pada cap cembung besarnya adalah 133.16 MPa dan letaknya berada pada cap cembung di sumbu pusat tabungnya.

Berikut ini disajikan tegangan-tegangan yang terjadi di sekitar cap cembung serta tegangan maksimum dan minimumnya pada tabel 3.

Tabel 3 tegangan-tegangan di sekitar cap cembung

σ	σ_{max} (N/mm ²)		Lokasi tegangan maksimum* (mm)		<i>Safety factor</i>	
	A	B	A	B	A	B
σ_l	93.37	93.35	61.25	61.75	2.96	2.96
σ_h	138.2	136.93	76.2	76.43	1.99	2.01
σ_r	133	133.16	0	0	2.08	2.07

Keterangan : * Jarak tegak lurus sumbu pusat tabung terhadap titik pada cap cembung dimana σ_{max} terjadi

A = Abaqus 6.11

B = Patran Nastran 2011

Berdasarkan tabel 3 maka struktur tabung di bagian di sekitar cap cembung masih dalam keadaan aman ketika diberikan beban tekanan dalam sebesar 60 bar karena angka keamanannya masih lebih besar dari 1.5. Namun dari hasil perhitungan ini perlu diberikan tegangan tambahan akibat beban termal yang disebabkan pembakaran motor roket yang nilai *safety factor*nya masih harus di atas 1.5 agar struktur masih dalam keadaan aman.

Berdasarkan tabel 3 terdapat perbedaan tegangan yang relatif kecil namun masih dalam nilai yang wajar. Hal ini disebabkan karena perbedaan *meshing* elemen di sekitar sambungan cap cembung dan tabung pada software Abaqus 6.11 dan PATRAN-NASTRAN 2011.

4. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan metode numerik

- Tegangan terbesar di antara sambungan cap cembung dengan tabung silinder ternyata terjadi pada cap cembung itu sendiri bukan pada sambungannya yang menghasilkan tegangan prinsipal berupa tegangan melingkar sebesar 138.2 MPa (Abaqus 6.11) dan 136.93 MPa (Patran Nastran 2011). Hal ini disebabkan ketebalan sambungannya lebih tebal dari tebal cap cembungnya.
- Faktor keamanan yang dihasilkan sebesar 1.99 (Abaqus 6.11) dan 2.01 (PATRAN-NASTRAN 2011) akibat beban internal pressure masih dalam kondisi aman.
- Tegangan melingkar terbesar ini terletak pada jarak 76.2 mm (Abaqus 6.11) dan 76.43 mm (PATRAN-NASTRAN 2011) tegak lurus dari sumbu pusat tabung sehingga pada daerah ini perlu diperhatikan apabila uji statik dilakukan.
- Perlu adanya simulasi lanjutan guna memasukkan efek tegangan akibat beban termal untuk memastikan apakah kekuatan struktur motor roket ini masih dalam keadaan aman.

DAFTAR PUSTAKA

1. Moss, D., *Pressure Vessel Design Manual*, Gulf Professional Publishing, 2004
2. Kaminski, C., *Stress Analysis & Pressure Vessel*, University of Cambridge, 2005
3. <https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10/index.html>
4. *“Gambar Teknik Struktur Motor Roket RX-220”*, Bidang Struktur dan Mekanika, Pustekroket, Rumpin, LAPAN, Oktober 2012.
5. Setiadi ., *Hasil Uji Tarik Bahan Stainless Steel 17-7PH sebagai Validasi Kekuatan Tabung Motor Roket RX550 LPN terhadap Beban Internal Pressure dan Thermal Pressure*. Prosiding Seminar Nasional Riset dan Teknologi di Bidang Industri ke-17, Yogyakarta 2011.
6. Sugiarmadhi, HPS., Setiadi ., *Analisis Perhitungan Besarnya Tegangan Statik pada Struktur Tabung Motor Roket RX4012 LPN dengan Metoda Analitik*, Prosiding Seminar nasional Matematika tahun 2010 Universitas Indonesia 6 Februari uni 2010 (hal. 583-590)
7. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061t6>

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS

DATA UMUM

Nama Lengkap : Ir. Setiadi MT
 Tempat & Tgl. Lahir : Jakarta, 23 Nopember 1959
 Jenis Kelamin : Laki-laki
 Instansi Pekerjaan : LAPAN
 NIP. / NIM. : 19591123 198703 1 001
 Pangkat / Gol. Ruang : Pembina Tk.I / Gol.IVb
 Jabatan Dalam Pekerjaan : Peneliti Madya
 Agama : Islam
 Status Perkawinan : 1 istri, 3 anak

DATA PENDIDIKAN

SLTA : SMAN 12 Jakarta Tahun: 1977
 STRATA 1 (S.1) : Teknik Sipil Struktur UI Tahun: 1986
 STRATA 2 (S.2) : Bidang Ilmu Teknik Sipil Struktur UI Tahun: 1994

ALAMAT

Alamat Rumah : Komplek Perumkar DKI Pondok Kelapa Jak Tim
HP. : 08164809135
Alamat Kantor / Instansi : LAPAN Rumpin Tarogong
Email: seti1159@biz.net.id