

PERANCANGAN TANGKI BAHAN BAKAR RCX1H-1 DENGAN MASSA YANG EFISIEN

DESIGN OF MASS EFFICIENT RCX1H-1 FUEL TANK

Herry Purnomo¹, Haryadi Abrizal², M. Dito Saputra³

^{1,2,3}Pusat Teknologi Roket/ LAPAN

herry.purnomo@lapan.go.id

Abstrak

Pada roket berbahan bakar cair, bahan bakar disimpan di dalam suatu tangki atau bejana tekan (*pressure vessel*). Salah satu roket yang sedang dikembangkan di Pustekroket LAPAN adalah roket RCX1H-1. Pada makalah ini dipaparkan konseptual desain dari tangki bahan bakar RCX1H-1 menggunakan metode perhitungan analitik berdasarkan ASME *Boiler And Pressure Vessel Code* yang divalidasi dengan metode FEA menggunakan *software* Patran/Nastran. Iterasi dilakukan terhadap hasil perhitungan untuk mendapatkan nilai massa tangki yang efisien.

Spesifikasi awal dari tangki bahan bakar RCX1H-1 adalah mampu menahan beban tekanan kerja sebesar 60 bar, dengan diameter luar maksimal sebesar 300 mm, volume sebesar 15000000 mm³, dan menggunakan material AISI 304. Hasil dari perhitungan analitik adalah keluaran nilai ketebalan minimal dan berat dari tangki. Hasil ini kemudian diiterasi dengan meningkatkan nilai tekanan maksimal yang diizinkan dari material dengan keluaran nilai ketebalan tangki yang lebih tipis dan berat tangki yang lebih ringan. Hasil akhir perhitungan dan validasi adalah, didapati desain kepala tangki dengan tipe *hemispherical* mampu menahan beban kerja yang diberikan, dengan nilai ketebalan minimal sebesar 3.2266 mm dan berat total tangki sebesar 9.75 kg.

Kata kunci: Tangki, Pressure Vessel, ASME, Roket cair, massa

Abstract

In liquid fuel rockets, the fuel stored in a pressure vessel tank. One of the rockets being developed at LAPAN Pustekroket is an RCX1H-1 rocket. In this paper, the conceptual design of the RCX1H-1 fuel tank is presented with an analytical calculation method using ASME Boiler and Pressure Vessel Code which is validated using the FEA method using Patran / Nastran software. Iterations are carried out on the results of calculations to obtain an efficient mass value of the tank.

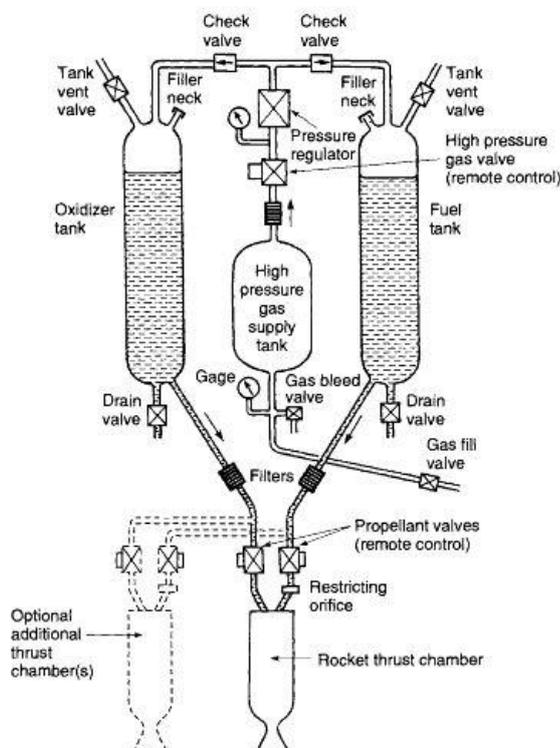
The initial requirement of the RCX1H-1 fuel tank are able to withstand the working pressure of 60 bar, with 300 mm maximum outer diameter, 15000000 mm³ inner volume, and made of AISI 304 material. The calculation results are output of minimum thickness and weight of the tank value. These results are iterated by increasing the maximum allowable stress value from the material with a thinner tank thickness and lighter tank weight. The final result of the calculation and validation is, the hemispherical tank head design was able to withstand the given workload, with a minimum thickness of 3.2266 mm and a total tank weight of 9.75 kg.

Keywords: Tank, Pressure vessel, ASME, Liquid fuel rocket, Mass.

1. PENDAHULUAN

Secara Umum, bentuk tangki bahan bakar yang digunakan pada roket berbahan bakar cair adalah sebuah *pressure vessel* (bejana bertekanan). Salah satu tipe roket yang sedang dikembangkan di Pustekroekt LAPAN adalah roket RCX1H-1. RCX1H-1 adalah roket dengan mesin berbahan bakar cair dengan sistem penyaluran bahan bakar *gas pressure feed systems*. Pada gambar 1 dapat dilihat diagram *Gas pressure feed systems*, yaitu sistem penyaluran dimana bahan bakar roket dipaksa keluar menuju mesin roket dengan menggunakan gas bertekanan [1]. Gas bertekanan ini akan mendorong bahan bakar di dalam tangki, hal ini akan mengakibatkan tangki mengalami beban tekanan ke segala

arah. Oleh sebab itu, perlu didesain tangki yang mampu menahan beban tekanan tersebut, namun dengan massa yang efisien.



Gambar 1. Diagram Gas Pressure Feed Systems pada roket berbahan bakar cair [1]

Sebuah tangki *pressure vessel* yang tidak dirancang secara memadai untuk menahan beban tekanan tinggi dapat menyebabkan bahaya keselamatan yang sangat riskan. Karena itu, desain dan sertifikasi *pressure vessel* diatur oleh dokumen desain seperti *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* di Amerika, *Pressure Equipment Directive* di Uni Eropa (PED), *Japanese Industrial Standard (JIS)* di Jepang, dll [2].

Dalam mendesain *pressure vessel* untuk tangki bahan bakar RCX1H-1, rujukan yang digunakan adalah dokumen ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), *Section VIII, Division 1*. Pada dokumen ini, diberikan rumus untuk menghitung ketebalan dan beban tekanan dari komponen-komponen tangki. Secara teori, komponen-komponen penyusun dari sebuah tangki *pressure vessel* adalah *Shell* dan *Head*. *Shell* adalah bagian tengah tangki berbentuk tabung dengan ketebalan tertentu, sedangkan *head* adalah bagian kepala/ujung tangki. Komponen *head* terdiri dari beberapa jenis, yaitu *hemispherical*, *ellipsoidal*, dan *torispherical* [3]. Ketentuan pemilihan jenis *head* pada *pressure vessel* tergantung pada beberapa hal, seperti tingkat kesulitan pada proses manufaktur, beban tekanan operasional, volume total tangki, dan massa tangki.

Metode perhitungan yang dilakukan adalah berdasarkan pendekatan teorikal dengan menggunakan rumus pada dokumen ASME, *Section VIII, Divisi 1, Subsection A general Requirement, Part UG-27 Design-Thickness of shells under internal pressure*. Hasil dari perhitungan analitik digunakan sebagai dasar dalam menetapkan dimensi ketebalan tangki, yang berdampak pada berat total tangki. Iterasi dilakukan dengan memberikan faktor pengali sebesar 1.5 dan 2 dari nilai tegangan tarik maksimal yang diizinkan oleh sebuah material berdasarkan ASME Section II, Part D (*maximum allowable stress*) dengan keluaran yang diharapkan adalah nilai ketebalan tangki yang lebih tipis dan berat tangki yang lebih ringan. Hasil dari iterasi ini kemudian divalidasi dengan menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* menggunakan *software Patran/Nastran* untuk menentukan apakah desain dari tangki aman terhadap beban tekanan kerja yang diberikan.

2. DESAIN TANGKI PRESSURE VESSEL

Pada tabel 1 dibawah, ditampilkan data desain awal perancangan tangki bahan bakar mesin roket cair RCX1H-1:

Tabel 1. Data desain awal dan kondisi kerja

No	Spesifikasi	Nilai/Keterangan	Simbol
1	Tekanan Kerja Tangki	60 Bar (6 MPa)	P
2	Radius Luar Maksimal	125-150 mm	R_o
3	Volume Tangki	15000000 mm ³	v
4	<i>Allowable Stress</i>	115 MPa	S
5	<i>Joint efficiency</i>	1	E
6	Material	AISI304 (S30403)	-

Tabel 2 dibawah merupakan data propertis material yang digunakan pada tangki bahan bakar mesin roket cair RCX1H-1:

Tabel 2. Properties material AISI304 (S30403) [4]

No	Spesifikasi	Nilai/Keterangan
1	<i>Tensile Strength</i>	505 MPa
2	<i>Yield Strength</i>	215 MPa
3	<i>Modulus of Elasticity</i>	200 GPa
4	<i>Poisson's Ratio</i>	0.29
5	<i>Density</i>	8000 kg/m ³

2.1. Menentukan Ketebalan Minimal

Untuk menentukan dimensi ketebalan tangki, maka berdasarkan part UG27 pada dokumen ASME digunakan rumus di bawah ini [5],

$$t = \frac{P R}{S E - 0.6 P} \quad (1)$$

Nilai R pada rumus (1) adalah nilai radius bagian dalam tangki, dimana nilai tersebut tidak ditentukan pada desain konfigurasi awal tangki. Untuk itu dilakukan perhitungan numerik dengan metode iterasi untuk mencari nilai R yang sesuai dengan radius luar tangki dan ketebalan tangki yang efisien.

2.2. Menentukan Jenis Kepala Tangki

Untuk menentukan desain jenis kepala tangki yang akan dipakai, maka pendekatan yang dipakai adalah dengan menghitung beban tekanan yang mampu diterima oleh masing-masing tipe, berdasarkan rumus pada part UG32 pada dokumen ASME [5], digunakan rumus di bawah ini,

Untuk jenis kepala *ellipsoidal*:

$$t = \frac{P D}{2 S E - 0.2 P} \text{ atau } P = \frac{2 S E}{D + 0.2 t} \quad (2)$$

Untuk jenis kepala *torispherical*:

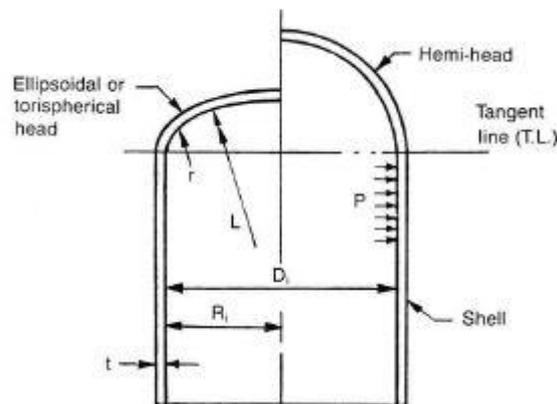
$$t = \frac{0.885 P L}{S E - 0.1 P} \text{ atau } P = \frac{S E t}{0.885 L + 0.1 t} \quad (3)$$

Untuk jenis kepala *hemispherical*:

$$t = \frac{P L}{2 S E - 0.2 P} \text{ atau } P = \frac{S E t}{L + 0.2 t} \quad (4)$$

Dimana:

- t = Ketebalan kepala tangki
- P = Desain Tekanan dalam tangki
- D = Diameter dalam kepala tangki
- E = *Joint Efficiency*
- L = Radius dalam



Gambar 2. Konfigurasi dan data dimensional untuk masing-masing komponen *Pressure vessel* [3]

Pada gambar 2 ditampilkan beberapa tipe kepala yang biasa digunakan pada tangki *pressure vessel*. Dapat dilihat pula data dimensional ketebalan (t), diameter dalam (D), tekanan dalam (P), radius kepala (r), dan radius tangki (R).

3. PERHITUNGAN

3.1. Desain 1

a. Ketebalan Minimal

Berdasarkan data dari table 1, ketebalan minimal dapat dihitung dengan menggunakan rumus (1), maka didapatkan :

$$\begin{aligned} t &= (P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P) \\ &= (6 \cdot 0.11875) / (115 \cdot 1 - 0.6 \cdot 6) \\ &= 0.0064 \text{ m} \end{aligned}$$

Ketebalan minimal tangki adalah 0.0064 meter atau 6.34 milimeter.

b. Jenis Kepala Tangki

Hasil perhitungan beban tekanan yang mampu diterima oleh masing-masing tipe kepala, berdasarkan rumus (2), (3), (4) adalah sebagai berikut :

Tabel 3. Perhitungan beban tekanan di kepala tangki

No	Jenis Kepala	Tekanan
1	<i>Ellipsoidal Head</i>	6.16 MPa
2	<i>Torispherical Head</i>	3.97 MPa
3	<i>Hemispherical Head</i>	12.25 MPa

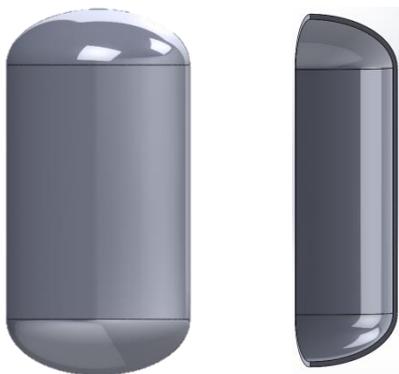
Hasil perhitungan pada tabel 3 menunjukkan, jenis kepala tangki yang mampu menahan beban tekanan sesuai dengan data desain awal tangki pada tabel 1 adalah jenis *ellipsoidal head* dan *hemispherical head*. Atas pertimbangan ini desain jenis kepala yang akan dianalisis untuk tangki bahan bakar RCX1H-1 adalah *ellipsoidal* dan *hemispherical head*.

c. Desain Tangki Keseluruhan

Setelah didapatkan nilai ketebalan minimal dan desain kepala tangki, selanjutnya adalah dilakukan analisis terhadap kedua desain tangki berdasarkan massa total tangki *pressure vessel*.

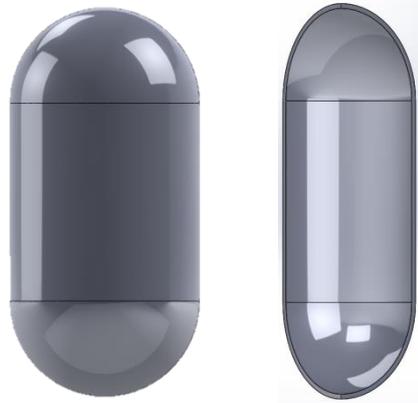
Tabel 4. Spesifikasi desain tangki dengan kepala *ellipsoidal*

Tangki dengan Kepala <i>Ellipsoidal</i>	
Spesifikasi	Nilai
Volume dalam Tangki	15000000 mm ³
Tinggi total tangki	430.71 mm
Tinggi <i>shell</i>	299.16 mm
Tinggi kepala	65.77 mm
Volume material tangki	2302109.68 mm ³
Massa tangki	18.42 kg



Tabel 5. Spesifikasi desain tangki dengan kepala *hemispherical*

Tangki dengan Kepala <i>Hemispherical</i>	
Spesifikasi	Nilai
Volume dalam Tangki	15000000 mm ³
Tinggi total tangki	509.84 mm
Tinggi <i>shell</i>	259.55 mm
Tinggi kepala	125.15 mm
Volume material tangki	2467162.7 mm ³
Massa tangki	19.74 kg



Data dari tabel 4 dan tabel 5 menunjukkan, konfigurasi desain tangki dengan kepala *ellipsoidal* memiliki massa yang lebih kecil dari tangki dengan kepala *hemispherical*.

3.2. Desain 2

Desain ke-2 dari tangki bahan bakar RCX1H-1 adalah iterasi dari desain 1, dengan output ketebalan minimal yang lebih kecil dan massa yang lebih ringan.

a. Ketebalan Minimal

Berdasarkan data dari tabel 1, iterasi dilakukan dengan memberikan faktor pengali 1.5 kepada nilai S (*allowable stress*). Ketebalan minimal dapat dihitung dengan menggunakan rumus (1), maka didapatkan :

$$\begin{aligned} t &= (P \cdot R) / (1.5S \cdot E - 0.6 \cdot P) \\ &= (6 \cdot 0.12075) / (172.5 \cdot 1 - 0.6 \cdot 6) \\ &= 0.0043 \text{ m} \end{aligned}$$

Ketebalan minimal tangki desain ke-2 adalah 0.0043 meter atau 4.29 milimeter.

b. Jenis Kepala Tangki

Hasil perhitungan beban tekanan yang mampu diterima oleh masing-masing tipe kepala, berdasarkan rumus (2), (3), (4) adalah sebagai berikut :

Tabel 6. Perhitungan beban tekanan di kepala tangki

No	Jenis Kepala	Tekanan
1	<i>Ellipsoidal Head</i>	6.1 MPa
2	<i>Torispherical Head</i>	3.38 MPa
3	<i>Hemispherical Head</i>	12.17 MPa

Hasil perhitungan pada tabel 6 menunjukkan, jenis kepala tangki yang mampu menahan beban tekanan sesuai dengan data ketebalan tangki desain ke-2 adalah jenis *ellipsoidal head* dan *hemispherical head*.

c. Desain Tangki Keseluruhan

Setelah didapatkan nilai ketebalan minimal dan desain kepala tangki, selanjutnya adalah dilakukan analisis terhadap kedua desain tangki berdasarkan massa total tangki *pressure vessel*.

Tabel 7. Spesifikasi desain ke-2 tangki dengan kepala *ellipsoidal*

Tangki dengan Kepala <i>Ellipsoidal</i>	
Spesifikasi	Nilai
Volume dalam Tangki	15000000 mm ³
Tinggi total tangki	416.7 mm
Tinggi <i>shell</i>	287.36 mm
Tinggi kepala	64.67 mm
Volume material tangki	1519578.52 mm ³
Massa tangki	12.16 kg

Tabel 8. Spesifikasi desain ke-2 tangki dengan kepala *hemispherical*

Tangki dengan Kepala <i>Hemispherical</i>	
Spesifikasi	Nilai
Volume dalam Tangki	15000000 mm ³
Tinggi total tangki	497.17 mm
Tinggi <i>shell</i>	247.17 mm
Tinggi kepala	125.04 mm
Volume material tangki	1632839.03 mm ³
Massa tangki	13.06 kg

Data dari tabel 7 dan tabel 8 menunjukkan, konfigurasi desain tangki dengan kepala *ellipsoidal* memiliki massa yang lebih kecil dari tangki dengan kepala *hemispherical*.

3.3. Desain 3

Desain ke-3 dari tangki bahan bakar RCX1H-1 adalah iterasi dari desain 1, dengan output ketebalan minimal yang lebih kecil dan massa yang lebih ringan.

a. Ketebalan Minimal

Berdasarkan data dari tabel 1, iterasi dilakukan dengan memberikan faktor pengali 2 kepada nilai S (*allowable stress*). Ketebalan minimal dapat dihitung dengan menggunakan rumus (1), maka didapatkan:

$$\begin{aligned} t &= (P \cdot R) / (2S \cdot E - 0.6 \cdot P) \\ &= (6 \cdot 0.12175) / (230 \cdot 1 - 0.6 \cdot 6) \\ &= 0.0032 \text{ m} \end{aligned}$$

Ketebalan minimal tangki desain ke-3 adalah 0.0032 meter atau 3.22 milimeter.

b. Jenis Kepala

Hasil perhitungan beban tekanan yang mampu diterima oleh masing-masing tipe kepala, berdasarkan rumus (2), (3), (4) adalah sebagai berikut :

Tabel 9. Perhitungan beban tekanan di kepala tangki

No	Jenis Kepala	Tekanan
1	<i>Ellipsoidal Head</i>	6.08 MPa
2	<i>Torispherical Head</i>	3.43 MPa
3	<i>Hemispherical Head</i>	12.13 MPa

Hasil perhitungan pada tabel 9 menunjukkan, jenis kepala tangki yang mampu menahan beban tekanan sesuai dengan data ketebalan tangki desain ke-3 adalah jenis *ellipsoidal head* dan *hemispherical head*.

c. Desain Tangki Keseluruhan

Setelah didapatkan nilai ketebalan minimal dan desain kepala tangki, selanjutnya adalah dilakukan analisis terhadap kedua desain tangki berdasarkan massa total tangki *pressure vessel*.

Tabel 10. Spesifikasi desain ke-3 tangki dengan kepala *ellipsoidal*

Tangki dengan Kepala <i>Ellipsoidal</i>	
Spesifikasi	Nilai
Volume dalam Tangki	15000000 mm ³
Tinggi total tangki	409.87 mm
Tinggi <i>shell</i>	281.67 mm
Tinggi kepala	64.1 mm
Volume material tangki	1177563.76 mm ³
Massa tangki	9.42 kg

Tabel 11. Spesifikasi desain ke-3 tangki dengan kepala *hemispherical*

Tangki dengan Kepala <i>Hemispherical</i>	
Spesifikasi	Nilai
Volume dalam Tangki	15000000 mm ³
Tinggi total tangki	491.02 mm
Tinggi <i>shell</i>	241.06 mm
Tinggi kepala	124.98 mm
Volume material tangki	1219762.94 mm ³
Massa tangki	9.76 kg

Data dari tabel 10 dan tabel 11 menunjukkan, konfigurasi desain tangki dengan kepala *ellipsoidal* memiliki massa yang lebih kecil dari tangki dengan kepala *hemispherical*.

4. ANALISIS DAN VALIDASI

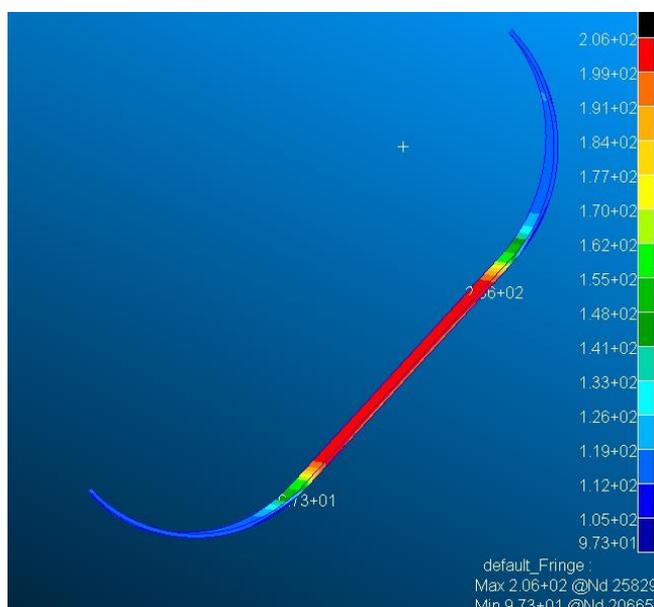
Hasil perhitungan dari ketiga buah desain tangki, didapati spesifikasi massa tangki sebagai berikut:

Tabel 12. Perbandingan massa desain tangki

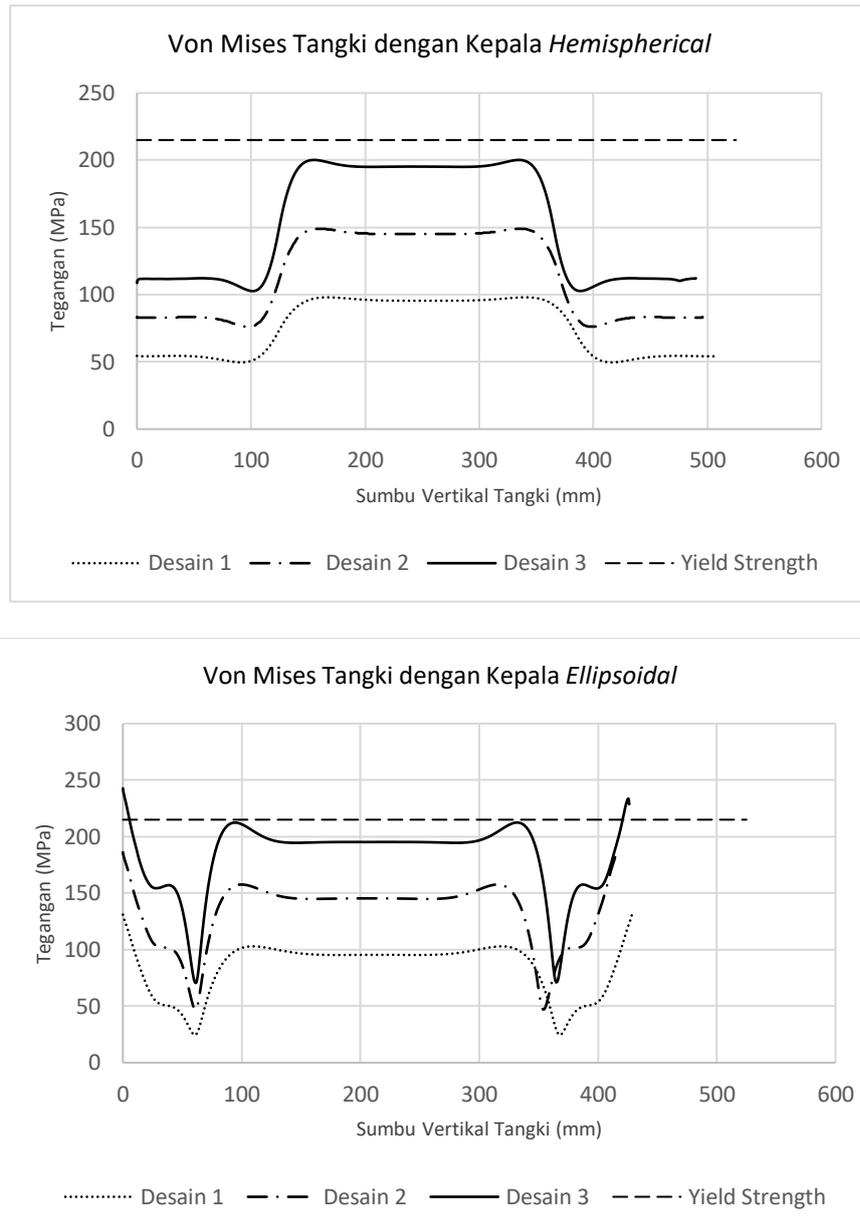
Desain 1		Desain 2		Desain 3	
Kepala <i>Ellipsoidal</i>	Kepala <i>Hemispherical</i>	Kepala <i>Ellipsoidal</i>	Kepala <i>Hemispherical</i>	Kepala <i>Ellipsoidal</i>	Kepala <i>Hemispherical</i>
18.42 kg	19.74 kg	12.16 kg	13.06 kg	9.42 kg	9.76 kg

Pada tabel 12 ditampilkan perbandingan hasil perhitungan dan iterasi dari desain tagki *pressure vessel*. Hasil iterasi pada desain ke-3 didapati massa tanki dengan jenis kepala *ellipsoidal* ada desain tanki yang paling ringan.

Berdasarkan spesifikasi diatas, dilakukan validasi dengan metode FEA (*Finite Element Analysis*) menggunakan *software* Patran/Nastran. Tujuan dari validasi adalah memastikan bahwa desain tangki aman terhadap beban tekanan kerja yang dengan memastikan tegangan yang terjadi pada desain tangki tidak melebihi tegangan luluh (*yield strength*) dari material penyusun tangki. Pada gambar 3 ditampilkan hasil simulasi analisis terhadap desain tanki dengan jenis kepala *hemispherical*, dapat dilihat area dengan tegangan Von Misses yang paling tinggi terjadi pada bagian *shell* tanki. Rincian terhadap hasil tegangan yang terjadi pada simulasi ini ditampilkan pada gambar 4.



Gambar 3. Hasil simulasi tegangan yang terjadi pada salah satu desain tangki



Gambar 4. Grafik perbandingan tegangan yang terjadi dengan sumbu vertical desain tangki

Pada gambar 4 ditampilkan grafik hasil simulasi FEA untuk masing-masing desain tangki. Pada grafik Von Mises tangki dengan kepala *ellipsoidal* menunjukkan tegangan yang terjadi pada desain 1 dan desain 2 tidak melewati batas *yield strength*, sedangkan desain 3 melewati batas *yield strength* dari material tangki, sehingga disimpulkan desain 3 tidak aman.

Pada grafik Von Mises tangki dengan kepala *hemispherical* menunjukkan tegangan yang terjadi pada desain 1, desain 2, dan desain 3 tidak melewati batas *yield strength* dari material tangki, sehingga disimpulkan desain tangki dengan kepala *hemispherical* semuanya aman. Hasil akhir disimpulkan tangki desain 3 dengan kepala *hemispherical* merupakan desain tangki yang mampu menahan beban tekanan kerja dengan massa yang paling kecil.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil iterasi perhitungan menggunakan rujukan dokumen ASME *Section VIII Divisi 1*, dan validasi menggunakan metode FEA (*Finite Element Analysis*) menggunakan software

Patran/Nastran disimpulkan, desain tangki bahan bakar untuk RCX1H-1 dengan massa yang efisien adalah menggunakan konfigurasi kepala *hemispherical*, dengan ketebalan minimal 3.22 milimeter.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Bapak Arif Nur Hakim selaku Kepala Program Roket Cair, dan Bapak Sutrisno selaku Kepala Pusat Teknologi Roket LAPAN yang telah mendukung kegiatan ini. Terima kasih juga kami ucapkan kepada seluruh tim WP.2 Program Roket Cair dan seluruh tim laboratorium Struktur Pustekroket LAPAN.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi makalah ini merupakan tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. P. Sutton and O. Biblarz, *Rocket Propulsion Element*, New Delhi: Wiley India, 2013.
- [2] P. V. V. Saidpatil and P. A. S. Thankare, "Design & Weight Optimization of Pressure Vessel Due to Thickness Using Finite Element Analysis," *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 1-8, 2014.
- [3] D. Moss and M. Basic, *Pressure Vessel Design Manual*, USA: Elsevier, 2013.
- [4] "ASM," Aerospace Specification Metals Inc. , [Online]. Available: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a>. [Accessed 18 Juni 2019].
- [5] ASME Boiler and Pressure Vessels Code 2013 Sec 8 Division 1, 2013.
- [6] S. Lawete and B. Deshmukh, "Analysis of Heads of Pressure Vessel," *International Journal of Innovative Research in Science*, vol. 4, no. 2, pp. 759-765, 2015.
- [7] B. Thakkar and S. Thakkar, "DESIGN OF PRESSURE VESSEL USING ASME CODE, SECTION VIII, DIVISION 1," *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, vol. 1, no. 2, pp. 228-234, 2012.
- [8] N. S.J., S. V. Patel and A. K. Dubey, "Design and Analysis of Vertical Pressure Vessel using ASME Code and FEA Technique," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [9] A. K. M., H. Manjunath and A. K. S.N., "Design of pressure vessel using ASME codes and a comparative Analysis using FEA," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 04, no. 11, pp. 617-625, 2017.
- [10] M. T. Altinbalik and S. Isencik, "Comparative Design and Cost Analysis of Cylindrical Storage Tanks with Different Head Types by Using COMPRESS," in *Proceedings of the 2nd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*, Budapest, 2016.