

Studi Numerik Pengaruh Radius *Fillet* dan Ketebalan Cap terhadap Tegangan Von Mises dan Faktor Keamanan Silinder Berdinding Tipis untuk Tabung Motor Roket

Lasinta Ari Nendra Wibawa^{1,2,*}

¹ Mahasiswa Pascasarjana Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta

² Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

*E-mail: lasinta.ari@lapan.go.id

Received: 12-02-2020; Accepted: 16-04-2020; Published online: 23-04-2020

Abstrak

Motor roket adalah bagian penting dari roket. Motor roket bekerja menggunakan prinsip bejana tekan karena bekerja di lingkungan dengan tekanan dan suhu tinggi. Makalah ini menyelidiki tegangan von Mises yang terjadi dalam silinder berdinding tipis untuk tabung motor roket dan faktor keamanan karena pengaruh radius *fillet* dan ketebalan cap. Dimensi panjang silinder adalah 400 mm, diameter luar 122 mm, dan ketebalan dinding 5 mm. Radius *fillet* divariasikan 2, 4, 6, dan 8 mm, sedangkan ketebalan cap divariasikan 5 dan 10 mm. Silinder berdinding tipis dikenai tekanan internal konstan yaitu 6 MPa. Analisis tegangan dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak Ansys Workbench 2019 R3. Perbandingan nilai tegangan hoop dan longitudinal antara perhitungan analitik dan simulasi digunakan untuk proses verifikasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketika radius *fillet* dan ketebalan cap meningkat, tegangan Von Mises menurun. Material memiliki faktor keamanan lebih tinggi dari 1,25 ketika ketebalan cap 10 mm dengan radius *fillet* 4, 6, dan 8 mm.

Kata kunci: ansys; bejana tekan; metode elemen hingga; silinder berdinding tipis; tabung motor roket.

Abstract

The rocket motor is an important part of rockets. The rocket motor works using the pressure vessel principle because it works in an environment with high pressure and temperature. This paper investigates the von Mises stress that occurs in thin-walled cylinders and safety factors for rocket motor cases due to the influence of the fillet radius and cap thickness. Dimensions of the cylinder length are 400 mm, outer diameter is 122 mm, and wall thickness is 5 mm. The fillet radius is varied 2, 4, 6, and 8 mm, while the cap thickness is varied 5 and 10 mm. Thin-walled cylinders are subjected to the constant internal pressure of 6 MPa. Stress analysis is performed using the finite element method with Ansys Workbench 2019 R3 software. A comparison of hoop and longitudinal stress values between analytical calculation and simulation are used for the verification process. The simulation results show that when the fillet radius and cap thickness increase, the Von Mises stress decreases. The materials have a safety factor higher than 1.25 when the thickness of the cap 10 mm with a fillet radius of 4, 6, and 8 mm.

Keywords: ansys; pressure vessel; finite element method; thin-walled cylinder; rocket motor case.

1. Pendahuluan

Motor roket adalah bagian penting dari roket yang berisi bahan bakar untuk mendorong roket [1]. Motor roket terdiri dari tabung, nosel, cap, isolator, dan pemantik (*igniter*). Motor roket beroperasi dengan mengeluarkan gas suhu tinggi melalui nosel untuk menghasilkan daya dorong. Motor roket bekerja menggunakan prinsip seperti bejana tekan karena menyimpan bahan bakar propelan. Pada umumnya, motor roket bekerja di lingkungan dengan tekanan dan suhu tinggi [2].

Desain tabung motor roket tergantung pada tekanan internal dan bahan yang digunakan [3]. Tabung motor roket yang bekerja pada tekanan internal tinggi umumnya menggunakan silinder berdinding tebal (*thick-walled cylinder*), sedangkan pada tekanan internal rendah menggunakan silinder berdinding tipis (*thin-walled cylinder*). Material yang memiliki kekuatan tinggi biasanya menggunakan silinder berdinding tipis, sedangkan material yang memiliki kekuatan rendah menggunakan silinder berdinding tebal.

Tekanan internal, ketebalan dinding, dan panjang silinder adalah beberapa faktor yang mempengaruhi tegangan von Mises maksimum pada silinder berdinding tipis [4]. Faktor-faktor lain seperti radius *fillet* dan ketebalan cap juga turut

berpengaruh pada silinder berdinding tipis. Tujuan dari penelitian ini adalah memprediksi tegangan von Mises dan faktor keamanan pada silinder berdinding tipis dengan variasi radius *fillet* dan ketebalan cap.

Pada penelitian ini, desain tabung motor roket menggunakan silinder berdinding tipis dengan panjang 400 mm, diameter luar 122 mm, dan ketebalan dinding 5 mm. Radius *fillet* divariasikan 2, 4, 6, dan 8 mm, sedangkan ketebalan cap divariasikan 5 dan 10 mm. Silinder berdinding tipis dikenai tekanan internal konstan yaitu 6 MPa.

Analisis tegangan menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak *Ansys Workbench 2019 R3*. Metode elemen hingga adalah teknik matematika numerik untuk menghitung kekuatan struktur komponen teknik dengan membagi obyek menjadi bentuk jala (*mesh*) [5][6], suatu elemen yang lebih kecil sehingga kalkulasi dapat diatur dan dijalankan. Metode elemen hingga bertujuan untuk menentukan struktur atau komponen dapat dengan aman menahan beban yang telah ditentukan [7]. Metode elemen hingga banyak digunakan untuk memprediksi tegangan pada silinder berdinding tipis dan berdinding tebal [8].

2. Material dan metodologi

Berdinding tipis dan berdinding tebal adalah klasifikasi bejana tekan berdasarkan dimensinya. Bejana tekan berdinding tipis adalah bejana tekan dengan ketebalan dinding (t_w) lebih kecil dari $1/20$ diameter internal (D_i). Bejana tekan berdinding tebal adalah bejana tekan dengan ketebalan dinding (t_w) lebih besar dari $1/20$ diameter internalnya (D_i).

Tegangan silinder berdinding tipis akan terjadi dalam tiga arah, yaitu hoop (*circumferential*), longitudinal (*axial*), dan radial. Persamaan tegangan maksimum silinder berdinding tipis pada arah (1) hoop, (2) longitudinal, dan (3) radial adalah:

$$(\sigma_h)_{max} = \left(\frac{P_i D_i}{2t} \right) \quad (1)$$

$$(\sigma_l)_{max} = \left(\frac{P_i D_i}{4t} \right) \quad (2)$$

$$(\sigma_r)_{max} = -p_i \quad (3)$$

dimana p_i adalah tekanan internal tabung silinder (MPa), D_i adalah diameter dalam silinder (mm), dan t adalah tebal dinding silinder (mm). Sedangkan $(\sigma_h)_{max}$ adalah tegangan hoop maksimum, $(\sigma_l)_{max}$ adalah tegangan longitudinal maksimum, dan $(\sigma_r)_{max}$ adalah tegangan radial maksimum.

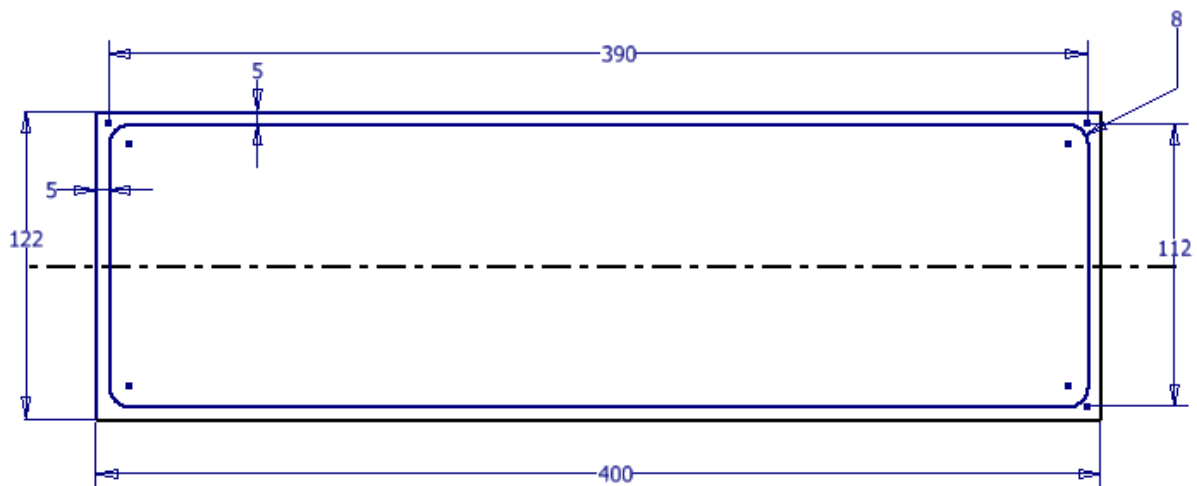
Analisis tegangan pada tabung motor roket menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak *Ansys Workbench 2019 R3*. Analisis elemen hingga merupakan salah satu metode numerik yang sangat familiar digunakan untuk menghitung setiap fenomena fisik seperti perilaku struktur atau fluida, perpindahan panas, dan elektromagnetik komponen teknik. Metode ini memungkinkan setiap desain produk dianalisis dengan rinci dan mengurangi jumlah prototipe fisik sehingga memudahkan dalam mengembangkan produk yang lebih baik dengan waktu yang lebih cepat. Salah satu perangkat lunak yang cukup populer digunakan dalam analisis elemen hingga adalah *Ansys*. *Ansys* banyak digunakan untuk mengukur konsentrasi tegangan dalam silinder berdinding tebal dan berdinding tipis [8].

Penyelesaian persoalan hukum fisika yang bergantung pada ruang dan waktu biasanya dinyatakan dalam persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equations*). Pada sebagian besar kasus dan geometri, persamaan diferensial parsial tidak dapat diselesaikan dengan metode analitis. Namun, pendekatan persamaan dapat dibangun, biasanya didasarkan

pada berbagai jenis diskritisasi. Metode diskritisasi ini mendekati persamaan diferensial parsial dengan persamaan model numerik, yang dapat diselesaikan dengan menggunakan metode numerik. Dengan kata lain, solusi untuk persamaan model numerik merupakan pendekatan dari solusi nyata untuk persamaan diferensial parsial.

Prosedur metode elemen hingga memungkinkan kontinum didiskritisasi menjadi sejumlah bagian (elemen) yang terbatas dan menekankan bahwa karakteristik domain kontinu dapat diperkirakan dengan merakit sifat-sifat yang sama dari elemen-elemen diskrit per node. Proses ini dikenal sebagai diskritisasi. Nilai-nilai antara node ditentukan dari interpolasi polinomial menggunakan metode matriks komputasi dan akurasi hasil tergantung pada diskritisasi, akurasi bentuk interpolasi yang diasumsikan, dan akurasi metode solusi komputasi. Metode elemen hingga sangat populer karena kemampuannya untuk memodelkan banyak persoalan numerik terlepas dari geometri, kondisi batas, dan pembebanan.

Gambar 1 menunjukkan model geometri silinder. Karena silinder menunjukkan simetri pada arah longitudinal (*axial*), maka silinder dapat dimodelkan dengan setengah bagian atasnya [9]. Penelitian ini menggunakan segmen 90 derajat dari model silinder padat atau seperdelapan silinder (Gambar 2). Hal ini mewakili karena tekanan yang diberikan pada fluida dalam silinder tertutup maka tekanan tersebut akan diteruskan sama besar dan merata ke semua arah [10].

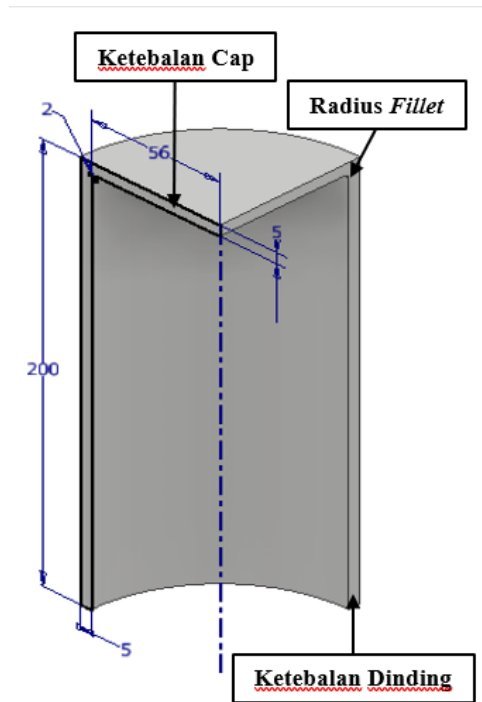


Gambar 1. Desain silinder berdinding tipis dengan ketebalan cap 5 mm dan radius *fillet* 8 mm.

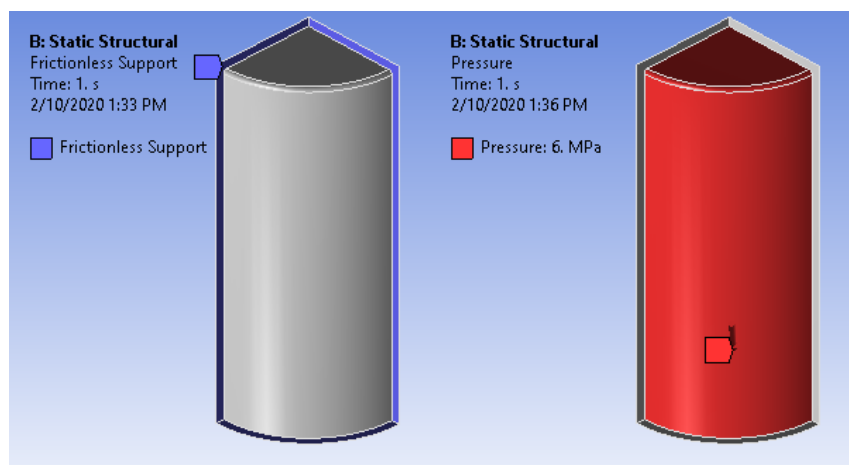
Asumsi berikut dibuat secara teoritis pada silinder berdinding tipis: (1) Material Aluminium 6061 homogen dan isotropik. (2) Bagian silinder tetap rata bahkan setelah diberi tekanan internal. (3) Semua permukaan silinder akan mengembang atau berkontraksi secara independen.

Kondisi batas menggunakan perangkat lunak *Ansys Workbench 2019 R3* ditunjukkan pada Gambar 3 dan parameter analisis elemen hingga pada Tabel 1. Ukuran elemen yang digunakan diatur seragam, yaitu 3 mm. Hal ini berakibat jumlah node dan elemen untuk masing-masing variabel ada sedikit perbedaan, tetapi tidak terlalu berbeda signifikan.

Kriteria untuk material tabung motor roket adalah ringan dan memiliki kekuatan tinggi. Aluminium 6061 dipilih untuk material tersebut [11]. Sifat mekanik Aluminium 6061 ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 2. Bagian satu per delapan dari silinder dengan radius *fillet* 2 mm dan ketebalan cap 5 mm



Gambar 3. Kondisi batas: jenis *constraint* (kiri) dan kondisi pembebanan (kanan)

Tabel 1. Parameter analisis elemen hingga

Parameter	Notasi	Nilai
Panjang silinder	L	300 mm
Diameter luar silinder	D_o	122 mm
Ketebalan dinding	t_w	5 mm
Radius <i>fillet</i>	-	2, 4, 6, dan 8 mm
Ketebalan cap	t_c	5 dan 10 mm
Tekanan internal	P_i	6 MPa
Ukuran elemen	-	3 mm

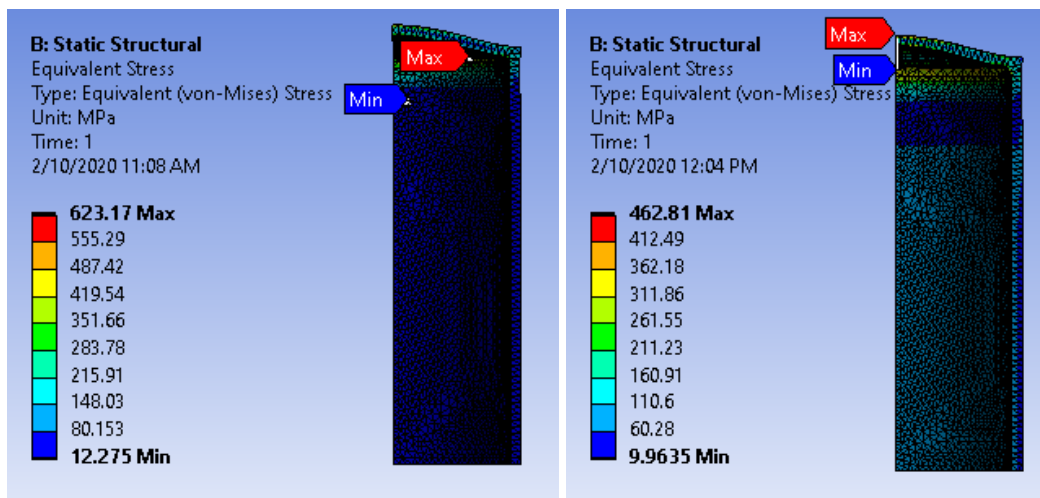
Tabel 2. Sifat mekanik material Aluminium 6061 [12]

Material	Density (gr/cm ³)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Aluminium 6061	2,7	275	310

3. Hasil dan pembahasan

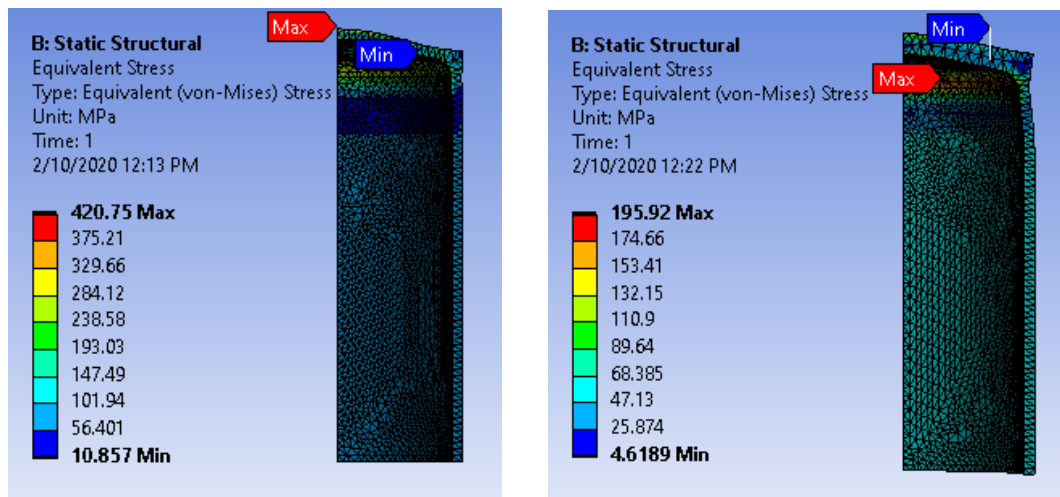
Salah satu teori kegagalan didasarkan pada energi distorsi maksimum, yang dikenal sebagai kriteria von Mises. Tegangan von Mises menjadi faktor penentu apakah material akan mengalami kegagalan atau tidak [13]. Tegangan von Mises menghitung kombinasi tegangan pada titik tertentu yang akan menyebabkan kegagalan [14]. Material akan gagal ketika tegangan von Mises melebihi kekuatan material. Teori von Mises merupakan teori plastisitas yang berlaku paling baik untuk material ulet, terutama untuk material logam seperti Aluminium 6061 [15]. Tegangan von Mises juga dikenal sebagai tegangan ekuivalen [16].

Gambar 4 menunjukkan tegangan von Mises silinder dengan ketebalan cap 5 mm untuk radius *fillet* 2 mm (kiri) dan 4 mm (kanan). Hasil simulasi menunjukkan tegangan von Mises maksimum menurun seiring peningkatan radius *fillet* (Tabel 3). Hubungan antara radius *fillet* dan tegangan von Mises maksimum berbanding terbalik. Tegangan von Mises maksimum terjadi pada area cap. Area tersebut merupakan area kritis. Penelitian ini membuktikan tegangan von Mises maksimum dapat dikurangi dengan meningkatkan radius *fillet*, meskipun tanpa menambah ketebalan dinding silinder. Metode ini lebih efisien karena material akan lebih ringan dibanding dengan meningkatkan ketebalan silinder secara keseluruhan.



Gambar 4. Tegangan von Mises dengan ketebalan cap 5 mm untuk radius *fillet* 2 mm (kiri) dan 4 mm (kanan)

Gambar 5 menunjukkan tegangan von Mises silinder dengan radius *fillet* 8 mm untuk ketebalan cap 5 mm (kiri) dan 10 mm (kanan). Hasil simulasi menunjukkan tegangan von Mises maksimum menurun seiring peningkatan ketebalan cap (Tabel 3). Hubungan antara ketebalan cap dan tegangan von Mises maksimum berbanding terbalik.



Gambar 5. Tegangan von Mises silinder dengan radius *fillet* 8 mm untuk ketebalan cap 5 mm (kiri) dan 10 mm (kanan).

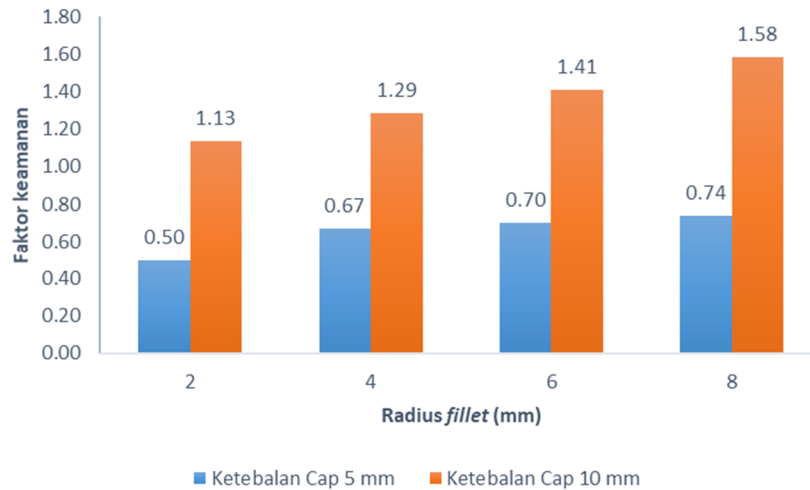
Tabel 3. Tegangan von Mises maksimum untuk variasi radius *fillet* dan ketebalan cap

Radius <i>fillet</i> (mm)	Ketebalan cap (mm)	Jumlah node	Jumlah elemen	Tegangan von Mises maksimum (MPa)
2	5	31811	17733	623,17
4	5	32053	17868	462,81
6	5	32281	18004	442,07
8	5	31608	17620	420.75
2	10	32810	18368	273,25
4	10	31996	17873	241,00
6	10	31322	17445	220,19
8	10	31404	17506	195,92

Faktor keamanan digunakan untuk mengevaluasi keamanan komponen atau struktur meskipun dimensi yang digunakan minimum [17]. Faktor keamanan dapat didasarkan pada salah satu batas tegangan tarik maksimum atau tegangan luluh dari material [18]. Kekuatan luluh adalah tegangan minimum saat material mulai kehilangan sifat elastisnya, yaitu sifat material untuk kembali ke bentuk semula saat beban atau gaya dihilangkan [19]. Kekuatan tarik maksimum adalah tegangan maksimum yang mampu dicapai suatu material sebelum patah. Faktor keamanan pada kekuatan luluh bertujuan untuk mencegah deformasi yang merugikan, sedangkan faktor keamanan pada kekuatan tarik maksimum bertujuan mencegah keruntuhan. Faktor keamanan kurang dari 1 menunjukkan kegagalan permanen dari sebuah desain [20]. Pada penelitian ini, faktor keamanan berdasarkan pada kekuatan tarik maksimum (*tensile strength*) karena tabung roket bukan komponen yang digunakan secara berulang-ulang. Hal ini karena sifat tabung roket yang merupakan komponen habis pakai.

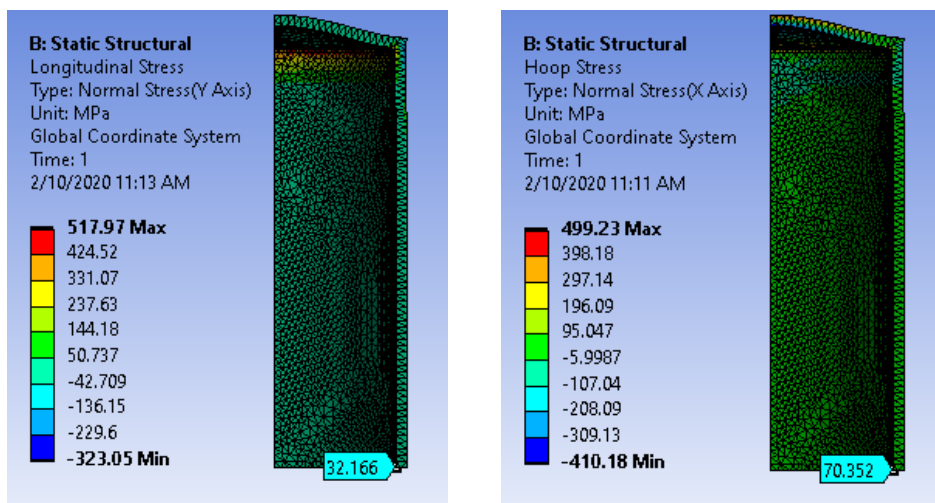
Gambar 6 menunjukkan pengaruh radius *fillet* dan ketebalan cap terhadap faktor keamanan dengan tekanan internal konstan, yaitu 6 MPa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketika radius *fillet* dan ketebalan cap meningkat, maka faktor keamanan juga meningkat. Hubungan antara radius *fillet* dan ketebalan cap terhadap faktor keamanan adalah linear.

Hasil analisis elemen hingga menunjukkan ketika ketebalan cap 10 mm dengan radius *fillet* 4, 6, dan 8 mm material memiliki faktor keamanan lebih tinggi dari 1,25. Hal ini berarti material tersebut mampu menahan beban statik. Hal ini berarti material tersebut mampu menahan beban statik karena nilai faktor keamanan untuk suatu material mampu menahan beban statik adalah 1,25-2,00 [21].



Gambar 6. Pengaruh radius *fillet* dan ketebalan cap terhadap faktor keamanan dengan tekanan internal 6 MPa

Proses verifikasi dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan hoop dan longitudinal antara perhitungan analitik dan analisis elemen hingga. Semakin kecil persentase kesalahan menunjukkan hasil analisis elemen hingga semakin valid. Gambar 7 menunjukkan nilai tegangan hoop (kiri) dan longitudinal (kanan) maksimum pada radius *fillet* 2 mm dengan ketebalan cap 5 mm, yaitu 70,35 MPa dan 32,17 MPa. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan radius *fillet* dan ketebalan cap tidak terlalu berpengaruh terhadap tegangan hoop dan longitudinal maksimum. Nilai tegangan hoop dan longitudinal yang dihasilkan relatif sama (Tabel 4). Kedua nilai tegangan menggunakan analisis elemen hingga dan perhitungan analitik tidak berbeda signifikan. Persentase kesalahan antara perhitungan analitik dan analisis elemen hingga kurang dari 5 persen.



Gambar 7. Nilai tegangan hoop (kiri) dan longitudinal (kanan) maksimum pada radius *fillet* 2 mm dengan ketebalan cap 5 mm

Tabel 4. Perbandingan tegangan hoop (*circumferential*) dan longitudinal (*axial*) maksimum antara perhitungan analitik dan simulasi elemen hingga

Radius <i>fillet</i> (mm)	Ketebalan cap (mm)	Perhitungan analitik		FEA		Persentase kesalahan	
		Tegangan Hoop (MPa)	Tegangan Longitudinal (MPa)	Tegangan Hoop (MPa)	Tegangan Longitudinal (MPa)	Tegangan Hoop (%)	Tegangan Longitudinal (%)
2	5	67,2	33,6	70,35	32,17	4,69	4,26
4	5	67,2	33,6	70,31	32,17	4,63	4,26
6	5	67,2	33,6	70,34	32,16	4,67	4,29
8	5	67,2	33,6	70,33	32,16	4,66	4,29
2	10	67,2	33,6	70,34	32,16	4,67	4,29
4	10	67,2	33,6	70,32	32,15	4,64	4,32
6	10	67,2	33,6	70,35	32,16	4,69	4,29
8	10	67,2	33,6	70,31	32,17	4,63	4,26

Tegangan hoop selalu tarik (*tensile*), dan tegangan hoop maksimum selalu terjadi pada jari-jari dalam atau jari-jari luar tergantung pada arah gradien tekanan [22]. Jika silinder berdinding tipis hanya mengalami tekanan eksternal, maka tegangan hoop maksimum terjadi pada jari-jari luar ($r = r_o$). Pada penelitian ini, silinder berdinding tipis hanya mengalami tekanan internal, maka tegangan hoop maksimum terjadi pada jari-jari dalam ($r = r_i$).

Pada silinder tertutup, tekanan internal bekerja untuk mengembangkan tegangan di sepanjang sumbu silinder. Tegangan ini disebut tegangan longitudinal dan biasanya lebih kecil dari tegangan hoop. Pada penelitian ini, tegangan hoop lebih tinggi dari tegangan longitudinal.

4. Kesimpulan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketika radius *fillet* dan ketebalan cap meningkat, tegangan Von Mises menurun. Material memiliki faktor keamanan lebih tinggi dari 1,25 ketika ketebalan cap 10 mm dengan radius *fillet* 4, 6, dan 8 mm. Hal ini berarti material tersebut mampu menahan beban statik.

Proses verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil analisis elemen hingga dengan perhitungan analitik untuk tegangan hoop dan longitudinal maksimum dengan kondisi batas tetap. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan radius *fillet* dan ketebalan cap tidak begitu berpengaruh terhadap tegangan hoop dan longitudinal maksimum. Kedua tegangan yang dihasilkan tersebut relatif sama. Hasil penelitian menunjukkan persentase kesalahan kurang dari 5 persen.

Daftar Pustaka

- [1] L. A. N. Wibawa. Merancang Komponen Roket 3D dengan Autodesk Inventor Professional 2017. Buku Katta, 2018.
- [2] W. Emrich. *Rocket Engine Fundamentals*. in Principles of Nuclear Rocket Propulsion. 2016, pp. 11–20.
- [3] L. A. N. Wibawa., K. Diharjo., W. W. Raharjo., B. H. Jihad. *Stress Analysis of Thick-Walled Cylinder for Rocket Motor Case under Internal Pressure*. in Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer Nature. 2020.
- [4] L. A. N. Wibawa., K. Diharjo., W. W. Raharjo., B. H. Jihad. *Effect of Cap Thickness and Internal Pressure on*

Von Mises Stress of Thick-Walled Cylinder for Rocket Motor Case. J. Teknol. Dirgant. 2020, 18(1).

- [5] L. A. N. Wibawa. Desain dan Analisis Kekuatan Dudukan (*Bracket*) AC Outdoor Menggunakan Metode Elemen Hingga. J. Crankshaft. 2019, 2(1): pp. 19–24.
- [6] L. A. N. Wibawa. Desain dan Analisis Kekuatan Rangka Meja Kerja (*Workbench*) Balai LAPAN Garut Menggunakan Metode Elemen Hingga. JTM-ITI (Jurnal Tek. Mesin ITI). 2019, 3(1): pp. 13–17.
- [7] L. A. N. Wibawa. Desain dan Analisis Kekuatan Rangka Lemari Perkakas di Balai LAPAN Garut Menggunakan Metode Elemen Hingga. Mach. J. Tek. Mesin. 2019, 5(2): pp. 45–50.
- [8] A. F. Mohamed. *Finite Element Analysis for Stresses in Thin-Walled Pressurized Steel Cylinders*. Int. J. Sci. Eng. Res. 2018, 9(3): pp. 201–204.
- [9] F. Dadkhah., J. Zecher. *ANSYS Workbench Software Tutorial with Multimedia CD Release 11*. Schroff Development Corporation, 2008.
- [10] K. L. Lawrence. *Ansyp Workbench Tutorial Release 14*. SDC Publications, 2012.
- [11] L. A. N. Wibawa. Prediksi Umur Fatik Struktur Crane Kapasitas 10 Ton Menggunakan Metode Elemen Hingga. Media Mesin Maj. Tek. Mesin. 2020, 21(1): pp. 18–24.
- [12] L. A. N. Wibawa. Desain dan Analisis Kekuatan Rangka *Tricycle Landing Gear* UAV Menggunakan Metode Elemen Hingga. Mechanical. 2018, 9(2): pp. 33–37.
- [13] L. A. N. Wibawa. Desain dan Analisis Tegangan Crane Hook Model Circular Section Kapasitas 5 Ton Menggunakan Autodesk Inventor 2017. Simetris J. Tek. Mesin, Elektro dan Ilmu Komput. 2019, 10(1): pp. 27–32.
- [14] L. A. N. Wibawa. Desain dan Analisis Tegangan Alat Pengangkat Raket Kapasitas 10 Ton Menggunakan Metode Elemen Hingga. J. Energi dan Teknol. Manufaktur. 2019, 02(01): pp. 23–26.
- [15] L. A. N. Wibawa. Pemodelan Umur Fatik Alat Pengangkat Raket Kapasitas 20 Ton Menggunakan Ansys Workbench. Turbul. J. Tek. Mesin. 2019, 2(2): pp. 44–49.
- [16] L. A. N. Wibawa. Pengaruh Kecepatan Landing Vertikal Terhadap Ketahanan Beban Impak Rangka *Landing Gear* Menggunakan Metode Elemen Hingga. Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol. 2019, 11(1): pp. 35–42.
- [17] L. A. N. Wibawa. Simulasi Kekuatan Komponen Sarana Pengujian Raket Menggunakan Autodesk Inventor Professional 2017. Buku Katta, 2018.
- [18] L. A. N. Wibawa. Pengaruh Susunan dan Jumlah Lubang Baut Terhadap Kekuatan Rangka *Main Landing Gear* Untuk Pesawat UAV. Flywheel J. Tek. Mesin Untirta. 2019, 5(1): pp. 46–50.
- [19] L. A. N. Wibawa. Pengaruh Diameter Baut Terhadap Kekuatan Rangka *Main Landing Gear* Pesawat UAV Menggunakan Metode Elemen Hingga. J. Polimesin. 2019, 17(1): pp. 26–32.
- [20] L. A. N. Wibawa., K. Diharjo. Desain, Pemilihan Material, dan Faktor Keamanan Stasiun Pengisian Gawai Menggunakan Metode Elemen Hingga. J. Teknol. 2019, 11(2): pp. 97–102.
- [21] K. Z. V. Dobrovolsky. *Machine elements : a textbook*. Moscow: Peace Publisher, 1978.
- [22] L. Skinner. *Snubbing Theory and Calculations*. in Hydraulic Rig Technology and Operations, Gulf Professional Publishing, 2018. pp. 189–275.