



OPTIMASI VARIASI RIB TERHADAP TEGANGAN DAN DEFORMASI *SADDLE SUPPORT* PADA BEJANA TEKAN HORIZONTAL

Ilham Harlianto^{a*}, Rachmad Syarifudin Hidayatullah^b, Wahyu Dwi Kurniawan^a, Hanto Subandono^c

^aProgram Studi Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Surabaya, Jl. Ketintang, Kec. Gayungan, Kota Surabaya, Jawa Timur 60231, Indonesia

^bProgram Studi Pendidikan Vokasional Teknologi Otomotif, Universitas Negeri Surabaya, Jl. Ketintang, Kec. Gayungan, Kota Surabaya, Jawa Timur 60231, Indonesia

^cPT. Boma Bisma Indra (Persero), Jl. Imam Bonjol No.18, Bugul Lor, Kec. Panggungrejo, Kota Pasuruan, Jawa Timur 67129, Indonesia

*Corresponding authors at: ilhamharlianto.23039@mhs.unesa.ac.id (ilham) Tel.: +62 812-3193-6140

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 22 Januari 2026

Direvisi pada 25 Juni 2026

Disetujui pada 22 Juli 2026

Tersedia daring pada 30 Juli 2026

Kata kunci:

Bejana gas, rib, pressure Vessel horizontal, Finite Element Analysis, stress

Keywords:

Gas Vessel, rib, pressure Vessel horizontal, Finite Element Analysis.

ABSTRAK

Saddle support merupakan komponen penting pada bejana tekan horizontal yang berfungsi menyalurkan beban dari badan bejana menuju fondasi. Konfigurasi *saddle support* yang kurang tepat dapat menyebabkan konsentrasi tegangan dan deformasi berlebih sehingga menurunkan keandalan struktur. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi jumlah rib dan penambahan *stiffener* terhadap respons struktural *saddle support* pada bejana tekan horizontal. Model tiga dimensi dikembangkan menggunakan *SolidWorks* dan dianalisis menggunakan *ANSYS* dengan metode elemen hingga. Pemodelan menggunakan elemen solid tetrahedral dan kontak *bonded* antara badan bejana dan *saddle support*. Variasi desain meliputi konfigurasi jumlah rib dan penambahan *stiffener*. Beban yang diterapkan mencakup berat operasi, *operating pressure* sebesar 0,61 kg/cm², *design pressure* sebesar 7,14 kg/cm², *Maximum Allowable Working Pressure* 17,61 kg/cm², temperatur operasi maksimum 60,3°C, beban angin berdasarkan ASCE/SEI 7-16, serta tekanan *hydrotest* sebesar 22,89 kg/cm² atau 1,3 kali MAWP. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi lima rib dengan penambahan *stiffener* memberikan kinerja struktural terbaik. Konfigurasi tersebut menghasilkan tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 105,23 MPa, deformasi maksimum 1,87 mm, dan faktor keamanan 2,38. Dibandingkan konfigurasi empat rib, desain ini mampu menurunkan tegangan maksimum sekitar 35% dan deformasi sebesar 77,7%. Seluruh variasi desain masih berada di bawah batas tegangan izin sebesar 166,67 MPa berdasarkan *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1*. Penambahan jumlah rib dan *stiffener* terbukti meningkatkan kekakuan serta menurunkan konsentrasi tegangan dan deformasi pada *saddle support*. Konfigurasi lima rib dengan *stiffener* direkomendasikan sebagai desain yang lebih andal untuk mendukung bejana tekan horizontal pada industri proses dan sistem penyimpanan gas.

ABSTRACT

Saddle supports are critical structural components of horizontal pressure vessels because they transfer loads from the vessel shell to the foundation. An unsuitable saddle configuration may generate stress concentrations and excessive deformation, thereby reducing the structural reliability of the vessel. This study evaluates the effects of varying the number of ribs and adding stiffeners on the structural performance of a saddle support for a 100-ton horizontal pressure vessel fabricated from SA-516 Gr. 70N steel. A parametric finite element analysis was conducted using a three-dimensional model developed in *SolidWorks* and simulated in *ANSYS*. The model employed tetrahedral solid elements and bonded contact between the vessel shell and the saddle support. The applied loads include operating weight, operating pressure of 0.61 kg/cm², design pressure of 7.14 kg/cm², Maximum Allowable Working Pressure of 17.61 kg/cm², maximum operating temperature of 60.3°C, wind load based on ASCE/SEI 7-16, and hydrotest pressure of 22.89 kg/cm² or 1.3 times MAWP. The results showed that the five-rib configuration with an additional stiffener provided the best structural performance, producing a maximum von Mises stress of 105.23 MPa, a maximum deformation of 1.87 mm, and a safety factor of 2.38. Compared with the four-rib

configuration, the proposed design reduced the maximum stress by approximately 35 % and the maximum deformation by 77.7 %. All investigated configurations remained below the allowable stress limit of 166.67 MPa specified in the ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1. These findings demonstrate that increasing the number of ribs and incorporating an additional stiffener can improve saddle-support stiffness and reduce stress concentration and deformation. Therefore, the five-rib configuration with a stiffener is recommended for improving the structural reliability of horizontal pressure vessels used in process industries and clean-energy gas-storage applications.

1. PENGANTAR

Meskipun berbagai penelitian telah memberikan kontribusi terhadap pengembangan desain *saddle support*, masih terdapat sejumlah aspek yang belum dievaluasi secara mendalam. Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada pengaruh parameter geometri utama, seperti lebar *saddle*, sudut kontak, posisi pemasangan penyangga, dan jarak antarpenganga terhadap respons struktural bejana tekan horizontal (Agale & Awachat, 2017). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa perubahan geometri penyangga dapat memengaruhi distribusi tegangan, deformasi, dan kekakuan struktur sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan konfigurasi penyangga yang memenuhi persyaratan desain. Namun, kajian yang tersedia masih didominasi oleh perubahan dimensi global *saddle support*, sedangkan pengaruh modifikasi elemen pengaku pada struktur penyangga belum memperoleh perhatian yang memadai.

Salah satu elemen pengaku yang berperan dalam meningkatkan kekakuan *saddle support* adalah *rib*. Penambahan *rib* dapat meningkatkan momen inersia penampang sehingga kemampuan struktur dalam menahan beban lentur dan tekan menjadi lebih baik. Sementara itu, *stiffener* berfungsi memperkuat daerah yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi dengan meningkatkan kekakuan lokal dan membantu mendistribusikan beban dari badan bejana menuju *saddle support*. Mykhailiuk dkk. (2024) menunjukkan bahwa perubahan karakteristik kekakuan *saddle support* berpengaruh terhadap distribusi tegangan lokal pada badan bejana. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa modifikasi elemen pengaku berpotensi memengaruhi respons struktural bejana tekan. Akan tetapi, penelitian tersebut belum mengevaluasi variasi jumlah *rib* maupun penambahan *stiffener* sebagai parameter desain yang dibandingkan secara sistematis (Hafiz dkk., 2021).

Gophane dkk. (2024) melaporkan bahwa modifikasi geometri penyangga dapat menurunkan deformasi maksimum struktur. Sementara itu, Jadhav dkk., (2025) menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi penyangga dapat memengaruhi distribusi tegangan pada daerah kritis. Meskipun demikian, kedua penelitian tersebut masih berfokus pada perubahan dimensi dan konfigurasi *saddle support* secara umum, tanpa membandingkan variasi jumlah *rib* ataupun mengevaluasi pengaruh penambahan *stiffener* pada konfigurasi yang sama. Oleh karena itu, hubungan antara jumlah *rib*, penambahan *stiffener*, tegangan von Mises maksimum, deformasi total, dan faktor keamanan pada bejana tekan horizontal masih belum dijelaskan secara komprehensif dalam literatur.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan penelitian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* terhadap respons struktural *saddle support* dengan kondisi pembebanan yang merepresentasikan kondisi operasi aktual bejana tekan. Pembebanan tersebut mencakup berat operasi, tekanan internal, temperatur operasi, beban angin, dan tekanan uji hidrostatik. Kajian ini penting karena setiap konfigurasi elemen pengaku menghasilkan distribusi kekakuan yang berbeda sehingga dapat memengaruhi besarnya tegangan, deformasi, dan faktor keamanan struktur (Solangi dkk., 2024).

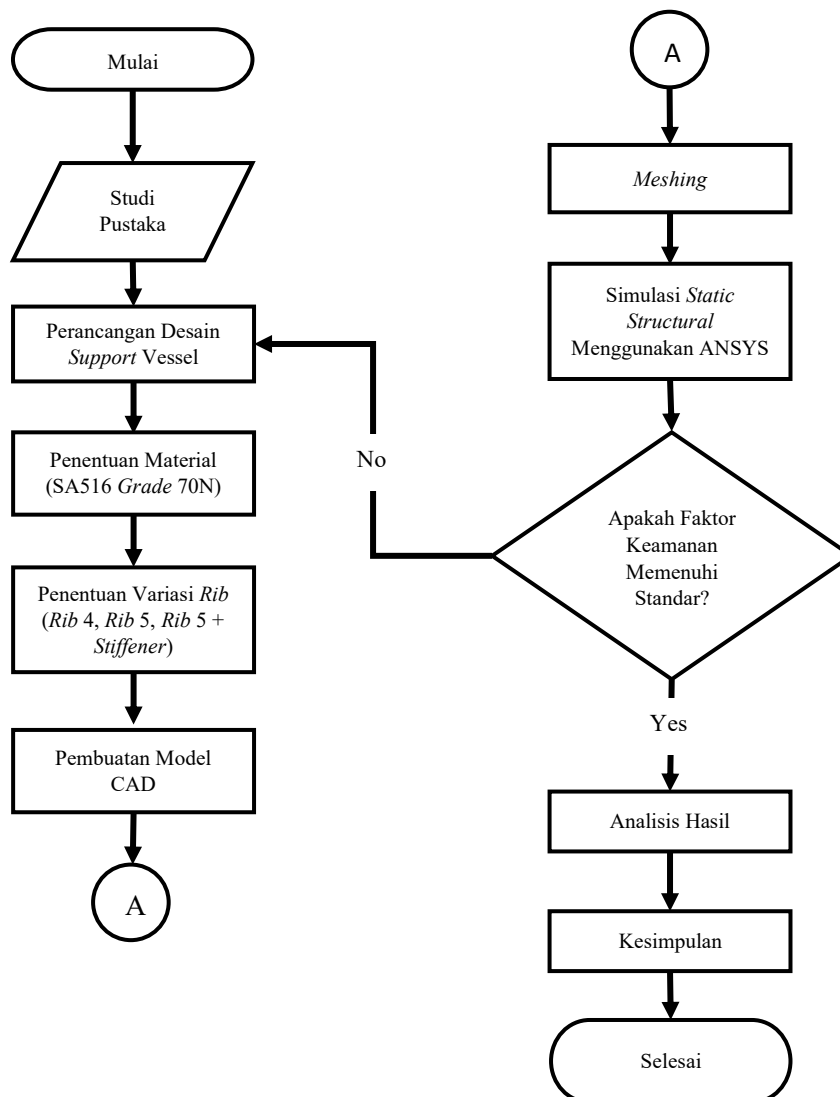
Penelitian ini dilakukan melalui studi parametrik menggunakan metode elemen hingga untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* terhadap respons struktural *saddle support* pada bejana tekan horizontal berbahan SA-516 Gr. 70N dengan kapasitas operasi 100 ton. Tiga konfigurasi dianalisis, yaitu *saddle support* dengan empat *rib*, lima *rib*, serta lima *rib* yang dilengkapi dengan *stiffener*. Parameter yang dievaluasi meliputi tegangan von Mises maksimum, deformasi total, dan faktor keamanan struktur. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan batas tegangan yang diizinkan berdasarkan ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1 (ASME, 2023a). Kebaruan penelitian ini terletak pada studi parametrik yang membandingkan secara langsung pengaruh variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* terhadap kinerja struktural *saddle support* pada bejana tekan horizontal dengan kombinasi pembebanan yang merepresentasikan kondisi operasi. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang lebih banyak membahas perubahan dimensi global penyangga, penelitian ini secara khusus mengevaluasi modifikasi elemen pengaku pada konfigurasi *saddle support* yang sama.

Selain relevan untuk aplikasi pada industri proses, hasil penelitian ini berpotensi mendukung pengembangan bejana tekan untuk penyimpanan gas bertekanan pada sistem energi bersih, seperti hidrogen, biogas, *compressed biomethane gas* (CBG), dan *compressed natural gas* (CNG). Aplikasi tersebut memerlukan struktur penyangga dengan kekakuan, keandalan, dan tingkat keselamatan yang tinggi (IEA, 2023). Peningkatan kekakuan melalui variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* diharapkan dapat meningkatkan keandalan struktur serta keselamatan sistem penyimpanan gas bertekanan yang menjadi bagian dari infrastruktur energi berkelanjutan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pemilihan konfigurasi *saddle support* yang mampu menghasilkan tegangan dan deformasi yang lebih rendah serta faktor keamanan yang memenuhi persyaratan ASME.

2. METODE

2.1 Diagram Alir

Tahapan penelitian disusun secara sistematis agar seluruh proses analisis dapat dilakukan secara terstruktur, mulai dari identifikasi permasalahan hingga interpretasi hasil simulasi. Alur penelitian yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1. Diagram alir tersebut mencakup tahapan identifikasi masalah, pengumpulan data desain bejana tekan, pemodelan geometri tiga dimensi, penentuan sifat material, proses *meshing*, penerapan kondisi batas dan pembebanan, simulasi menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*), serta analisis dan evaluasi hasil simulasi. Penyusunan tahapan penelitian secara sistematis bertujuan menjaga konsistensi proses pemodelan dan simulasi sehingga hasil analisis dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah (Hazizi, 2023).



Gambar 1: Gambar diagram alir

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik dengan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) untuk menganalisis respons struktural *saddle support* pada bejana tekan horizontal. Pendekatan numerik dipilih karena mampu mengevaluasi distribusi tegangan, deformasi, dan distribusi beban pada struktur dengan geometri yang kompleks serta kombinasi pembebanan yang sulit dianalisis menggunakan metode analitis konvensional. Selain itu, teknologi *Computer-Aided Engineering* (CAE) telah banyak dimanfaatkan dalam analisis struktur bejana tekan karena mampu meningkatkan efisiensi proses perancangan serta mengevaluasi kinerja struktur sebelum tahap manufaktur (Anggraini dkk., 2023).

Objek penelitian berupa bejana tekan horizontal berbahan ASTM SA-516 Grade.70N berkapasitas 100 ton beserta sistem penyangganya *saddle support*. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah konfigurasi *saddle support*, yaitu desain dengan 4 *rib*, 5 *rib*, dan 5 *rib* yang dilengkapi *stiffener*. Variabel terikat meliputi tegangan *Von Mises* maksimum, deformasi total, dan faktor keamanan yang diperoleh dari hasil simulasi numerik. Ketiga konfigurasi tersebut dibandingkan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* terhadap respons struktural *saddle support*, sebagaimana banyak diterapkan pada penelitian optimasi struktur penyangga bejana tekan (Huang dkk., 2024).

Analisis numerik dilakukan menggunakan *SolidWorks* untuk membangun model geometri 3D *modelling*, sedangkan simulasi struktur dilakukan menggunakan *ANSYS Mechanical*. Berdasarkan tahapan yang ditunjukkan pada Gambar 1, proses analisis dimulai dari pembuatan model geometri, penentuan sifat material, proses *meshing*, pendefinisian *bonded contact* antara *shell vessel* dan *saddle support*, penerapan *boundary conditions*, serta pemberian kondisi pembebanan yang mengacu pada data desain bejana tekan. Pembebanan terdiri atas beban operasi sebesar 100 ton, *operating pressure* sebesar 0,61 kg/cm², *design pressure* sebesar 7,14 kg/cm², *Maximum Allowable Working Pressure* (MAWP) sebesar 17,61 kg/cm², temperatur operasi maksimum 60,3°C, beban angin berdasarkan ASCE/SEI 7-16, serta

tekanan *hydrotest* sebesar 22,89 kg/cm² atau 1,3 kali MAWP. Selanjutnya dilakukan analisis statik struktural (*static structural analysis*) untuk memperoleh respons mekanik pada setiap konfigurasi *saddle support*. Tahapan pemodelan dan simulasi tersebut merupakan prosedur yang umum digunakan dalam analisis elemen hingga untuk mengevaluasi integritas struktur bejana tekan serta mengidentifikasi daerah yang mengalami konsentrasi tegangan secara lebih akurat (Anggara, 2022).

Parameter keluaran yang dianalisis meliputi *Equivalent Von Mises Stress*, Total deformasi, dan faktor keamanan. Tegangan *Von Mises* digunakan untuk mengidentifikasi daerah yang mengalami konsentrasi tegangan maksimum, sedangkan total deformasi digunakan untuk mengevaluasi kekakuan masing-masing konfigurasi *saddle support*. Faktor keamanan digunakan untuk menilai kemampuan struktur dalam menahan kondisi pembebanan yang diberikan. Seluruh hasil simulasi kemudian diverifikasi terhadap batas tegangan yang diizinkan berdasarkan ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1*, kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada bejana tekan horizontal (Zhang dkk., 2022).

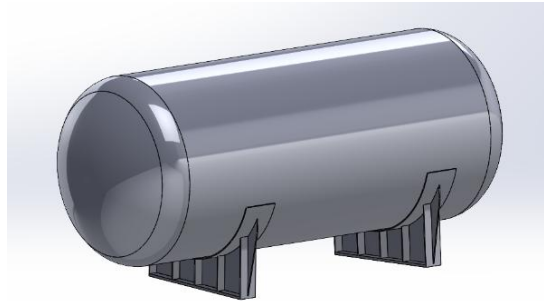
2.2 Pemodelan Desain

Pemodelan geometri dilakukan menggunakan perangkat lunak SolidWorks sebagai platform *Computer-Aided Design* (CAD). Model yang dikembangkan berupa bejana tekan horizontal berkapasitas 100 ton yang terdiri atas *cylindrical shell*, dua buah *elliptical head* dengan rasio 2:1, serta dua buah *saddle support* sebagai sistem penyangga utama. Model tiga dimensi dikembangkan berdasarkan data desain aktual sehingga geometri yang digunakan dapat merepresentasikan kondisi peralatan pada aplikasi industri. Hasil pemodelan tiga dimensi bejana tekan ditunjukkan pada Gambar 2.

Dimensi utama bejana tekan meliputi diameter luar sebesar 3.050 mm, panjang *shell* sebesar 7.000 mm, dan ketebalan *shell* sebesar 25 mm. Pada kedua ujung bejana digunakan *elliptical head* dengan rasio 2:1, yang memiliki ketebalan 28 mm pada bagian *crown* dan 22 mm pada bagian *knuckle*. Pemilihan *elliptical head* didasarkan pada kemampuannya dalam menghasilkan distribusi tegangan yang relatif lebih merata dibandingkan beberapa tipe *head* lainnya. Oleh karena itu, bentuk ini banyak digunakan dalam perancangan bejana tekan sesuai dengan ketentuan ASME Section VIII.

Dua buah *saddle support* dipasang secara simetris terhadap sumbu longitudinal bejana. Posisi masing-masing *saddle support* ditentukan berdasarkan jaraknya dari ujung *shell*, dengan titik referensi yang disesuaikan terhadap gambar desain. Penempatan tersebut menghasilkan jarak antarsadel yang simetris terhadap pusat bejana. Konfigurasi ini bertujuan mendistribusikan beban secara lebih merata serta mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah kontak antara badan bejana dan *saddle support*.

Geometri *saddle support* dimodifikasi melalui studi parametrik yang terdiri atas tiga konfigurasi, yaitu empat *rib*, lima *rib*, serta lima *rib* dengan tambahan *stiffener*. Seluruh konfigurasi menggunakan dimensi dasar *saddle support* yang sama, sedangkan variasi hanya diterapkan pada jumlah *rib* dan penambahan *stiffener*. Pendekatan ini dilakukan untuk memastikan bahwa perubahan respons struktural terutama disebabkan oleh variasi elemen pengaku, tanpa dipengaruhi oleh perubahan dimensi utama *saddle support*. Dimensi geometrik setiap konfigurasi disajikan pada Tabel 1.



Gambar 2: Gambar 3D *Vessel horizontal*

Tabel 1: Dimensi Geometri *Saddle support*

Parameter	4 rib	5 rib	5 Rib + stiffener
Tebal <i>saddle plate</i> (mm)	25	25	25
Lebar <i>saddle</i> (mm)	595	595	595
Tinggi <i>saddle</i> (mm)	1640	1640	1640
Sudut kontak <i>saddle</i> (°)	180°	180	180
Tebal <i>rib</i> (mm)	16	16	16
Tinggi <i>rib</i> (mm)	750	750	750
Panjang <i>rib</i> (mm)	300	300	300
Jumlah <i>rib</i>	4	5	5
Jarak antar <i>rib</i> (mm)	735	434,4	434,4
Tebal <i>stiffener</i> (mm)	12	12	12
Tinggi <i>stiffener</i> (mm)	-	-	1240
Lebar <i>stiffener</i> (mm)	-	-	2240
Tebal <i>saddle plate</i> (mm)	40	40	40

2.3 Karakteristik Material

Setelah pemodelan geometri selesai, tahap berikutnya adalah menentukan sifat mekanik material yang digunakan dalam simulasi numerik. Tahap ini penting karena karakteristik material menjadi salah satu parameter utama yang menentukan respons struktur terhadap berbagai kondisi pembebanan. Model tiga dimensi bejana tekan horizontal beserta *saddle support* selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Engineering* (CAE) berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) untuk mengevaluasi perilaku mekanik struktur pada kondisi operasi (Pinto & Neto, 2025). Pendekatan ini memungkinkan distribusi tegangan, deformasi, dan lokasi yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan diidentifikasi secara lebih terperinci dibandingkan dengan metode perhitungan analitis konvensional.

Sifat mekanik material ditentukan sebelum proses simulasi agar model numerik dapat merepresentasikan kondisi aktual konstruksi bejana tekan. Parameter material yang dimasukkan ke dalam perangkat lunak meliputi modulus elastisitas (*Young's modulus*), rasio

Poisson, densitas, tegangan luluh, dan tegangan izin. Parameter tersebut digunakan sebagai dasar untuk menghitung hubungan tegangan dan regangan pada struktur akibat beban operasi maupun beban pengujian (Paul, 2020).

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon SA-516 Grade 70N. Material tersebut banyak digunakan pada konstruksi bejana tekan, tangki penyimpanan, dan peralatan proses bertekanan. Pemilihannya didasarkan pada kekuatan mekanik dan ketangguhannya dalam menerima pembebanan statis, serta kesesuaiannya dengan persyaratan ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII*. Selain itu, SA-516 Grade 70N memiliki kemampuan las yang baik sehingga sesuai untuk proses fabrikasi bejana tekan.

Dalam simulasi, material dimodelkan sebagai material elastis linier dan isotropik. Asumsi isotropik menunjukkan bahwa material memiliki sifat mekanik yang sama pada setiap arah, sedangkan asumsi elastis linier menunjukkan bahwa hubungan antara tegangan dan regangan mengikuti hukum linier selama pembebanan masih berada dalam daerah elastis. Pendekatan ini digunakan karena penelitian difokuskan pada evaluasi respons elastis struktur. Oleh karena itu, model material elastis linier isotropik dinilai memadai untuk merepresentasikan perilaku mekanik bejana tekan dan *saddle support* secara numerik (Hadi, 2025).

Data sifat mekanik material yang digunakan sebagai parameter masukan dalam simulasi elemen hingga disajikan pada Tabel 2. Parameter tersebut digunakan dalam perhitungan distribusi tegangan ekuivalen *von Mises*, deformasi total, dan faktor keamanan struktur selama proses simulasi.

Tabel 2: Sifat mekanik material SA-516 Grade 70N

Setup	Nilai
<i>Young's Modulus</i>	200 GPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,30
<i>Yield Strength</i>	250 MPa
<i>Density</i>	7850 kg/m ³
<i>Allowable stress</i>	1699,5 kg/cm ²

Berdasarkan data pada Tabel 2, nilai *Young's Modulus* sebesar 200 GPa menunjukkan kemampuan material dalam menahan deformasi elastis ketika menerima pembebanan. *Poisson's Ratio* sebesar 0,30 menggambarkan hubungan antara regangan longitudinal dan regangan lateral yang terjadi selama proses deformasi. Sementara itu, *Yield Strength* sebesar 250 MPa digunakan sebagai acuan untuk menentukan batas awal terjadinya deformasi plastis pada material.

Pada penelitian ini, nilai *allowable stress* dihitung menggunakan pendekatan konservatif berdasarkan perbandingan *antara yield strength* dan faktor keamanan sebesar 1,5, sebagaimana umum digunakan dalam pendekatan desain berbasis tegangan ijin pada mekanika material (Basic, 2012). Persamaan yang digunakan untuk menghitung *allowable stress* ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$S = \frac{\sigma_y}{1,5} \quad (1)$$

Dimana:

S = *allowable stress* material kg/cm²

σ_y = *yield strength* material (MPa)

Selanjutnya, dengan memasukkan nilai *yield strength* sebesar 250 MPa ke dalam Persamaan 1 diperoleh perhitungan *allowable stress* sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$\begin{aligned} S &= \frac{250 \text{ MPa}}{1,5} \\ S &= 166,67 \text{ MPa} \\ S &= 166,67 \times 10,1972 \\ &= 1699,5 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Hasil perhitungan pada Persamaan 2 menunjukkan bahwa nilai *allowable stress* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 166,67 MPa atau setara dengan 1699,5 kg/cm². Nilai tersebut digunakan sebagai parameter pembanding dalam mengevaluasi keamanan struktur berdasarkan hasil analisis elemen hingga. Perlu diperhatikan bahwa nilai *allowable stress* tersebut merupakan hasil pendekatan konservatif berdasarkan *yield strength* dan faktor keamanan, sehingga bukan merupakan nilai *allowable stress* resmi menurut ASME BPVC *Section II Part D*. Dalam praktik perancangan *bejana tekan* sesuai ASME BPVC *Section VIII Division 1*, nilai *allowable stress* harus mengacu pada tabel sifat material yang tercantum dalam ASME BPVC *Section II Part D* sesuai jenis material dan temperatur desain yang digunakan.

2.4 Kriteria Evaluasi deformasi

Selain mengevaluasi distribusi tegangan, penelitian ini juga menganalisis total deformasi untuk mengetahui tingkat kekakuan struktur *saddle support* terhadap kombinasi pembebanan yang bekerja pada *bejana tekan* horizontal. Evaluasi deformasi dilakukan menggunakan pendekatan *span-to-deflection ratio* (L/360) yang umum digunakan sebagai indikator *serviceability* pada struktur penyangga. Pendekatan ini digunakan untuk membandingkan kinerja relatif antar variasi desain *saddle support* dan tidak dimaksudkan sebagai kriteria penerimaan (*acceptance criteria*) dalam ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII*. Oleh karena itu, hasil evaluasi deformasi hanya digunakan sebagai parameter pendukung dalam menilai kekakuan struktur, sedangkan evaluasi keamanan utama tetap didasarkan pada batas tegangan izin (*allowable stress*) (Basic, 2012). Batas deformasi yang diizinkan (*allowable deflection*) dihitung menggunakan Persamaan 3 dan Persamaan 4.

$$\delta_{allow} = \frac{L}{360} \quad (3)$$

Keterangan:

δ_{allow} = deformasi yang diizinkan (mm)

L = panjang *shell Vessel* (mm)

Substitusi nilai panjang shell menghasilkan:

$$\begin{aligned} \delta_{allow} &= \frac{7000}{360} \\ \delta_{allow} &= 19,44 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4)$$

Nilai *allowable deflection* sebesar 19,44 mm selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi hasil total deformasi pada setiap konfigurasi *saddle support*. Semakin kecil nilai deformasi yang diperoleh dibandingkan dengan nilai *allowable deflection*, maka semakin baik tingkat kekakuan struktur yang dihasilkan. Evaluasi tersebut digunakan untuk membandingkan efektivitas variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* terhadap peningkatan kekakuan sistem penyangga.

2.5 Kriteria Evaluasi Faktor Keamanan

Selain mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi, penelitian ini juga menggunakan faktor keamanan (SF) sebagai parameter untuk menilai tingkat keamanan struktur *saddle support* terhadap kemungkinan terjadinya kegagalan luluh (*yielding*). Faktor keamanan menunjukkan perbandingan antara kemampuan material dalam menahan tegangan dengan tegangan maksimum yang bekerja pada struktur. Semakin besar nilai faktor keamanan, semakin besar pula margin keamanan yang dimiliki struktur terhadap pembebanan yang diterima. Pada penelitian ini, perhitungan faktor keamanan didasarkan pada *Equivalent Von Mises Stress*, karena kriteria *Von Mises* merupakan pendekatan yang umum digunakan untuk mengevaluasi kegagalan pada material ulet, seperti baja karbon SA-516 Grade 70N (Basic, 2012).

Perhitungan faktor keamanan dilakukan dengan membandingkan *yield strength* material terhadap *Equivalent Von Mises Stress* maksimum hasil simulasi, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan 5.

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} \quad (5)$$

Dimana:

SF = Faktor keamanan

σ_y = *Yield Strength* material (MP_a)

σ_{max} = Tegangan *Von Mises* maksimum hasil simulasi (MP_a)

Nilai *yield strength* yang digunakan pada penelitian ini sebesar 250 MPa sesuai dengan sifat mekanik material SA-516 Grade 70N, sedangkan nilai *Equivalent Von Mises Stress* diperoleh dari hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS *Mechanical*. Selanjutnya, nilai faktor keamanan yang diperoleh digunakan untuk membandingkan tingkat keamanan masing-masing variasi *saddle support*, kemudian diverifikasi menggunakan pendekatan *allowable stress* yang telah dihitung melalui Persamaan (1) dan Persamaan (2) pada Subbab 2.3. Dengan demikian, evaluasi keamanan struktur dilakukan berdasarkan kombinasi analisis *Equivalent Von Mises Stress*, faktor keamanan, dan *allowable stress* sehingga memberikan penilaian yang lebih komprehensif terhadap kinerja struktur.

2.6 Boundary Condition & Load

Pada analisis elemen hingga, *boundary condition* dan pembebanan ditentukan agar model numerik dapat merepresentasikan kondisi operasi aktual bejana tekan horizontal. Sistem penyangga terdiri atas dua buah *saddle support* yang dipasang secara simetris pada bagian bawah *shell vessel*. Salah satu *saddle support* dimodelkan sebagai *fixed support* untuk menahan seluruh derajat kebebasan translasi dan rotasi, sedangkan *saddle support* lainnya dimodelkan sebagai *sliding support* dengan pembatasan perpindahan pada arah vertikal dan lateral, namun tetap diizinkan bergerak sepanjang sumbu *longitudinal* bejana untuk mengakomodasi ekspansi termal selama operasi.

Pembebanan yang diterapkan pada model terdiri atas beban mekanik, tekanan internal, temperatur, dan beban lingkungan. Beban mekanik meliputi berat bejana kosong, berat fluida operasi, dan berat fluida pada kondisi *hydrotest*. Selain itu, model diberikan tekanan internal sesuai kondisi desain, temperatur operasi, serta beban angin berdasarkan ketentuan ASCE/SEI 7-16 berupa bending moment sebesar 1106,5 kgf·m dan *shear force* sebesar 553,25 kgf. Tekanan internal diterapkan secara merata pada seluruh permukaan bagian dalam *shell* dan *head*.

Parameter pembebanan yang digunakan sebagai masukan pada simulasi elemen hingga dirangkum pada Tabel 3. Parameter tersebut meliputi berat bejana, berat fluida operasi, berat air *hydrotest*, tekanan operasi, *Maximum Allowable Working Pressure* (MAWP), tekanan *hydrotest*, temperatur operasi, serta beban angin yang bekerja pada struktur.

Tabel 3: Kombinasi pembebanan

Komponen Beban	Nilai
Massa Bejana Kosong	19,151 kg
Massa Fluida Operasi	36,725 kg
Massa Air <i>Hydrotest</i>	49,546 kg
<i>Internal Pressure</i>	7,14 kg/cm ²
<i>Operating Pressure</i>	0,61 kg/cm ²
MAWP	17,61 kg/cm ²
<i>Hydrotest Pressure</i>	22,89 kg/cm ²
<i>Temperatur Operasi</i>	60,3°C
<i>Wind Load</i>	1106,5 kgf·m
<i>Wind Load</i>	553,25 kgf

Berdasarkan parameter pada Tabel 3, total beban vertikal yang bekerja pada struktur saat *operating condition* sebesar 90.718,5 kg, sedangkan pada kondisi *hydrotest* meningkat menjadi 98.883,1 kg akibat tambahan berat air selama proses pengujian. Tekanan *hydrotest* ditetapkan sebesar 22,89 kg/cm², yaitu sekitar 1,3 kali MAWP, sesuai ketentuan ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1*. Rekapitulasi total pembebanan untuk masing-masing kondisi simulasi disajikan pada Tabel 4.

Table 4: Kombinasi pembebanan

Kondisi	Beban Total
<i>Operating Load</i>	90.718,5 kg
<i>Hydrotest Load</i>	98.883,1 kg

2.7 Penerapan Beban Support, Boundary conditions dan Meshing

Model geometri yang telah dibuat diimpor ke perangkat lunak ANSYS *Mechanical* untuk dilakukan analisis statik struktural (*Static Structural Analysis*). Seluruh komponen dimodelkan menggunakan elemen tiga dimensi tipe SOLID187 berbentuk tetrahedral yang sesuai untuk geometri kompleks pada bejana tekan. Interaksi antara *shell vessel*, *saddle support*, *rib*, dan *stiffener* dimodelkan menggunakan tipe

kontak *bonded contact*. Jenis kontak ini dipilih karena seluruh komponen dihubungkan melalui proses pengelasan sehingga selama pembebanan tidak terjadi perpindahan relatif maupun pemisahan antarkomponen. Dengan demikian seluruh beban dianggap ditransfer secara penuh melalui sambungan las.

Proses meshing dilakukan menggunakan elemen tetrahedral dengan penerapan *local mesh refinement* pada daerah yang diperkirakan mengalami konsentrasi tegangan tinggi, yaitu di sekitar pertemuan antara *shell vessel*, *saddle support*, *rib*, dan *stiffener*. Penyempurnaan ukuran elemen pada area tersebut bertujuan meningkatkan akurasi prediksi distribusi tegangan tanpa meningkatkan jumlah elemen secara berlebihan pada seluruh model. Untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak dipengaruhi oleh ukuran elemen (*mesh-independent*), dilakukan *mesh independence study* menggunakan tiga variasi ukuran elemen, yaitu mesh kasar, sedang, dan halus. Statistik masing-masing variasi *mesh*, meliputi ukuran elemen, jumlah *node*, jumlah elemen, serta nilai maksimum *Equivalent Von Mises Stress*, disajikan pada Tabel 5.

Table 5: Statistik *Mesh*

<i>Mesh</i>	Ukuran Elemen (mm)	<i>Node</i>	Elemen	<i>Von Mises</i>
Kasar	70	12,541	6,984	104,8
Sedang	50	21,122	10,565	105,2
Halus	35	39,814	19,733	105,6

Berdasarkan Tabel 5, peningkatan kerapatan mesh menyebabkan jumlah *node* dan elemen bertambah sehingga hasil simulasi menjadi lebih stabil. Nilai maksimum *Equivalent Von Mises Stress* yang diperoleh pada mesh kasar, sedang, dan halus berturut-turut sebesar 104,8 MPa, 105,2 MPa, dan 105,6 MPa. Perbedaan nilai tegangan antara mesh sedang dan mesh halus hanya sebesar 0,38 %, sehingga telah memenuhi kriteria konvergensi yang ditetapkan, yaitu perubahan hasil kurang dari 5 %. Oleh karena itu, mesh berukuran 50 mm (medium mesh) dipilih untuk seluruh simulasi karena telah menghasilkan solusi yang konvergen dengan waktu komputasi yang lebih efisien dibandingkan mesh halus.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

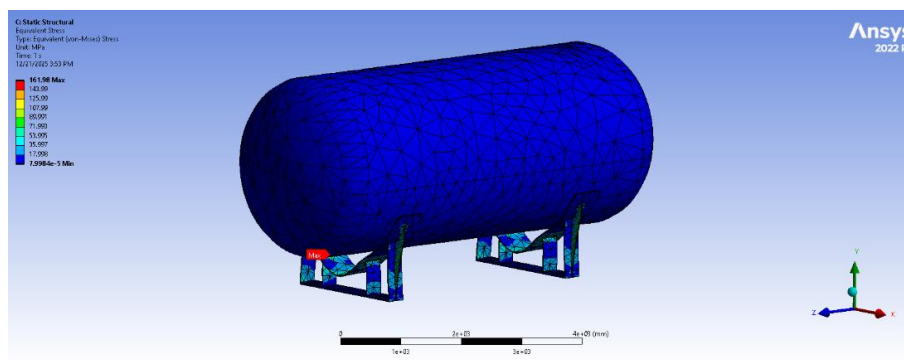
Bagian ini membahas hasil analisis struktur terhadap variasi konfigurasi *rib* pada *saddle support* bejana tekan *horizontal* berdasarkan simulasi elemen hingga. Variasi desain *support* dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana penambahan dan *optimasi rib* pengaku memengaruhi respons mekanis struktur terhadap pembebanan statik. Beban yang diterapkan merepresentasikan berat total bejana dan fluida dengan kapasitas operasi sebesar 100 ton, yang sesuai dengan kondisi operasi normal bejana tekan *horizontal* sebagaimana direkomendasikan dalam standar desain bejana tekan, seperti *ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section VIII*. Parameter utama yang dianalisis meliputi tegangan *Von Mises*, deformasi total (*displacement*), dan faktor keamanan, yang masing-masing digunakan untuk menilai kekuatan, kekakuan, dan tingkat keselamatan struktur *support*.

3.1 Tegangan *Von Mises* pada *Support Vessel*

Analisis tegangan *Von Mises* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan struktur *saddle support* dalam menahan kombinasi pembebanan yang bekerja pada bejana tekan horizontal. Parameter *Equivalent Von Mises Stress* digunakan untuk mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan maksimum sekaligus mengevaluasi keamanan struktur terhadap kemungkinan terjadinya luluh (*yielding*). Berdasarkan hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*), daerah kritis berada pada sambungan antara *saddle support*, *rib*, *stiffener*, dan *shell vessel*. Daerah tersebut merupakan lokasi terjadinya transfer beban utama dari badan bejana menuju sistem penyangga sehingga mengalami konsentrasi tegangan yang lebih tinggi dibandingkan bagian struktur lainnya. Distribusi tegangan pada masing-masing konfigurasi ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.

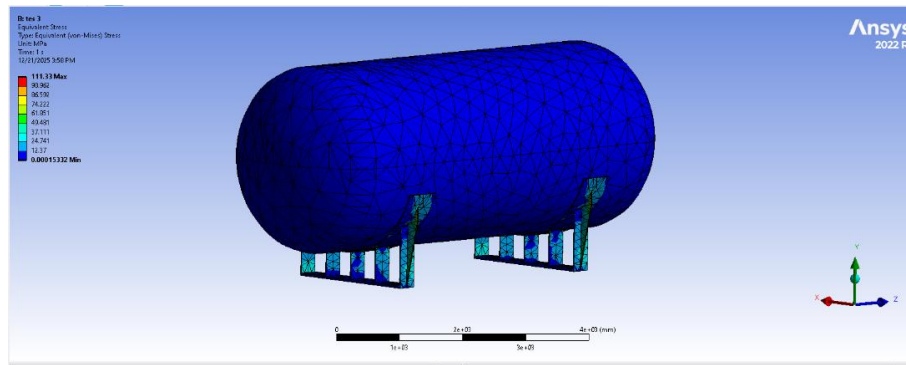
Untuk mengevaluasi keamanan struktur, nilai tegangan maksimum hasil simulasi dibandingkan dengan tegangan izin (*allowable stress*) material ASTM SA-516 Grade 70N. Material tersebut memiliki *yield strength* sebesar 250 MPa. Berdasarkan pendekatan desain tegangan izin, nilai *allowable stress* dihitung menggunakan Persamaan 1.

Nilai *allowable stress* sebesar 166,67 MPa digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi keamanan masing-masing konfigurasi *saddle support*. Pada konfigurasi 4 *rib*, tegangan *Von Mises* maksimum yang diperoleh sebesar 161,998 MPa atau 97,2 % dari tegangan izin material. Konsentrasi tegangan terlihat pada daerah sambungan antara badan *saddle support* dengan pelat pengaku bagian atas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa distribusi beban masih terpusat pada area tertentu sehingga kekakuan struktur belum optimal.



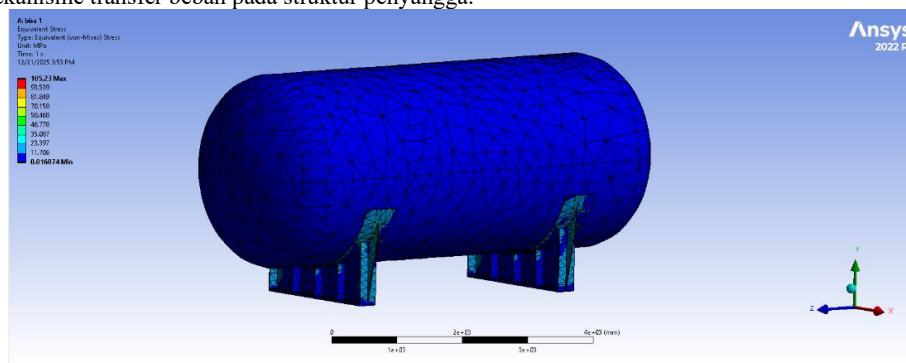
Gambar 3: Kontur distribusi tegangan *Von Mises* (*Equivalent Stress*)

Penambahan jumlah *rib* menjadi 5 buah menurunkan tegangan maksimum menjadi 111,33 MPa, atau 66,8 % dari tegangan izin material. Dibandingkan konfigurasi 4 *rib*, terjadi penurunan tegangan maksimum sebesar 31,3 %. Selain itu, distribusi tegangan menjadi lebih merata pada badan *saddle support*, yang menunjukkan bahwa penambahan *rib* meningkatkan kemampuan struktur dalam mendistribusi kan beban dari *shell vessel* menuju sistem penyangga.



Gambar 4: Distribusi Tegangan *Von Mises* support vessel modifikasi 5 rib

Konfigurasi 5 rib dengan penambahan *stiffener* menghasilkan tegangan maksimum sebesar 105,23 MPa, atau 63,1 % dari tegangan izin material. Nilai ini merupakan tegangan terendah dibandingkan dua konfigurasi lainnya. Distribusi tegangan terlihat lebih merata pada daerah kontak antara *shell vessel* dan *saddle support*, sehingga menunjukkan bahwa penambahan *stiffener* meningkatkan kekakuan lokal dan memperbaiki mekanisme transfer beban pada struktur penyangga.



Gambar 5 : Distribusi Tegangan *Von Mises* support vessel modifikasi 5 rib + *stiffener*

Hasil Untuk memberikan perbandingan kuantitatif antar konfigurasi, nilai tegangan maksimum, allowable stress, persentase utilisasi, dan status keamanan struktur dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6: Perbandingan Tegangan Maksimum terhadap *allowable stress*

Konfigurasi Support	Tegangan Maksimum (MPa)	Allowable stress (MPa)	Utilisasi (%)	Status
Support 4 rib	161,998	166,67	97,2	Aman
Support 5 rib	111,3	166,67	66,8	Aman
Support 5 Rib + <i>stiffener</i>	105,23	166,67	63,14	Aman

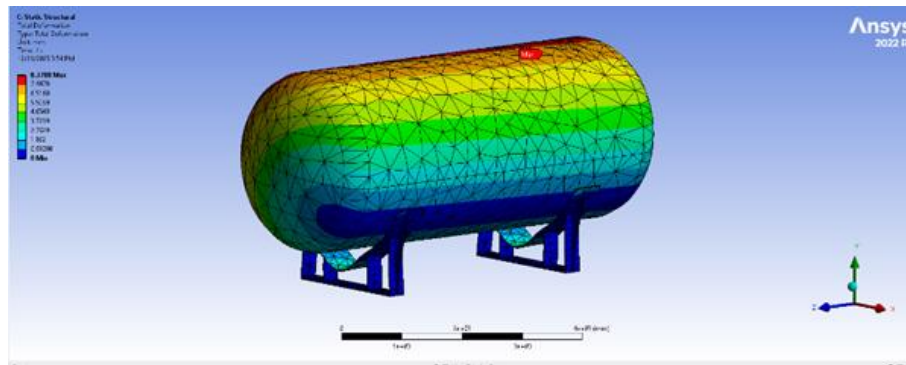
Berdasarkan Tabel 6, seluruh konfigurasi *saddle support* menghasilkan tegangan maksimum yang masih berada di bawah *allowable stress* material sebesar 166,67 MPa, sehingga seluruh desain memenuhi kriteria kekuatan terhadap kegagalan luluh (*yielding*) berdasarkan pendekatan *allowable stress* design. Konfigurasi 5 rib + *stiffener* menunjukkan performa struktural terbaik dengan tegangan maksimum sebesar 105,23 MPa, atau mengalami penurunan sekitar 35,0 % dibandingkan konfigurasi awal 4 rib. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi penambahan rib dan *stiffener* mampu meningkatkan kekakuan struktur serta menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata pada sistem penyangga bejana tekan.

3.2 Displacement pada Support Vessel

Analisis total deformasi dilakukan untuk mengevaluasi kekakuan struktur *saddle support* terhadap kombinasi pembebanan yang bekerja pada bejana tekan horizontal. Besarnya deformasi merupakan salah satu parameter yang menunjukkan kemampuan struktur dalam mempertahankan bentuk geometrinya selama operasi. Deformasi yang berlebihan dapat menyebabkan *misalignment* pada sistem perpipaan dan peralatan pendukung, meningkatkan tegangan lokal pada *shell vessel*, serta mempercepat penurunan kinerja sambungan penyangga akibat distribusi beban yang tidak merata.

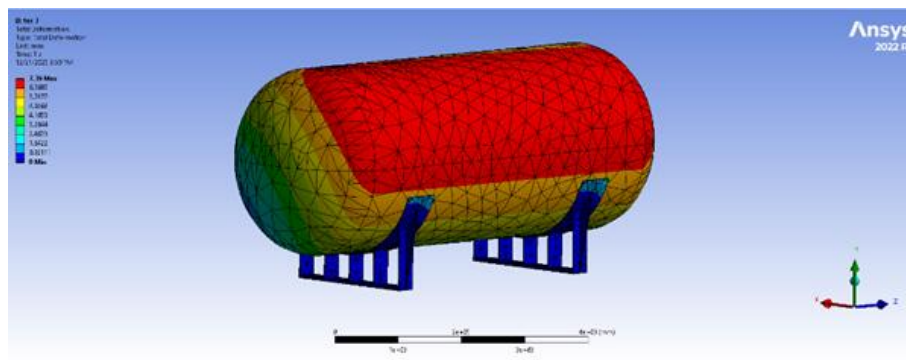
Dalam penelitian ini, hasil deformasi dievaluasi menggunakan pendekatan *span-to-deflection ratio* ($L/360$) sebagai indikator *serviceability* untuk membandingkan tingkat kekakuan antar konfigurasi *saddle support*. Pendekatan tersebut telah dijelaskan pada Subbab 2.4, di mana nilai *allowable deflection* dihitung menggunakan Persamaan 3 dan hasil perhitungannya ditunjukkan pada Persamaan 4. Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh nilai *allowable deflection* sebesar 19,44 mm, yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi tingkat kekakuan masing-masing konfigurasi *saddle support*. Nilai tersebut hanya digunakan sebagai indikator *serviceability* dan bukan sebagai kriteria penerimaan menurut ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII.

Pada konfigurasi 4 rib, deformasi maksimum yang diperoleh sebesar 8,38 mm atau sekitar 43,1 % dari nilai *allowable deflection*. Distribusi deformasi menunjukkan bahwa perpindahan maksimum terjadi pada bagian tengah *shell vessel*, sedangkan daerah *saddle support* mengalami deformasi yang relatif lebih kecil akibat adanya *constraint* pada sistem penyangga. Meskipun deformasi masih berada di bawah nilai acuan, pola distribusi perpindahan menunjukkan bahwa efek lentur (*bending*) pada daerah penyangga masih cukup dominan. Distribusi total deformasi pada konfigurasi 4 rib ditunjukkan pada Gambar 6.



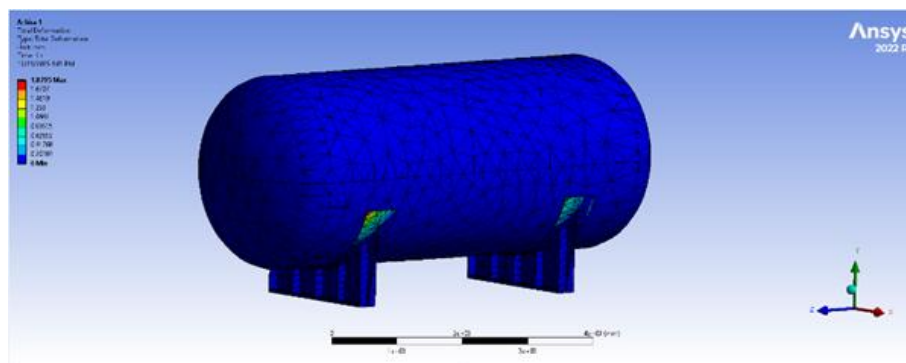
Gambar 6: Displacement support vessel 4 rib

Penambahan jumlah *rib* menjadi 5 buah menghasilkan deformasi maksimum sebesar 7,39 mm, atau sekitar 38,0 % dari nilai acuan $L/360$. Dibandingkan konfigurasi sebelumnya, deformasi berkurang sebesar 11,8 %, yang menunjukkan bahwa penambahan *rib* meningkatkan kekakuan lokal *saddle support* sehingga distribusi beban dari *shell vessel* menuju penyangga menjadi lebih merata. Distribusi deformasi pada konfigurasi 5 *rib* ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7: Displacement support vessel modifikasi 5 rib

Konfigurasi 5 *rib* dengan penambahan *stiffener* menghasilkan deformasi maksimum sebesar 1,87 mm, atau sekitar 9,6 % dari nilai acuan $L/360$. Nilai ini merupakan deformasi terkecil di antara seluruh konfigurasi yang dianalisis. Penambahan *stiffener* meningkatkan kekakuan lokal pada daerah sambungan antara *shell vessel* dan *saddle support*, sehingga perpindahan struktur menjadi lebih kecil dan distribusi deformasi lebih merata. Distribusi deformasi pada konfigurasi 5 *rib* + *stiffener* ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8: Displacement support vessel modifikasi 5 rib + stiffener

Penurunan deformasi dari 8,38 mm pada konfigurasi 4 *rib* menjadi 1,87 mm pada konfigurasi 5 *rib* + *stiffener* menunjukkan penurunan deformasi sebesar 77,7 %. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan jumlah *rib* yang disertai *stiffener* memberikan peningkatan kekakuan struktur yang paling signifikan dibandingkan konfigurasi lainnya. Untuk memberikan perbandingan kuantitatif terhadap hasil deformasi pada setiap konfigurasi, nilai deformasi maksimum, *allowable deflection*, persentase utilisasi, serta status evaluasi *serviceability* disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7: Evaluasi Deformasi Maksimum terhadap Batas Deformasi

Konfigurasi Support	Deformasi Maksimum (mm)	Allowable Deflection (mm)	Utilisasi (%)	Status
Support tanpa 4 rib	8,38	19,44	43,1	Memenuhi
Support dengan 5 rib	7,39	19,44	38,0	Memenuhi
Support 5 Rib + stiffener	1,87	19,44	9,6	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 7, seluruh konfigurasi menghasilkan deformasi yang lebih kecil daripada nilai *allowable deflection* sebesar 19,44 mm, sehingga menunjukkan tingkat kekakuan struktur yang baik dari aspek *serviceability*. Konfigurasi 5 *rib* + *stiffener* memberikan *respons* terbaik dengan deformasi maksimum sebesar 1,87 mm, atau mengalami penurunan sekitar 77,7 % dibandingkan konfigurasi awal 4 *rib*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi penambahan *rib* dan *stiffener* mampu meningkatkan kekakuan struktur, memperbaiki distribusi beban, serta mengurangi perpindahan pada sistem penyangga *bejana tekan*. Perlu ditegaskan bahwa evaluasi deformasi pada penelitian ini hanya digunakan sebagai indikator kinerja struktural dan bukan sebagai kriteria penerimaan menurut ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII*. Oleh karena itu, penilaian keamanan *bejana tekan* tetap mengacu pada hasil evaluasi *Equivalent Von Mises Stress* terhadap *allowable stress*, sebagaimana telah dibahas pada Subbab 3.1.

3.3 Faktor keamanan pada Support Vessel

Selain mengevaluasi distribusi *Equivalent Von Mises Stress*, penelitian ini juga menganalisis faktor keamanan untuk mengetahui tingkat keamanan struktur *saddle support* terhadap kegagalan luluh (*yielding*). Nilai faktor keamanan dihitung berdasarkan perbandingan antara *yield strength* material dan tegangan *Von Mises* maksimum hasil simulasi menggunakan persamaan (5) yang telah dijelaskan pada Subbab 2.7. Semakin besar nilai faktor keamanan, semakin besar pula margin keamanan struktur terhadap pembebanan yang diterima.

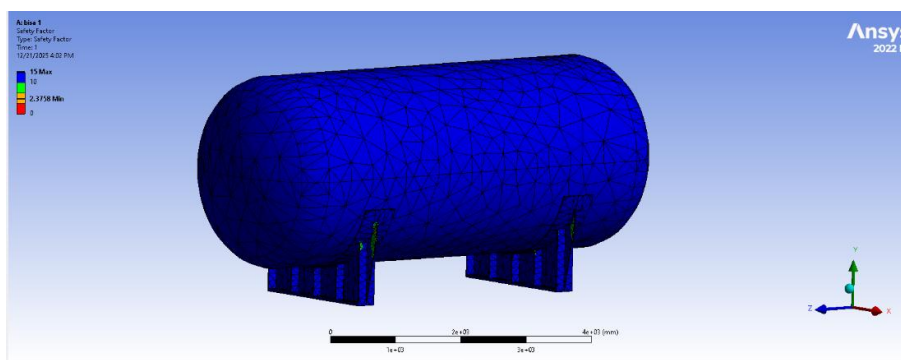
Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja karbon SA-516 Grade 70N dengan *yield strength* sebesar 250 MPa. Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan menggunakan persamaan (5), diperoleh nilai faktor keamanan untuk masing-masing konfigurasi *saddle support* sebagaimana disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8: Perhitungan faktor keamanan

Konfigurasi Support	Yield Strength (MPa)	Tegangan Maksimum (MPa)	Faktor keamanan
Support 4 <i>rib</i>	250	161,998	1,54
Support 5 <i>rib</i>	250	111,3	2,25
Support 5 <i>Rib</i> + <i>stiffener</i>	250	105,23	2,38

Distribusi Berdasarkan Tabel 8, konfigurasi 4 *rib* menghasilkan faktor keamanan sebesar 1,54, yang menunjukkan bahwa struktur masih berada di bawah batas luluh material, meskipun memiliki margin keamanan yang relatif lebih kecil dibandingkan konfigurasi lainnya. Penambahan jumlah *rib* menjadi lima buah meningkatkan faktor keamanan menjadi 2,25, sedangkan konfigurasi 5 *rib* + *stiffener* menghasilkan nilai tertinggi, yaitu 2,38. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa penambahan *rib* dan *stiffener* mampu menurunkan konsentrasi tegangan sehingga kemampuan struktur dalam menahan pembebanan menjadi lebih baik.

Distribusi faktor keamanan pada konfigurasi 5 *rib* + *stiffener* ditunjukkan pada Gambar 9. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan ANSYS, sebagian besar permukaan *shell vessel* dan *saddle support* didominasi oleh zona dengan nilai faktor keamanan yang tinggi. Nilai faktor keamanan terendah masih berada pada daerah sambungan antara *saddle support*, *rib*, dan *shell vessel*, yaitu lokasi yang sebelumnya teridentifikasi sebagai daerah dengan konsentrasi *Equivalent Von Mises Stress* tertinggi. Meskipun demikian, nilai minimum yang diperoleh masih sebesar 2,38, sehingga struktur masih memiliki margin keamanan yang memadai terhadap potensi kegagalan luluh.



Gambar 9: Faktor keamanan *support vessel* modifikasi 5 *rib* + *stiffener*

Selain menggunakan parameter faktor keamanan, hasil simulasi juga diverifikasi terhadap *allowable stress* sesuai pendekatan yang telah dijelaskan pada Subbab 2.3. Nilai *allowable stress* dihitung menggunakan persamaan (1), sedangkan hasil perhitungannya ditunjukkan pada persamaan (2). Berdasarkan perhitungan tersebut diperoleh nilai *allowable stress* sebesar 166,67 MPa, yang digunakan sebagai batas pembanding dalam mengevaluasi hasil simulasi. Perbandingan antara tegangan maksimum hasil simulasi dan *allowable stress* untuk setiap konfigurasi disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9: Verifikasi terhadap *Allowable Stress ASME*

Konfigurasi Support	Tegangan Maksimum (MPa)	Tegangan Izin ASME (MPa)	Status
Support 4 <i>rib</i>	161,998	166,67	Memenuhi
Support 5 <i>rib</i>	111,3	166,67	Memenuhi
Support 5 <i>Rib</i> + <i>stiffener</i>	105,23	166,67	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 8 dan Tabel 9, seluruh konfigurasi *saddle support* memenuhi batas tegangan yang diizinkan berdasarkan ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1*. Konfigurasi 4 *rib* memiliki faktor keamanan sebesar 1,54, yang menunjukkan bahwa tegangan kerja masih berada di bawah batas luluh material, meskipun margin keamanannya relatif kecil. Penambahan jumlah *rib* menjadi lima buah meningkatkan faktor keamanan menjadi 2,25, sedangkan konfigurasi 5 *rib* dengan penambahan *stiffener* menghasilkan faktor keamanan tertinggi sebesar 2,38.

Peningkatan nilai faktor keamanan tersebut menunjukkan bahwa penambahan *rib* dan *stiffener* mampu meningkatkan kekakuan struktur, memperbaiki distribusi beban, serta menurunkan konsentrasi tegangan pada daerah kritis. Dengan demikian, konfigurasi 5 *rib* + *stiffener* memberikan tingkat keamanan struktural terbaik di antara seluruh variasi desain yang dianalisis.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengevaluasi pengaruh variasi konfigurasi *rib* dan penambahan *stiffener* pada *saddle support* bejana tekan horizontal berkapasitas 100 ton menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Hasil analisis menunjukkan bahwa variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* memberikan penurunan tegangan dan deformasi berdasarkan hasil simulasi numerik pada sistem penyangga. Konfigurasi 5 *rib* dengan tambahan *stiffener* menghasilkan kinerja terbaik dengan tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 105,23 MPa, deformasi maksimum sebesar 1,87 mm, serta faktor keamanan sebesar 2,38. Dibandingkan desain awal, konfigurasi tersebut mampu menurunkan tegangan hingga sekitar 35 % dan mengurangi deformasi sebesar 77,7 %, sehingga menghasilkan distribusi beban yang lebih merata dan meningkatkan kekakuan struktur secara keseluruhan.

Kontribusi ilmiah utama penelitian ini terletak pada pengembangan desain *saddle support* melalui studi parametrik berbasis variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* yang dievaluasi menggunakan simulasi numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan lokal pada struktur *support* berperan dalam mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah kritis kontak antara *shell vessel* dan *saddle support*. Selain itu, hasil simulasi telah diverifikasi terhadap batas tegangan yang diizinkan berdasarkan ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1*, sehingga memberikan dasar dalam mengevaluasi keamanan desain. Hasil penelitian ini tidak hanya relevan untuk perancangan bejana tekan pada industri proses, tetapi juga berpotensi diterapkan sebagai acuan dalam pengembangan sistem penyimpanan gas bertekanan untuk mendukung teknologi energi bersih, seperti *hydrogen storage*, *biogas storage*, *compressed biomethane* (CBG), dan *compressed natural gas* (CNG). Dengan demikian, peningkatan kinerja struktural *saddle support* melalui variasi jumlah *rib* dan penambahan *stiffener* dapat berkontribusi terhadap peningkatan keandalan dan keselamatan infrastruktur penyimpanan gas pada sektor energi terbarukan.

Meskipun simulasi telah mempertimbangkan pengaruh tekanan internal sebesar 7 kg/cm² sebagai salah satu kondisi pembebanan operasi bersama berat operasi, temperatur, beban angin, dan kondisi *hydrotest*, penelitian ini belum mengevaluasi pengaruh masing-masing komponen pembebanan secara terpisah terhadap respons struktural *saddle support*. Oleh karena itu, Kontribusi spesifik tekanan internal terhadap distribusi tegangan dan deformasi belum dianalisis secara individual dalam studi parametrik ini. Selain itu, hasil simulasi numerik belum divalidasi melalui pengujian eksperimental maupun pengukuran lapangan sehingga akurasi model masih bergantung pada asumsi, kondisi batas, dan parameter yang digunakan dalam simulasi.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan analisis dengan mengevaluasi pengaruh masing-masing komponen pembebanan, seperti tekanan internal, beban operasi, temperatur, dan beban lingkungan, secara terpisah terhadap respons struktural *saddle support*. Selain itu, analisis kelelahan (*fatigue analysis*) akibat pembebanan siklik perlu dilakukan mengingat bejana tekan pada kondisi operasi aktual sering mengalami fluktuasi tekanan dan temperatur. Pengembangan studi parametrik menggunakan metode optimasi berbasis algoritma, seperti *Genetic Algorithm*, *Response Surface Methodology*, atau *Topology Optimization*, juga dapat dipertimbangkan untuk memperoleh konfigurasi *saddle support* yang lebih efisien dari sisi kekuatan struktur, penggunaan material, dan umur layan. Validasi eksperimental maupun perbandingan dengan data lapangan juga diperlukan untuk meningkatkan tingkat keandalan model numerik yang dikembangkan serta memperkuat penerapan hasil penelitian pada perancangan bejana tekan di industri maupun pada pengembangan bejana tekan untuk aplikasi penyimpanan gas pada sistem energi terbarukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Boma Bisma Indra (BBI) yang telah memberikan dukungan sarana dan prasarana untuk melakukan penelitian ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan dukungan kerja sama dari PT Boma Bisma Indra (Persero) melalui penyediaan data teknis, spesifikasi desain, dan informasi yang diperlukan sebagai dasar pemodelan bejana tekan. Data yang digunakan dalam penelitian merupakan data yang diperoleh melalui izin kerja sama dengan perusahaan dan digunakan hanya untuk kepentingan penelitian ilmiah. Seluruh proses analisis numerik, pemodelan, pengolahan data, interpretasi hasil, serta penyusunan naskah dilakukan secara mandiri oleh penulis tanpa intervensi dari pihak perusahaan. PT Boma Bisma Indra (Persero) tidak memengaruhi metode penelitian, hasil analisis, maupun kesimpulan yang disajikan dalam artikel ini. Dengan demikian, penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan yang dapat memengaruhi objektivitas, integritas, maupun independensi penelitian. Keterlibatan pihak industri semata-mata bertujuan mendukung penyediaan data teknis sehingga hasil penelitian memiliki relevansi yang lebih tinggi terhadap praktik perancangan bejana tekan di industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Agale, C. M., & Awachat, P. N. (2017). Finite Element Analysis of Horizontal Pressure Vessels Saddle. *International Journal of Innovations in Engineering and Science*, 2(2), 7–13.
- Anggara, F. (2022). Perancangan Dan Analisis Tegangan Pressure Vessel Horizontal Separator Dengan Metode Elemen Hingga Design And Stress Analysis Pressure Vessel Horizontal. 7(2), 83–97.
- Anggraini, L., Hidayat, R., Sukwadi, R., & Hernawan, R. (2023). Modeling and Static Analysis of Pressure Vessel in Full Welded Connections. 25(1), 33–39.
- Basic, M., Moss, D. R. (2012). *Pressure Vessel Design Manual 4 ed*. Butterworth-Heinemann (Elsevier).
- Gophane, I., Dharashivkar, N., Mulik, P., & Patil, P. (2024). Theoretical and Finite Element Analysis of Pressure Vessel. *Indian Journal of Science and Technology*, 17(12), 1148–1158.
- Hadi, I. (2025). Stress analysis in vessels using finite element method. *Bina: Jurnal Pembangunan Daerah*, 3(2), 104–114.

- Hafiz, A., Rosli, A., & Muhammad, A. (2021). *Design Optimization of Saddle Support for The High-Capacity Pressure Vessel Using Finite Element Analysis*. 2(2), 1079–1089.
- Hazizi, K., & Ghaleeh, M. (2023). Design and Analysis of a Typical Vertical Pressure Vessel Using ASME Code and FEA Technique. *MDPI Journals*, 7(3), 78.
- Huang, Y., Wang, X., Liu, Z., You, Y., & Ma, H. (2024). Design of Inner Ribs with Unequal Stiffness for Deep-Sea Highly Pressure-Resistant Cylindrical Shells and Utilizing NSGA-2 for Lightweight Optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7), 26.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. OECD Publishing.
- Jadhav, R. P., G. Kamble, Y. G., Mahajan, M. N., & Rathot, V. P. (2025). Comparative Analysis of Circumferential Stress in Horizontal Pressure Vessels Using Finite Element. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 13(1 jan 2025), 1340–1345.
- Mykhailiuk, V., Liakh, M., Deineha, R., Matviienkiv, O., Pawlik, J., & Dzienniak, D. (2024). Optimization Of The Support. *Silesian University Of Technology Publishing House*, 2(202), 48–58.
- Paul, P. R., Chowdary, V. L. (2020). And Engineering Trends Design And Static Analysis Of Different Pressure Vessels And Materials Using Fem Method. *International Journal Of Advance Scientific Research And Engineering Trends*, 5(7), 93–99.
- Pinto, R., & Neto, M. (2025). Pressure Vessels Structural Integrity Assessment Using Failure Analysis Diagrams Avaliação da Integridade Estrutural de Vasos de Pressão com a Utilização dos Diagramas de Análise de Falhas. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 13(1), 1–19.
- Solangi, E., Albarody, T. M. B., Al-challabi S., & Ali, S. (2024). Design and Failure Analysis of a Vacuum Pressure Vessel for Aerospace Applications using Finite Element Analysis (FEA). *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(6), 17888–17893.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2023). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels* (2023 ed). ASME.
- Zhang, X., Hu, Y., Shi, J., Liang, H., & Xu, Y. (2022). A safety assessment approach to pressure vessels based on machine learning. *Frontiers in Materials*, 9(November), 1–12.