

Analisis Desain Kekuatan Struktur *Saddle Support* Pressure Vessel Akibat Beban Gelombang Pada Kapal Offshore Menggunakan ANSYS

Fina Hadi Fitriana^{*1}, Ebeng Sugondo 1^{*} and Siti Adriani 2^{*}

*** Politeknik Negeri Batam**

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: finahadifitriana@email.com

Abstrak

Pressure vessel merupakan peralatan pada industri *offshore* yang digunakan untuk menyimpan fluida bertekanan dan ditopang oleh *saddle support* sebagai penyangga utama. Selama beroperasi, *saddle support* menerima kombinasi gaya gravitasi, tekanan internal, dan tekanan gelombang laut sehingga perlu dievaluasi untuk mengetahui tingkat keamanan strukturnya. Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan struktur *saddle support pressure vessel* pada kapal *offshore* akibat variasi beban gelombang menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) berbasis ANSYS *Mechanical*. Simulasi dilakukan menggunakan material ASTM SA-516 Grade 70 dengan *gravity* dan tekanan internal sebesar 1,471 MPa yang dijaga tetap, sedangkan pengaruh gelombang dimodelkan sebagai *equivalent static wave pressure* sebesar 10,06 kPa, 30,17 kPa, dan 50,28 kPa. Parameter yang dianalisis meliputi *equivalent stress*, *total deformation*, *equivalent total strain*, dan *safety factor*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan tekanan gelombang menyebabkan *equivalent stress*, *total deformation*, dan *equivalent total strain* menurun, sedangkan nilai *safety factor* meningkat dari 1,0804 menjadi 1,1163. Konsentrasi tegangan tertinggi tetap berada pada sambungan *nozzle* dan *shell*. Seluruh nilai *equivalent stress* masih berada di bawah *yield strength* material sebesar 260 MPa dan nilai *safety factor* lebih besar dari satu, sehingga struktur masih berada pada daerah elastis serta memenuhi persyaratan kekuatan terhadap kombinasi tekanan internal, gaya gravitasi, dan *equivalent static wave pressure* pada kondisi operasi.

Kata kunci: Pressure Vessel, Saddle Support, Finite Element Analysis (FEA), Beban Gelombang

Abstract

Pressure vessels are widely used in the offshore industry to store pressurized fluids and are commonly supported by saddle supports. During operation, the saddle support is subjected to the combined effects of gravity, internal pressure, and wave loading, making structural evaluation essential to ensure safe operation. This study analyzes the structural strength of a saddle support pressure vessel on an offshore vessel under different wave loading conditions using the Finite Element Analysis (FEA) method in ANSYS Mechanical. ASTM SA-516 Grade 70 was used as the material, while gravity and an internal pressure of 1.471 MPa were kept constant. The wave effect was represented by equivalent static wave pressures of 10.06 kPa, 30.17 kPa, and 50.28 kPa. The evaluated parameters were equivalent stress, total deformation, equivalent total strain, and safety factor. The results showed that increasing the wave pressure reduced the equivalent stress, total deformation, and equivalent total strain, while the safety factor increased from 1.0804 to 1.1163. The highest stress concentration consistently occurred at the nozzle-shell junction. All equivalent stress values remained below the material yield strength of 260 MPa, and the safety factor remained greater than one, indicating that the structure stayed within the elastic region and satisfied the required strength criteria under the combined effects of internal pressure, gravity, and equivalent static wave pressure.

Keywords : Pressure Vessel, Saddle Support, Finite Element Analysis (FEA), Wave Loading

1 Pendahuluan

Industri *offshore* mengalami perkembangan yang pesat seiring meningkatnya kebutuhan energi global, khususnya minyak dan gas bumi. Berdasarkan laporan *International Energy Agency* (IEA), kebutuhan energi global diproyeksikan meningkat lebih dari 25% hingga tahun 2040 [1]. Kondisi ini mendorong penggunaan berbagai struktur *offshore* seperti *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO), *platform* lepas pantai, serta *pressure vessel*. Pada lingkungan *offshore*, *pressure vessel* umumnya dipasang pada struktur kapal atau *platform* dengan menggunakan *saddle support* sebagai komponen penyangga utama. *Saddle support* berfungsi menopang berat *pressure vessel* beserta fluida yang tersimpan di dalamnya sekaligus meneruskan seluruh gaya yang bekerja menuju struktur kapal. Selama proses operasi, *saddle support* menerima kombinasi pembebanan berupa gaya gravitasi akibat berat *pressure vessel*, tekanan internal akibat fluida yang berada di dalam *vessel*, serta beban eksternal yang berasal dari gelombang laut [2]. Namun, penelitian ini tidak memodelkan gerakan kapal tersebut secara langsung, pengaruh gelombang disimulasikan melalui variasi tekanan gelombang (*equivalent static pressure*) sebagai beban statik untuk menganalisis respons kekuatan struktur *saddle support*. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan konsentrasi tegangan dan deformasi pada struktur *saddle support*. Dalam jangka panjang, pembebanan gelombang yang terjadi secara berulang juga dapat memicu terjadinya kelelahan material (*fatigue failure*), yang diawali dengan terbentuknya retak mikro dan berkembang menjadi retak makro apabila kondisi tegangan melampaui batas ketahanan material [3-4]. Oleh karena itu, evaluasi terhadap distribusi tegangan, regangan, deformasi, dan tingkat keamanan struktur menjadi langkah awal yang penting untuk menilai kemampuan *saddle support* dalam menahan kombinasi pembebanan selama kondisi operasi di lingkungan *offshore*. Selain karakteristik pembebanan, pemilihan material juga menjadi faktor yang sangat menentukan dalam meningkatkan keandalan struktur *saddle support*. Material ASTM SA-516 Grade 70 [5] dipilih pada penelitian ini karena merupakan baja karbon yang banyak digunakan pada *pressure vessel* serta memiliki kombinasi kekuatan, keuletan, kemampuan las, dan ketahanan terhadap pembebanan siklik yang baik sehingga sesuai dengan ketentuan ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section VIII [6]. Dalam konteks rekayasa modern, metode numerik *Finite Element Analysis* (FEA) telah menjadi pendekatan yang banyak digunakan untuk mengevaluasi respon struktur terhadap berbagai kondisi pembebanan. *Software* ANSYS mampu memprediksi distribusi tegangan, deformasi, regangan, hingga faktor keamanan (*safety factor*) secara numerik dengan tingkat akurasi yang baik [7]. Selain itu, perubahan tinggi gelombang dapat memengaruhi respons struktur, khususnya distribusi tegangan pada *saddle support*. Semakin besar beban gelombang yang bekerja, semakin besar pula potensi perubahan respons struktur sehingga diperlukan evaluasi untuk menilai kemampuan *saddle support pressure vessel* dalam menahan kombinasi tekanan internal, gaya gravitasi, dan *equivalent static wave pressure* selama operasi pada lingkungan *offshore* [8]. Meskipun berbagai penelitian telah membahas analisis struktur *offshore* menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA), sebagian besar penelitian masih berfokus pada struktur seperti pipa bawah laut, *riser*, *jacket platform*, maupun *pressure vessel* secara umum. Kajian yang secara khusus mengevaluasi kekuatan struktur *saddle support pressure vessel* pada kapal *offshore* akibat beban gelombang masih relatif terbatas. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu hanya mempertimbangkan beban statis atau tekanan internal sebagai kondisi pembebanan, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi operasi aktual yang melibatkan kombinasi tekanan internal, gaya gravitasi, dan tekanan gelombang statik ekuivalen (*equivalent static wave pressure*) sebagai representasi pengaruh gelombang laut [8-9]. Padahal, *saddle support* merupakan komponen utama yang menopang *pressure vessel* dan menerima akumulasi gaya dari kondisi operasi maupun pengaruh gerakan kapal akibat gelombang laut. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang secara khusus menganalisis respon struktur *saddle support* terhadap variasi beban gelombang menggunakan simulasi ANSYS dengan tekanan internal dan gaya gravitasi sebagai kondisi operasi tetap, sehingga diperoleh evaluasi yang lebih representatif terhadap tingkat keamanan dan kelayakan desain berdasarkan nilai *safety factor*.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur *saddle support pressure vessel* pada kapal *offshore* akibat pengaruh variasi beban gelombang laut menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) pada *software* ANSYS Mechanical. Analisis dilakukan dengan mengevaluasi nilai *safety factor* sebagai indikator utama dalam menentukan tingkat keamanan dan kelayakan desain sesuai standar rekayasa. Penelitian ini dibatasi pada analisis kekuatan struktur *saddle support pressure vessel* menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) berbasis perangkat lunak ANSYS Mechanical. Model *pressure vessel* diasumsikan berbentuk silinder horizontal sederhana dengan material ASTM SA-516 Grade 70 yang dianggap homogen, isotropik, dan berperilaku elastis linier sesuai sifat material yang digunakan dalam simulasi. Simulasi dilakukan dengan kondisi operasi berupa gaya gravitasi dan tekanan internal yang dijaga tetap pada setiap variasi pembebanan, sedangkan pengaruh gelombang laut direpresentasikan sebagai tekanan statik ekuivalen (*equivalent static wave pressure*) yang dihitung berdasarkan variasi tinggi gelombang dan diterapkan pada permukaan luar *shell pressure vessel*. Penelitian

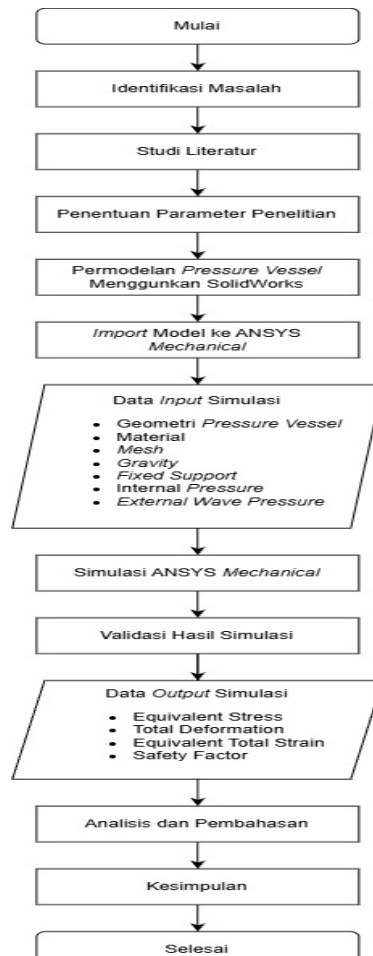
ini tidak mempertimbangkan pengaruh korosi, degradasi material, tegangan sisa akibat proses fabrikasi, pengaruh temperatur, interaksi fluida-struktur (*fluid-structure interaction*), maupun pembebanan dinamis akibat gerakan kapal seperti *heave*, *pitch*, dan *roll*. Selain itu, penelitian ini juga tidak mencakup analisis kelelahan material (*fatigue analysis*), sehingga umur lelah (*fatigue life*), akumulasi kerusakan (*cumulative damage*), kurva S-N, maupun evaluasi menggunakan *Palmgren-Miner Rule* tidak dianalisis. Evaluasi kekuatan struktur hanya didasarkan pada parameter *Equivalent Stress*, *Total Deformation*, *Equivalent Total Strain*, dan *Safety Factor* sebagai hasil analisis statik. Dengan batasan tersebut, penelitian difokuskan pada penilaian respons struktur *saddle support* terhadap kombinasi tekanan internal, gaya gravitasi, dan tekanan gelombang statik ekuivalen (*equivalent static wave pressure*) sebagai representasi pengaruh gelombang laut. Dengan demikian, batasan ini diharapkan mampu menjaga ruang lingkup penelitian tetap terarah dan relevan terhadap tujuan analisis yang ingin dicapai. Manfaat penelitian ini diharapkan dapat memperkaya kajian mengenai respons kekuatan struktur *saddle support pressure vessel* terhadap kombinasi tekanan internal, gaya gravitasi, dan tekanan gelombang statik ekuivalen (*equivalent static wave pressure*) menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) berbasis *ANSYS Mechanical*.

2 Metodologi Penelitian

2.1 Saddle Support Pressure Vessel

Pressure vessel merupakan bejana tertutup yang digunakan untuk menyimpan fluida bertekanan. Pada penelitian ini, fokus analisis tidak ditujukan pada keseluruhan *pressure vessel*, melainkan pada struktur *saddle support* sebagai komponen penyangga utama yang menerima kombinasi pembebanan berupa gaya gravitasi, tekanan internal sebagai kondisi operasi, serta beban gelombang laut sebagai pembebanan eksternal. Untuk mengevaluasi respon struktur tersebut digunakan metode numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan *software ANSYS Mechanical*, yang mampu memperoleh distribusi tegangan dan deformasi [10], serta nilai *safety factor* secara detail. Dengan pendekatan ini, data penelitian diperoleh dari hasil simulasi terkomputerisasi yang merepresentasikan kondisi aktual struktur.

2.2 Diagram Alur Penelitian



Gambar 1: Diagram alur penelitian

Penelitian ini diawali dengan identifikasi masalah terkait pengaruh beban gelombang laut terhadap kekuatan struktur *saddle support pressure vessel* pada kapal *offshore*, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur sebagai dasar penyusunan landasan teori, standar, dan penelitian terdahulu. Tahap selanjutnya adalah permodelan, yang meliputi penentuan parameter penelitian, pembuatan model 3 dimensi *pressure vessel* menggunakan SolidWorks, serta penentuan material ASTM SA-516 Grade 70. Model kemudian diimpor ke ANSYS *Mechanical* untuk dilakukan proses meshing dan pemberian *boundary condition* berupa *gravity*, *fixed support*, *internal pressure*, dan *external wave pressure* sesuai kondisi operasi. Selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk memperoleh respons struktur akibat variasi beban gelombang. Data hasil simulasi kemudian diambil pada area kritis menggunakan *Probe Tool* dengan parameter yang dianalisis meliputi *equivalent stress*, *total deformation*, *equivalent total strain*, dan *safety factor*. Hasil simulasi selanjutnya divalidasi dengan membandingkan nilai tegangan maksimum terhadap tegangan izin (*allowable stress*) material berdasarkan ASME BPVC *Section VIII Division 2*, kemudian dilakukan analisis dan pembahasan untuk mengevaluasi pengaruh variasi beban gelombang terhadap kekuatan struktur *saddle support*. Tahap akhir penelitian adalah penyusunan kesimpulan yang disusun berdasarkan hasil analisis untuk menjawab tujuan penelitian serta memberikan rekomendasi terhadap pengembangan desain *saddle support pressure vessel* pada aplikasi *offshore*.

2.3 Pengambilan Data

Pada tahap pengambilan data, terdapat tahap pengambilan data desain dan tahap pengambilan data simulasi. Terdapat 3 standar acuan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

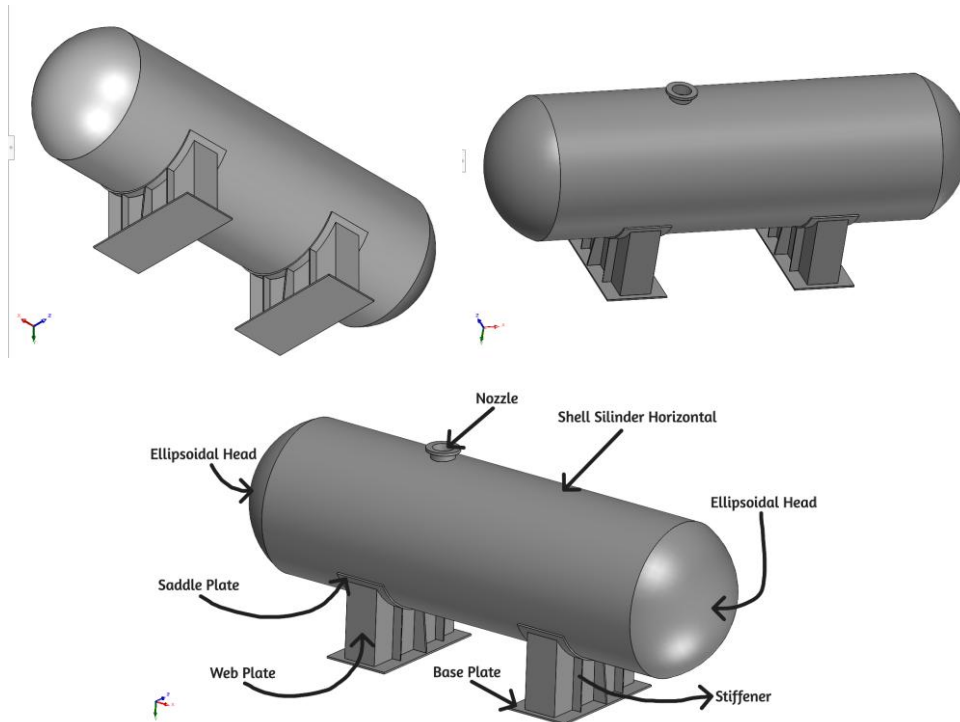
- ASME BPVC *Section VIII Division 1* [6], digunakan sebagai acuan dalam penentuan desain awal *pressure vessel* melalui pendekatan *Design by Rule*, sehingga parameter dan konfigurasi awal *pressure vessel* ditentukan berdasarkan ketentuan desain yang digunakan sebelum model dibuat menggunakan SolidWorks.
- ASME BPVC *Section VIII Division 2* [11], digunakan sebagai acuan dalam evaluasi hasil analisis struktur melalui pendekatan *Design by Analysis*, terutama dalam membandingkan tegangan hasil simulasi (*equivalent stress*) dengan batas tegangan yang digunakan sebagai kriteria penerimaan atau evaluasi untuk mengetahui apakah struktur masih memenuhi persyaratan kekuatan.
- DNV-RP-C205 [12], digunakan sebagai acuan dalam aspek kondisi lingkungan dan pembebanan gelombang pada struktur *offshore*. Dalam penelitian ini, pengaruh gelombang tidak dimodelkan melalui gerakan kapal secara langsung, tetapi direpresentasikan sebagai *equivalent static wave pressure* yang dihitung menggunakan pendekatan tekanan hidrostatik.

2.3.1 Pengambilan Data Desain SolidWorks

- Menentukan parameter awal desain *pressure vessel*, berdasarkan standar yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada ASME *Boiler and Pressure Vessel Code* (ASME BPVC *Section VIII Division 1*) untuk perhitungan awal (*Design by Rule*) serta data parameter desain yang bersumber dari sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter Desain [13]

Parameter	Nilai
<i>Outside Diameter (OD)</i>	1628 mm
<i>Inside Diameter (ID)</i>	1600 mm
<i>Shell Length Total</i>	4500 mm
<i>Shell & Head Thickness</i>	14 mm
<i>Saddle Width</i>	1460.44 mm
<i>Saddle Center Distance</i>	1066.76 mm
<i>Saddle Plate Thickness</i>	19.05 mm
<i>Web Plate Height</i>	558.79 mm
<i>Web Plate Thickness</i>	9.53 mm
<i>Base Plate Height</i>	152.40 mm
<i>Base Plate Width</i>	279.40 mm
<i>Base Plate Thickness</i>	19.05 mm



Gambar 2: Model 3D Pressure Vessel SolidWorks

- b) Pembuatan Model geometri *pressure vessel* pada penelitian ini dirancang menggunakan perangkat lunak SolidWorks dalam bentuk tiga dimensi (3D). Model terdiri atas *shell silinder horizontal*, 2 *ellipsoidal head*, 1 *nozzle*, dan 2 *saddle support* sebagai komponen utama yang dianalisis. Geometri dibuat berdasarkan parameter desain yang telah ditentukan sehingga dapat merepresentasikan kondisi aktual *pressure vessel* pada kapal *offshore*.
- c) Setelah model 3 dimensi *pressure vessel* selesai dibuat dan material ASTM SA-516 Grade 70 ditetapkan, dilakukan ekstraksi data menggunakan fitur *Mass Properties* pada SolidWorks. Data yang diperoleh meliputi volume, luas permukaan (*surface area*), massa (*mass*), dan pusat massa (*center of gravity*).

Tabel 2. Data Hasil Mass Properties penelitian yang dilakukan

Parameter	Nilai
Solid Volume	1.04 m ³
Volume Internal	10.12 m ³
Empty Mass	8146.89 kg
Surface Area	64.35 m ²
Center of Gravity X	0.00
Center of Gravity Y	0.61
Center of Gravity Z	0.00

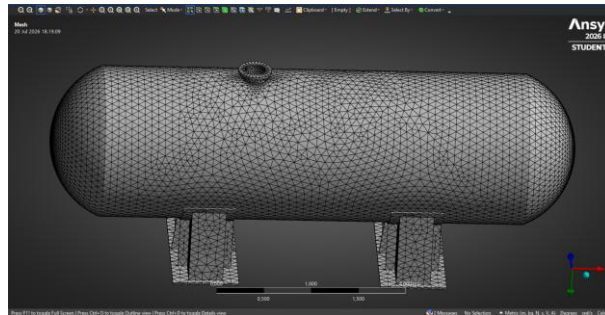
- d) Data massa hasil SolidWorks digunakan sebagai dasar penerapan pembebanan *gravity*. Pada penelitian ini digunakan *empty mass pressure vessel* diperoleh dari hasil *Mass Properties* pada SolidWorks sebesar 8146,89 kg. Selanjutnya massa fluida operasi dihitung berdasarkan volume *internal pressure vessel* dengan kondisi pengisian 80% sebesar 3991,33 kg sehingga diperoleh *operating mass* yang digunakan sebagai dasar pembebanan gravitasi pada simulasi ANSYS.
- e) *Export* model 3D ke *software* ANSYS dalam format STEP AP214 untuk digunakan pada proses simulasi.

2.3.2 Pengambilan Data Simulasi ANSYS

- a) *Import* dan validasi geometri, dalam proses simulasi menggunakan *software* ANSYS *Workbench Mechanical* dengan metode simulasi numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA). Selanjutnya dilakukan pengecekan error geometri dan ketidaksesuaian dimensi, jika hasil tidak valid maka hasil simulasi tidak akurat.

Tabel 3. Data Mesh

Parameter	Nilai
<i>Mesh Type</i>	<i>Tetrahedral & Hexahedral</i>
<i>Global Mesh Size</i>	120 mm
<i>Face Sizing Saddle Mesh Size</i>	80 mm
<i>Face Sizing Shell & Head Mesh Size</i>	80 mm
<i>Face Sizing Nozzle Mesh Size</i>	80 mm
Jumlah <i>Nodes</i>	122391
Jumlah <i>Elements</i>	63583



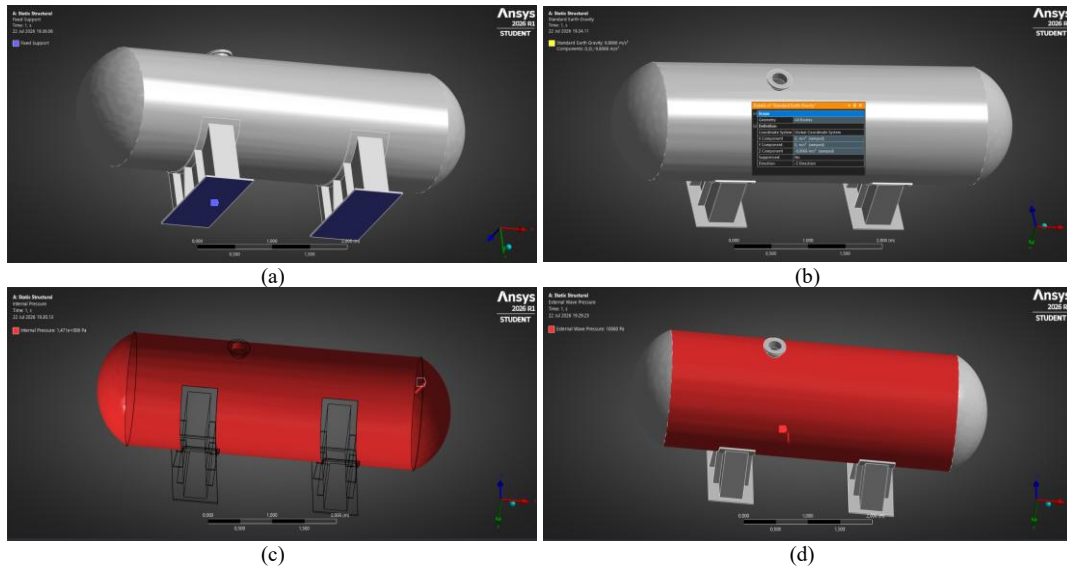
Gambar 3: Pemberian Mesh

- b) Proses *meshing* merupakan tahap pembagian model menjadi elemen-elemen hingga yang lebih kecil untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat. *Mesh* dibuat menggunakan metode *Patch Conforming* dengan dominasi elemen *tetrahedral* yang dikombinasikan dengan elemen *hexahedral* pada bagian tertentu sesuai algoritma ANSYS *Mechanical*. Ukuran *mesh* ditentukan berdasarkan proses evaluasi hingga diperoleh jumlah elemen dan node yang masih memenuhi batas lisensi ANSYS *Student* serta mampu menghasilkan solusi yang stabil.
- c) *Input* properti material, data properti material ini menentukan respon struktur terhadap beban. Data yang dimasukkan dalam properti material yaitu Baja Karbon SA-516 *Grade 70* [5] dengan karakteristik sebagai berikut:

Tabel 4. Properti Material [13-14]

Properti	Nilai
<i>Density</i>	7850 kg/m ³
<i>Densitas LPG</i>	493 kg/m ³
Modulus Elastisitas	200 Gpa
Poisson's Ratio	0.3
<i>Yield Strength</i>	260 Mpa

- d) Pemberian *boundary condition* dan beban (*loading*), dilakukan untuk merepresentasikan kondisi operasi *pressure vessel* pada kapal *offshore*. Simulasi dilakukan menggunakan modul *Static Structural* ANSYS dengan kombinasi *Boundary condition* maupun pembebanan berupa *fixed support*, *gravity*, *internal pressure*, dan *external wave pressure*. *Fixed support* diterapkan pada bagian bawah *base plate saddle support* yang diasumsikan terikat pada struktur *deck* kapal *offshore*. *Gravity* sebesar 9,81 m/s² diberikan untuk merepresentasikan pengaruh berat struktur selama operasi. *Internal pressure* sebesar 1,471 Mpa diterapkan pada permukaan bagian dalam *pressure vessel* sebagai representasi tekanan fluida operasi. Sementara itu, *external wave pressure* pengaruh gelombang laut dimodelkan sebagai *equivalent static wave pressure* yang diberikan pada permukaan luar *shell pressure vessel* menggunakan fitur *Pressure* pada ANSYS *Mechanical* dengan metode *Normal To* dan *Surface Effect*, sehingga tekanan bekerja tegak lurus terhadap permukaan shell sesuai orientasi geometri model. Besarnya tekanan divariasikan menjadi 10,06 kPa, 30,17 kPa, dan 50,28 kPa yang masing-masing mewakili kondisi gelombang rendah, sedang, dan tinggi.



Gambar 4: Pemberian (a)Fixed Support (b)Gravity (c)Internal Pressure dan (d)External Wave Pressure

Tabel 5. Parameter Simulasi ANSYS [9,13,14]

Parameter	Nilai
Jenis Analisis	<i>Static Structural</i>
Material	<i>ASTM SA-516 Grade 70</i>
<i>Gravity</i>	9.81 m/s ²
<i>Operating Mass</i>	12.138,22 kg
<i>Pressure Internal</i>	1.471 MPa
<i>External Wave Pressure 1</i>	10.06 kPa
<i>External Wave Pressure 2</i>	30.17 kPa
<i>External Wave Pressure 3</i>	50.28 kPa
<i>Mesh Type</i>	<i>Tetrahedral & Hexahedral</i>
<i>Global Mesh Size</i>	120 mm
<i>Face Sizing Saddle Mesh Size</i>	80 mm
<i>Face Sizing Shell & Head Mesh Size</i>	80 mm
<i>Face Sizing Nozzle Mesh Size</i>	80 mm
<i>Fixed Support</i>	<i>Base plate saddle support</i>

Tabel 6. Variabel Penelitian [12,15]

Variasi	Tinggi Gelombang (m)	Tekanan Gelombang (kPa)
Gelombang Rendah	1 meter	10.06 kPa
Gelombang Sedang	3 meter	30.17 kPa
Gelombang Tinggi	5 meter	50.28 kPa

e) Perhitungan tekanan gelombang, dihitung menggunakan pendekatan tekanan hidrostatik:

$$P = \rho . g . H \quad (1)$$

Keterangan:

- $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- H = tinggi gelombang

- f) *Running* simulasi, merupakan proses *solving* atau program *controlled* dari *software* ANSYS. Setiap variasi tekanan gelombang dilakukan pada kondisi *gravity* dan internal *pressure* yang tetap sehingga pengaruh perubahan respon struktur hanya disebabkan oleh variasi *external wave pressure*. Data yang dihasilkan dari *running* simulasi yaitu distribusi tegangan, distribusi deformasi, dan nilai *safety factor*.

2.3.3 Pengambilan Data Hasil Simulasi ANSYS

- Tegangan (*Stress*), penelitian ini menggunakan distribusi tegangan (*von Mises stress*). Tegangan *von Mises* digunakan sebagai indikator utama dalam menentukan apakah struktur mengalami kegagalan plastis, yang menggunakan fitur *Solution, Equivalent Stress*. Data yang diambil yaitu nilai maksimum (MPa) dan lokasi titik kritis, dilakukan evaluasi terhadap titik kritis seperti sambungan dan area dengan konsentrasi tegangan tinggi, karena lokasi tersebut merupakan area paling rentan terhadap kegagalan [16].
- Deformasi, digunakan untuk menilai dan mengevaluasi perubahan bentuk struktur akibat pembebanan yang menggunakan fitur *Solution, total deformation*. Data yang diambil yaitu nilai deformasi maksimum (mm) dan pola deformasi struktur.
- Equivalent Total Strain*, regangan dianalisis menggunakan parameter *equivalent total strain* yang diperoleh melalui fitur *Solution* pada ANSYS *Mechanical*. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat regangan total yang terjadi pada struktur akibat kombinasi pembebanan *gravity*, *internal pressure*, dan *external wave pressure*. Nilai regangan maksimum digunakan sebagai indikator deformasi material selama pembebanan berlangsung.
- Safety factor* diperoleh menggunakan fitur *Safety Tool* pada ANSYS *Mechanical* yang menghitung faktor keamanan berdasarkan perbandingan antara tegangan luluh (*yield strength*) material ASTM SA-516 Grade 70 dengan tegangan ekuivalen (*Equivalent von Mises Stress*) hasil simulasi. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah nilai minimum *safety factor* karena menunjukkan kondisi paling kritis pada struktur
- Interpretasi *safety factor* dilakukan berdasarkan hasil evaluasi ANSYS *Mechanical*. Nilai *safety factor* yang semakin besar menunjukkan margin keamanan struktur yang semakin tinggi, sedangkan nilai *safety factor* kurang dari 1 mengindikasikan bahwa tegangan kerja telah melampaui tegangan luluh material sehingga struktur belum memenuhi kriteria keamanan berdasarkan kekuatan luluh material.
- Kontur distribusi hasil simulasi digunakan untuk mengidentifikasi lokasi terjadinya konsentrasi tegangan, deformasi maksimum, dan daerah dengan nilai *safety factor* minimum sehingga dapat diketahui bagian struktur yang paling kritis terhadap pembebanan gelombang.

2.3.4 Penentuan Titik Pengambilan Data

- Data hasil simulasi diambil pada lokasi yang menunjukkan nilai maksimum dan minimum dari parameter hasil simulasi, yaitu *Equivalent Stress*, *Total Deformation*, *Equivalent Total Strain*, dan *Safety Factor*.
- Selain nilai maksimum dan minimum, dilakukan identifikasi terhadap lokasi terjadinya konsentrasi tegangan, deformasi maksimum, serta nilai *safety factor* minimum berdasarkan kontur hasil simulasi (*contour plot*).
- Penentuan titik pengambilan data dilakukan karena distribusi tegangan pada struktur *pressure vessel* tidak merata akibat pengaruh kombinasi pembebanan, sehingga diperlukan identifikasi terhadap daerah yang mengalami konsentrasi tegangan sebagai dasar evaluasi kekuatan struktur.

2.3.5 Teknik Ekstraksi Data

- Data hasil simulasi diperoleh menggunakan fitur *Result* pada ANSYS *Mechanical*, yaitu *Equivalent Stress*, *Total Deformation*, *Equivalent Total Strain*, dan *Safety Factor*.
- Nilai maksimum dan minimum diperoleh secara otomatis melalui fitur *Probe (Maximum/Minimum)* pada setiap parameter hasil simulasi. Selanjutnya lokasi terjadinya nilai tersebut diidentifikasi berdasarkan kontur distribusi (*contour plot*) yang dihasilkan ANSYS *Mechanical*.
- Data yang digunakan dalam penelitian meliputi nilai numerik maksimum dan minimum, lokasi terjadinya nilai kritis, serta visualisasi kontur distribusi yang digunakan sebagai dasar analisis dan pembahasan.

2.3.6 Pengambilan Data Variasi (Eksperimen Numerik)

- Simulasi dilakukan 3 kali yang dirubah hanya *external wave pressure*, dalam simulasi ini yang dirubah hanya variasi *external wave pressure* (gelombang rendah, gelombang sedang, gelombang tinggi). Variasi yang dilakukan adalah variasi parameter gelombang, meliputi variasi tinggi gelombang (meter) yang dihitung menggunakan pendekatan tekanan hidrostatik sesuai dengan Tabel 6. Total hasil simulasi yaitu ada 12 nilai *output* dalam 3 kali simulasi berulang.
- Tujuannya yaitu melihat pengaruh parameter terhadap hasil [17].

2.3.7 Pengelolaan Data Validasi

- Tingkat keamanan struktur dievaluasi berdasarkan nilai *safety factor* yang diperoleh dari fitur *Safety Tool* pada ANSYS Mechanical. Parameter ini digunakan sebagai indikator utama untuk menilai tingkat keamanan dan kelayakan desain struktur. Semakin besar nilai *Safety Factor*, semakin besar cadangan kekuatan struktur dalam menahan beban kerja.
- Selain itu, nilai *equivalent stress* dibandingkan dengan *allowable stress* material sesuai prinsip evaluasi pada ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section VIII Division 2. Apabila *equivalent stress* lebih kecil daripada tegangan izin, struktur dinyatakan masih memenuhi persyaratan kekuatan. Sebaliknya apabila nilainya melebihi tegangan izin, struktur perlu dievaluasi.

2.3.8 Penyusunan Data Akhir Penelitian dan Penyajian Data

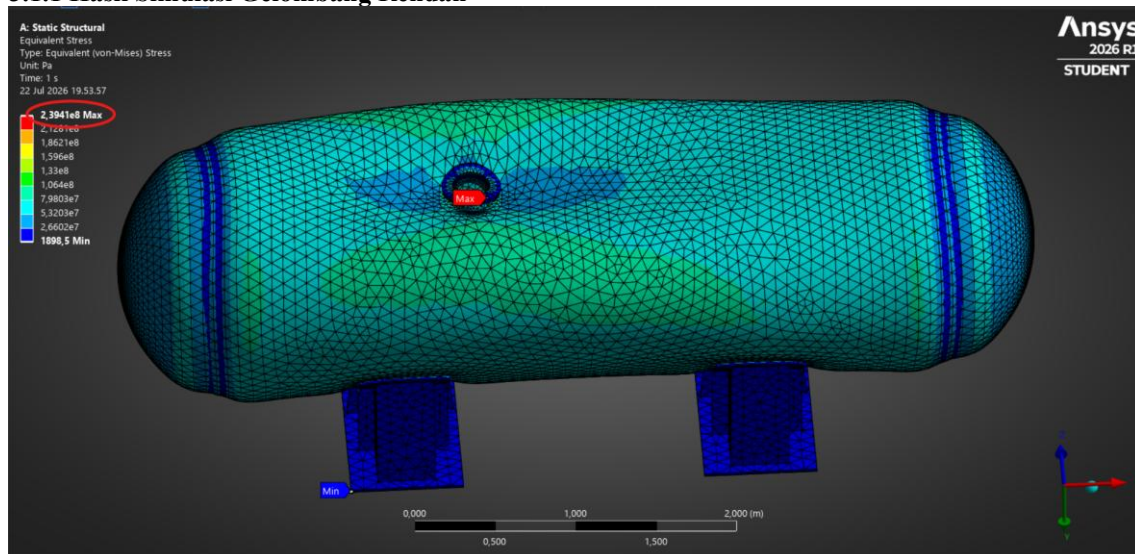
- Output* simulasi pada ANSYS Mechanical berupa nilai minimum *Safety Factor*, nilai maksimum *Equivalent von Mises stress*, nilai maksimum *Total Deformation*, nilai maksimum *Equivalent Total Strain*. Distribusi tegangan dan deformasi, regangan digunakan sebagai parameter pendukung untuk menjelaskan respon struktur terhadap variasi beban gelombang, sedangkan nilai *safety factor* digunakan sebagai parameter utama dalam mengevaluasi tingkat keamanan dan kelayakan desain *saddle support pressure vessel* sesuai dengan tujuan penelitian.
- Seluruh hasil simulasi disajikan dalam bentuk gambar hasil simulasi, tabel ringkasan, serta grafik hubungan antara variasi tinggi gelombang dengan parameter hasil simulasi. Format standar yang digunakan *safety factor* (tanpa satuan).

Pendekatan ini memungkinkan evaluasi struktur *saddle support pressure vessel* secara menyeluruh tanpa memerlukan pengujian eksperimental langsung, sehingga lebih efisien namun tetap memiliki tingkat akurasi tinggi. Dengan demikian, metodologi ini diharapkan mampu menghasilkan analisis yang valid.

3 Analisa Data dan Pembahasan

3.1 Analisa Hasil Simulasi

3.1.1 Hasil Simulasi Gelombang Rendah



Gambar 5: Hasil *Equivalent Stress* Pada Simulasi Gelombang Rendah

Simulasi pada kondisi gelombang rendah dilakukan dengan memberikan tekanan gelombang sebesar 10,06 kPa serta tekanan internal sebesar 1,471 MPa pada *pressure vessel*. Berdasarkan hasil analisis menggunakan ANSYS Mechanical, diperoleh *equivalent stress* maksimum sebesar $2,3941 \times 10^8$ Pa atau 239,41 MPa. Kontur tegangan menunjukkan bahwa nilai maksimum terkonsentrasi pada daerah sambungan antara *nozzle* dan *shell pressure vessel*, sedangkan bagian *shell*, *head*, dan *saddle support* mengalami tegangan yang lebih rendah. Konsentrasi tegangan pada lokasi tersebut dipengaruhi oleh adanya perubahan bentuk geometri dan pertemuan antar komponen, sehingga aliran tegangan menjadi tidak merata dan cenderung terpusat pada area sambungan. Untuk mengetahui apakah tegangan yang terjadi masih berada dalam batas kemampuan material, hasil simulasi dibandingkan dengan *yield strength* pada material logam yang bersifat *ductile material* ASTM SA-516 Grade 70 sebesar 260 Mpa. Kegagalan struktur umumnya diawali oleh terjadinya luluh (*yielding*) sebelum material mengalami patah. Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{equivalent stress maksimum } \sigma_{vm} &= 239,41 \text{ MPa} \\ \text{yield strength } \sigma_y &= 260 \text{ MPa} \end{aligned}$$

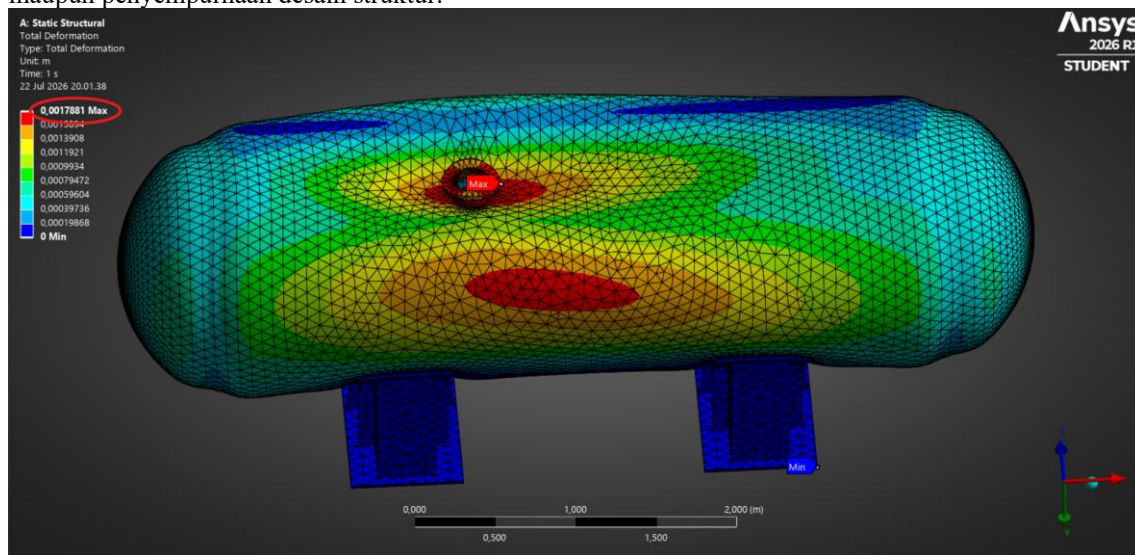
Selisih antara tegangan maksimum dan batas luluh material adalah:

$$260 - 239,41 = 20,59 \text{ MPa}$$

Sedangkan persentase pemanfaatan kekuatan material dapat dihitung menggunakan persamaan rumus matematika persentase dasar:

$$\frac{\sigma_{vm}}{\sigma_y} \times 100\% = \frac{239,41}{260} \times 100\% = 92,08\%$$

Perhitungan tersebut menunjukkan bahwa tegangan kerja yang terjadi telah mencapai sekitar 92,08% dari kemampuan luluh material. Dengan kata lain, material masih memiliki cadangan kekuatan sekitar 7,92% sebelum mencapai kondisi luluh, karena nilai *equivalent stress* pada kondisi gelombang rendah masih lebih kecil dari pada *yield strength*, maka berdasarkan kriteria luluh *von Mises (von mises yield criterion)* material masih bekerja pada daerah elastis. Kondisi ini menunjukkan bahwa *pressure vessel* masih mampu menerima kombinasi pembebanan berupa gaya gravitasi, tekanan internal, dan tekanan gelombang tanpa mengalami deformasi plastis. Meskipun demikian, area sambungan *nozzle* tetap menjadi bagian yang paling kritis sehingga perlu mendapat perhatian apabila di kemudian hari dilakukan peningkatan kapasitas operasi maupun penyempurnaan desain struktur.

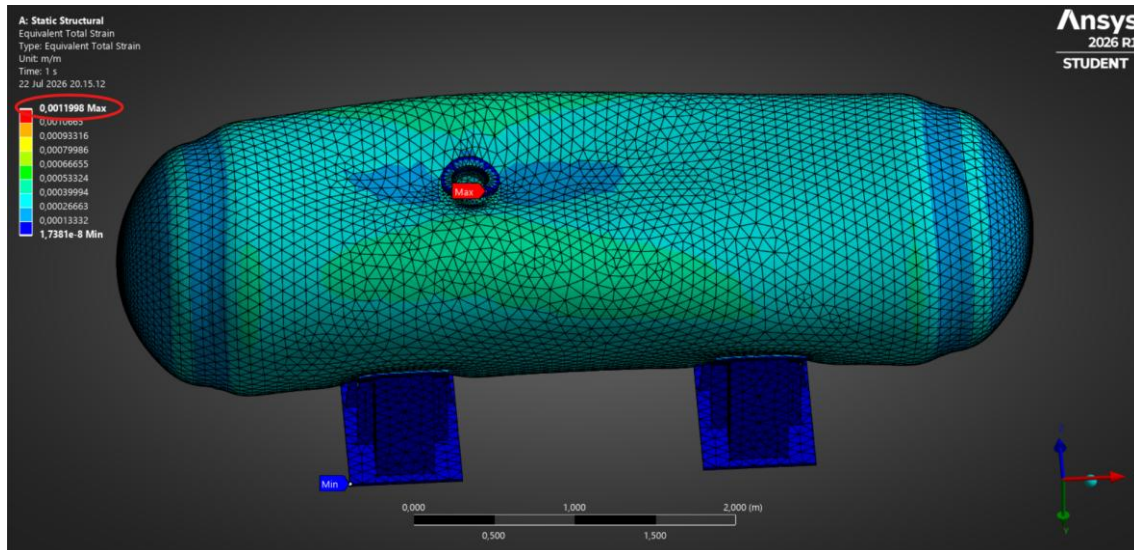


Gambar 6: Hasil Total Deformation Pada Simulasi Gelombang Rendah

Selain distribusi tegangan, simulasi pada kondisi gelombang rendah menghasilkan nilai *total deformation* maksimum sebesar 0,0017881 m atau 1,7881 mm. Berdasarkan kontur deformasi, perpindahan terbesar terlihat pada bagian atas *shell pressure vessel*, sedangkan perpindahan terkecil berada pada bagian bawah *base plate saddle support* yang diberi kondisi *fixed support*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa *saddle support* mampu menahan perpindahan struktur sehingga deformasi lebih banyak terjadi pada bagian *shell* yang menerima kombinasi tekanan internal dan tekanan gelombang. Apabila dibandingkan dengan panjang *pressure vessel* sebesar 4500 mm, maka deformasi maksimum yang terjadi hanya sebesar:

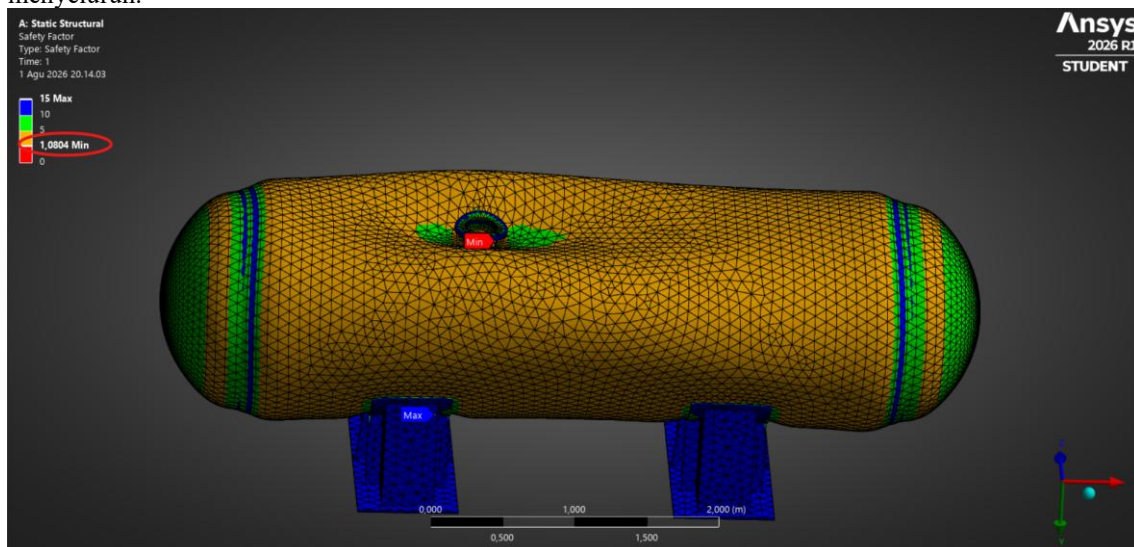
$$\frac{1,7881}{4500} \times 100\% = 0,0397\%$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa perubahan bentuk struktur relatif kecil dibandingkan ukuran keseluruhan *pressure vessel*. Besarnya deformasi pada kondisi gelombang rendah yang hanya sekitar 1,79 mm mengindikasikan bahwa struktur masih memiliki kekakuan yang baik sehingga bentuk geometrinya tetap dapat dipertahankan selama menerima pembebanan yang diberikan. Dengan demikian, kondisi operasi pada variasi gelombang rendah belum menimbulkan perubahan bentuk yang dapat memengaruhi stabilitas struktur *pressure vessel*.



Gambar 7: Hasil *Equivalent Total Strain* Pada Simulasi Gelombang Rendah

Simulasi pada kondisi gelombang rendah menunjukkan bahwa *equivalent total strain* maksimum sebesar 0,0011998. Berdasarkan kontur distribusi regangan, nilai maksimum berada pada daerah sambungan antara *nozzle* dan *shell pressure vessel*. Lokasi tersebut bertepatan dengan daerah yang mengalami *equivalent stress* maksimum, sehingga menunjukkan bahwa perubahan geometri pada sambungan menyebabkan distribusi tegangan dan regangan menjadi lebih terkonsentrasi dibandingkan bagian struktur lainnya. Kondisi ini umum dijumpai pada komponen yang memiliki perubahan penampang atau pertemuan beberapa elemen struktur karena aliran beban tidak lagi terdistribusi secara merata. Nilai regangan pada kondisi gelombang rendah yang diperoleh menunjukkan bahwa material masih mengalami deformasi elastis. Hal ini didukung oleh hasil *equivalent stress* pada kondisi gelombang rendah sebesar 239,41 MPa, yang masih berada di bawah *yield strength* material ASTM SA-516 Grade 70 sebesar 260 MPa. Selama tegangan kerja belum melampaui batas luluh material, hubungan antara tegangan dan regangan masih mengikuti *Hukum Hooke (Hooke's Law)*, sehingga perubahan bentuk yang terjadi diperkirakan masih bersifat sementara dan material masih dapat kembali ke kondisi semula setelah pembebanan dihilangkan. Kesesuaian antara lokasi *equivalent stress* maksimum pada kondisi gelombang rendah dan *equivalent total strain* maksimum pada kondisi gelombang rendah juga menunjukkan bahwa kedua parameter tersebut saling berkaitan dalam menggambarkan respons mekanik struktur. Daerah yang menerima konsentrasi tegangan lebih tinggi akan mengalami regangan yang lebih besar dibandingkan bagian lainnya. Oleh karena itu, parameter *equivalent total strain* pada kondisi gelombang rendah digunakan sebagai pendukung dalam mengevaluasi perilaku struktur, sehingga distribusi tegangan yang diperoleh dari hasil simulasi dapat dipahami secara lebih menyeluruh.



Gambar 8: Hasil *Safety Factor* Pada Simulasi Gelombang Rendah

Tingkat keamanan struktur dievaluasi menggunakan *Safety Tool* pada ANSYS Mechanical. Berdasarkan hasil simulasi pada kondisi gelombang rendah diperoleh *safety factor* minimum sebesar 1,0804. Untuk

material *ductile*, faktor keamanan dihitung menggunakan *yield strength* karena kegagalan umumnya diawali oleh terjadinya luluh, maka nilai tersebut dihitung berdasarkan perbandingan antara *yield strength* material dengan *equivalent von mises stress*, sehingga dapat menggambarkan besarnya cadangan kekuatan yang masih dimiliki struktur terhadap beban yang bekerja. Persamaan dari *Strength of Materials* faktor keamanan dinyatakan sebagai:

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vm}}$$

dengan:

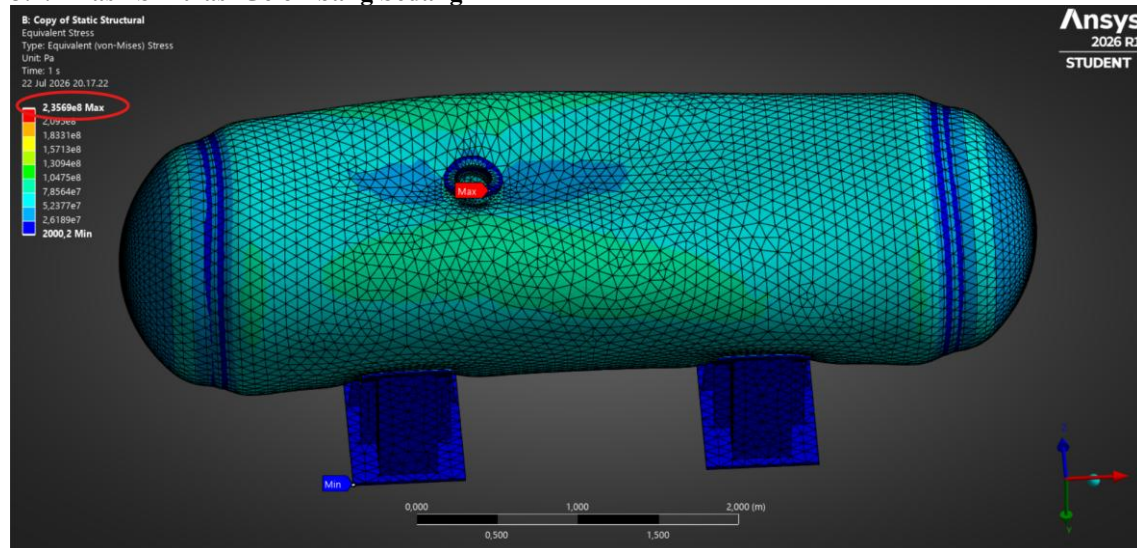
- SF = Safety Factor
- σ_y = Yield Strength material
- σ_{vm} = Equivalent von Mises Stress

Berdasarkan data hasil simulasi pada kondisi gelombang rendah menggunakan rumus diperoleh:

$$SF = \frac{260}{239,41} = 1,086$$

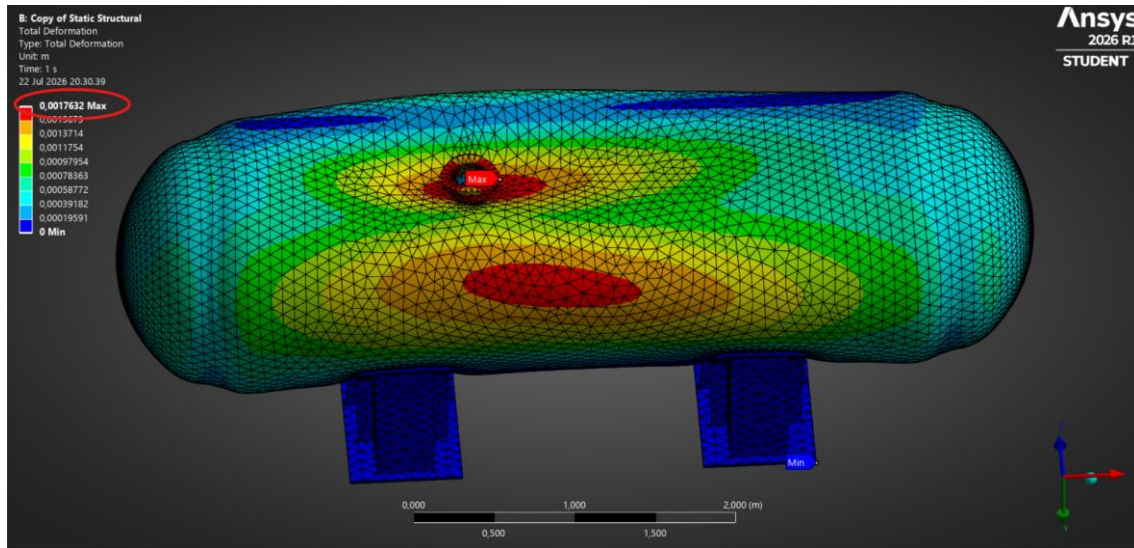
Hasil perhitungan manual sebesar 1,086 sangat mendekati nilai yang diperoleh ANSYS yaitu 1,0804. Perbedaan yang sangat kecil antara hasil perhitungan manual dan hasil simulasi ANSYS disebabkan oleh perbedaan metode evaluasi yang digunakan. Perhitungan manual hanya menggunakan satu nilai *equivalent stress* maksimum sebagai dasar perhitungan, sedangkan ANSYS menghitung distribusi tegangan pada seluruh elemen mesh selama proses analisis, kemudian menentukan nilai *safety factor* minimum dari keseluruhan model. Oleh karena itu, meskipun rumus yang digunakan memiliki konsep yang sama, hasil yang diperoleh dapat sedikit berbeda. Pada penelitian ini selisih kedua nilai tersebut sangat kecil sehingga tidak memengaruhi interpretasi hasil analisis. Nilai *safety factor* pada kondisi gelombang rendah menunjukkan bahwa tegangan kerja masih berada di bawah batas luluh material. Artinya, struktur masih mempunyai cadangan kekuatan untuk menahan pembebanan yang diberikan dan belum mengalami kegagalan akibat luluh (*yield failure*). Oleh karena itu, area sambungan antara *nozzle* dan *shell pressure vessel* perlu menjadi perhatian dalam proses evaluasi maupun pengembangan desain agar struktur memiliki tingkat keamanan yang lebih baik terhadap kemungkinan peningkatan beban pada kondisi operasi.

3.1.2 Hasil Simulasi Gelombang Sedang



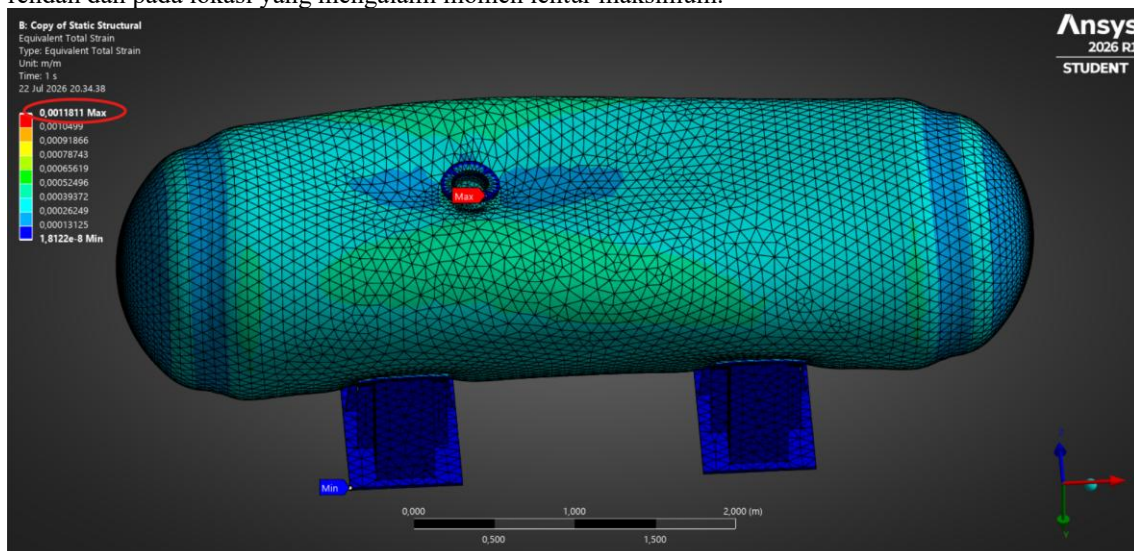
Gambar 9: Hasil *Equivalent Stress* Pada Simulasi Gelombang Sedang

Berdasarkan hasil simulasi ANSYS, kondisi gelombang sedang menghasilkan nilai *equivalent stress* maksimum sebesar 235,69 MPa. Nilai tegangan ini masih berada di bawah *yield strength* material ASTM SA-516 Grade 70 sebesar 260 MPa, sehingga material belum mengalami deformasi plastis. Tegangan maksimum tetap terkonsentrasi pada daerah sambungan antara *nozzle* dan *shell pressure vessel*. Kondisi tersebut terjadi karena perubahan geometri pada area tersebut menyebabkan distribusi tegangan menjadi tidak merata sehingga muncul konsentrasi tegangan. Jika dibandingkan dengan batas luluh material, masih terdapat selisih sebesar 24,31 MPa atau sekitar 9,35% dari nilai *yield strength*. Hal ini menunjukkan bahwa struktur masih memiliki kapasitas untuk menahan beban yang bekerja tanpa mengalami kegagalan akibat luluh. Dengan demikian, pembebanan kombinasi berupa tekanan internal sebesar 1,471 MPa, gravitasi, dan tekanan gelombang sedang sebesar 30,17 kPa masih dapat diterima oleh struktur *pressure vessel*.



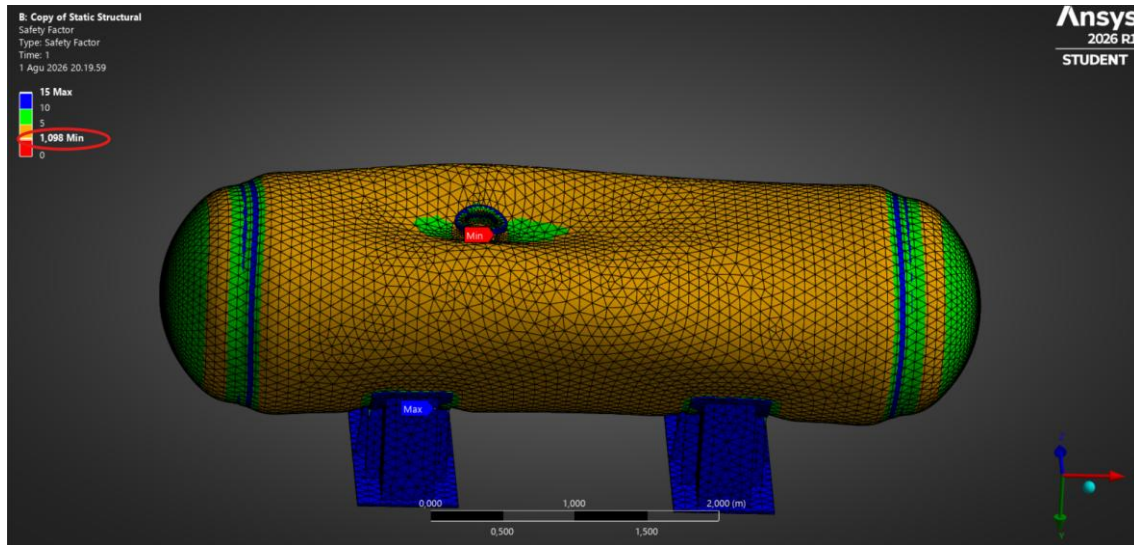
Gambar 10: Hasil *Total Deformation* Pada Simulasi Gelombang Sedang

Simulasi menunjukkan bahwa *total deformation* maksimum kondisi gelombang sedang sebesar 1,7632 mm. Nilai ini merupakan perpindahan maksimum yang terjadi pada struktur akibat kombinasi tekanan internal, gravitasi, dan tekanan gelombang sedang. Nilai deformasi maksimum pada kondisi gelombang sedang terjadi pada sambungan antara *nozzle* dan *shell* serta pada bagian samping *shell* di tengah bentang *pressure vessel*. Kondisi ini disebabkan oleh adanya diskontinuitas geometri pada daerah sambungan *nozzle* yang mengakibatkan penurunan kekakuan lokal sehingga perpindahan lebih mudah terkonsentrasi. Selain itu, bagian tengah *shell* berada di antara dua *saddle support* sehingga mengalami momen lentur terbesar akibat kombinasi beban berat sendiri, berat fluida, tekanan internal, dan tekanan gelombang. Sebaliknya, daerah *saddle support* menunjukkan deformasi yang lebih kecil karena memiliki kekakuan yang lebih tinggi akibat adanya *saddle plate*, *web plate*, *stiffener*, dan kondisi pengekangan (*fixed support*). Dengan demikian, pola deformasi yang dihasilkan sesuai dengan perilaku mekanik *pressure vessel* horizontal yang ditumpu oleh dua *saddle support*, di mana deformasi terbesar umumnya terjadi pada daerah dengan kekakuan lebih rendah dan pada lokasi yang mengalami momen lentur maksimum.



Gambar 11: Hasil *Equivalent Total Strain* Pada Simulasi Gelombang Sedang

Nilai *equivalent total strain* maksimum yang diperoleh dari simulasi pada kondisi gelombang sedang adalah 0,0011811. Distribusi regangan menunjukkan pola yang sejalan dengan distribusi tegangan, yaitu terkonsentrasi di sekitar sambungan *nozzle* dan *shell pressure vessel*. Besarnya regangan tersebut menunjukkan bahwa material masih mengalami deformasi dalam batas elastis. Hal ini didukung oleh nilai *equivalent stress* pada kondisi gelombang sedang yang masih berada di bawah *yield strength* material. Dengan demikian, setelah beban dihilangkan, struktur masih memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk semula tanpa mengalami deformasi permanen.



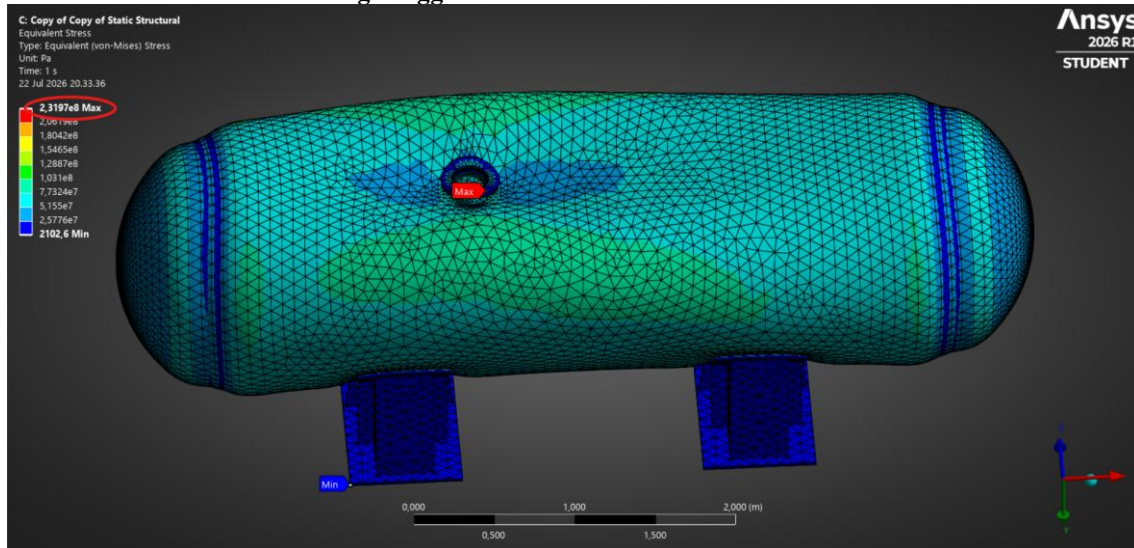
Gambar 12: Hasil *Safety Factor* Pada Simulasi Gelombang Sedang

Hasil simulasi pada kondisi gelombang sedang menghasilkan *safety factor* minimum sebesar 1,098. Nilai tersebut diperoleh dari perbandingan antara *yield strength* material dengan *equivalent stress* maksimum yang terjadi pada struktur. Diperoleh hasil menggunakan rumus:

$$SF = \frac{260}{235,69} = 1,103$$

Perbedaan yang sangat kecil antara hasil perhitungan manual dan hasil simulasi ANSYS disebabkan oleh perbedaan metode evaluasi yang digunakan. Perhitungan manual hanya menggunakan satu nilai *equivalent stress* maksimum sebagai dasar perhitungan, sedangkan ANSYS menghitung distribusi tegangan pada seluruh elemen mesh selama proses analisis, kemudian menentukan nilai *safety factor* minimum dari keseluruhan model. Oleh karena itu, meskipun rumus yang digunakan memiliki konsep yang sama, hasil yang diperoleh dapat sedikit berbeda. Nilai minimum berada pada area sambungan *nozzle* dan *shell*, yaitu lokasi yang juga mengalami konsentrasi tegangan terbesar. Nilai *safety factor* pada kondisi gelombang sedang menunjukkan bahwa tegangan kerja masih berada di bawah batas luluh material, sehingga struktur masih memiliki cadangan kekuatan untuk menahan kombinasi pembebanan pada kondisi gelombang sedang.

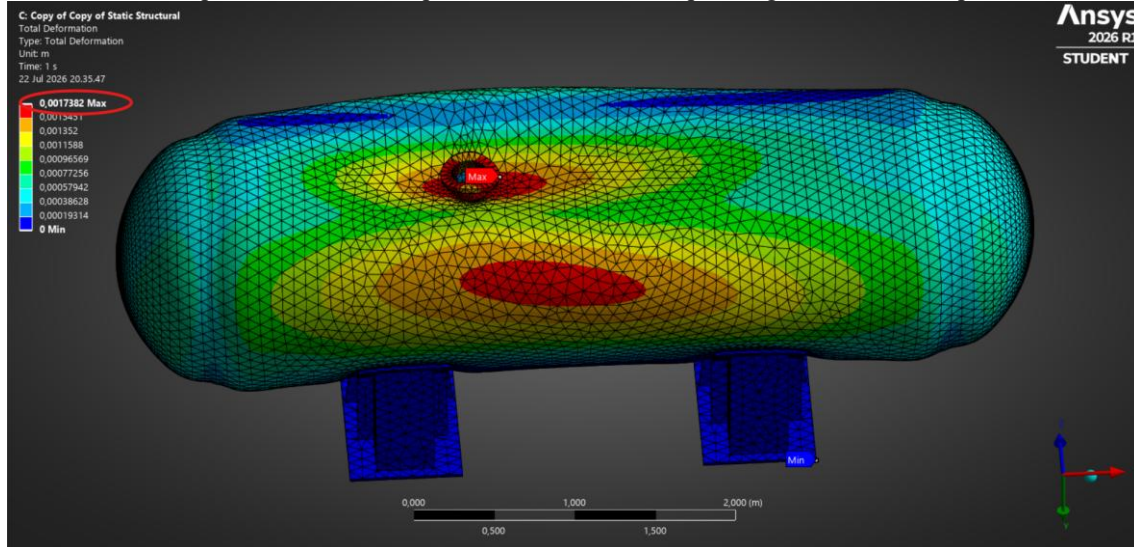
3.1.3 Hasil Simulasi Gelombang Tinggi



Gambar 13: Hasil *Equivalent Stress* Pada Simulasi Gelombang Tinggi

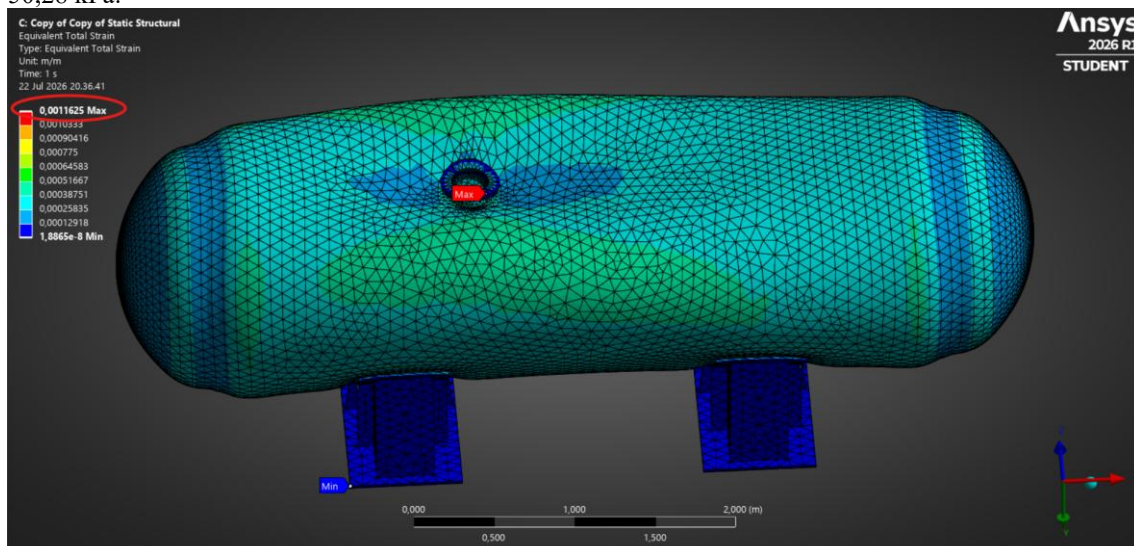
Hasil simulasi pada kondisi gelombang tinggi menunjukkan bahwa *equivalent stress* maksimum sebesar 231,97 MPa. Nilai tersebut masih berada di bawah *yield strength* material ASTM SA-516 Grade 70 sebesar 260 MPa, sehingga struktur masih bekerja pada daerah elastis dan belum mengalami kegagalan akibat luluh. Distribusi tegangan memperlihatkan bahwa konsentrasi tegangan terbesar tetap berada pada daerah

sambungan antara *nozzle* dan *shell pressure vessel*. Area ini memiliki perubahan geometri yang menyebabkan distribusi tegangan tidak merata sehingga menjadi lokasi dengan nilai tegangan tertinggi. Meskipun *pressure vessel* menerima kombinasi beban berupa tekanan internal sebesar 1,471 MPa, gravitasi, dan tekanan gelombang sebesar 50,28 kPa, nilai tegangan pada kondisi gelombang tinggi yang dihasilkan masih berada di bawah batas luluh material. Dengan demikian, struktur *saddle support pressure vessel* masih mampu menahan kondisi pembebanan tersebut tanpa mengalami deformasi plastis.



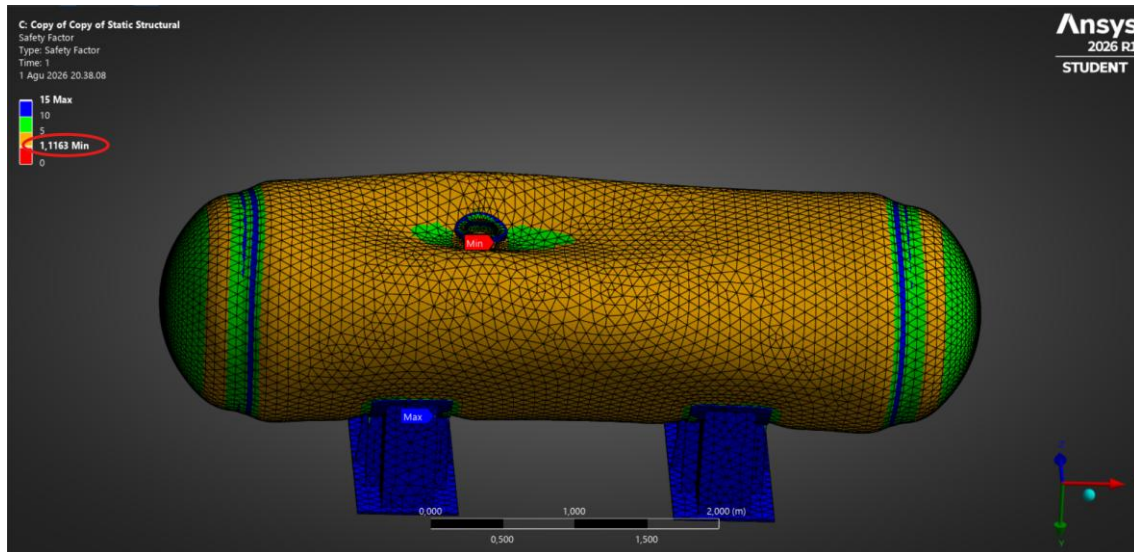
Gambar 14: Hasil *Total Deformation* Pada Simulasi Gelombang Tinggi

Hasil simulasi pada kondisi gelombang tinggi menunjukkan bahwa *total deformation* maksimum sebesar 1,7382 mm. Nilai ini menunjukkan besarnya perpindahan maksimum struktur akibat kombinasi tekanan internal, gravitasi, dan tekanan gelombang tinggi. Berdasarkan kontur deformasi, perpindahan terbesar terjadi pada bagian tengah *shell pressure vessel*, sedangkan daerah *saddle support* mengalami deformasi yang sangat kecil karena terikat oleh kondisi *fixed support*. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa daerah penumpuan mampu membatasi pergerakan struktur, sementara bagian *shell* yang berada di antara kedua *saddle support* mengalami perpindahan yang lebih besar. Besarnya deformasi pada kondisi gelombang tinggi yang diperoleh menunjukkan bahwa struktur masih mampu mempertahankan kekakuannya ketika menerima kombinasi beban tekanan internal sebesar 1,471 MPa, gravitasi, dan tekanan gelombang sebesar 50,28 kPa.



Gambar 15: Hasil *Equivalent Total Strain* Pada Simulasi Gelombang Tinggi

Nilai *equivalent total strain* maksimum yang diperoleh dari hasil simulasi kondisi gelombang tinggi adalah 0,0011625. Distribusi regangan menunjukkan pola yang serupa dengan distribusi tegangan, yaitu terkonsentrasi pada area sambungan *nozzle* dan *shell pressure vessel*. Nilai regangan tersebut menunjukkan bahwa material masih mengalami deformasi dalam batas elastis. Kondisi ini sejalan dengan hasil *equivalent stress* yang masih berada di bawah *yield strength* material ASTM SA-516 Grade 70. Oleh karena itu, struktur masih memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk semula setelah pembebanan dihilangkan.



Gambar 16: Hasil *Safety Factor* Pada Simulasi Gelombang Tinggi

Simulasi ANSYS *Mechanical* menghasilkan *safety factor* minimum pada kondisi gelombang tinggi sebesar 1,1163. Nilai tersebut diperoleh dari perbandingan antara *yield strength* material dengan *equivalent stress* maksimum yang terjadi pada struktur. Dapat diperoleh menggunakan rumus:

$$SF = \frac{260}{231,97} = 1,12$$

Perhitungan manual menghasilkan nilai 1,12, sedangkan ANSYS menunjukkan nilai 1,1163. Perbedaan tersebut sangat kecil dan terjadi karena metode evaluasi yang digunakan tidak sepenuhnya sama. Perhitungan manual menggunakan satu *equivalent stress* maksimum, sedangkan ANSYS menghitung distribusi tegangan pada seluruh elemen *mesh* kemudian menentukan nilai *safety factor* minimum dari keseluruhan model. Perbedaan tersebut tidak memengaruhi interpretasi hasil analisis. Nilai *safety factor* pada kondisi gelombang tinggi menunjukkan bahwa struktur masih memiliki cadangan kekuatan terhadap batas luluh material. Dengan demikian, *saddle support pressure vessel* masih berada dalam kondisi aman ketika menerima kombinasi beban tekanan internal sebesar 1,471 MPa, gravitasi, dan tekanan gelombang sebesar 50,28 kPa.

3.2 Perbandingan Hasil Simulasi dari ANSYS *Mechanical* dan Pembahasan

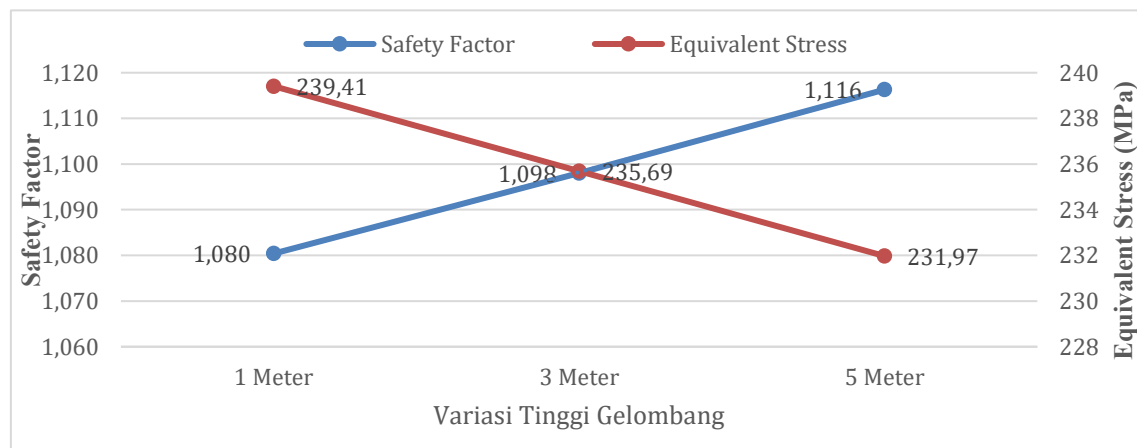
Tabel 7. Rekapitulasi Seluruh Hasil Simulasi dari ANSYS *Mechanical*

Variasi <i>External Wave Pressure</i>	<i>Stress</i> (MPa)	<i>Deformation</i> (mm)	<i>Strain</i>	<i>Safety Factor</i>
Gelombang Rendah	239,41 MPa	1,7881 mm	0,0011998	1,0804
Gelombang Sedang	235,69 MPa	1,7632 mm	0,0011811	1,098
Gelombang Tinggi	231,97 MPa	1,7382 mm	0,0011625	1,1163

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan ANSYS *Mechanical*, kenaikan tekanan gelombang dari 10,06 kPa menjadi 30,17 kPa dan 50,28 kPa tidak menyebabkan bertambahnya tegangan maksimum pada struktur *saddle support pressure vessel*. Nilai *equivalent stress* justru mengalami sedikit penurunan, yaitu dari 239,41 MPa menjadi 235,69 MPa dan 231,97 MPa. Tren yang sama juga terlihat pada *total deformation* yang menurun dari 1,7881 mm menjadi 1,7632 mm dan 1,7382 mm, serta *equivalent total strain* yang berkurang dari 0,0011998 menjadi 0,0011811 dan 0,0011625. Sebaliknya, *safety factor* meningkat secara bertahap dari 1,0804 menjadi 1,0980 dan 1,1163. Perubahan ini menunjukkan bahwa penambahan tekanan gelombang pada rentang yang dianalisis tidak memperbesar beban yang diterima struktur, tetapi memengaruhi distribusi tegangan sehingga respons struktur menjadi lebih stabil. Karakteristik tersebut berkaitan dengan arah pembebanan yang diterapkan pada model. Tekanan internal sebesar 1,471 MPa bekerja dari bagian dalam *shell* menuju arah luar, sedangkan tekanan gelombang diberikan sebagai *external pressure* pada permukaan luar *shell* dengan arah yang berlawanan. Perbedaan arah pembebanan ini menghasilkan redistribusi tegangan pada dinding *pressure vessel*. Di sisi lain, tekanan gelombang maksimum hanya sekitar 0,05028 MPa, sehingga nilainya jauh lebih kecil dibandingkan tekanan internal. Oleh karena itu, tekanan internal tetap menjadi faktor utama yang memengaruhi respons struktur, sedangkan tekanan gelombang hanya memberikan perubahan kecil terhadap distribusi tegangan.

Distribusi hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa area kritis tetap berada pada sambungan *nozzle-shell* pada seluruh variasi pembebanan. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan geometri pada sambungan tersebut lebih berpengaruh terhadap konsentrasi tegangan dibandingkan peningkatan tekanan gelombang. Sambungan *nozzle* merupakan lokasi peralihan beban dan perubahan bentuk geometri sehingga konsentrasi tegangan cenderung terjadi pada area tersebut [18]. Sementara itu, *saddle support* yang dilengkapi *stiffener* mampu mempertahankan kekakuan struktur sehingga beban dapat diteruskan menuju *base plate* secara lebih merata tanpa menimbulkan konsentrasi tegangan baru pada daerah penyangga. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menjelaskan bahwa penambahan elemen pengaku dapat meningkatkan kekakuan *saddle support* dan memperbaiki distribusi tegangan pada *pressure vessel* [19-20].

Respon struktur juga dipengaruhi oleh konfigurasi *saddle support* yang digunakan. Model penelitian terdiri atas *saddle plate*, *web plate*, *base plate*, dan dilengkapi *stiffener*. Susunan tersebut memberikan kekakuan tambahan pada daerah penyangga dan membantu meneruskan beban dari *pressure vessel* menuju *base plate* yang diberi kondisi *fixed support*. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa konfigurasi dan karakteristik geometris *saddle support* dapat memengaruhi distribusi tegangan pada *pressure vessel* dan daerah penyangga [21]. Pengaruh tersebut juga sejalan pada penelitian terdahulu yang menganalisis perubahan ketebalan *saddle*, di mana perubahan parameter penyangga menghasilkan perubahan pada distribusi tegangan struktur [22].



Gambar 17: Grafik Hubungan Variasi Tinggi Gelombang terhadap Safety Factor dan Equivalent Stress

Pada grafik diatas, keterkaitan antara *equivalent stress* dan *safety factor* terlihat jelas pada seluruh variasi pembebanan. Ketika nilai *equivalent stress* menurun, *safety factor* meningkat karena cadangan kekuatan struktur menjadi lebih besar. Seluruh nilai tegangan juga masih berada di bawah *yield strength* material ASTM SA-516 Grade 70 sebesar 260 MPa, sehingga desain *saddle support* memenuhi kriteria keamanan berdasarkan ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section VIII Division 2 [11]. Selain itu, nilai *total deformation* dan *equivalent total strain* yang relatif kecil menunjukkan bahwa struktur masih bekerja pada daerah elastis dan memiliki kekakuan yang cukup untuk menerima kombinasi beban yang diberikan. Dengan demikian, peningkatan *safety factor* yang diperoleh bukan menunjukkan adanya peningkatan sifat material, tetapi merupakan konsekuensi dari perubahan nilai tegangan maksimum pada setiap kondisi pembebanan.

Penurunan hasil simulasi *equivalent stress* dari 3 variasi tinggi gelombang tersebut dapat dijelaskan melalui kondisi tegangan yang terbentuk akibat tekanan dari kedua sisi *shell*. Tekanan internal bekerja dari arah dalam, sedangkan tekanan eksternal bekerja dari arah luar. Kedua pembebanan tersebut tidak hanya menambah besar gaya yang diterima struktur, tetapi juga mengubah kombinasi dan distribusi komponen tegangan pada dinding *pressure vessel*. Kondisi tegangan pada silinder yang menerima tekanan internal dan eksternal ditentukan oleh pengaruh kedua tekanan tersebut secara bersamaan [23]. Oleh karena itu, peningkatan *external wave pressure* pada penelitian ini dapat menyebabkan perubahan distribusi tegangan yang sebelumnya terbentuk akibat *internal pressure*. Karena *equivalent stress* merupakan besaran ekuivalen dari kombinasi komponen tegangan, perubahan tersebut dapat menghasilkan nilai maksimum yang lebih rendah pada kondisi tertentu.

Sementara itu, variasi tekanan gelombang memberikan pengaruh tambahan terhadap distribusi tegangan yang telah terbentuk. Sejalan dengan penelitian sebelumnya mengenai respons silinder terhadap tekanan internal dan eksternal, perubahan kondisi pembebanan dapat menghasilkan perubahan pada distribusi tegangan di dalam dinding struktur [23]. Dengan demikian, penurunan nilai *equivalent stress* pada penelitian ini lebih tepat dipahami sebagai hasil redistribusi tegangan akibat kombinasi tekanan internal

dan eksternal, bukan sebagai indikasi bahwa tekanan gelombang memberikan efek pengurangan beban secara langsung.

Berdasarkan seluruh parameter yang dianalisis, desain kekuatan struktur *saddle support* masih mampu menopang *pressure vessel* pada ketiga variasi tekanan gelombang. Tidak terjadi perpindahan area kritis menuju *saddle support*, deformasi tetap rendah, dan *safety factor* pada seluruh kondisi berada di atas satu. Hal ini menunjukkan bahwa sistem penyangga masih mampu mendistribusikan beban secara efektif sehingga kekuatan struktur tetap terjaga pada kondisi pembebanan statik yang merepresentasikan pengaruh gelombang di kapal *offshore*. Meskipun demikian, kondisi operasi sebenarnya juga dipengaruhi oleh gerakan kapal serta pembebanan berulang akibat gelombang. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat dikembangkan menggunakan *dynamic structural analysis* atau *fatigue analysis* agar evaluasi kekuatan struktur lebih mendekati kondisi operasi nyata.

4 Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis kekuatan struktur *saddle support pressure vessel* pada kapal *offshore* akibat variasi beban gelombang menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) pada *ANSYS Mechanical*. Hasil analisis menunjukkan bahwa *safety factor* sebagai indikator utama dalam penilaian kekuatan struktur cenderung meningkat pada setiap variasi tekanan gelombang, sehingga mengindikasikan bahwa desain *saddle support* memiliki kelayakan struktur yang baik terhadap kombinasi beban tekanan internal, gravitasi, dan variasi beban gelombang. *Stiffener* berperan dalam meningkatkan kekakuan struktur *saddle support* serta membantu mendistribusikan beban menuju *base plate*, sehingga fungsi *saddle support* sebagai penyangga *pressure vessel* tetap bekerja dengan baik. Dengan demikian, desain kekuatan struktur *saddle support pressure vessel* masih mampu menjaga integritas struktural pada kondisi pembebanan statik yang merepresentasikan pengaruh beban gelombang pada kapal *offshore*.

5 Daftar Pustaka

- [1] “World Energy Outlook 2023 – Analysis.” Diakses: 24 April 2026. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [2] A. M. Al-Yacoub, H. Arifin, M. S. Liew, dan Z. Razak, “Stress analysis of freestanding risers subjected to waves and current loadings - Numerical modelling,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1101, no. 1, hlm. 012003, Mar 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1101/1/012003.
- [3] Usen Inemesit dan Jasper Ahametula Agbakwuru, “Model prediction of fatigue damage on offshore steel risers due to wave loading using FEA and ANN: A case of Forcados Offshore, Nigeria,” *Int. J. Eng. Res. Updat.*, vol. 4, no. 1, hlm. 020–033, Feb 2023, doi: 10.53430/ijeru.2023.4.1.0014.
- [4] Y. A. Kadir dan H. G. Lemu, “Prediction of Fatigue Crack Initiation under Variable Amplitude Loading: Literature Review,” *Metals*, vol. 13, no. 3, hlm. 487, Feb 2023, doi: 10.3390/met13030487.
- [5] American Society Of Mechanical Engineers, *ASME BPVC Section II: Materials*, 2025 ed. dalam ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code. Two Park Avenue, New York, NY: American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2025.
- [6] American Society of Mechanical Engineers, *ASME BPVC Section VIII: Rules for Construction of Pressure Vessels*, 2025 ed. dalam ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code. Two Park Avenue, New York, NY: American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2025.
- [7] P. Sidabalok dan R. Rildova, “Beban Vertikal Gelombang pada Deck Dermaga di Pelabuhan Marore, Provinsi Sulawesi Utara,” *J. Tek. Sipil*, vol. 31, no. 1, hlm. 107–108, Jun 2024, doi: 10.5614/jts.2024.31.1.12.
- [8] D. Q. Cuong dan B. T. Anh, “Assessment of Dynamic Effects of Wave Loads in Fatigue Analysis for Fixed Steel Offshore Structures,” *Civ. Eng. J.*, vol. 9, no. 2, hlm. 465–482, Feb 2023, doi: 10.28991/CEJ-2023-09-02-016.
- [9] M.Tech. Student, Mechanical, TKIET, Warananagar, 416113, Maharashtra, India, I. Gophane, N. Dharashivkar, P. Mulik, dan P. Patil, “Theoretical and Finite Element Analysis of Pressure Vessel,” *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 12, hlm. 1148–1158, Mar 2024, doi: 10.17485/IJST/v17i12.3272.
- [10] Jefri Imron, “Analisis Desain dan Keandalan Bejana Bertekanan pada Industri Energi Pendekatan Numerik dan Eksperimental,” *JURAL Ris. RUMPUN ILMU Tek.*, vol. 4, no. 1, hlm. 48–59, Apr 2025, doi: 10.55606/jurritek.v4i1.4474.

- [11] American Society of Mechanical Engineers, *ASME BPVC Section VIII Division 2: Rules for Construction of Pressure Vessels*, 2023 ed. dalam ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code. Two Park Avenue, New York, NY: American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2023.
- [12] Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd, *DNVGL--RP--C205: Environmental conditions and environmental loads*, 2019 ed. 2019.
- [13] E. F. A. Nureddin O. Fahel Alboum, "Design and Static Structural Analysis of a Horizontal Pressure Vessel," *ISTJ*, vol. 31, Nov 2021.
- [14] Mr. N.Gopikrishna dan E. Tharun, "Design And Static Thermal Analysis of Pressure Vessels With Various Materials Using FEM," *Int. J. Eng. Sci. Adv. Technol.*, vol. 24, no. 10, hlm. 412–418, 2024, doi: 10.36893/IJESAT.2024.V24I10.052.
- [15] A. N. Efendi *dkk.*, "Karakteristik Gelombang Laut Indoneisa Untuk Mendukung Kegiatan Laut dan Keamanan Maritim," *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 7, no. 2, hlm. 346–357, Mar 2023, doi: 10.33379/gtech.v7i2.1989.
- [16] E. Solangi, T. M. B. Albarody, S. Al-Challabi, J. A. Khan, dan S. Ali, "Design and Failure Analysis of a Vacuum Pressure Vessel for Aerospace Applications using Finite Element Analysis (FEA)," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, no. 6, hlm. 17888–17893, Des 2024, doi: 10.48084/etasr.7673.
- [17] F. M. Shirwa, "Finite Element Analysis of Pressure Vessels Subjected to Uniform Internal Pressure Using Ansys Software," *Int. J. Res. Innov. Appl. Sci.*, vol. 07, no. 09, hlm. 20–26, 2022, doi: 10.51584/IJRIAS.2022.7902.
- [18] F. M. Mukhtar dan H. J. Al-Gahtani, "Finite Element Analysis and Development of Design Charts for Cylindrical Vessel–Nozzle Junctures Under Internal Pressure," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 10, hlm. 4195–4206, Okt 2016, doi: 10.1007/s13369-016-2155-x.
- [19] A. H. A. Rosli dan M. A'imullah, "Design Optimization of Saddle Support for The High-Capacity Pressure Vessel Using Finite Element Analysis," vol. 2, no. 2, 2021.
- [20] L. P. Zick, "Approximate stresses that exist in cylindrical vessels supported on two saddles at various conditions and design of stiffening for vessels which require it".
- [21] N. El-Abbasi, S. A. Meguid, dan A. Czekanski, "Three-dimensional finite element analysis of saddle supported pressure vessels".
- [22] K. Krisdiyanto, "Simulation of the Pressure Vessel Saddle Thickness Effect to Stress Distribution," *Mek. Maj. Ilm. Mek.*, vol. 20, no. 1, hlm. 18, Mar 2021, doi: 10.20961/mechanika.v20i1.44938.
- [23] A. K. Aggarwal, R. Sharma, dan S. Sharma, "Safety Analysis Using Lebesgue Strain Measure of Thick-Walled Cylinder for Functionally Graded Material under Internal and External Pressure," *Sci. World J.*, vol. 2013, no. 1, hlm. 676190, Jan 2013, doi: 10.1155/2013/676190.