

Evaluasi Kekuatan Struktur *Stool* terhadap Pembebanan Statik pada Fabrikasi FPSO *Topside* Module Menggunakan Metode *Finite Element* *Analysis*

Muhamad Iqbal Rhakashtowi*¹, Meilani Mandhalena Manurung, S.T., M. T. ^{1*}

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknik Mesin

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

¹E-mail: irhakashtowi@gmail.com

Abstrak

Dalam proses fabrikasi Floating Production Storage and Offloading (FPSO) topside module, diperlukan struktur penyangga sementara (*stool*) untuk menopang beban modul selama proses fabrikasi. Penggunaan beberapa tipe *stool* pada variasi pembebanan yang berbeda dapat menurunkan efisiensi fabrikasi, sehingga diperlukan evaluasi untuk mengetahui kelayakan penggunaan satu desain *stool*. Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan struktur *stool* terhadap pembebanan statik serta mengevaluasi kelayakan penggunaan satu tipe *stool* pada 15 titik pembebanan. Analisis dilakukan menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA) pada SolidWorks Simulation dengan analisis linear static. Material yang digunakan adalah API 5L Grade X52 untuk main pipe dan DH-36 untuk base plate serta stiffener. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan Von Mises, displacement, strain, dan Factor of Safety (FoS). Hasil simulasi menunjukkan tegangan Von Mises maksimum sebesar 283 MPa, displacement maksimum 0,598 mm, dan strain maksimum $6,257 \times 10^{-4}$, dengan nilai FoS berkisar 1,3–6,2. Seluruh hasil masih berada di bawah yield strength material dan memenuhi kriteria keamanan beban statik. Berdasarkan hasil tersebut, satu tipe *stool* layak digunakan sebagai pengganti tiga tipe *stool* sebelumnya tanpa mengurangi keamanan struktur.

Kata kunci: *Stool, FPSO, Topside Module, Beban Statik, Finite Element Analysis (FEA), Von Mises Stress, Factor of Safety (FoS), SolidWorks Simulation.*

Abstract

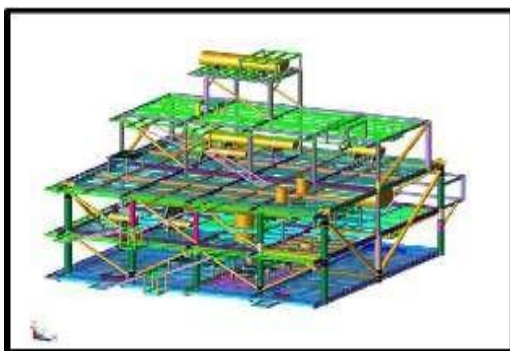
During the fabrication process of Floating Production Storage and Offloading (FPSO) topside modules, temporary support structures (stools) are required to carry the module loads throughout fabrication. The use of multiple stool designs for different loading conditions may reduce fabrication efficiency; therefore, an evaluation is needed to determine the feasibility of using a single stool design. This study aims to analyze the structural strength of a stool under static loading and evaluate the feasibility of using a single stool design for 15 loading points. The analysis was conducted using the Finite Element Analysis (FEA) method in SolidWorks Simulation with a linear static analysis approach. API 5L Grade X52 was used for the main pipe, while DH-36 steel was selected for the base plate and stiffeners. The analyzed parameters included Von Mises stress, displacement, strain, and the Factor of Safety (FoS). The simulation results showed a maximum Von Mises stress of 283 MPa, a maximum displacement of 0.598 mm, a maximum strain of 6.257×10^{-4} , and FoS values ranging from 1.3 to 6.2. All results remained below the material yield strength and satisfied the safety requirements for static loading. Therefore, a single stool design is considered feasible to replace the previous three stool designs without compromising structural safety.

Keywords: *Stool, FPSO, Topside Module, Static Load, Finite Element Analysis (FEA), Von Mises Stress, Factor of Safety (FoS), SolidWorks Simulation.*

1 Pendahuluan

Industri minyak bumi dan gas bumi merupakan salah satu sektor strategis yang memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan energi global[1]. Kegiatan dalam industri ini mencakup proses eksplorasi, produksi, hingga pengolahan minyak dan gas bumi yang membutuhkan teknologi serta infrastruktur yang kompleks. Salah satu hasil dari proyek industri ini adalah fasilitas produksi lepas pantai seperti FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), yang berfungsi sebagai unit terapung untuk memproses, menyimpan, dan menyalurkan minyak mentah dari sumur produksi[2]. Dalam sistem FPSO, struktur utamanya terbagi menjadi dua komponen utama, yaitu *hull* dan *topside module* termasuk fasilitas lainnya seperti *gas processing module*, *utility module*, *compression module*, *living quarter module*, dan *power generator module*[3].

Hull merupakan bagian bawah atau badan utama dari FPSO yang bentuknya seperti lambung kapal sebagai struktur utama sekaligus tempat untuk menyimpan minyak. Sedangkan, *topside module* merupakan fasilitas proses produksi minyak dari yang dipasang diatas *deck hull*. Umumnya pembuatan *topside module* dilakukan di *onshore* tepatnya di lapangan fabrikasi dengan konsep modularisasi. Modul-modul tersebut difabrikasi, dirakit dan diuji di darat sebelum di *load out* dan diinstalasi pada *hull* FPSO.



Gambar 1. Struktur *Topside Module*

(Sumber : Internal document PT. VME Process (MODUL M26 PROYEK AGOGO))

Dalam proses pembangunan FPSO, khususnya pada tahap fabrikasi *topside module*, diperlukan suatu struktur penunjang sementara (*temporary structure*) yang digunakan untuk menopang beban modul sebelum dipasang pada posisi final. Struktur ini dalam praktik lapangan dikenal sebagai *stool*. *Stool* memiliki peranan penting dalam proses fabrikasi karena berfungsi sebagai penopang sementara beban modul sehingga struktur tetap stabil selama proses pengerjaan berlangsung. Selain itu, penggunaan *stool* juga bertujuan untuk memudahkan proses fabrikasi seperti *welding*, *fit-up*, dan inspeksi, serta untuk menghindari terjadinya deformasi pada struktur selama proses *assembly*. Dengan demikian, keberadaan *stool* tidak hanya berpengaruh terhadap kemudahan proses kerja, tetapi juga terhadap kualitas dan keselamatan hasil fabrikasi. Meskipun bersifat sementara, struktur *stool* tetap harus dirancang dengan mempertimbangkan kekuatan dan keamanan terhadap beban yang bekerja.



Gambar 2. Struktur *Stool* (Temporary Structure)

(Sumber : Internal document PT. VME Process (PROYEK SUBEA))

Dalam praktik industri, desain *stool* seringkali dibuat dalam beberapa tipe untuk mengakomodasi variasi beban yang berbeda. Pada penelitian ini ditemukan variasi tipe sebanyak 3 *stool* dengan pembebanan beban variasi yang berbeda seperti *stool* 100 ton, *stool* 200 ton dan *stool* 300 ton. Namun, pada proyek skala besar seperti industri minyak dan gas, penggunaan jumlah tipe *stool* yang terlalu banyak dapat menurunkan efisiensi proses fabrikasi. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan untuk mengoptimalkan

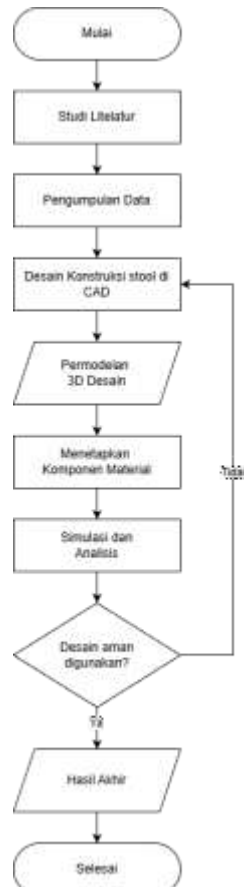
desain *stool* agar dapat digunakan pada beberapa kondisi pembebanan sekaligus tanpa mengurangi tingkat keamanan struktur. Hal ini mendorong dilakukannya analisis kekuatan struktur *stool* untuk memastikan bahwa desain yang digunakan tetap memenuhi kriteria keselamatan.

Analisis kekuatan struktur pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan numerik melalui perangkat lunak *SolidWorks* yang memiliki fitur *Finite Element Analysis* (FEA). Metode ini memungkinkan evaluasi terhadap distribusi tegangan, deformasi, serta faktor keamanan (*factor of safety*) pada struktur secara lebih detail[4]. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa struktur penunjang sementara seperti *stool* memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan, terutama pada daerah sambungan yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan. Untuk mengoptimalkan geometri dapat menggunakan tambahan elemen pengaku (*stiffener*) yang bisa meningkatkan kinerja struktur dan mengurangi risiko kegagalan[5]. Sebagai pedoman pelaksanaan penelitian serta pengujian ini akan dilakukan sesuai DNVGL-CG-0127 (*Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd*)[6] Selain itu, standar faktor keamanan untuk beban statis direkomendasikan pada rentang nilai 1,25 hingga 2.0 menurut Robert L Mott[7].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan struktur *stool* terhadap beban statis yang bekerja serta untuk memperoleh nilai faktor keamanan yang optimal. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kemungkinan penggunaan jumlah tipe *stool* yang lebih sedikit guna meningkatkan efisien dalam proses fabrikasi tanpa mengurangi tingkat keamanan struktur. Dalam penelitian ini, analisis difokuskan pada beban statis yang berasal dari berat modul, sementara pengaruh beban dinamis seperti beban gelombang, beban angin, serta beban fatigue tidak diperhitungkan. Hal ini dikarenakan *stool* yang dianalisis merupakan struktur sementara yang digunakan pada tahap fabrikasi di darat, sehingga beban utama yang bekerja bersifat statis. Dengan pendekatan ini, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan kontribusi dalam perancangan struktur *stool* yang lebih efisien dan aman dalam proses fabrikasi modul di industri minyak dan gas.

2 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini digunakan dalam diagram alir dengan tahapan-tahapan berikut.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

2.1 Studi Litelatur

Studi litelatur dilakukan untuk memperkuat terhadap penelitian yang dibahas. Berdasarkan jurnal dan rules yang menjelaskan tentang *temporary structure*, teori mengenai elatisitas tegangan dan regangan dan memahami perilaku struktur pada saat di beri beban. Untuk proses analisis, digunakan metode Elemen Hingga (*Finite Element Analysis*), sehingga prinsip-prinsip dipelajari untuk memastikan metode simulasi dalam *software SolidWorks* tetap tepat. DNVGL-CG-0127 (*Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd*)[6] turut dikaji sebagai pedoman pelaksanaan serta evaluasi hasil FEA. Dan standar faktor keamanan menurut Mott turut dikaji pada rentang nilai 1,25 hingga 2,0[7].

2.2 Pengumpulan Data

Tahap ini melakukan pengumpulan data, pertama data dari observasi konstruksi *stool* secara aktual maupun non-aktual. Data berikutnya yang dikumpulkan adalah data *reaction force* satu modul. Dengan data tersebut akan menjadi acuan untuk pengujian kekuatan struktur *stool*. Data ini diperoleh dari perusahaan dan digunakan sebagai input pembeban pada simulasi. Terdapat 15 titik yang akan digunakan untuk posisi *stool* dengan perbedaan *reaction force* dari satu titik dengan titik lainnya dijelaskan dalam tabel berikut.

Tabel 1 Nilai *reaction force* modul

Komponen	Nilai	Satuan
W1	459.25	kN
W2	1006.32	kN
W3	856.36	kN
W4	1058.90	kN
W5	375.80	kN
W6	1546.29	kN
W7	1850.30	kN
W8	1832.80	kN
W9	1818.40	kN
W10	1551.04	kN
W11	836.36	kN
W12	1595.33	kN
W13	1216.75	kN
W14	1521.57	kN
W15	597.81	kN

Tabel 2 Spesifikasi pipa sebagai struktur *stool*

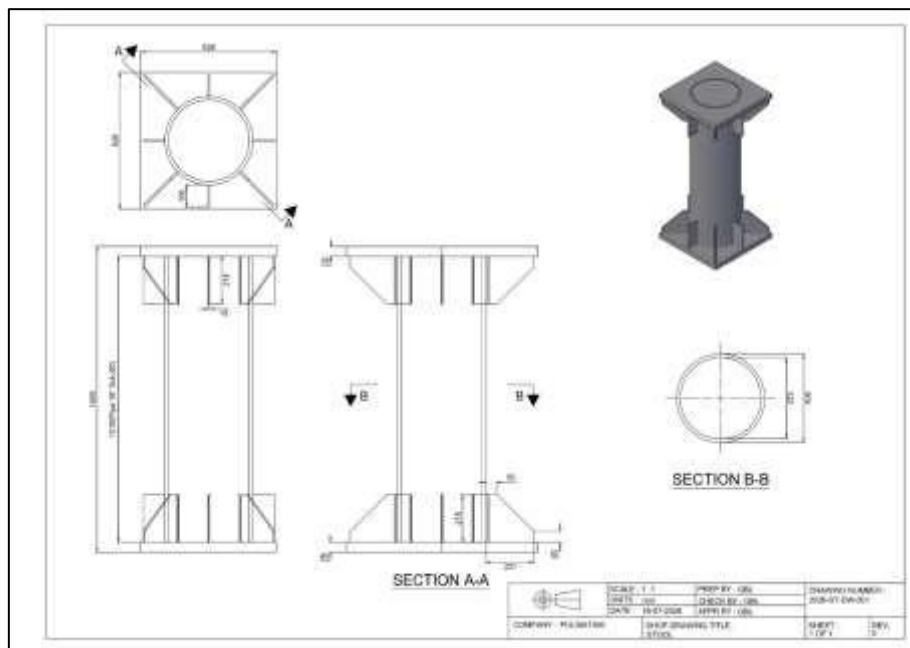
Komponen	Nominal Pipe Size (inci)	Outside Diameter (mm)	Thickness (mm)	Schedule
Main Pipe	16	406.4	16.66	60

Tabel 3 Spesifikasi plate sebagai struktur *stool*

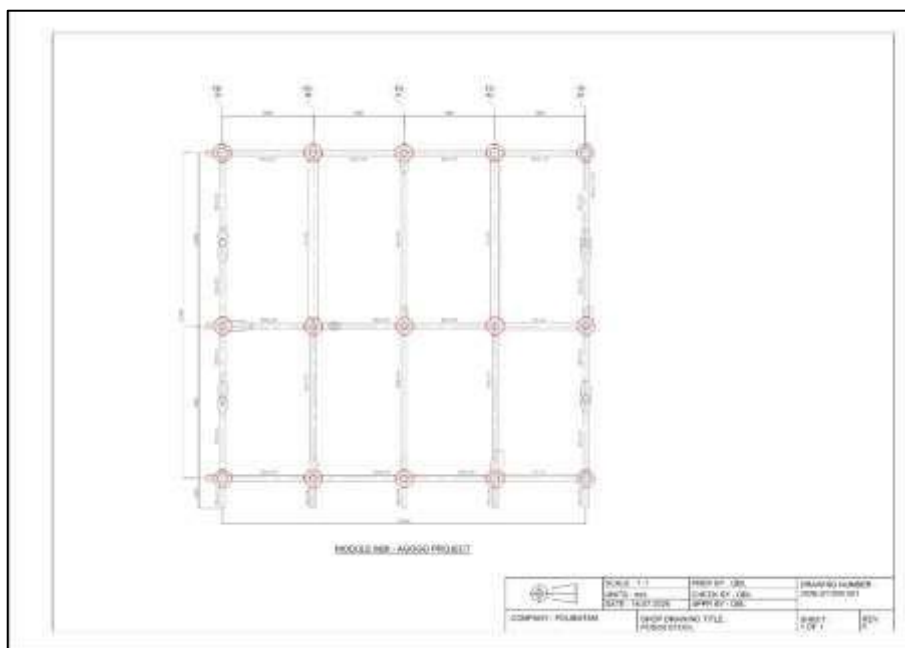
Komponen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Thickness (mm)
Base Plate	626	626	45
Leg Stool	221	218	15
Stiffener	100	10	10

2.3 Model Konstruksi *stool* pada CAD

Data yang diperoleh akan diolah menjadi model dengan AutoCAD yang kemudian dikonversi menjadi bentuk 3D pada SolidWorks. Model 3D ini digunakan untuk menganalisa beban statis dan simulasi. Model 2D maupun 3D yang dimaksud ditampilkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Model konstruksi *stool*



Gambar 5. Posisi tampak atas letak stool

2.4 Penetapan komponen material

Material yang digunakan pada konstruksi stool yaitu part *main pipe* adalah API 5L Grade X52 sedangkan *base plate* dan *stiffener* adalah DH-36. Material ini merupakan *high-strength structural steel* yang umum digunakan pada perusahaan yang bergerak di bidang migas. Pemilihan material ini disebabkan karena kekuatannya yang sangat terjamin pada bangunan atau struktur yang diproduksi oleh perusahaan yang bergerak di bidang migas. Spesifikasi material API 5L Grade X52[8] dan DH-36[9] ini dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4 Spesifikasi material API 5L Grade X52

Property	Value	Unit
Elastic Modulus	200.000	N/mm ²
Poisson's Ratio	0,30	N/A
Shear Modulus	76.923	N/mm ²
Tensile Strength	455	N/mm ²
Yield Strength	359	N/mm ²

Tabel 5 Spesifikasi material DH-36

Property	Value	Unit
Elastic Modulus	210.000	N/mm ²
Poisson's Ratio	0,30	N/A
Shear Modulus	80.769	N/mm ²
Tensile Strength	490	N/mm ²
Yield Strength	355	N/mm ²

2.4 Perhitungan dan simulasi

Perhitungan dan simulasi dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SolidWorks Simulation yang menerapkan metode Analisis Elemen Hingga (*Finite Element Analysis*) dengan jenis analisis linear *static*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana struktur stool bereaksi terhadap beban statis yang diterapkan, dengan mengabaikan efek dari beban dinamis, seperti beban angin, getaran, atau beban kelelahan. Sebelum melakukan simulasi, model 3D *stool* terlebih dahulu diberikan karakteristik material, kondisi batas (*boundary condition*), serta parameter pembebanan sesuai dengan situasi kerja yang telah direncanakan. Kemudian, perangkat lunak tersebut melaksanakan perhitungan numerik untuk memperoleh respons struktur dalam bentuk distribusi tegangan (*stress*), regangan (*strain*), perpindahan (*displacement*), serta faktor keamanan (*safety factor*). Faktor keamanan menurut Mott (2018) untuk beban statis dimana perkiraan 1,25–2.0 sebagai batas aman[7]. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai acuan dalam menilai kekuatan struktur stool terhadap beban statis. Penjelasan mengenai tiap parameter akan diuraikan pada subbab berikut.

2.4.1 Tegangan (Stress)

Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai gaya persatuan luas penampang benda tersebut. Tegangan dapat dirumuskan[2] :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Keterangan:

σ = Tegangan (N/mm² atau MPa)

F = Gaya yang bekerja (N)

A = Luas penampang (mm²)

Berdasarkan teori *Von Mises yield criterion (maximum distortion energy criterion)* mengatakan material *ductile* mulai mengalami deformasi plastis ketika energi distorsi berlebih pada saat tegangan *Von Mises* mencapai batas *yield strength* material[10].

2.4.2 Regangan (Strain)

Regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara penambahan panjang benda ΔL terhadap panjang mula-mula L . Regangan dapat dirumuskan[2] :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Keterangan:

ε = Regangan

ΔL = Pertambahan panjang (mm)

L = Panjang awal (mm)

2.4.3 Perpindahan (Displacement)

Perpindahan (*displacement*) merupakan perubahan posisi suatu titik pada struktur akibat pembebanan. Nilai displacement menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada struktur ketika menerima beban statis[2].

2.4.4 Faktor Keamanan (Safety Factor)

Faktor keamanan (*Safety Factor*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui tingkat keamanan suatu struktur terhadap beban yang diberikan. Nilai faktor keamanan diperoleh dari perbandingan antara kekuatan luluh (*yield strength*) material dengan tegangan *Von Mises* maksimum yang terjadi pada struktur. Faktor keamanan dapat dirumuskan[2] :

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_v}$$

Keterangan:

SF = Faktor keamanan

σ_y = *Yield Strength* material ((N/mm²)

σ_v = Tegangan *Von Mises* maksimum (N/mm²)

Semakin besar nilai faktor keamanan, maka semakin aman struktur terhadap kemungkinan terjadinya kegagalan. Pada penelitian ini, nilai *Safety Factor* digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan kelayakan desain struktur stool terhadap pembebanan dengan rentang 1,25 hingga 2,0 yang direkomendasikan oleh Mott (2018)[7].

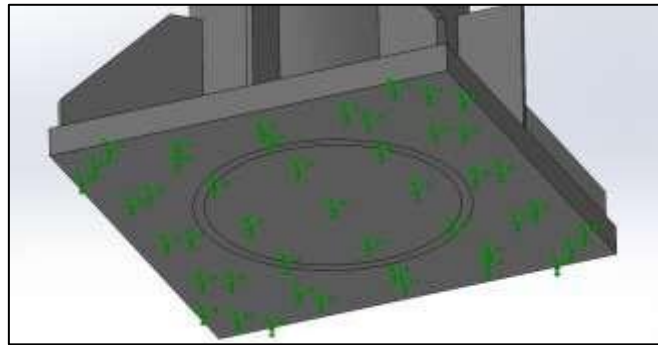
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pemberian Material

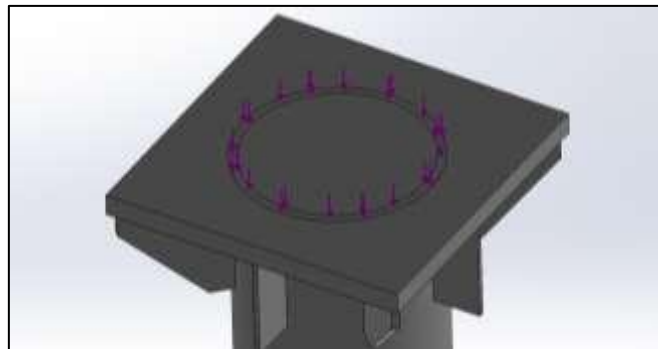
Tahap awal simulasi dilakukan dengan menentukan material pada setiap komponen model menggunakan menu Apply Material pada SolidWorks Simulation. Material API 5L Grade X52 diterapkan pada komponen pipe, sedangkan material DH-36 diterapkan pada komponen leg stool dan stiffener. Penentuan material ini bertujuan agar simulasi menggunakan sifat mekanik yang sesuai dengan kondisi aktual struktur.

3.2 Penempatan Fixed Geometri dan Force

Tahap berikutnya adalah menetapkan boundary condition berupa Fixed Geometry sebagai tumpuan serta memberikan pembebanan (Force) pada permukaan yang menjadi lokasi penerimaan beban. Pengaturan fixture dan pembebanan pada SolidWorks Simulation ditampilkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



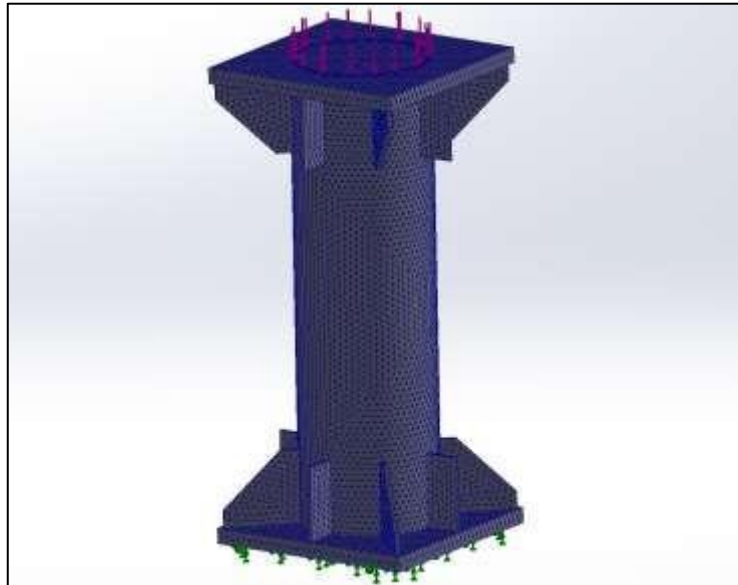
Gambar 6. Peletakan *fixture*



Gambar 7. Pemberian beban pada stool

3.3 Meshing

Setelah material dan boundary condition ditentukan, tahap selanjutnya adalah melakukan proses meshing pada model simulasi. Proses meshing bertujuan untuk membagi model geometri menjadi elemen-elemen kecil yang akan digunakan dalam proses perhitungan metode Finite Element Analysis (FEA). Pada penelitian ini digunakan Blended curvature-bases mesh berukuran 20 mm dan mesh control sebesar 5 mm. Penerapan mesh pada model simulasi ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Pemberian *blended curvature-bases mesh* pada stool

3.4 Hasil Simulasi pada 15 Titik Pembebanan

Analisis pada penelitian ini dilakukan terhadap satu jenis stool secara terpisah dengan menerapkan 15 variasi pembebanan yang berbeda. Setiap variasi pembebanan merepresentasikan beban yang diterima oleh stool pada masing-masing titik pemasangan berdasarkan distribusi beban modul. Dengan demikian, beban yang diterapkan pada simulasi telah mewakili kondisi pembebanan yang terjadi pada penggunaan aktual di lapangan, sehingga hasil analisis dapat digunakan untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan tipe stool pada seluruh titik pemasangan yang ditinjau. Berdasarkan Tabel 6 hasil simulasi pada 15 titik pembebanan menunjukkan bahwa setiap komponen menghasilkan nilai *Von Mises Stress*, *Displacement*, *Strain*, dan *Factor of Safety* (FoS) yang berbeda-beda. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh besarnya pembebanan yang diterima pada masing-masing komponen. Secara umum, semakin besar beban yang diberikan, maka nilai tegangan, perpindahan, dan regangan cenderung meningkat, sedangkan nilai *Factor of Safety* cenderung menurun.

Tabel 6 Hasil simulasi 15 titik pembebanan

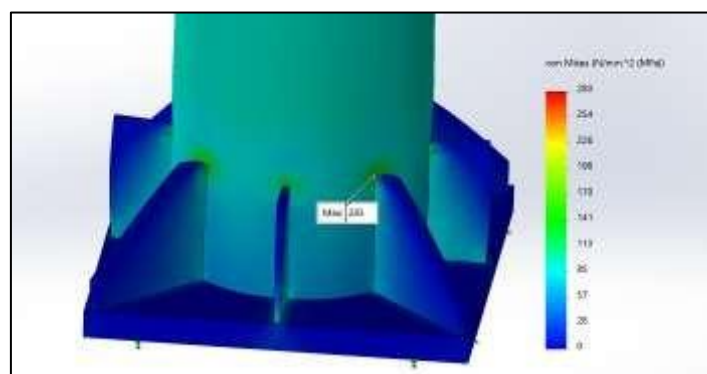
Komponen	Beban (kN)	Von Mises (N/mm ²)		Displacement (mm)		Strain		FoS
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	
W1	459,25	8×10^{-4}	70	1×10^{-30}	0.148	$6,518 \times 10^{-9}$	$1,553 \times 10^{-4}$	5,1
W2	1006.32	2×10^{-3}	154	1×10^{-30}	0.325	$1,428 \times 10^{-8}$	$3,403 \times 10^{-4}$	2,3
W3	856.36	2×10^{-3}	130	1×10^{-30}	0.277	$1,215 \times 10^{-8}$	$2,896 \times 10^{-4}$	2,7
W4	1058.90	2×10^{-3}	161	1×10^{-30}	0.342	$1,503 \times 10^{-8}$	$3,581 \times 10^{-4}$	2,2
W5	375.80	7×10^{-4}	57	1×10^{-30}	0.121	$5,334 \times 10^{-9}$	$1,271 \times 10^{-4}$	6,2
W6	1546.29	3×10^{-3}	236	1×10^{-30}	0.500	$2,195 \times 10^{-8}$	$5,229 \times 10^{-4}$	1,5
W7	1850.30	3×10^{-3}	283	1×10^{-30}	0.598	$2,626 \times 10^{-8}$	$6,257 \times 10^{-4}$	1,3
W8	1832.80	3×10^{-3}	280	1×10^{-30}	0.529	$2,601 \times 10^{-8}$	$6,198 \times 10^{-4}$	1,3
W9	1818.40	3×10^{-3}	277	1×10^{-30}	0.588	$2,581 \times 10^{-8}$	$6,149 \times 10^{-4}$	1,3
W10	1551.04	3×10^{-3}	236	1×10^{-30}	0.501	$2,201 \times 10^{-8}$	$5,245 \times 10^{-4}$	1,5
W11	836.36	2×10^{-3}	127	1×10^{-30}	0.270	$1,187 \times 10^{-8}$	$2,828 \times 10^{-4}$	2,8
W12	1595.33	3×10^{-3}	243	1×10^{-30}	0.516	$2,264 \times 10^{-8}$	$5,395 \times 10^{-4}$	1,5
W13	1216.75	2×10^{-3}	185	1×10^{-30}	0.393	$1,272 \times 10^{-8}$	$4,111 \times 10^{-4}$	1,9
W14	1521.57	3×10^{-3}	232	1×10^{-30}	0.492	$2,160 \times 10^{-8}$	$5,145 \times 10^{-4}$	1,5
W15	597.81	11×10^{-4}	91	1×10^{-30}	0.193	$8,485 \times 10^{-9}$	$2,021 \times 10^{-4}$	3,9

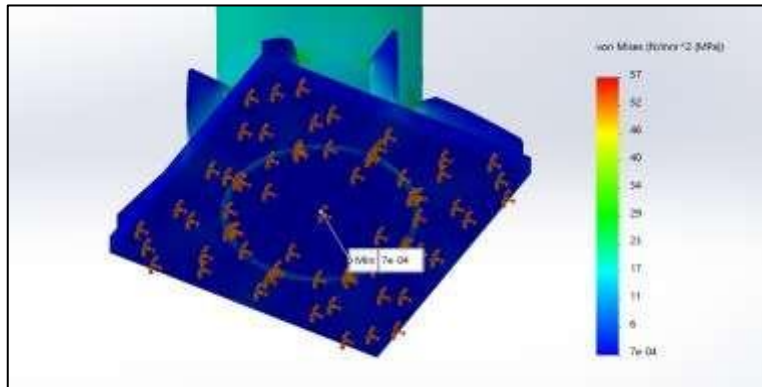
Tabel 7 Hasil evaluasi pada 15 titik pembebanan

Komponen	FoS	Keputusan Desain	Keterangan
W1	5,1	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W2	2,3	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W3	2,7	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W4	2,2	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W5	6,2	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W6	1,5	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W7	1,3	Menjadi acuan desain tunggal	Nilai FoS minimum menjadi acuan desain stool Tunggal sebagai batas aman.
W8	1,3	Menjadi acuan desain tunggal	Nilai FoS minimum menjadi acuan desain stool Tunggal sebagai batas aman.
W9	1,3	Menjadi acuan desain tunggal	Nilai FoS minimum menjadi acuan desain stool Tunggal sebagai batas aman.
W10	1,5	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W11	2,8	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W12	1,5	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W13	1,9	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W14	1,5	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.
W15	3,9	Menggunakan desain tunggal	Nilai FoS memenuhi kriteria keamanan di atas batas aman.

3.5 Pembahasan Stress

Berdasarkan informasi dari Tabel 6 nilai *Von Mises stress* paling tinggi terdapat pada komponen W7 dengan angka 283 N/mm^2 saat diberikan beban $1850,30 \text{ kN}$. Angka ini mengindikasikan bahwa komponen W7 mengalami tekanan yang lebih besar dibandingkan komponen lainnya akibat beban yang paling berat. Hasil *stress* sebesar 283 N/mm^2 yang didapat dikategorikan aman karena nilai x dari *stress* tersebut lebih kecil daripada nilai *yield strength* pada material yang digunakan sebagai pengujian, oleh karena itu *stool* ini masih berada pada daerah elastis dan aman digunakan. Sedangkan, nilai terendah dari *Von Mises stress* diperoleh pada komponen W5 dengan hasil $7 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^2$ di bawah beban $375,80 \text{ kN}$. Tegangan yang lebih rendah ini muncul karena beban yang diterima oleh komponen tersebut jauh lebih sedikit dibandingkan titik pembebanan yang lain. Maka dari itu dilihat dari nilai *Von mises* maksimal berada di bawah *yield strength* material API 5L Grade X52 sebesar 359 N/mm^2 yaitu berkisar 78% dari batas elastis. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur masih bekerja dalam zona elastis dan tidak menunjukkan potensi kegagalan plastis[10]. Simulasi *Von Mises stress* maksimum dan minimum dijelaskan pada Gambar 9 dan Gambar 10.

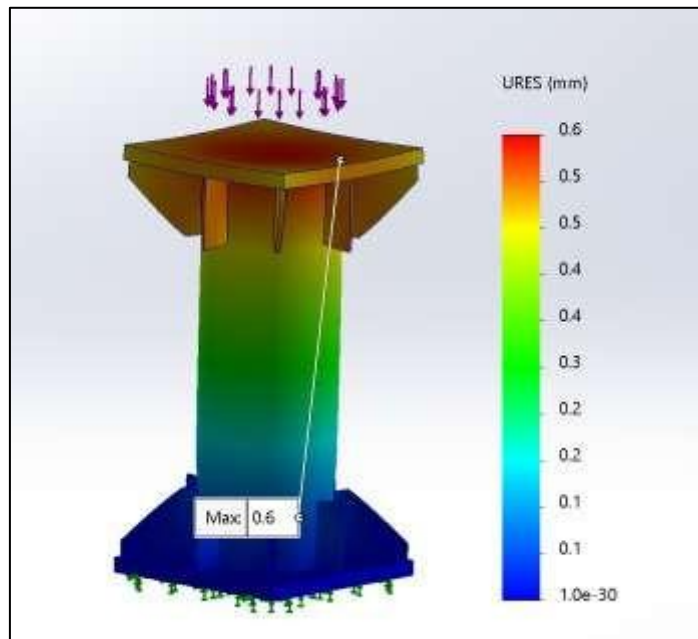
Gambar 9. Hasil simulasi *Von-Mises stress* maksimum



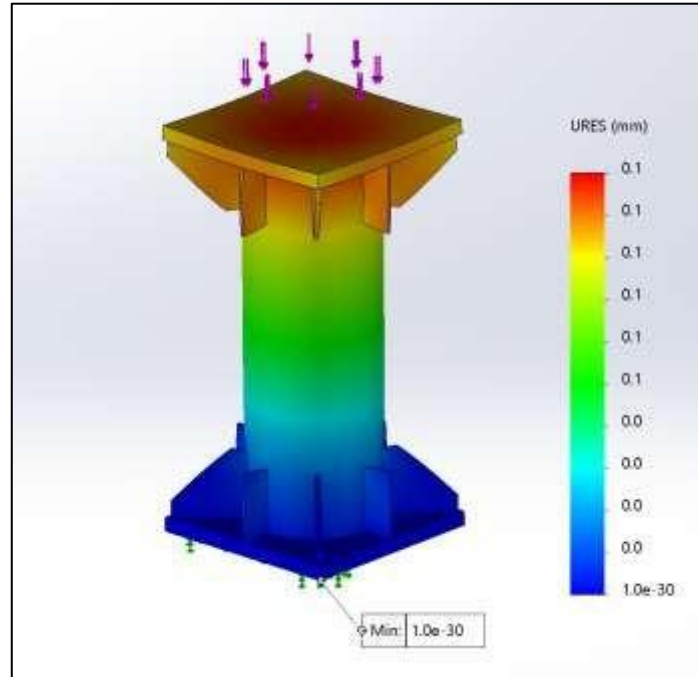
Gambar 10. Hasil simulasi *Von-Mises stress* minimum

3.6 Pembahasan *Displacement*

Hasil pengujian *displacement* didapatkan nilai maksimum diperoleh dari komponen W7 sebesar 0,6 mm dengan letak titik maksimum terdapat pada *top plate* pada *stool* tersebut dengan ditandai dengan warna merah, pada bagian yang ditandai berwarna merah ini merupakan bagian yang paling besar terkena deformasi beban yang dialami *stool* tersebut akibat menahan beban yang berada di atasnya. Kemudian untuk nilai minimum yang didapat dari komponen W5 sebesar 1×10^{-30} mm dengan letak titik minimum yang terletak di bagian *bottom plate* pada *stool* yang menjadi pusat beban dari pengujian ini dan ditandai dengan warna biru gelap, bagian yang berwarna biru gelap ini merupakan bagian yang paling sedikit terkena deformasi akibat beban yang ditahan oleh *stool*, dijelaskan pada Gambar 11 dan Gambar 12.



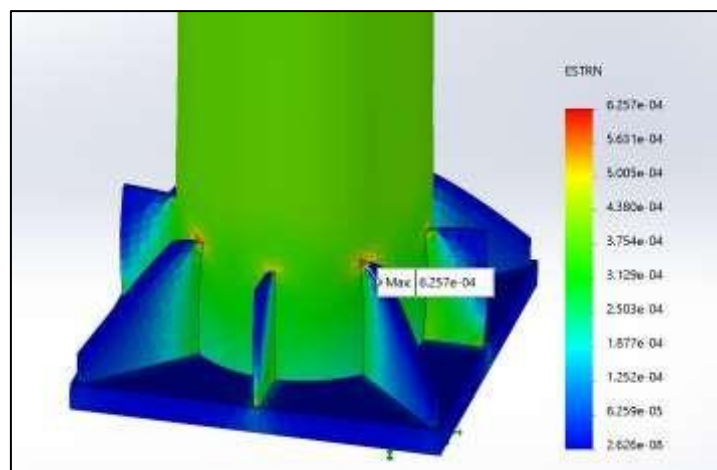
Gambar 11. Hasil simulasi *displacement* maksimum



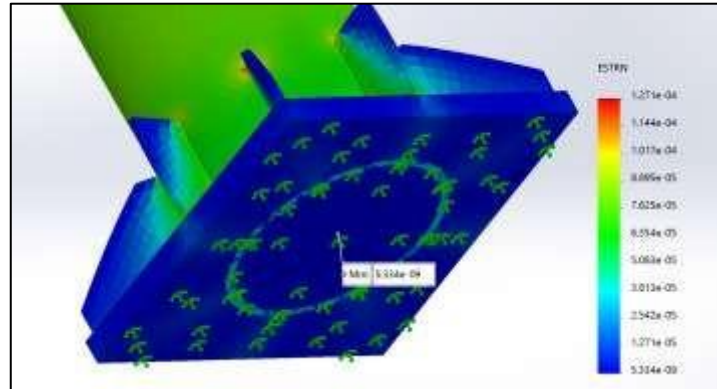
Gambar 12. Hasil simulasi *displacement* minimum

3.7 Pembahasan *Strain*

Hasil pengujian strain nilai maksimum didapatkan hasil dari komponen W7 sebesar $6,257 \times 10^{-4}$ dengan letak posisi maksimum sambungan antara *leg stool* dan *main pipe stool*. Hal ini dikarenakan pada daerah yang berwarna merah merupakan daerah yang terkena dampak lebih besar untuk menahan beratnya modul pada *stool* ini. Untuk hasil minimum didapatkan nilai komponen W5 sebesar $5,334 \times 10^{-9}$ posisi letak titik minimum berada pada *bottom plate* yang ditandai dengan warna biru gelap, pada daerah berwarna biru terkena dampak lebih kecil dikarenakan sedikitnya reaksi regangan dijelaskan pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 13. Hasil simulasi *strain* maksimum

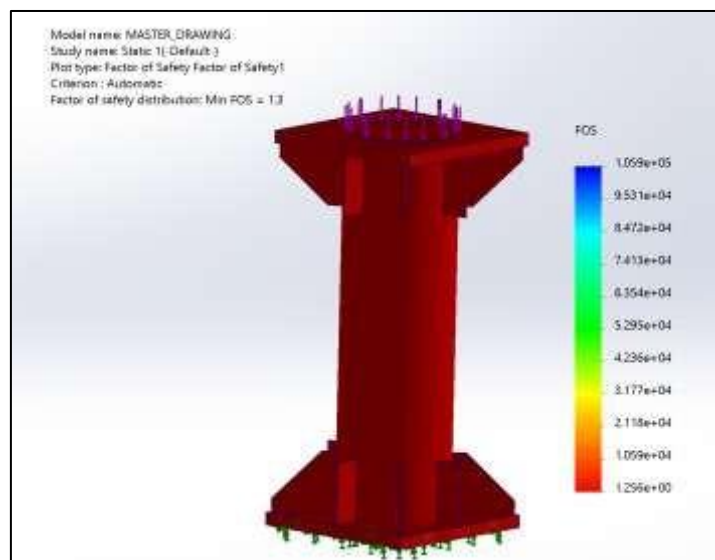


Gambar 14. Hasil simulasi *strain* minimum

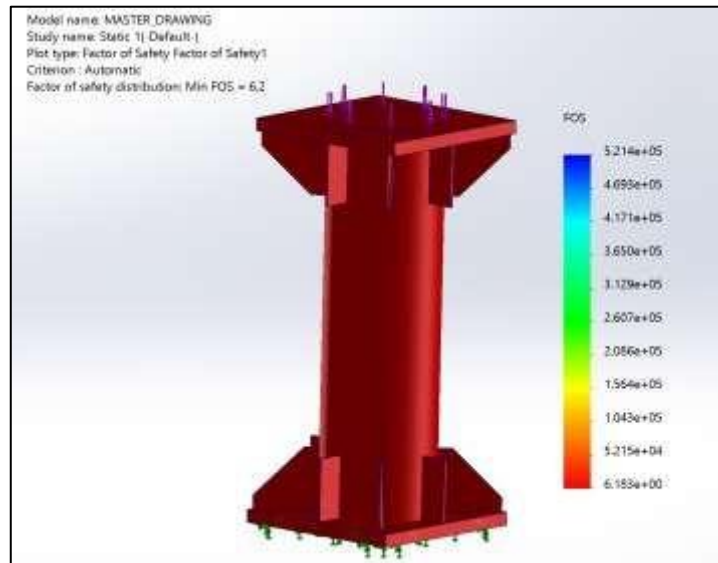
3.8 Pembahasan *Factor of Safety*

Factor of safety (FoS) merupakan faktor penting dalam menentukan kualitas suatu produk yang ingin dirancang. Suatu struktur dinyatakan tidak layak digunakan apabila nilai *safety factor* yang diperoleh kurang dari 1, karena hal tersebut mengindikasikan bahwa tegangan yang terjadi pada struktur telah melampaui kekuatan material yang digunakan. Jika, struktur memiliki nilai 1 maka hanya dapat menahan beban itu saja sedangkan nilai *safety factor* yang diperoleh jauh melampaui batas minimum dan mencapai tiga digit atau lebih, maka struktur tersebut dapat dikategorikan dalam kondisi yang sangat aman terhadap pembebanan yang diberikan[2].

Berdasarkan hasil simulasi, nilai FoS terendah diperoleh pada komponen W7 sebesar 1,3 dengan pembebanan 1850,30 kN. Nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur masih memiliki margin keamanan karena nilai FoS lebih besar dari 1, sehingga tegangan yang terjadi belum mencapai batas luluh material. Sementara itu, nilai FoS tertinggi diperoleh pada komponen W5 sebesar 6,2 dengan pembebanan 375,80 kN. Tingginya nilai FoS pada komponen tersebut menunjukkan bahwa struktur memiliki margin keamanan yang lebih besar akibat beban yang diterima relatif lebih kecil dan begitupun sebaliknya. Adanya perbedaan nilai FoS yang cukup jauh dari satu titik ke titik lainnya tidak menandakan bahwa titik terendah dianggap tidak aman, dikarenakan nilai faktor keamanan yang direkomendasikan untuk struktur dengan pembebanan statik berada pada rentang 1,25 hingga 2,0 untuk memastikan struktur aman terhadap beban yang diterima[7]. Dapat dijelaskan pada Gambar 15 dan Gambar 16



Gambar 15. Hasil simulasi *factor of safety* pada titik terberat



Gambar 16. Hasil simulasi *factor of safety* pada titik tetingan

3.9 Hasil Evaluasi pada 15 Titik Pembebanan

Berdasarkan hasil simulasi yang terangkum pada Tabel 7, dilakukan evaluasi terhadap 15 kondisi pembebanan untuk mengkaji kelayakan penerapan satu tipe stool sebagai pengganti tiga tipe stool yang sebelumnya digunakan. Evaluasi dilakukan berdasarkan nilai *Factor of Safety* (FoS) yang diperoleh pada masing-masing kondisi pembebanan. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh kondisi pembebanan memiliki nilai FoS di atas batas minimum yang direkomendasikan, dengan nilai terendah sebesar 1,3 yang terjadi pada komponen W7, W8, dan W9. Ketiga komponen tersebut merupakan kondisi dengan pembebanan terbesar sehingga dijadikan sebagai acuan dalam penentuan desain stool tunggal. Sementara itu, kondisi pembebanan lainnya menghasilkan nilai FoS yang lebih tinggi sehingga tetap memenuhi persyaratan keamanan struktur. Nilai FoS sebesar 1,3 menunjukkan bahwa struktur masih memiliki kemampuan menahan beban hingga 1,3 kali lebih besar dari beban kerja yang diterima sebelum mencapai batas keamanannya. Oleh karena itu, berdasarkan hasil evaluasi tersebut dapat disimpulkan bahwa penerapan satu tipe stool layak digunakan sebagai pengganti tiga tipe stool yang sebelumnya diterapkan tanpa mengurangi tingkat keamanan struktur.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian evaluasi kekuatan struktur stool terhadap pembebanan statik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA), dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) menunjukkan bahwa struktur stool mampu menahan seluruh variasi beban statis pada 15 titik pembebanan yang telah dianalisis. Tegangan maksimum (Von Mises stress) sebesar 283 N/mm² terjadi pada komponen W7 akibat pembebanan 1850,30 kN. Nilai tersebut masih lebih kecil dari yield strength material API 5L Grade X52 sebesar 359 N/mm², sehingga struktur masih berada pada daerah elastis dan belum mengalami kondisi yang dapat menyebabkan deformasi plastis. Selain itu, nilai displacement maksimum sebesar 0,6 mm dan strain maksimum sebesar $6,257 \times 10^{-4}$ juga terjadi pada komponen W7. Nilai tersebut menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi masih relatif kecil sehingga struktur tetap berada dalam kondisi yang aman. Hasil analisis *Factor of Safety* (FoS) berada pada rentang 1,3 hingga 6,2, sehingga telah memenuhi kriteria keamanan untuk pembebanan statis berdasarkan rekomendasi Mott, yaitu 1,25–2,0. Dengan demikian, struktur stool dinyatakan aman digunakan untuk menahan beban statis sesuai dengan kondisi pembebanan yang dianalisis.
2. Berdasarkan evaluasi terhadap 15 kondisi pembebanan, penerapan satu tipe stool tunggal terbukti layak digunakan sebagai pengganti tiga tipe stool yang sebelumnya diterapkan, dengan komponen W7, W8, dan W9 dijadikan acuan utama desain karena menahan kondisi pembebanan terbesar. Hal ini menunjukkan bahwa penyederhanaan jumlah tipe stool dapat dilakukan tanpa mengurangi aspek keamanan struktur, sekaligus berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi proses fabrikasi topside module FPSO di darat.

5 Daftar Pustaka

- [1] R. Nonci, A. Fauzi, F. D. Thamrin, and I. Pertanian Bogor, "Equilibrium: Jurnal Penelitian Pendidikan dan Ekonomi ANALISA DESKRIPSI MINYAK DAN GAS (Study Kasus Lapangan 'X')," vol. 17, p. 2, 2020, doi: 10.25134/equi.v17i02.
- [2] S. Lesmana *et al.*, "STUDI KEKUATAN SUPPORT STRUCTURE (LEG) PADA KONSTRUKSI FPSO BULK WATER SEPARATION MODULE," 2022. [Online]. Available: <http://jurnal.polibatam.ac.id/index.php/JATRA>, <https://jurnal.polibatam.ac.id/index.php/JATRA>
- [3] "PENGARUH BUKAAN PADA GELADAK FPSO TERHADAP KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL".
- [4] A. Wibisana, M. I. Shodiq, M. Naufal, A. Diputra, N. Nazhifah, and P. N. Batam, "Performance Comparison of Wheeled Soccer Robot Frames Using Finite Element Analysis (FEA)," 2025.
- [5] S. Tri Pangestu *et al.*, "Respon struktur akibat perubahan jarak stiffener pada car deck Kapal Ferry Ro-Ro".
- [6] DNV GL, "CLASS GUIDELINE Finite element analysis," 2015. [Online]. Available: <http://www.dnvgl.com>,
- [7] R. L. . Mott, E. M. . Vavrek, and Jyhwen. Wang, *Machine elements in mechanical design*. Pearson, 2018.
- [8] A. Petroleum Institute, "By Authority Of THE UNITED STATES OF AMERICA Legally Binding Document API 5L: Specification for Line Pipe."
- [9] "ASTM-A131-A131M-19".
- [10] K. Deedat Alnurrasyid, I. Nugraha Gusniar, T. Mesin, U. Singaperbangsa Karawang Jl HSRonggo Waluyo, T. Timur, and J. Barat, "Analisis kekuatan dan stabilitas struktur trolley terhadap variasi beban statis menggunakan metode elemen hingga (FEA)," *Jurnal Teknik Mesin Indonesia* |, vol. 20, no. 2, p. 1, 2025, doi: 10.71452/ysxcxc25.