

EVALUASI KEKUATAN STATIS KOLOM PADA TOPSIDE FPSO (*FLOATING PRODUCTION STORAGE AND OFFLOADING*) MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Eben Haezer Situmorang^{1*}, Meilani Mandhalena Manurung, S.T., M.T.^{2*} and Veryawan
Nanda Perkasa, S.T., M.Han^{3*}

*Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: ebenn.situmorang@gmail.com

Abstrak

FPSO Mero 3 merupakan unit penting dalam industri migas lepas pantai yang dilengkapi modul *topside*. Kolom pipa tubular pada modul ini memikul beban terpusat yang besar, sehingga rentan mengalami kegagalan *yielding*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kekuatan statis, menentukan kapasitas beban maksimum, serta memastikan *safety factor* pada kolom pipa tubular *topside* FPSO Mero 3. Evaluasi dilakukan secara numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM) via ANSYS 2024 untuk memetakan distribusi tegangan *Von Mises*, regangan, dan deformasi, yang divalidasi dengan perhitungan analitis mekanika bahan. Pemodelan 3D dibuat menggunakan ANSYS *SpaceClaim* berbasis material API 5L Grade X52 dengan ukuran *mesh* 50 mm. Pembebanan statis dihitung dari akumulasi beban mati *mezzanine* dan *upper deck*, serta memperhitungkan efek dinamik (*Dynamic Amplification Factor*) dan beban angin horizontal. Hasil simulasi menunjukkan deformasi maksimum sebesar 1,0765 mm, regangan elastis maksimum 0,00072209, dan tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 144 MPa pada Kolom 5. Nilai tegangan ini berada jauh di bawah batas *yield strength* material (360 MPa), mengindikasikan struktur bekerja sepenuhnya dalam fase elastis. Evaluasi kapasitas struktur mengacu pada DNVGL-RP-C208 menghasilkan kapasitas beban maksimum sebesar 188,26 ton. Verifikasi berdasarkan DNV-OS-C101 memperoleh nilai *Safety Factor* sebesar 2,50, yang melebihi batas izin minimum 1,5. Dengan demikian, kolom pipa tubular *topside* FPSO Mero 3 dinyatakan aman, stabil, dan memenuhi standar keselamatan struktural lepas pantai.

Kata kunci: FPSO Mero 3, Kapasitas Maksimum, *Safety Factor*, Metode Elemen Hingga, ANSYS 2024.

Abstract

The Mero 3 FPSO is a critical unit in the offshore oil and gas industry equipped with a topside module. The tubular pipe columns in this module bear large concentrated loads, making them susceptible to yielding failure. This study aims to evaluate the static strength, determine the maximum load capacity, and verify the safety factor of the topside tubular pipe columns on the Mero 3 FPSO. The evaluation was conducted numerically using the Finite Element Method (FEM) via ANSYS 2024 to map the distribution of von Mises stress, strain, and deformation, which was validated using analytical calculations based on the mechanics of materials. The 3D model was created using ANSYS *SpaceClaim* based on API 5L Grade X52 material with a mesh size of 50 mm. The static loading was calculated from the accumulated dead loads of the mezzanine and upper deck, while also accounting for dynamic effects (*Dynamic Amplification Factor*) and horizontal wind loads. The simulation results show a maximum deformation of 1.0765 mm, a maximum elastic strain of 0.00072209, and a maximum von Mises stress of 144 MPa at Column 5. This stress value is well below the material's yield strength (360 MPa), indicating that the structure is operating entirely within the elastic range. A structural capacity evaluation based on DNVGL-RP-C208 yields a maximum load capacity of 188.26 metric tons. Verification according to DNV-OS-C101 yields a *Safety Factor* of 2.50, which exceeds the minimum allowable limit of 1.5. Thus, the tubular pipe columns of the Mero 3 FPSO topside have been deemed safe, stable, and compliant with offshore structural safety standards.

Keywords : FPSO Mero 3, Maximum Capacity, *Safety Factor*, Finite Element Method, ANSYS 2024.

1 Pendahuluan

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) kini menjadi salah satu pilihan utama dalam industri minyak dan gas di daerah perairan [1]. Unit ini digunakan untuk memproses serta menyimpan sementara minyak mentah atau gas yang didapatkan dari anjungan produksi atau langsung dari sumur bawah laut. Untuk membantu proses produksi, penyimpanan, dan pemuatan, FPSO dilengkapi dengan berbagai *topside module*, yang merupakan struktur bangunan terletak di atas FPSO itu sendiri [2]. Fungsi dari modul-modul ini adalah untuk memproses fluida hidrokarbon dari lapangan lepas pantai. Secara berkala, minyak atau gas yang sudah diproses disimpan di tangki di dalam kapal FPSO, lalu dikirim ke kapal tanker untuk diangkut ke fasilitas darat.

Penelitian ini menjadikan proyek *topside* FPSO Mero 3 sebagai objek penelitian, khususnya pada kekuatan statis kolom modul yang menggunakan profil pipa tubular. Meskipun desain kolom ini terlihat sederhana secara geometri, tantangan utamanya terletak pada besarnya beban terpusat yang harus ditanggung oleh penampang pipa tersebut. Identifikasi masalah dalam penelitian ini berfokus pada potensi kegagalan struktur akibat konsentrasi tegangan pada area tumpuan pipa [13]. Seringkali, evaluasi kekuatan pada pipa tubular pendukung modul masih terabaikan dibandingkan analisis lambung, padahal ketidakmampuan pipa dalam mendistribusikan gaya internal dapat memicu tekuk (*buckling*) atau tegangan yang melebihi batas yield.

Kapasitas maksimum kolom pipa tubular tidak dapat ditentukan dari satu mekanisme kegagalan saja, melainkan harus mempertimbangkan dua batas yang bersaing secara bersamaan, yaitu kegagalan luluh (*yielding*) ketika tegangan mencapai kuat leleh material, dan kegagalan tekuk (*buckling*) yang dapat terjadi lebih awal pada kolom dengan rasio kelangsingan tinggi. Dalam operasinya, kolom pipa tubular ini harus mampu menahan kombinasi beban statis dan dinamis yang kompleks. Berdasarkan standar industri, evaluasi harus mencakup berbagai kondisi kritis seperti kondisi saat beroperasi di laut, kondisi *extreme*, hingga fase *lifting* [4]. Analisis pada kolom pipa tubular pada proyek *topside* Mero 3 ini bertujuan untuk memastikan *safety factor* tetap terpenuhi di setiap kondisi pembebanan statis tersebut [5].

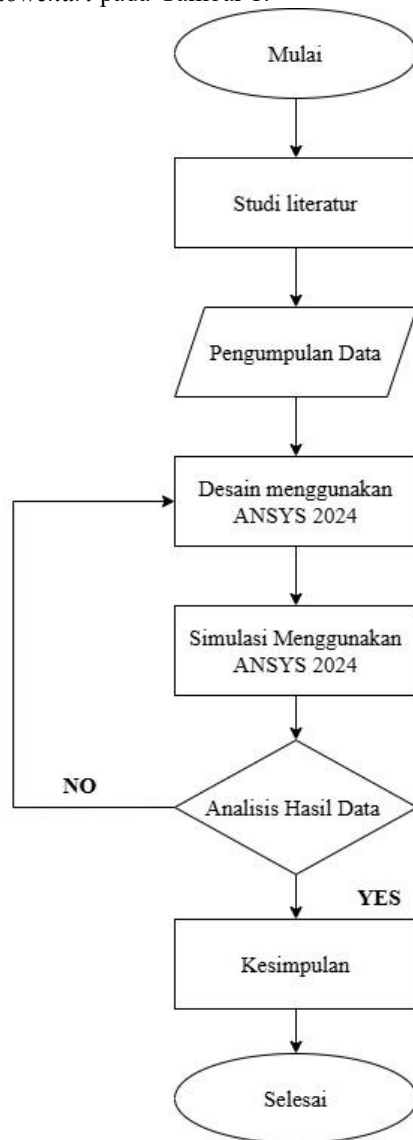
Meskipun desain kolom pipa tubular tidak sekompleks struktur sambungan lainnya, penggunaan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) tetap menjadi kebutuhan dalam penelitian ini [5]. Analisis manual seringkali terlalu menyederhanakan distribusi beban pada penampang melingkar pipa, terutama pada titik pertemuan antara pipa dengan struktur *deck*. Dengan Metode Elemen Hingga, distribusi tegangan Von Mises dapat dipetakan secara lebih akurat pada seluruh permukaan pipa, sehingga titik kritis yang berpotensi mengalami deformasi dapat teridentifikasi secara visual dan numerik [12].

Evaluasi kapasitas struktural pada kolom ini merujuk pada standar DNVGL-RP-C208 untuk menentukan kapasitas maksimum melalui analisis elemen hingga non-linier yang mempertimbangkan ketidaklinieran material dan geometri sekaligus [6]. Pendekatan ini memerlukan pengaturan meshing yang presisi guna memastikan konvergensi data dan akurasi distribusi tegangan pada area dengan konsentrasi beban tinggi di sekitar tumpuan [7]. Guna memastikan *safety factor* tetap aman, penentuan kriteria desainnya juga divalidasi melalui standar DNV-OS-C101 supaya struktur tetap stabil terhadap risiko tekuk secara menyeluruh [8].

Dalam konteks ini, kapasitas umum kolom diukur berdasarkan rasio antara tegangan ekuivalen Von Mises terhadap tegangan izin material yang telah direduksi oleh faktor keamanan, guna memastikan bahwa struktur tidak hanya kuat secara luluh tetapi juga stabil terhadap risiko tekuk secara menyeluruh [6]. Verifikasi hasil dilakukan dengan memastikan bahwa nilai *safety factor* aktual yang diperoleh berada di atas batas izin minimum sebesar 1,5 yang menunjukkan bahwa desain kolom memiliki cadangan kekuatan yang memadai untuk menghadapi beban yang sangat besar [7]. Analisis Metode Elemen Hingga merupakan pendekatan paling komprehensif yang dapat menangkap fenomena ini dengan tepat jika dibandingkan dengan metode analitis maupun empiris lainnya. Namun demikian, Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan melakukan evaluasi kekuatan struktur yang bertujuan untuk menentukan batas kapasitas beban maksimum serta memastikan pemenuhan *safety factor* pada kolom pipa tubular FPSO Mero 3 menggunakan *software* ANSYS 2024.

2 Metodologi Penelitian

Dalam penelitian kuantitatif ini, terdapat beberapa tahapan yang harus dilalui yaitu studi literatur, pengumpulan data, desain menggunakan Ansys, simulasi, analisis hasil data dan kesimpulan. Alur tahapan proses pengujian dapat ditampilkan dengan *flowchart* pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir pengerjaan tugas akhir (*Flowchart*)

Tahapan Penelitian

Penjelasan mengenai diagram alir pengerjaan tugas akhir dapat dilihat pada uraian berikut ini:

2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengkaji referensi ilmiah dan standar industri yang berkaitan langsung dengan tujuan penelitian, yaitu menentukan kapasitas maksimum dan safety factor kolom pipa tubular pada topside FPSO. Standar utama yang digunakan sebagai acuan adalah DNVGL-RP-C208 untuk evaluasi kekuatan batas struktur menggunakan analisis elemen hingga, serta API Spec 5L untuk spesifikasi material pipa Grade X52.

2.2 Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini meliputi dimensi utama modul topside, geometri penampang kolom tubular, spesifikasi material API 5L Grade X52, serta laporan berat dari masing-masing *deck* [9]. Data-data tersebut digunakan sebagai input pemodelan di ANSYS 2024 untuk menghitung distribusi tegangan, menentukan kapasitas maksimum kolom, dan memverifikasi pemenuhan safety factor pada setiap kondisi pembebanan statis.

2.3 Data Struktur

Dalam penelitian ini, struktur yang dianalisis adalah struktur kolom modul *topside* FPSO Mero 3. Struktur ini dimodelkan menggunakan *software* ANSYS 2024 untuk melakukan analisis kekuatan statis guna menentukan kapasitas maksimum dan memastikan *safety factor* terpenuhi. Berikut adalah model dari struktur *topside* dan kolom tersebut:

2.3.1 Struktur *Topside*

Untuk mendukung analisis kekuatan statis, pemodelan struktur ini mencakup beberapa aspek data berikut:

Tabel 1. Main dimension module [9]

Main dimension Module	
Length	8.5 m
Width	5.5 m
Height	6.7 m



Gambar 2. *Topside* FPSO Mero 3 [9]

2.3.2 Struktur Kolom

Struktur kolom dianalisis menggunakan material API 5L X52N (PSL2) dengan fokus pada evaluasi kekuatan penampang tubular. Data pendukung untuk analisis ini meliputi:

Tabel 2. Material grade [10]

API Spec 5L PSL 2					
Pipe Grade	Yield Strength MPa (ksi)		Tensile Strength MPa (ksi)		Y/T Ratio
	min	max	min	max	max
X52	360 (52.2)	530 (76.9)	460 (66.7)	760 (110.2)	0.93

Tabel 3. dimensi pipa tubular kolom [10]

Length (mm)	Pipe Tubular (inch)	Thk (mm)	Weight (kg)
3480	12	25.4	648.7

2.3.3 Laporan Berat *Topside* FPSO Mero 3

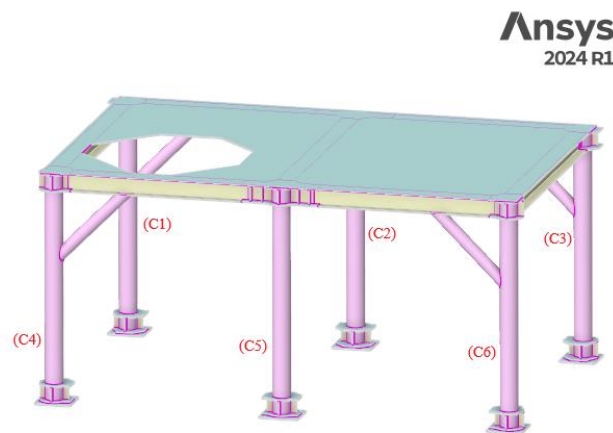
Pada tahap pengumpulan data, didapatkan data yang berhasil dikumpulkan yaitu berupa data berat dari *topside* FPSO Mero 3 secara keseluruhan, dan berat dari seluruh konstruksi. Selanjutnya untuk data berat dari konstruksi module Mero 3 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Daftar berat *Topside* FPSO Mero 3 [9]

<i>Topside</i> FPSO Mero 3	<i>Lower Deck Weight (kg)</i>	<i>Mezz Deck Weight (kg)</i>	<i>Upper Deck Weight (kg)</i>
<i>Structure</i>	20222	20170	12857
<i>Equipment</i>	48620	-	-
<i>Piping</i>	7920	14520	17160
<i>E&I</i>	2040	2040	1710
<i>Total (kg)</i>	78802	36730	31727

2.4 Desain 3D Kolom Menggunakan ANSYS 2024

Data yang diperoleh akan diolah menjadi model dengan ANSYS SpaceClaim. Model 3D ini digunakan untuk menganalisa beban statis dan simulasi. Model 3D yang dimaksud ditampilkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Kolom *Topside* FPSO Mero 3

2.5 Simulasi menggunakan ANSYS 2024

2.5.1 Landasan Teori Perhitungan

Sebelum dilakukan simulasi menggunakan metode elemen hingga, terlebih dahulu dilakukan perhitungan teoritis sebagai dasar penentuan parameter pembebanan sekaligus validasi hasil simulasi. Dalam penelitian ini, validasi analitis dilakukan menggunakan pendekatan mekanika bahan dengan asumsi bahwa kolom menerima beban tekan aksial yang terdistribusi secara merata. Perhitungan manual difokuskan pada evaluasi respons global kolom berupa tegangan aksial, regangan aksial, dan deformasi elastis. Sementara itu, distribusi tegangan lokal, konsentrasi tegangan pada sambungan pelat kolom, serta pengaruh geometri tiga dimensi dievaluasi menggunakan metode elemen hingga melalui ANSYS 2024. Langkah selanjutnya adalah dengan mencari nilai gaya yang akan digunakan sebagai acuan perhitungan beban, gaya merupakan suatu tarikan atau dorongan. Selanjutnya setelah dapat nilai gaya yang akan digunakan untuk proses simulasi. Berikut ini penjelasan singkat mengenai beberapa besaran yang diamati yakni *deformation*, *strain*, dan *stress*. Deformasi adalah perubahan bentuk pada benda yang dikenai gaya [11]. Deformasi dapat dirumuskan menggunakan persamaan (1):

$$\Delta L = \frac{F \cdot L}{A \cdot E} \quad (1)$$

Keterangan :

ΔL : Pertambahan panjang (mm)

F : Besar gaya tekan/tarik (N)

L : Panjang mula-mula (mm)

A : Luas penampang (mm²)

E : Modulus Elastisitas (N/mm²)

Regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara penambahan panjang benda ΔL terhadap panjang mula-mula L [11]. Regangan dapat dirumuskan menggunakan persamaan (2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Keterangan :

ε : Regangan (tanpa satuan)

ΔL : Pertambahan panjang (m)

L : Panjang mula-mula (m)

Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai gaya persatuan luas penampang benda tersebut [11]. tegangan dapat dirumuskan menggunakan persamaan (3):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Keterangan :

σ : Tegangan (N/m²)

F : Besar gaya tekan/tarik (N)

A : Luas penampang (m²)

Karena gaya pembebanan pada simulasi diberikan pada pelat atas, maka pada perhitungan manual gaya tersebut diasumsikan diteruskan sepenuhnya menuju kolom sebagai elemen pemikul utama. Dengan demikian, analisis manual dilakukan pada masing-masing kolom menggunakan prinsip beban tekan aksial. Pendekatan ini sesuai dengan jalur transfer beban aktual pada struktur, yaitu dari deck menuju pelat, kemudian diteruskan ke kolom hingga mencapai tumpuan [11]. Gaya dapat didefinisikan sebagai berikut menggunakan persamaan (4):

$$F = w \times g \quad (4)$$

Keterangan :

F : gaya (Newton)

w : massa benda (kg)

g : percepatan gravitasi 9,81 m/s²

Untuk mengevaluasi batas keamanan struktur kolom, digunakan parameter *Safety Factor* (SF) yang membandingkan tegangan luluh material (*Yield Strength*) terhadap tegangan ekuivalen maksimum [3]. hasil simulasi *Von-Mises Stress* menggunakan persamaan (5):

$$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{maks}} \quad (5)$$

Berdasarkan prinsip proporsionalitas linear pada material di fase elastis, kapasitas batas gaya vertikal maksimum (F_{maks}) yang mampu ditahan oleh kolom sebelum mengalami kegagalan plastis dihitung menggunakan persamaan substitusi berikut menggunakan persamaan (6):

$$F_{maks} = F_{aktual} \times SF \quad (6)$$

Kapasitas gaya maksimum tersebut kemudian dikonversikan menjadi batas tumpuan massa maksimum (W_{maks}) menggunakan pembagi percepatan gravitasi menggunakan persamaan (7):

$$W_{maks} = \frac{F_{maks}}{g} \quad (7)$$

Selanjutnya yang dilakukan adalah untuk mencari hasil dari perhitungan nilai w (*weight*) terlebih dahulu, yang nantinya akan diasumsikan sebagai hasil dari berat yang telah ditentukan, untuk mencari nilai dari gaya yang akan digunakan sebagai proses simulasi. Dikarenakan kolom berada di *lower deck* maka berat yang di gunakan adalah berat *mezz deck* dan *upper deck*, dengan cara [11]:

$$\begin{aligned} W_{total} &= W_{mezz\ deck} + W_{upper\ deck} \\ &= 36730\ kg + 31727\ kg \\ &= 68457\ kg \end{aligned}$$

$$F = W_{total} \times g$$

$$F = 68457 \times 9,81$$

$$F = 671563,17\ N$$

Beban operasional aktual modul *topside* pada kondisi di laut lepas (*In-Place Condition*) merupakan kombinasi dari beban mati struktur dan beban lingkungan dinamis (seperti angin dan gelombang). efek dinamis laut tersebut diintegrasikan ke dalam software ANSYS Static Structural menggunakan pendekatan Statis Ekuivalen yang merujuk pada metodologi A. Yadhav & M. Kulkarni (2023) serta standar regulasi DNV-OS-C101 [4] [8].

- Perubahan Gaya Aksial Vertikal (F_z) akibat Akselerasi Gelombang

Beban vertikal awal berasal dari berat mati *mezzanine* dan *upper deck* sebesar 671563,17 N. Di laut, gerakan kapal memicu gaya inersia tambahan yang searah gaya berat. Berdasarkan ketentuan kondisi *Normal Operating In-Place* pada standar DNV-OS-C101, efek tersebut diakomodasi dengan mengalikan beban mati dengan Faktor Amplifikasi Dinamis *Dynamic Amplification Factor* (DAF) sebesar 1,1 (mewakili kenaikan beban inersia 10%) [8]. Formulasinya adalah:

$$F_z = 671563,17 \text{ N} \times 1,1 = 738719,49 \text{ N}$$

- Penambahan Gaya Lateral Horizontal (F_x) akibat Beban Angin (*Wind Load*)

Kondisi operasional *In-Place* di laut mengharuskan adanya validasi terhadap terpaan angin horizontal yang menghantam dinding modul. Berdasarkan pendekatan praktis pradesain struktur lepas pantai, beban angin statis ekuivalen diestimasikan sebesar 5% dari total beban vertikal awalnya [4]. Formulasinya adalah:

$$F_x = 671563,17 \text{ N} \times 0,05 = 33578,15 \text{ N}$$

Tahap akhir sebelum proses simulasi adalah menetapkan landasan teori perhitungan dari data yang didapatkan. Dalam analisis metode elemen hingga, ketepatan ukuran *mesh* sangat memengaruhi keakuratan hasil. Penelitian ini menetapkan ukuran elemen *mesh* sebesar 50 mm berdasarkan standar DNVGL-RP-C208 Bagian 5.1.3.1, yang merekomendasikan ukuran elemen berkisar antara $1t \times 1t$ hingga $5t \times 5t$ (di mana t adalah ketebalan plat) [6]. Mengingat kolom pipa tubular memiliki ketebalan (t) sebesar 25,4 mm, rentang ukuran *mesh* standar yang diizinkan adalah 25,4 mm hingga 127 mm. Dengan demikian, ukuran 50 mm ($\approx 2t$) yang dipilih secara teoritis telah valid dan memenuhi regulasi komputasi lepas pantai.

2.5.2 Simulasi Software

Untuk metode yang digunakan adalah metode simulasi menggunakan Metode Elemen Hingga di bawah ini akan dijabarkan bagaimana untuk melakukan pengujian statis menggunakan ANSYS 2024.

Langkah-langkah prosedur pengoperasian *software* ANSYS 2024 dilakukan melalui tahapan berikut:

- Pemilihan Modul Analisis: Buka aplikasi ANSYS Workbench, lalu pilih dan seret modul *Static Structural* ke dalam panel *Project Schematic*.
- Input Properti Material (*Engineering Data*): Membuat material baru bernama API 5L Grade X52 dengan memasukkan nilai *Modulus Young* (200.000 MPa), *Poisson's Ratio* (0,3), *Yield Strength* (360 MPa), dan *Ultimate Strength* (460 MPa).
- Inisialisasi Geometri dan Model: Klik dua kali pada kolom Model untuk membuka dan masuk ke jendela ANSYS Mechanical, di mana model 3D kolom *topside* yang sebelumnya telah selesai didesain di *ANSYS SpaceClaim* akan otomatis terintegrasi dan termuat.
- Diskretisasi Model (*Meshing*): Di dalam jendela ANSYS Mechanical, klik kanan menu Mesh, pilih *Insert*, lalu pilih *Method* dan *Sizing*, *select* semua *body* kolom lalu klik *Apply*, atur ukuran elemen sebesar 50 mm, dan klik *Generate Mesh*.
- Pengaturan Kondisi Batas (*Boundary Condition*):
 - Standard Earth Gravity: Klik kanan Static Structural, pilih *Insert*, lalu pilih Standard Earth Gravity, kemudian atur arahnya menghadap ke bawah (sumbu Z negatif).
 - Fixed Support: Klik kanan Static Structural, lalu pilih *Insert* Fixed Support pada seluruh permukaan ujung bawah keenam kolom untuk mengunci pergerakan struktur.
 - Force: Klik kanan Static Structural, lalu pilih *Insert* Force pada permukaan atas plat, lalu masukkan nilai beban dalam satuan Newton (arah sumbu X positif dan Z negatif) sesuai dengan data hasil F_x & F_z .
- Solution*: Klik kanan pada menu Solution, pilih *Insert*, kemudian pilih parameter evaluasi yang ingin diekstrak yaitu *Equivalent Von-Mises Stress*, *Equivalent Strain*, *Total Deformation*
- Solving*: Klik tombol Solve pada toolbar atas untuk memulai proses hitung, lalu tunggu hingga seluruh indikator status berubah menjadi centang hijau untuk mengambil visualisasi kontur hasil simulasi.

3 Analisa Data dan Pembahasan

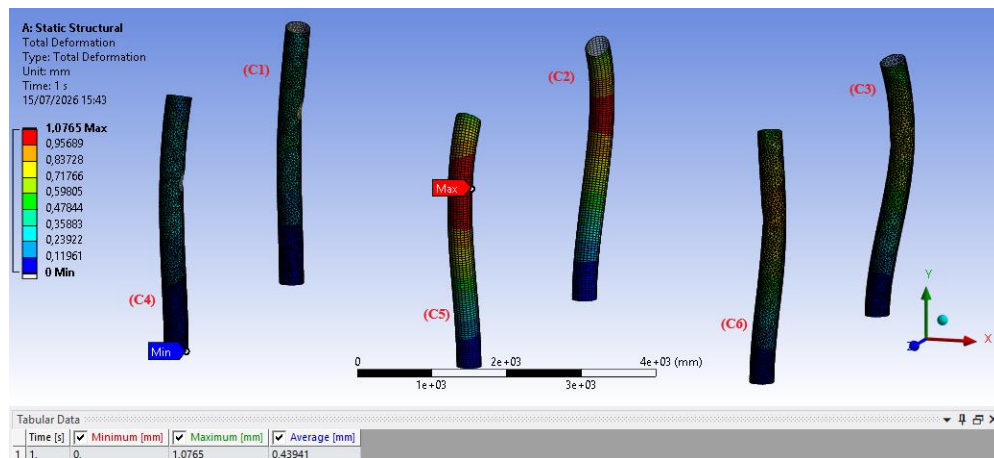
Analisis hasil simulasi Static Structural menggunakan software ANSYS 2024 dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan statis enam kolom topside FPSO Mero 3. Evaluasi dilakukan terhadap parameter *Total Deformation*, *Equivalent Elastic Strain*, dan *Equivalent Von Mises Stress*. Untuk meningkatkan keandalan hasil simulasi, dilakukan validasi analitis menggunakan perhitungan manual berdasarkan teori mekanika bahan pada kondisi pembebanan aksial. Perhitungan manual digunakan untuk mengevaluasi respons global kolom, sedangkan distribusi tegangan lokal dianalisis menggunakan metode elemen hingga.

3.1 Evaluasi *Total Deformation*

Deformasi total mengindikasikan besarnya pergeseran posisi atau perubahan bentuk pada struktur akibat beban aksial vertikal ($F_z = 738.719,49 \text{ N}$) dan gaya lateral horizontal ($F_x = 33.578,15 \text{ N}$).

Tabel 5. *Total Deformation* ANSYS 2024

	Total Deformation		
	Minimum (mm)	Maximum (mm)	Average (mm)
Kolom 1	0	0,43332	0,26433
Kolom 2	0	0,99504	0,59742
Kolom 3	0	0,74937	0,45798
Kolom 4	0	0,35051	0,20291
Kolom 5	0	1,0765	0,63495
Kolom 6	0	0,8685	0,52628



Gambar 4. *Total Deformation* ANSYS 2024

Analisis Deformasi:

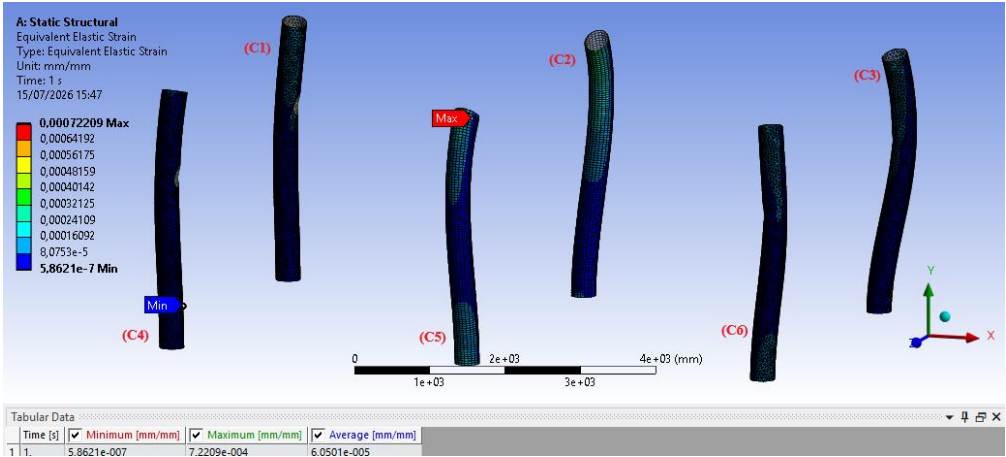
- Nilai deformasi minimum (0 mm) pada seluruh kolom berada di area paling bawah, yang konsisten dengan penerapan kondisi batas *Fixed Support* pada tumpuan bawah.
- Deformasi maksimum terbesar terjadi pada Kolom 5 (C5) yaitu sebesar 1,0765 mm. Deformasi maksimum terkecil tercatat pada Kolom 4 (C4) sebesar 0,35051 mm.
- Berdasarkan visualisasi kontur, nilai deformasi bertambah secara bertahap dari bagian bawah menuju bagian atas kolom. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan terbesar terjadi pada daerah yang menerima kombinasi beban aksial dan beban lateral yang diterapkan melalui pendekatan Equivalent Static Analysis, sehingga bagian atas kolom mengalami respons deformasi yang lebih besar dibandingkan bagian lainnya.

3.2 Evaluasi *Equivalent Elastic Strain*

Regangan elastis ekuivalen menunjukkan tingkat perubahan bentuk yang relatif terjadi per satuan panjang, dalam rentang elastis material.

Tabel 6. *Equivalent Elastic Strain* ANSYS 2024

	<i>Equivalent Elastic Strain</i>		
	<i>Minimum (mm)</i>	<i>Maximum (mm)</i>	<i>Average (mm)</i>
Kolom 1	0,00000068276	0,00024496	0,000042707
Kolom 2	0,0000010653	0,00061662	0,000089592
Kolom 3	0,000001313	0,00029574	0,000058253
Kolom 4	0,00000058621	0,00019941	0,000031858
Kolom 5	0,00000080709	0,00072209	0,000086623
Kolom 6	0,0000017418	0,00037637	0,000061121



Gambar 5. *Equivalent Elastic Strain* ANSYS 2024

Analisis Regangan:

- Nilai regangan maksimum tertinggi terjadi pada Kolom 5 (C5) sebesar 0,00072209 mm
- Nilai regangan maksimum terendah berada pada Kolom 4 (C4) yaitu 0,00019941 mm.
- Tingkat regangan yang berada jauh di bawah nilai regangan kritis luluh mengonfirmasi bahwa seluruh material kolom berada sepenuhnya dalam batas elastis linier.

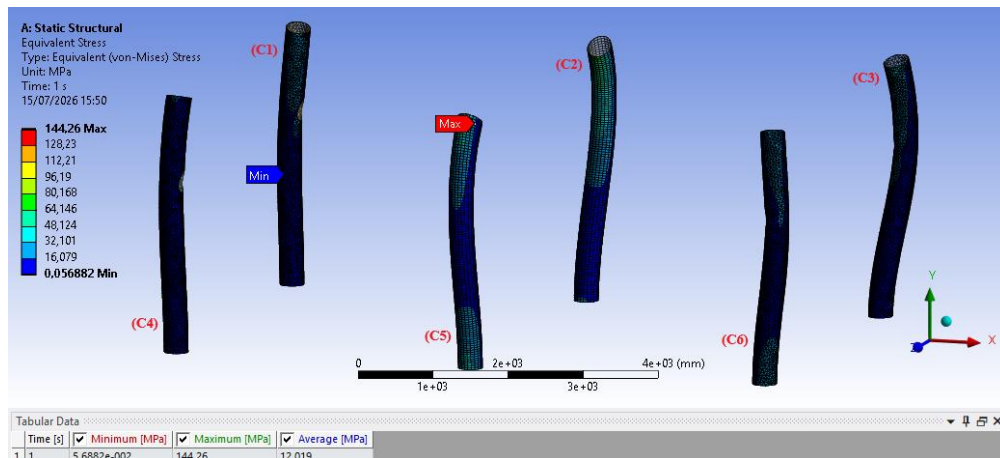
3.3 Evaluasi *Equivalent Von-Mises Stress*

Tegangan ekuivalen Von-Mises digunakan sebagai ukuran utama untuk menilai kegagalan luluh (*yielding*) pada material ductile API 5L Grade X52 yang memiliki batas tegangan luluh (σ_{yield}) sebesar 360 MPa.

Tabel 7. *Equivalent von-mises Stress* ANSYS 2024

	<i>Equivalent von-mises Stress</i>		
	<i>Minimum (mpa)</i>	<i>Maximum (mpa)</i>	<i>Average (mpa)</i>
Kolom 1	0,056882	48	8
Kolom 2	0,1835	123	18
Kolom 3	0,24889	56	12
Kolom 4	0,078745	40	6

Kolom 5	0,14731	144	17
Kolom 6	0,095725	75	12



Gambar 6. Equivalent von-mises Stress ANSYS 2024

Analisis Tegangan:

- Tegangan Von-Mises maksimum terbesar tercatat pada Kolom 5 (C5) sebesar 144 MPa.
- Tegangan Von-Mises maksimum terendah tercatat pada Kolom 4 (C4) sebesar 40 MPa.
- Rata-rata tegangan pada seluruh kolom tergolong sangat kecil, berkisar antara 6 MPa hingga 18 MPa.
- Karena nilai tegangan maksimum terbesar (144 MPa) jauh lebih kecil daripada tegangan luluh material (360 MPa), maka dapat disimpulkan bahwa $\sigma_{maks} < \sigma_{yield}$ (144 MPa < 360 MPa). Dengan demikian, tidak ada bagian dari kolom yang mengalami deformasi plastis maupun *yielding*.
- Kontur tegangan puncak terkonsentrasi di area sambungan antara pipa tubular dengan pelat tumpuan di bagian atas akibat *local stress concentration* dari transfer gaya terpusat.

3.4 Validasi perhitungan manual

Untuk mengevaluasi keandalan hasil simulasi numerik Statis *Structural* pada ANSYS 2024, dilakukan validasi menggunakan pendekatan mekanika bahan. Perhitungan manual ini difokuskan pada evaluasi respons global kolom akibat beban tekan aksial murni vertikal (F_z) sebagai pembanding dasar.

3.4.1 Perhitungan Gaya Aksial

Total beban vertikal aksial setelah memperhitungkan faktor amplifikasi dinamis (Dynamic Amplification Factor / DAF = 1,1) adalah $F_z = 738.719,49$ N. Mengingat struktur disangga secara simetris oleh 6 buah kolom utama, maka gaya aksial tekan yang diterima oleh masing-masing kolom (F_k) dihitung sebagai berikut:

$$F_k = \frac{F_z}{6} = \frac{738719,49}{6} = 123119,92 \text{ N}$$

3.4.2 Perhitungan Luas Penampang Kolom

Spesifikasi geometri pipa tubular yang digunakan memiliki diameter luar (D) sebesar 323 mm dan tebal dinding (t) sebesar 25,4 mm. Diameter dalam pipa (d) dihitung dengan:

$$d = D - 2t = 323 - 2(25,4) = 272,2 \text{ mm}$$

Luas penampang melintang pipa tubular (A) dihitung menggunakan persamaan penampang lingkaran berlubang:

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{3,14}{4}(323^2 - 272,2^2) = 23747,4 \text{ mm}^2$$

3.4.3 Perhitungan Tegangan

Tegangan tekan aksial murni (σ) pada masing-masing kolom dihitung menggunakan Persamaan (2):

$$\sigma = \frac{F_z}{A} = \frac{123119,92}{23747,4} = 5,18 \text{ MPa}$$

3.4.4 Perhitungan Deformasi

Deformasi elastis aksial (ΔL) akibat beban tekan dihitung menggunakan Persamaan (1) dengan nilai Modulus Elastisitas material API 5L Grade X52 sebesar $E = 200.000 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$ dan panjang kolom $L = 3.480 \text{ mm}$:

$$\Delta L = \frac{F_z \cdot L}{A \cdot E} = \frac{123119,92 \times 3480}{23747,4 \times 200000} = 0,090211 \text{ mm}$$

3.4.5 Perhitungan Regangan

Regangan elastis aksial (ϵ) didefinisikan sebagai perubahan panjang per satuan panjang mula-mula sesuai Persamaan (3):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0,090211}{3480} = 0,0000259$$

3.4.6 Perbandingan Hasil Perhitungan Analitis dan Simulasi ANSYS

Untuk memverifikasi serta menganalisis perbedaan antara pendekatan teori analitis sederhana dengan simulasi Metode Elemen Hingga (FEA), hasil kalkulasi dirangkum pada Tabel 8 berikut:

Tabel 8. Perbandingan Hasil Perhitungan Manual dan Simulasi ANSYS 2024

Parameter Evaluasi	Perhitungan Manual (Analitis)	Simulasi ANSYS (Rata-Rata)	Simulasi ANSYS (Maksimum Lokal)
Tegangan (σ)	5,18 MPa	6,00 – 18,00 MPa	40,00 – 144 MPa
Deformasi (ΔL)	0,0902 mm	0,2029 – 0,6350 mm	0,3505 – 1,0765 mm
Regangan Elastis (ϵ)	0,0000259	0,0000318 – 0,0000896	0,0001994 – 0,0007221

Berdasarkan Tabel 8, hasil perhitungan analitis menunjukkan tegangan sebesar 5,18 MPa, sedangkan rata-rata tegangan hasil simulasi ANSYS dari enam kolom adalah sebesar 12,17 MPa. Perbandingan kedua hasil tersebut menunjukkan persentase perbedaan sebesar 57,44%. Perbedaan ini terjadi karena perhitungan analitis menggunakan asumsi beban aksial terdistribusi secara merata pada enam kolom, sedangkan simulasi ANSYS mempertimbangkan geometri tiga dimensi, kondisi batas, distribusi pembebanan, serta konsentrasi tegangan pada struktur. Oleh karena itu, perhitungan analitis digunakan sebagai pembanding terhadap respons global struktur, sedangkan ANSYS digunakan untuk mengevaluasi respons struktur secara lebih rinci.

3.5 Perhitungan *Safety Factor* dan Kapasitas Beban Maksimum

Sesuai metodologi pada Bab 2 menggunakan rumus persamaan (5), (6), dan (7) :

3.5.1 *Safety Factor*

$$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{maks}} = \frac{360 \text{ MPa}}{144 \text{ MPa}} = 2,50$$

Berdasarkan standar DNV-OS-C101, nilai *Safety Factor* izin minimum adalah 1,50. Karena $SF_{aktual}(2,50) > 1,50$, maka struktur kolom dipastikan aman dan stabil.

3.5.2 Kapasitas Beban Maksimum

- Gaya Vertikal Aksial Maksimum (F_{maks}):

$$F_{maks} = F_{aktual} \times SF = 738.719,49 \text{ N} \times 2,50 = 1.846.798,725 \text{ N}$$

- Kapasitas Massa Tumpuan Maksimum (W_{maks}):

$$W_{maks} = \frac{F_{maks}}{g} = \frac{1.846.798,725 \text{ N}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 188.256,75 \text{ kg} \approx 188,26 \text{ Ton}$$

3.6 Analisis Akhir Hasil Simulasi

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga pada *software* ANSYS 2024, dapat diketahui bahwa perilaku struktur kolom tubular pada *topside* FPSO Mero 3 menunjukkan pola respons yang konsisten terhadap pembebanan statis. Hal ini ditunjukkan oleh parameter *Total Deformation*, *Equivalent Elastic Strain*, dan *Equivalent Von Mises Stress* yang sama-sama memperlihatkan bahwa Kolom 5 merupakan elemen struktur dengan respons paling kritis dibandingkan kolom lainnya. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa distribusi pembebanan pada struktur tidak berlangsung secara merata sehingga kolom tersebut menerima kombinasi gaya aksial dan momen lentur yang lebih besar dibandingkan kolom lainnya. Walaupun demikian, besarnya respons yang terjadi masih berada dalam batas elastis material sehingga struktur belum menunjukkan indikasi kegagalan akibat pembebanan statis.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa peningkatan deformasi selalu diikuti oleh peningkatan regangan dan tegangan pada lokasi yang sama. Hubungan tersebut sesuai dengan teori mekanika bahan, di mana perubahan bentuk akibat pembebanan akan menghasilkan regangan yang selanjutnya memunculkan tegangan di dalam material. Konsistensi ketiga parameter tersebut menunjukkan bahwa model elemen hingga yang digunakan telah mampu menggambarkan perilaku mekanis struktur secara logis dan memberikan hasil yang saling mendukung. Selain itu, lokasi tegangan maksimum yang berada pada daerah sambungan antara kolom tubular dan pelat atas menunjukkan adanya *local stress concentration* akibat perubahan geometri dan jalur transfer beban dari pelat menuju kolom. Fenomena ini umum dijumpai pada struktur baja yang menerima pembebanan terpusat dan sulit dianalisis secara rinci menggunakan pendekatan analitis sederhana.

Perbandingan antara hasil simulasi dan perhitungan manual memperlihatkan bahwa metode elemen hingga menghasilkan nilai deformasi, regangan, dan tegangan yang lebih besar. Secara kuantitatif, perbandingan tegangan menunjukkan bahwa hasil analitis sebesar 5,18 MPa memiliki perbedaan sebesar 57,44% terhadap rata-rata hasil simulasi ANSYS sebesar 12,17 MPa. Nilai tersebut menunjukkan adanya perbedaan respons antara pendekatan analitis sederhana dan simulasi numerik, yang dipengaruhi oleh asumsi distribusi beban dan kompleksitas model struktur dibandingkan pendekatan analitis. Perbedaan tersebut bukan menunjukkan adanya kesalahan perhitungan, melainkan disebabkan oleh perbedaan pendekatan yang digunakan. Perhitungan manual mengasumsikan pembebanan aksial terdistribusi merata pada penampang kolom, sedangkan simulasi ANSYS mempertimbangkan geometri tiga dimensi, kondisi batas, distribusi pembebanan aktual, serta konsentrasi tegangan yang terjadi pada daerah sambungan. Oleh karena itu, hasil simulasi memberikan representasi perilaku struktur yang lebih mendekati kondisi aktual, sedangkan perhitungan manual berfungsi sebagai validasi terhadap kecenderungan respons global struktur.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan tujuan penggunaan metode elemen hingga dalam evaluasi struktur lepas pantai, yaitu memperoleh distribusi respons struktur secara menyeluruh serta mengidentifikasi lokasi yang berpotensi menjadi titik kritis. Pada penelitian ini, walaupun Kolom 5 mengalami respons terbesar, nilai

tegangan maksimum yang diperoleh masih berada jauh di bawah *Yield Strength* material API 5L Grade X52 sebesar 360 MPa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa seluruh kolom masih bekerja pada daerah elastis sehingga tidak mengalami deformasi permanen maupun *yielding*. Dengan demikian, dimensi kolom tubular yang digunakan masih mampu mendistribusikan pembebanan statis sesuai dengan kebutuhan struktur *topside* FPSO Mero 3.

Selain itu, hasil evaluasi kapasitas struktur menunjukkan bahwa beban operasi yang diberikan masih berada jauh di bawah kapasitas maksimum kolom, sedangkan nilai *Safety Factor* yang diperoleh telah melebihi batas minimum yang dipersyaratkan oleh standar DNV-OS-C101. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur masih memiliki cadangan kekuatan yang memadai untuk mengantisipasi variasi pembebanan selama kondisi operasi. Dengan terpenuhinya kapasitas struktur dan faktor keamanan tersebut, desain kolom tubular pada *topside* FPSO Mero 3 dapat dinyatakan memenuhi persyaratan keselamatan terhadap pembebanan statis yang dianalisis.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode elemen hingga menggunakan ANSYS 2024 mampu mengevaluasi perilaku struktur kolom tubular secara menyeluruh dibandingkan pendekatan analitis. Metode ini tidak hanya mampu menampilkan distribusi deformasi, regangan, dan tegangan secara tiga dimensi, tetapi juga mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan yang menjadi titik kritis struktur. Berdasarkan hasil simulasi, validasi analitis, evaluasi kapasitas maksimum, dan perhitungan *Safety Factor*, dapat disimpulkan bahwa kolom tubular pada struktur *topside* FPSO Mero 3 masih memiliki tingkat keamanan yang memadai terhadap pembebanan statis sehingga layak digunakan sebagai struktur pendukung modul *topside* sesuai dengan kriteria desain yang diterapkan dalam penelitian ini.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga pada ANSYS 2024, dapat disimpulkan bahwa tujuan penelitian telah tercapai. Evaluasi kekuatan statis menunjukkan bahwa Kolom 5 merupakan elemen dengan respons paling kritis, ditunjukkan oleh nilai *Total Deformation* sebesar 1,0765 mm, *Equivalent Elastic Strain* sebesar 0,00072209, dan *Equivalent Von Mises Stress* sebesar 144 MPa. Meskipun demikian, nilai tegangan tersebut masih berada di bawah *yield strength* material API 5L Grade X52 sebesar 360 MPa, sehingga seluruh kolom masih bekerja pada daerah elastis dan tidak mengalami *yielding*. Berdasarkan evaluasi kapasitas struktur mengacu pada DNVGL-RP-C208, kolom memiliki kapasitas beban maksimum sebesar 188,26 ton. Selanjutnya, hasil verifikasi berdasarkan standar DNV-OS-C101 menunjukkan *Safety Factor* sebesar 2,50, lebih besar dari batas minimum 1,50, sehingga struktur kolom tubular pada *topside* FPSO Mero 3 dinyatakan aman dan memenuhi persyaratan keselamatan terhadap pembebanan statis.

5 Daftar Pustaka

- [1] H. Meng, L. Kloul, and A. Rauzy, "Production availability analysis of Floating Production Storage and Offloading (FPSO) systems," *Appl. Ocean Res.*, vol. 74, pp. 117–126, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.02.026>.
- [2] Y. Huang, Y. He, Y. Liu, M. Qiu, and M. Li, "Design and numerical simulation of the elastomeric support for the *topside* modules of an FPSO," *Ocean Eng.*, vol. 307, p. 118203, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118203>.
- [3] A. Ardianti, M. N. S. Daerobi, and M. Z. M. Alie, "A Structural Analysis of Column Gusset Plates on the Production Module Support Structures," *Eng. Technol. & Appl. Sci. Res.*, vol. 16, no. 2, pp. 33576–33581, 2026.
- [4] A. Yadhav and M. Kulkarni, "Design optimization of FPSO *Topside* Module for InPlace, Lift and Weighing conditions," 2023.
- [5] B. B. Tenggara and S. Djiwo, "Analisis Tegangan Von Mises Stress, Deformation, dan *Safety factor* Perancangan Rangka Auto Transfer Tipe Lifter dengan Pendekatan Metode Elemen Hingga," *J. Mesin Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 6, no. 1, pp. 292–297, 2026.
- [6] DNVGL-RP-C208. (2016). *Determination of structural capacity by non-linear finite element analysis method*.
- [7] M. Qiu *et al.*, "Structural Evaluation on the Floating Production Storage and Offloading Large Flow Gas Processing Module Based on FEM Analysis," *Buildings*, vol. 14, no. 10, 2024, doi: [10.3390/buildings14103180](https://doi.org/10.3390/buildings14103180).
- [8] Dnv-OS-C101, "Design of Offshore Steel Structures, General (Lrfd Method)," *Det Nor. Verit.*, no. April, p. 2015, 2011.
- [9] VME, "FPSO MARECHAL DUQUE DE CAXIAS (MERO 3 PROJECT)," Batam, 2022.

- [10] M. Lin, "Characterization of tensile and fracture properties of X52 steel pipes and their girth welds," 2015. 2017, 2018.
- [11] J. Teknologi, "STUDI KEKUATAN SUPPORT STRUCTURE (LEG) PADA KONSTRUKSI," vol. 4, no. 2, pp. 45–51, 2022.
- [12] Studi, P., Mesin, T., Lambung, U., Studi, P., Perkapalan, T., & Batulicin, P. (2023). *ANALISIS KEKUATAN HELIDECK SANTOS SANGU*. 5(2).
- [13] Daniel, R., Bello, Á., Álvarez-arellano, J. A., & Hamzaoui, Y. El. (2025). *Assessment of Structural Integrity Through On-Site Decision-Making Analysis for a Jacket-Type Offshore Platform*.