

Verifikasi Kekuatan Struktur *Spreader Bar* Berdasarkan Standar DNV-ST-E273 Menggunakan Metode *Finite Element Analysis* Pada Proyek Mero di PT. VME Process

Dewi Nur Mala Sari^{*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: dewinurmalasari2004@gmail.com

Abstrak

Operasi pengangkatan (*lifting operation*) pada instalasi struktur FPSO memerlukan *spreader bar* yang mampu menahan beban secara aman selama proses pengangkatan. Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan struktur *spreader bar* pipa 16 inch schedule 80 dengan *Safe Working Load* (SWL) sebesar 230 MT pada proyek Mero 3 di PT. VME Process. Analisis dilakukan melalui perhitungan manual dan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) dengan bantuan perangkat lunak *SolidWorks Simulation* berdasarkan standar DNV-ST-E273. Hasil analisis statik menunjukkan presentase galat sebesar 4,51% antara perhitungan manual dan simulasi, sehingga masih berada di bawah batas toleransi sebesar 10%. Pada analisis *buckling*, kondisi tumpuan *fixed-free* digunakan karena dianggap paling mendekati kondisi aktual sehingga sesuai untuk dibandingkan dengan hasil perhitungan manual. Hasil perbandingan menunjukkan presentase galat sebesar 0,049%, sehingga hasil simulasi memiliki kesesuaian yang sangat baik dengan perhitungan manual dan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dapat digunakan untuk memverifikasi hasil analisis.

Kata kunci: *Spreader bar*, DNV-ST-E273, *Finite Element Analysis*

Abstract

Lifting operations for the installation of FPSO structures require spreader bars capable of safely supporting the load during the lifting process. This study aims to analyze the structural strength of a 16-inch Schedule 80 pipe spreader bar with a Safe Working Load (SWL) of 230 MT for the Mero 3 project at PT. VME Process. The analysis was conducted through manual calculations and Finite Element Analysis (FEA) simulations using SolidWorks Simulation software, in accordance with the DNV-ST-E273 standard. The results of the static analysis showed an error percentage of 4.51% between the manual calculations and the simulation, which remains below the 10% tolerance limit. In the buckling analysis, fixed-free support conditions were used because they were considered to most closely approximate actual conditions, making them suitable for comparison with the results of manual calculations. The comparison results showed an error percentage of 0.049%, indicating that the simulation results are in very good agreement with the manual calculations and that the Finite Element Analysis (FEA) method can be used to verify the analysis results.

Keywords: *Spreader bar*, DNV-ST-E273, *Finite Element Analysis*

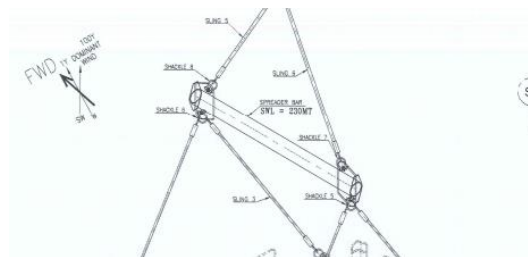
1 Pendahuluan

Industri minyak dan gas bumi lepas pantai (*offshore*) merupakan salah satu sektor energi yang sangat penting untuk mendukung kebutuhan energi di seluruh dunia, sekaligus merupakan sektor yang memiliki tingkat kekompleksan dan risiko operasional tertinggi, terutama dalam proses instalasi *equipment* berskala besar pada unit produksi *Floating Production Storage and Offloading* yang disingkat FPSO. FPSO merupakan struktur terapung yang berfungsi untuk memproses, menyimpan dan mengantarkan hasil produksi seperti minyak dan gas dari lokasi hasil produksi didapatkan dan dapat dipindah-pindahkan [1]. Dalam proses pengangkatan struktur FPSO pada saat instalasi (*lifting operation*) menjadi tahapan yang sangat kritis karena melibatkan beban yang besar dan adanya tambahan beban dinamis karena dilakukan di lingkungan yang beresiko tinggi di lepas pantai.

Salah satu proyek minyak dan gas lepas pantai berskala internasional adalah proyek Mero 3, yang menggunakan struktur terapung FPSO *Marechal Duque de Caxias*. Lapangan Mero adalah lapangan minyak *Ultra-Deepwater*

yang berada sekitar 180 km dari jalur pesisir *Rio de Janeiro, Brasil*. Proyek Mero 3 terdiri dari 15 sumur yang terhubung ke FPSO *Marechal Duque de Caxias* dengan kapasitas produksi mencapai 18.000 *barrel* minyak per hari. Proyek besar ini melibatkan banyak perusahaan, termasuk perusahaan-perusahaan fabrikasi dari berbagai negara, salah satunya adalah PT. VME Process yang bertanggung jawab untuk melakukan proses fabrikasi *module* di darat. Setelah selesai difabrikasi, *module* tersebut harus dipindahkan melalui proses pengangkatan (*lifting operation*) ke atas kapal FPSO. Operasi pengangkatan (*lifting operation*) memerlukan alat bantu angkat yang dirancang sesuai dengan kapasitas beban, dimana komponen utamanya mencakup *spreader bar*, *sling*, *shackle* dan *pad eye* [2]. Semua alat angkat pendukung yang terlibat dalam proses pengangkatan harus mampu menahan beban yang ada selama kegiatan pengangkatan berlangsung. Oleh karena itu, seluruh alat yang digunakan harus dipastikan memiliki daya tahan melalui perhitungan kekuatan struktur yang akurat untuk menghindari kecelakaan kerja maupun kegagalan struktural [3].

Salah satu alat angkat pendukung saat melakukan operasi pengangkatan (*lifting operation*) adalah *spreader bar*. *Spreader bar* adalah alat angkat pendukung yang dipakai dalam berbagai sektor. Fungsi utama dari *spreader bar* adalah untuk membantu proses pengangkatan dan mengurangi tekanan pada satu titik serta mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan pada barang yang diangkat dengan cara membagi beban yang diangkat dengan cara mendistribusikan beban angkat secara menyeluruh [4]



Gambar 1. *Spreader bar*.

(Sumber : *Internal document PT. VME Process (S20- FUEL GAS TREATMENT PACKAGE LIFTING ARRANGEMENT DETAIL DRAWING)*)

Penelitian ini mengacu pada *spreader bar fuel gas treatment package* pada proyek FPSO *Marechal Duque de Caxias* yang difabrikasi oleh PT. VME Process. *Spreader bar* tersebut memiliki *Safe Working Load (SWL)* sebesar 230MT dengan material utama *A36*. Dalam praktik industri aktual, proses verifikasi kekuatan struktur dilakukan oleh pihak *consultant*. Namun, verifikasi independen dari pihak fabrikator menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* belum dilakukan, sehingga perlu dilakukan sebagai bentuk verifikasi standar yang berlaku.

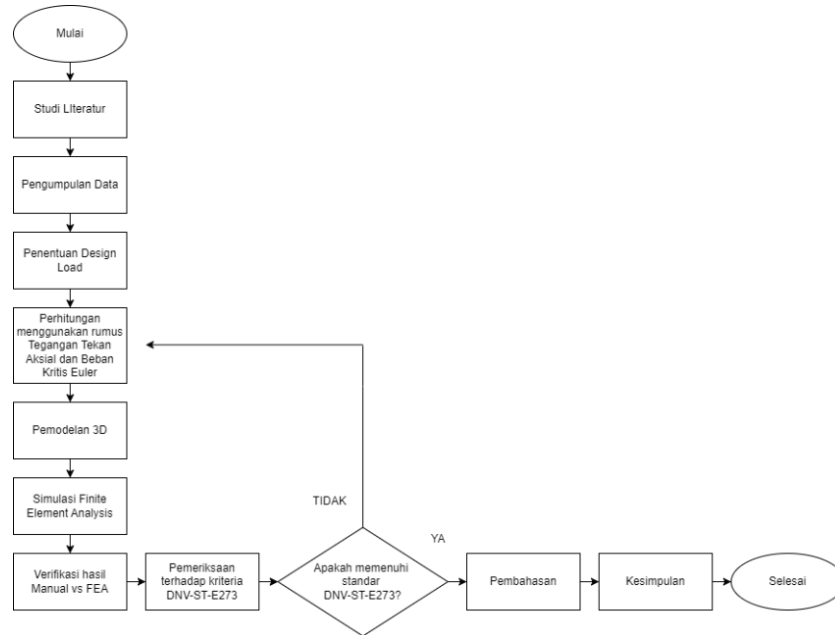
Standar *DNV-ST-E273* yang dikeluarkan oleh *Det Norske Veritas (DNV)* merupakan standar yang menetapkan persyaratan teknis bagi *Portable Offshore Unit (POU)*, yaitu sebuah paket atau unit yang dimaksudkan untuk pengangkutan serta instalasi atau pengangkatan lepas pantai secara berulang maupun sekali jalan, yang juga dapat dirancang untuk pengangkatan bawah laut. Standar ini mencakup seluruh aspek operasional unit mulai dari kriteria desain, proses manufaktur, prosedur pengujian, hingga sertifikasi, dengan tujuan utama untuk memastikan bahwa *Portable Offshore Unit (POU)* dapat diangkat melalui laut dan diangkat di lingkungan lepas pantai maupun bawah laut dengan aman di seluruh dunia [5]. *Spreader bar* ini menggunakan material berupa pipa baja dengan diameter 16 inch dan ketebalan dinding pipa *schedule 80*, memiliki spesifikasi *DNVGL VL A36 / API 5L X52N PSL2*. Untuk memastikan struktur tersebut aman dan memenuhi standar, diperlukan perhitungan secara manual berdasarkan *DNV-ST-E273*, kemudian hasilnya dicek menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* yang terdapat pada *software SolidWorks Simulation*. Metode *Finite Element Analysis (FEA)* dipilih karena *spreader bar* pada proyek Mero memiliki bentuk yang tidak sama di seluruh bagian, sehingga metode perhitungan manual biasa tidak bisa menggambarkan penyebaran tegangan secara menyeluruh. Dengan menggunakan *Finite Element Analysis (FEA)*, struktur dibagi menjadi bagian-bagian kecil sehingga tegangan Von Mises ekuivalen di setiap titik struktur dapat dihitung. Hasil tegangan Von Mises yang diperoleh inilah yang nantinya akan dicek sesuai dengan kriteria *DNV-ST-E273*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan perhitungan kekuatan struktural berdasarkan tegangan Von Mises ekuivalen dan stabilitas tekuk struktur *spreader bar pipe 16 inch sch 80* dengan kapasitas *Safe Working Load (SWL)* sebesar 230MT secara manual dan melakukan verifikasi hasil perhitungan tersebut menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* pada *software SolidWorks Simulation*. Kemudian, dilakukan pemeriksaan berdasarkan ketentuan standar *DNV-ST-E273*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui apakah struktur *spreader bar* tersebut layak digunakan berdasarkan nilai tegangan yang terjadi dan faktor keamanan yang diperoleh, sehingga dapat disimpulkan apakah struktur tersebut memenuhi standar keselamatan yang berlaku atau tidak. Penelitian ini ditujukan untuk melakukan perhitungan kekuatan struktural berdasarkan tegangan Von Mises ekuivalen dan

stabilitas tekuk struktur *spreader bar* yang hanya berfokus pada struktur utama pipa berdiameter *16 inch sch 80* dengan kapasitas *Safe Working Load (SWL)* 230MT yang digunakan di PT. VME Process. Material yang digunakan dalam perhitungan dan simulasi adalah *DNVGL VL A36 / API 5L X52N PSL2* untuk komponen pipa dengan sifat mekanik sesuai dengan spesifikasi material yang berlaku. Standar yang digunakan hanya *DNV-ST-E273* dan tidak dibandingkan dengan standar lainnya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software SolidWorks Simulation*. Pemodelan yang dilakukan adalah bentuk aktual dari *spreader bar*, dan pembebanan yang digunakan dalam perhitungan maupun simulasi merupakan beban maksimum *Safe Working Load (SWL)* sebesar 230 MT.

2 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini digambarkan dalam diagram alir dengan tahapan-tahapan seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

2.1 Studi Literatur

Fokus utama dalam penelitian ini adalah memahami dengan baik standar internasional *DNV-ST-E273* mengenai *Portable Offshore Units (POU)*, sebagai acuan utama dalam proses pemeriksaan agar unit tersebut dapat beroperasi di lingkungan *offshore*. Selain itu, prinsip prinsip *Finite Element Analysis (FEA)* dipelajari untuk memastikan metode simulasi dalam *software SolidWorks* tetap tepat. Semua referensi teoritis tersebut kemudian digabungkan dengan data spesifikasi material untuk menentukan batas keamanan struktur.

2.2 Pengumpulan Data

Data teknis yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari *as-built drawing MR3-SVME-STR-DWG-2045XX-30009*. Seluruh data yang akan digunakan akan ditampilkan pada tabel 1 yang berisi data umum *spreader bar*, tabel 2 yang memuat informasi dimensi *spreader bar*, tabel 3 yang berisi spesifikasi material dan tabel 4 yang berisi informasi mengenai *lifting arrangement*.

Tabel 1. Data Umum *spreader bar*

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Safe Working Load (SWL)</i>	230	MT
Panjang <i>spreader bar</i>	5.195	mm
Berat <i>spreader bar</i>	1.952	kg

Tabel 2. Dimensi *spreader bar*

Komponen	Dimensi	Nilai	Satuan
<i>Main tube</i>	Ø Luar (OD)	406.4	mm
	Ketebalan (t)	21.44	mm
	Ø Dalam (ID)	363.52	mm
<i>Main plate padeye</i>	Ketebalan (t)	40	mm
<i>Cheek plate 1 padeye</i>		20	mm
<i>Cheek plate 2 padeye</i>		16	mm
Lubang pin <i>padeye</i>	Ø Lubang (DH)	98	mm

Tabel 3. Spesifikasi material

Material	Spesifikasi
<i>Main tube</i>	<i>API 5L X52N PSL2 / DNVGL VL A36</i>
<i>Padeye plate</i>	<i>DNVGL VL A36 / ASTM A131 Gr.AH36</i>
<i>Padeye plate</i>	<i>DNVGL VL E36 / ASTM A131 Gr.EH36</i>

Tabel 4. Lifting arrangement

Komponen	Nilai	Satuan
Jumlah <i>sling</i>	6	Pcs
Sudut <i>sling</i> terhadap horizontal	60	Deg
Sudut <i>sling</i> terhadap vertikal	30	Deg
Jumlah <i>shackle</i> pada <i>spreader bar</i>	4	Pcs
Kapasitas <i>shackle spreader bar</i>	120	MT WLL
Dimensi <i>shackle</i> (W x D x S)	134 x 95 x 371	mm

2.3 Penentuan Design Load

Berdasarkan kriteria pada bagian 3.5.1 standar *DNV-ST-E273*, perhitungan beban tidak hanya mengacu pada berat statis objek, tetapi juga memperhitungkan faktor lingkungan serta percepatan gerakan yang terjadi di lapangan. Untuk mengakomodasi efek dinamis seperti gaya sentak (*shock load*), dinamika gerakan *crane*, dan respon gelombang laut, digunakan sebuah koefisien pengali yang disebut *Design Factor* (DF). Dengan mengalikan beban statis terhadap *Design Factor* (DF), diperoleh nilai beban dinamis ekuivalen yang representatif untuk perancangan struktur.

Sesuai dengan bagian 3.5.1, perhitungan beban desain di udara dilakukan dengan persamaan 1:

$$F_{Air} = DF \times MGW \times g \quad (1)$$

Dimana:

DF = *Design Factor*

MGW = *Maximum Gross Weight*

g = Gravitasi

2.4 Perhitungan Manual

Perhitungan manual dilakukan sebagai tahap pemeriksaan awal untuk memastikan dimensi profil yang dipilih mampu menahan beban yang diharapkan sebelum melanjutkan ke tahapan simulasi numerik. Fokus utama dalam perhitungan ini adalah perhitungan tegangan tekan aksial dan pemeriksaan tegangan izin sesuai standar *DNV-ST-E273* serta ketahanan terhadap tekuk (*buckling*) pada badan pipa.

2.4.1 Dekomposisi Gaya Angkat

Sebelum mengetahui seberapa besar pipa akan ditekan, hal yang harus diketahui terlebih dahulu adalah seberapa besar gaya *Resultant Sling Force* (RSF) yang bekerja pada tali *sling*, yang kemudian ditransmisikan menjadi gaya tekan aktual pada bagian badan pipa (P_{actual}), berdasarkan *DNV-ST-E273* bagian 3.5.5 [5], maka dapat dihitung dengan persamaan 2 dan persamaan 3, yaitu :

Gaya tarik *sling* (RSF)

$$RSF = \frac{1,2 \times SKL \times PL \times F_{Air}}{\cos(\nu)} \quad (2)$$

Dimana:

$SKL = \text{Skew Load Factor}$

$PL = \text{Percentage Load}$

dan

$$P_{actual} = RSF \times \sin(\nu) \quad (3)$$

2.4.2 Properti Penampang

Luas penampang dihitung melalui persamaan 4, yaitu: $A = \frac{\pi}{4} \times (OD^2 - ID^2)$ (4)

Dimana:

$OD = \text{Out Diameter}$

$ID = \text{In Diameter}$

Momen inersia dihitung melalui persamaan 5, yaitu: $I = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - ID^4)$ (5)

Jari-jari girasi didapatkan melalui persamaan 6, yaitu: $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ (6)

Dimana:

$I = \text{Momen inersia}$

$A = \text{Luas penampang}$

2.4.3 Tegangan Tekan Aksial

Spreader bar menerima beban tekan aksial, sehingga tegangan yang terjadi berupa tegangan normal rata-rata [6].

Nilai tegangan tekan aksial dihitung menggunakan persamaan 7, yaitu: $\sigma_{aksial} = \frac{P_{actual}}{A}$ (7). Nilai σ_{aksial} harus $\leq 0,85 \times R_e$ [5].

2.4.4 Stabilitas Tekuk

Spreader bar menerima beban tekan aksial, maka stabilitas struktur perlu dianalisis terhadap kemungkinan terjadinya tekuk (*buckling*) [6]. Analisis dilakukan dengan menentukan rasio kelangsingan yang dihitung melalui persamaan 8 dan beban kritis *Euler* yang dihitung melalui persamaan 9.

Persamaan rasio kelangsingan (λ) dihitung melalui persamaan 8, yaitu: $L_{eff} = K \times L$ dan $\lambda = \frac{L_{eff}}{r}$ (8)

Dimana:

$K = \text{Faktor panjang efektif}$

$L = \text{Panjang}$

$r = \text{Jari-jari girasi}$

Beban kritis *Euler* (P_{cr}) dihitung melalui persamaan 9, yaitu: $P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L_{eff}^2}$ (9)

Dimana:

$E = \text{Modulus elastisitas}$

$I = \text{Momen inersia}$

Berdasarkan *DNV-ST-E273* Bagian 3.4.4, faktor utilitas tekuk maksimum adalah 0.85 [5], sehingga nilai *utilization factor* dapat dihitung melalui persamaan 10, yaitu: $Utilization Factor = \frac{P_{actual}}{P_{cr}} \leq 0.85$ (10) atau ekuivalen dengan $P_{actual} \leq 0.85 \times P_{cr}$

2.5 Pemodelan 3D dan Simulasi FEA

Proses pemodelan 3D dilakukan menggunakan *software SolidWorks* dengan merujuk pada *technical drawing* resmi dari proyek Mero di PT. VME Process. Tahap ini diawali dengan pembuatan geometri komponen utama *spreader bar* berupa *main tube* dan *lifting lugs*. Setelah melakukan pemodelan 3D sesuai dengan geometri aktual, simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) dilakukan untuk mengevaluasi respon struktur terhadap beban kerja maksimum.

2.6 Verifikasi hasil Manual vs *Finite Element Analysis* FEA

Tahapan verifikasi hasil dilakukan untuk memastikan model simulasi yang telah dijalankan melalui perbandingan dengan perhitungan manual sudah dilakukan dengan benar. Dalam proses ini, persyaratan akurasi harus dilakukan sesuai dengan tujuan penggunaan model [7]. Dalam penelitian ini, batas toleransi kesalahan galat yang ditentukan adalah sebesar 10%. Angka ini dipilih berdasarkan standar yang digunakan dalam industri dimana terdapat variasi

alami sekitar 10% pada sifat mekanik seperti kekakuan lentur dan prediksi lendutan pada struktur baja dan terjadi karena toleransi ukuran material dan proses manufaktur [8]. Selain itu, prinsip *hierarchical validation* berstandar ASME V&V 10-2006 menerapkan perbandingan antara model analitis dan *Finite Element Analysis* (FEA) untuk memverifikasi akurasi solusi. Hasil verifikasi dengan galat dibawah 10% mengindikasikan bahwa simulasi telah konvergen, presisi dan valid merepresentasikan kondisi tegangan aktual struktur [9].

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Perhitungan Struktural Beban Desain Struktural (Design Load)

Berdasarkan metodologi pada bab 2 dan mengacu pada standar *DNV-ST-E273* bagian 3.5.1, kapasitas *Safe Working Load* (SWL) sebesar 230 MT diklasifikasikan sebagai *Maximum Gross Weight* (MGW) struktural. Melalui pengondisian *Operational Class R30* (tinggi gelombang ≤ 3.0 m), nilai *Design Factor* (DF) yang ditetapkan adalah sebesar 1.8.

Hasil perhitungan manual untuk beban dinamis di udara (F_{Air}) dihitung menggunakan persamaan:

$$F_{Air} = DF \times MGW \times g$$

Dan didapat hasil sebesar 4.061,34 kN.

Mengacu pada ketentuan *DNV-ST-E273* bagian 3.5.5, gaya vertikal global tersebut didekomposisikan menuju konfigurasi *rigging* atas dengan sudut *sling* terhadap vertikal adalah $v = 30^\circ$, *Skew Load Factor* (SKL = 1,1), dan *Percentage Loading* (PL = 0,5). Hasil akhir *Resultant Sling Force* (RSF) dan gaya tekan kompresi horizontal aktual pada pipa (P_{actual}) dihitung menggunakan persamaan:

$$RSF = \frac{1,2 \times SKL \times PL \times F_{Air}}{\cos(v)}$$

Kemudian diperoleh hasil sebesar 3.095,25 kN.

Berdasarkan konfigurasi *rigging* atas, gaya tekan kompresi horizontal aktual pada pipa (P_{actual}) merupakan komponen gaya yang berada di depan sudut *sling* terhadap vertikal ($v = 30^\circ$). Oleh karena itu, perhitungan gaya kompresi tersebut diselesaikan menggunakan persamaan:

$$P_{actual} = RSF \times \sin(v)$$

Dan diperoleh hasil akhir sebesar 1.547,62 kN

3.2 Evaluasi Properti Penampang Pipa Utama

Berdasarkan dimensi pipa aktual, properti geometris penampang pipa dihitung dengan persamaan luas penampang:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (OD^2 - ID^2)$$

Dan didapat hasil sebesar 25.929,22 mm².

Momen inersia dihitung menggunakan persamaan:

$$I = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - ID^4)$$

Dan diperoleh hasil sebesar 481.808.790,34 mm⁴.

Serta jari-jari girasi yang didapatkan melalui persamaan:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{481.808.790,34}{25.929,22}}$$

Yang mendapat hasil akhir 136,31 mm.

3.3 Evaluasi Tegangan Tekan Aksial

Berdasarkan kriteria batas aman kekuatan material pada *DNV-ST-E273* bagian 3.4.3, tegangan tekan aksial rata-rata (σ_{aksial}) yang terjadi akibat gaya kompresi tidak boleh melampaui batas tegangan izin material (σ_{ea}) yaitu sebesar $0,85 \times R_e$ [5].

Tegangan tekan aksial didapat melalui persamaan:

$$\sigma_{aksial} = \frac{P_{actual}}{A}$$

Dan didapat hasil akhir sebesar 59,69 Mpa.

Sementara tegangan izin dihitung melalui persamaan:

$$\sigma_{ea} = 0,85 \times R_e$$

Dan diperoleh hasil sebesar 306 Mpa.

3.4 Evaluasi Stabilitas Tekuk (*Buckling*)

Kekuatan struktur pipa sepanjang $L = 5.600 \text{ mm}$ terhadap risiko kegagalan tekuk akibat gaya kompresi aksial dievaluasi menggunakan teori tekuk beban kritis *Euler*. Faktor panjang efektif (K) ditetapkan bernilai 2,0 asumsi tumpuan *fixed-free* pada masing-masing ujung *spreader bar*. Panjang efektif pipa dihitung melalui persamaan:

$$L_{eff} = K \times L$$

Yang diperoleh hasil sebesar 11.200 mm.

Dengan perhitungan rasio kelangsingan penampang yang dihitung melalui persamaan:

$$\lambda = \frac{L_{eff}}{r}$$

Dan diperoleh hasil sebesar 82,17.

Kemudian nilai batas ambang kapasitas gaya kritis tekuk *Euler* (P_{cr}) dihitung menggunakan modulus elastisitas baja $E = 200.000 \text{ MPa}$ melalui persamaan:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L_{eff}^2}$$

Dan didapat hasil sebesar 7.570.472,5 N.

Dengan demikian nilai *Utilization Factor* (UF) dapat dihitung melalui persamaan:

$$UF = \frac{P_{actual}}{P_{cr}} = 0,2044$$

Dan mendapat hasil akhir *Utilization Factor* (UF) sebesar 0,2044.

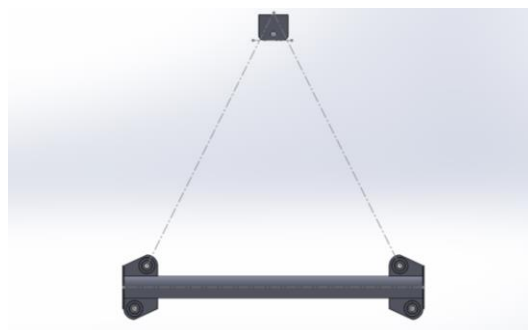
Berdasarkan ketentuan *DNV-ST-E273* Bagian 3.4.4, batas *Utilization factor* (UF) atau rasio keamanan maksimum untuk fenomena tekuk ditegaskan tidak boleh melebihi nilai ambang batas 0,85 [5].

3.5 Simulasi Finite Element Analysis

Untuk memperoleh analisis kekuatan struktur yang lebih mendetail, dilakukan simulasi berbasis *Finite Element Analysis* menggunakan *Software SolidWorks*. Simulasi ini bertujuan untuk memvalidasi hasil perhitungan manual yang telah dilakukan dan melihat distribusi tegangan dan potensi kegagalan struktur secara menyeluruh yang mencakup dua jenis analisis, yaitu tegangan von mises dan analisis stabilitas tekuk (*buckling*).

3.5.1 Pemodelan Geometri dan *Meshing*

Pemodelan geometri 3D dilakukan menggunakan *software SolidWorks* berdasarkan dimensi aktual yang tercantum pada drawing struktur *spreader bar*. Proses pemodelan ini mencakup pembuatan komponen utama seperti pipa, *stiffener*, kedua *padeye* disetiap sisi ujung *spreader bar* dan *hook* untuk menggubungkan *sling*.

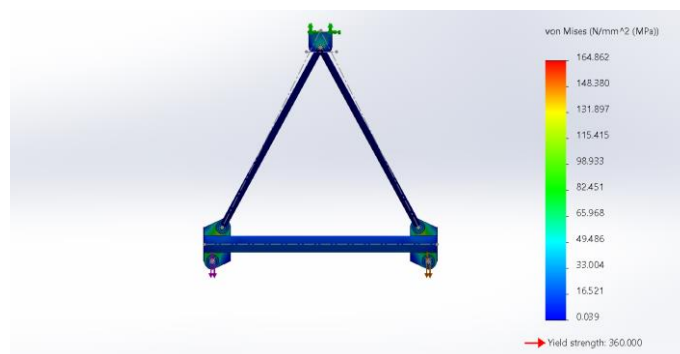


Gambar 3. *Spreader Bar 3D*

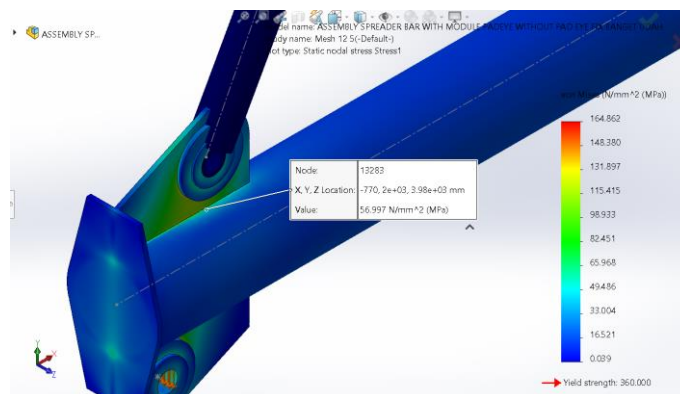
Proses *meshing* dilakukan untuk membagi geometri menjadi elemen-elemen kecil agar persamaan numerik dapat diselesaikan. Pada pemodelan ini, jenis *mesh* yang digunakan adalah *blended curvature-based mesh*. Untuk menjamin akurasi hasil simulasi tanpa membebani waktu komputasi, dilakukan uji konvergensi *mesh* dengan memvariasikan ukuran elemen *mesh*. Variasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat sensitivitas hasil terhadap kerapatan elemen hingga mencapai batas toleransi galat dibawah 10%.

3.5.2 Hasil simulasi Von Mises

Analisis *Finite Element Analysis* (FEA) dilakukan untuk mengevaluasi distribusi tegangan yang terjadi pada struktur *spreader bar*. Mengingat perhitungan analitis manual memiliki keterbatasan dalam mengakomodasi geometri yang rumit secara detail, maka fokus validasi simulasi ini diarahkan pada bagian *main tube*. Komponen *main tube* dipilih karena menjadi area utama yang dapat divalidasi langsung menggunakan pendekatan rumus teoritis. Visualisasi hasil pembebanan struktur disajikan dalam dua sudut pandang pada gambar 4 dan 5. Sudut pandang pada gambar 4 menampilkan distribusi tegangan von mises secara menyeluruh pada seluruh rakitan *spreader bar*. Sementara itu, sudut pandang gambar 5 menggunakan fitur *probe tracking* yang difokuskan secara spesifik pada area *main tube* guna mendapatkan nilai tegangan lokal yang objektif untuk dibandingkan dengan hasil perhitungan manual.



Gambar 4. Distribusi tegangan struktur *spreader bar*



Gambar 5. Tegangan pada struktur *main tube*

Akurasi hasil simulasi numerik sangat dipengaruhi oleh kerapatan elemen diskritisasi. Oleh karena itu, uji konvergensi *mesh* (*mesh convergence test*) dilakukan dengan memvariasikan ukuran elemen dari kasar hingga halus guna memastikan nilai tegangan telah mencapai kondisi stabil (konvergen). Perbandingan parameter variasi ukuran mesh beserta nilai tegangan maksimum yang dihasilkan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Mesh convergence test

Max. Size (mm)	Min. Size (mm)	Max Stress (Mpa)	Deviasi %
75	15	38,524	-
50	10	47,627	20,24
25	5	50,311	15,74
12,5	2,5	56,997	4,51
8	1,9	58,675	1,70

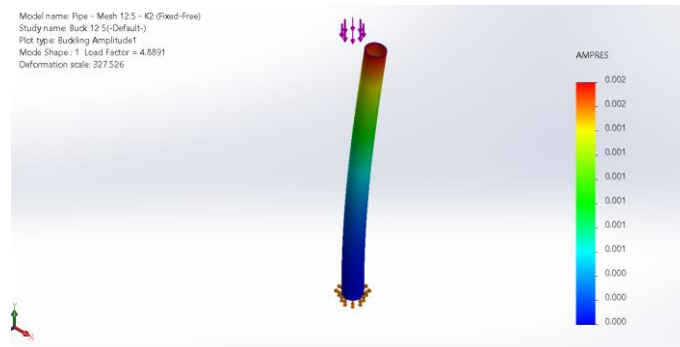
Berdasarkan data uji konvergensi pada Tabel 5, ukuran *mesh max size* 12,5 mm dan *min size* 2,5 mm dipilih sebagai acuan karena menghasilkan nilai yang sudah mendekati konvergen dengan efisiensi waktu komputasi yang optimal. Untuk mengetahui tingkat akurasi hasil simulasi pada ukuran tersebut terhadap perhitungan teoritis, dilakukan perhitungan persentase galat menggunakan persamaan:

$$Error (\%) = \left| \frac{\sigma_{analitis} - \sigma_{FEA}}{\sigma_{analitis}} \right| = \left| \frac{59,690 \text{ Mpa} - 56,997 \text{ Mpa}}{59,690 \text{ Mpa}} \right|$$

Dan diperoleh hasil galat sebesar 4,51%

3.5.3 Hasil Simulasi *Buckling*

Simulasi *buckling* dilakukan dengan kondisi *fixed-free* untuk mengetahui beban kritis tekuk. Kondisi ini dipilih agar memiliki asumsi yang setara dengan perhitungan teoritis menggunakan persamaan *Euler*, dengan faktor panjang efektif $K=2,0$. Model yang digunakan berupa pipa silinder sederhana dengan tujuan meminimalkan pengaruh geometri kompleks sehingga hasil simulasi dapat dibandingkan secara langsung dengan perhitungan manual.



Gambar 6. *Buckling fixed-free*

Berdasarkan hasil simulasi diperoleh *Load Factor* sebesar 4,8891. Nilai *Load Factor* tersebut digunakan untuk menentukan beban kritis *buckling* P_{cr} dengan persamaan:

$$P_{cr} = \text{Load Factor} \times \text{Working Load}$$

Dan diperoleh hasil sebesar 7.566.488,50 N.

Selanjutnya, nilai *Utilization factor* (UF) dihitung menggunakan persamaan:

$$UF = \frac{\text{Working Load}}{P_{cr}}$$

Dan didapat hasil akhir sebesar 0,2045.

Kemudian, dilakukan perhitungan persentase galat menggunakan persamaan:

$$Error (\%) = \left| \frac{UF_{analitis} - UF_{FEA}}{UF_{analitis}} \right| = \left| \frac{0,2044 - 0,2045}{0,2044} \right|$$

Dan diperoleh hasil akhir galat sebesar 0,049%

Tabel 6. Status keberterimaan.

Parameter Evaluasi	Nilai perhitungan manual	Nilai perhitungan simulasi	Galat (%)	Batas error	Batas standar DNV	Status keberterimaan
Tegangan tekan aksial (σ_{aksial})	59,690 MPa	56,997 MPa	4,51%	10%	$\leq 306 \text{ MPa}$	Aman
Faktor utilitas tekuk	0,2044	0,2045	0,049%	10%	≤ 0.85	Aman

Berdasarkan Tabel 6, nilai tegangan tekan aksial dan faktor utilitas tekuk yang diperoleh dari perhitungan manual maupun simulasi, keduanya memenuhi batas yang dipersyaratkan oleh standar *DNV-ST-E273*. Presentase galat masing-masing sebesar 4,51% untuk tegangan tekan aksial dan 0,049% untuk faktor utilitas tekuk, sehingga keduanya masih berada di bawah batas galat sebesar 10%. Selain itu, nilai tegangan masih lebih kecil dari batas tegangan izin material dan nilai *Utilization Factor* (UF) sesuai standar *DNV-ST-E273*. Oleh karena itu, hasil perhitungan manual dan simulasi dapat dikatakan memiliki tingkat kesesuaian yang baik, sehingga struktur *spreader bar* dinyatakan memenuhi kriteria keberterimaan.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa struktur *spreader bar* yang dianalisis telah memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan standar *DNV-ST-E273*. Pada analisis tegangan tekan aksial, hasil perhitungan manual diperoleh hasil sebesar 59,690 *Mpa*, sedangkan hasil simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) sebesar 56,997 *Mpa*. Selisih antara kedua metode menghasilkan galat sebesar 4,51%, sehingga masih berada di bawah batas toleransi sebesar 10%. Selain itu, nilai tegangan yang diperoleh juga masih lebih kecil dari batas tegangan izin material sebesar 306 *Mpa*, sehingga struktur dinyatakan aman terhadap beban kerja yang diberikan.

Hasil analisis stabilitas tekuk juga menunjukkan bahwa struktur masih memenuhi batas yang dipersyaratkan. Berdasarkan perhitungan manual menggunakan tumpuan *fixed-free*, diperoleh nilai *Utilization factor* (UF) sebesar 0,2044, sedangkan hasil simulasi FEA menghasilkan nilai UF sebesar 0,2045. Perbedaan antara kedua metode menghasilkan galat sebesar 0,049%, sehingga menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki kesesuaian yang sangat baik dengan hasil perhitungan manual. Nilai *Utilization factor* (UF) yang diperoleh juga masih berada di bawah batas maksimum 0,85 sesuai standar *DNV-ST-E273*, sehingga struktur *spreader bar* dinyatakan aman terhadap kegagalan akibat tekuk pada kondisi pembebanan yang dianalisis.

Secara keseluruhan, hasil perhitungan manual dan simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan tekan aksial maupun nilai *Utilization factor* (UF) masih berada dalam batas yang diizinkan oleh standar *DNV-ST-E273*. Dengan demikian, struktur *spreader bar* dapat dinyatakan aman untuk digunakan pada working load sebesar 230 MT, dan hasil simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) dapat digunakan sebagai pendukung untuk memverifikasi hasil perhitungan manual yang telah dilakukan.

5 Daftar Pustaka

- [1] R. K. Sari, A. F. Zakki, and G. Rindo, "Studi Perbandingan Performa Hull Form FPSO Berbentuk Kapal dan FPSO Berbentuk Silinder di Perairan Lepas Pantai Utara Natuna-Indonesia," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 3, no. 1, 2015.
- [2] H. M. Imad, W. E. Primaningtyas, and others, "Construction design of lifting spreader for lifting harp evaporator using finite element method," *JISO J. Ind. Syst. Optim.*, vol. 6, no. 2, pp. 124–130, 2023.
- [3] I. D. A. Ashariyani, P. Sidi, and P. N. A. Nugroho, "Perancangan *spreader bar* sebagai alat bantu pengangkatan pada proses erection," in *Proceedings Conference On Design Manufacture Engineering And Its Application*, 2023.
- [4] J. Nurzain Miftakhul, "Analisa Tegangan *Spreader bar* Kapasitas 280 Ton Menggunakan Aplikasi Solidworks," UNSADA, 2025.
- [5] D. N. V. GL, "Portable offshore units," *DNV-ST-E273*. DNV GL AS, 2016. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/>
- [6] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*. Prentice Hall PTR, 2011. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=JME9qAAACAAJ>
- [7] ASME., *ASME V&V 10-2019: Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*. ASME, 2020. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=HkaIzwEACAAJ>
- [8] P. Debney, S. Hendry, and R. Kannan, "Accuracy and precision in finite-element analysis," *Struct. Eng.*, vol. 101, pp. 62–65, 2023, doi: 10.56330/HLNJ3016.
- [9] S. De, "Verification and Validation in Computational Mechanics," *Preprints*, 2022, doi: 10.20944/preprints202202.0121.v1.

LAMPIRAN

Persamaan 1 :

$$F_{Air} = DF \times MGW \times g = 1.8 \times 230.000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 4.061.340 \text{ N} = 4.061,34 \text{ kN}$$

Persamaan 2 :

$$RSF = \frac{1.2 \times SKL \times PL \times F_{Air}}{\cos(v)} = \frac{1.2 \times 1.1 \times 0.5 \times 4.061.340 \text{ N}}{\cos(30^\circ)} = \frac{2.680.484,40 \text{ N}}{0,866} = 3.095.247,58 \text{ N} \\ = 3.095,25 \text{ kN}$$

Persamaan 3 :

$$P_{actual} = RSF \times \sin(v) = 3.095,25 \text{ kN} \times \sin(30^\circ) = 1.547,62 \text{ kN}$$

Persamaan 4 :

$$A = \frac{\pi}{4} \times (OD^2 - ID^2) = \frac{\pi}{4} \times (406,4^2 - 363,52^2) = 25.929,22 \text{ mm}^2$$

Persamaan 5 :

$$I = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - ID^4) = \frac{\pi}{64} \times (406,4^4 - 363,52^4) = 481.808.790,34 \text{ mm}^4$$

Persamaan 6 :

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{481.808.790,34}{25.929,22}} = 136,31 \text{ mm}$$

Persamaan 7 :

$$\sigma_{aksial} = \frac{P_{actual}}{A} = \frac{1.547.624 \text{ N}}{25.929,22 \text{ mm}^2} = 59,69 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ea} = 0,85 \times R_e = 0,85 \times 360 \text{ MPa} = 306 \text{ MPa}$$

Persamaan 8 :

$$L_{eff} = K \times L = 2 \times 5.600 \text{ mm} = 11.200 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{L_{eff}}{r} = \frac{11.200 \text{ mm}}{136,31 \text{ mm}} = 82,17$$

Persamaan 9 :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L_{eff}^2} = \frac{\pi^2 \times 200.000 \times 481.808.790,34 \text{ N} \cdot \text{mm}^4}{(11.200 \text{ mm})^2} = \frac{9,5105 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{mm}^2}{125.440.000 \text{ mm}^2} = 7.570.472,5 \text{ N} \\ = 7.570,47 \text{ kN}$$

Persamaan 10:

$$UF = \frac{P_{actual}}{P_{cr}} = \frac{1.547.624 \text{ N}}{7.570.472,5 \text{ N}} = 0,2044$$

Persamaan 11:

$$P_{cr} = \text{Load Factor} \times \text{Working Load} = 4,8891 \times 1.547.62 = 7,566,488.50 \text{ N}$$

$$UF = \frac{\text{Working Load}}{P_{cr}} = \frac{1,547,624 \text{ N}}{7,566,488.50 \text{ N}} = 0.2045.$$