

Analisis Kekuatan Struktur *Pad eye Lifting* Terhadap Pembebanan Statis Pada Struktur *Module* Menggunakan Metode *Finite Element*

Dewi Sapitri, Meilani Mandhalena Manurung, S. T., M. T and Muhammad Irsyad Saihilmi, S.T., B.Eng., M.T., M.Sc.

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: dewisapitri2114@email.com

Abstrak

Proses pengangkatan (*lifting*) module pada proyek *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) memerlukan komponen *pad eye* yang memiliki kekuatan struktur memadai agar mampu menahan beban selama proses pengangkatan secara aman. Pada Proyek AGOGO milik PT. VME Process, evaluasi kekuatan *pad eye* dilakukan menggunakan perhitungan manual berdasarkan standar DNV-ST-N001, AISC, DNV OS-H205, dan ASME BTH-1 section 3-1.3.1, namun belum pernah dilakukan verifikasi menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur *pad eye lifting* terhadap pembebanan statis menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) berbantuan SolidWorks Simulation sebagai verifikasi tambahan terhadap perhitungan manual yang telah dilakukan PT. VME Process, serta memastikan desain *pad eye* memenuhi persyaratan keamanan berdasarkan nilai *Safety Factor* (SF) ≥ 3 sesuai *Nominal Design Factor* untuk *Design Category B* pada ASME BTH-1. Penelitian dilakukan melalui pengumpulan data desain, perhitungan distribusi beban berdasarkan posisi *Center of Gravity* (COG), perhitungan manual, pemodelan tiga dimensi, *mesh convergence study*, simulasi FEA, dan verifikasi hasil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Pad Eye 2* menerima beban terbesar sebesar 4.774,86 kN sehingga dipilih sebagai kondisi kritis. Perhitungan manual menghasilkan *utilization ratio* sebesar 0,01–0,84, sedangkan simulasi FEA menghasilkan tegangan *von Mises* maksimum sebesar 65,56 MPa, perpindahan maksimum sebesar 0,04281 mm, regangan maksimum sebesar 0,000261, dan *Safety Factor* minimum sebesar 5,44. Hasil *mesh convergence study* menunjukkan deviasi sebesar 0,04–2,36%, sehingga solusi numerik dinyatakan telah konvergen. Berdasarkan hasil tersebut, desain *pad eye* memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan sesuai standar yang digunakan, sehingga metode FEA dapat digunakan sebagai verifikasi tambahan (*dual verification*) terhadap perhitungan manual dalam evaluasi desain *pad eye* pada proses *lifting* module FPSO. **Kata kunci:** *Pad Eye, Lifting, Tegangan von Mises, Finite Element Analysis, Safety Factor, FPSO.*

Abstract

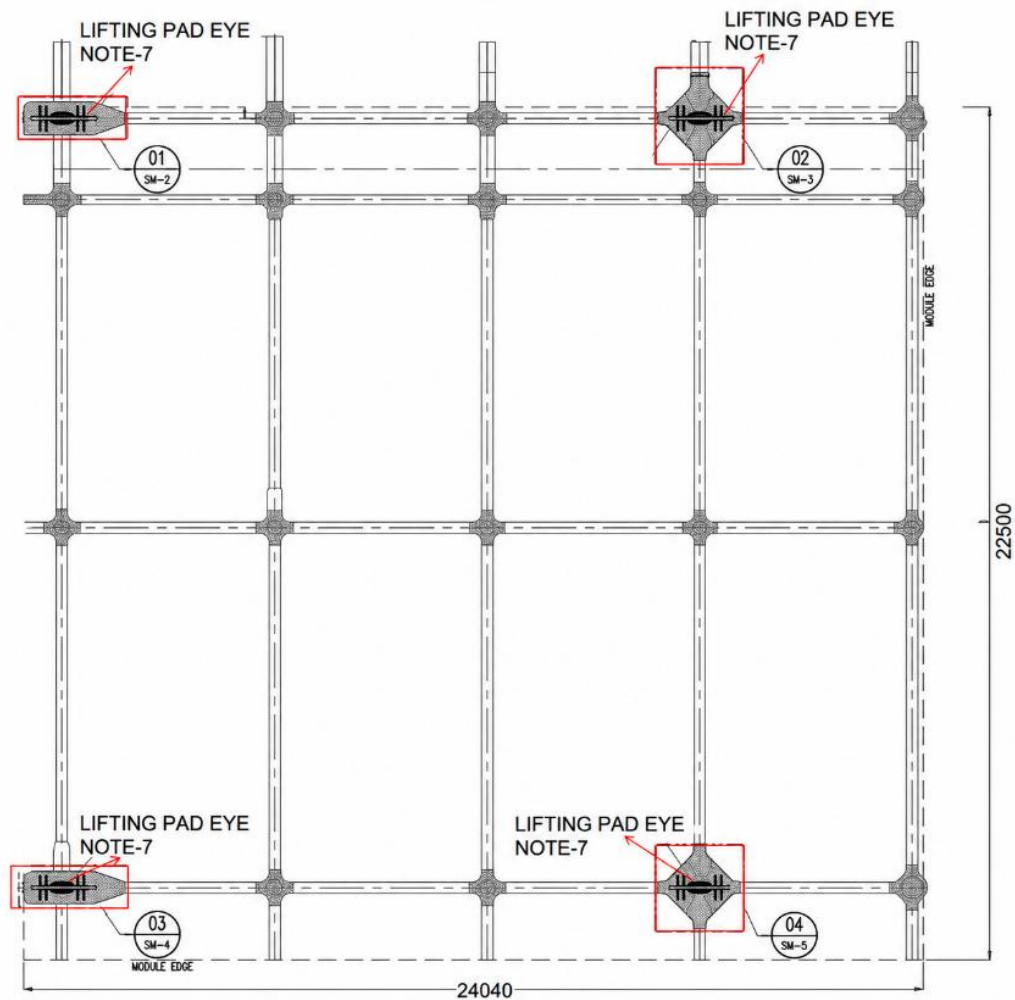
The lifting process of modules in *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) projects requires *pad eyes* with adequate structural strength to safely withstand lifting loads. In the AGOGO Project of PT. VME Process, the structural evaluation of *pad eyes* has been carried out using manual calculations based on DNV-ST-N001, AISC, DNV OS-H205, and ASME BTH-1 section 3-1.3.1 standards. However, the design has never been verified using the *Finite Element Analysis* (FEA) method. This study aims to analyze the structural strength of a lifting *pad eye* under static loading using *Finite Element Analysis* (FEA) with SolidWorks Simulation as an additional verification of the manual calculations performed by PT. VME Process, and to verify that the *pad eye* design satisfies the required safety criterion of a *Safety Factor* (SF) ≥ 3 in accordance with the *Nominal Design Factor* for *Design Category B* specified in ASME BTH-1 section 3-1.3.1. The research methodology consisted of design data collection, load distribution analysis based on the module's *Center of Gravity* (COG), manual calculations, three-dimensional modeling, a *mesh convergence study*, FEA simulation, and result verification. The results showed that *Pad Eye 2* experienced the highest load of 4,774.86 kN and was therefore selected as the critical loading case. The manual calculations produced utilization ratios ranging from 0.01 to 0.84, while the FEA simulation yielded a maximum *von Mises* stress of 65.56 MPa, a maximum displacement of 0.04281 mm, a maximum equivalent strain of 0.000261, and a minimum *Safety Factor* of 5.44. The *mesh convergence study* showed deviations ranging from 0.04% to 2.36%, indicating that the numerical solution had converged. Based on these findings, the *pad eye* design satisfies the required strength and safety criteria in accordance with the applicable standards. Therefore, the FEA method can be used as an additional *dual verification* approach to complement manual calculations in evaluating *pad eye* designs for FPSO module lifting operations.

Keywords : *Pad Eye, Lifting, Tensile Stress, Finite Element Analysis, Safety Factor, FPSO.*

1 Pendahuluan

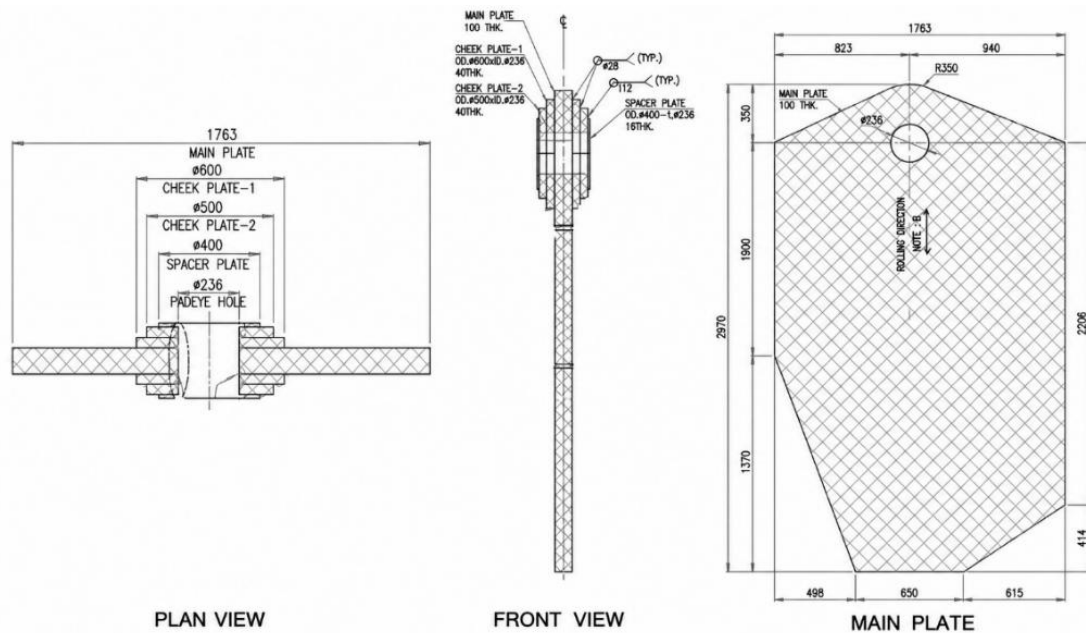
Industri minyak dan gas bumi merupakan salah satu sektor strategis yang memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan energi di seluruh dunia[1]. Salah satu infrastruktur utama dalam industri ini adalah *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO), yaitu kapal produksi terapung yang berfungsi untuk memproses, menyimpan, dan memindahkan minyak maupun gas bumi dari ladang lepas pantai[2]. Dalam pembangunan FPSO, terdapat proses fabrikasi *module topside* yang dilakukan di darat (*onshore*) sebelum *module-module* tersebut di instalasi ke atas dek utama kapal. Proses pemindahan *module* dari area fabrikasi menuju posisi instalasi dilakukan melalui kegiatan pengangkatan (*lifting*), di mana setiap *module* memiliki beban yang sangat besar sehingga membutuhkan komponen struktural khusus yang mampu menahan beban tersebut secara aman[3], [4].

Dalam proses konstruksi dan instalasi fasilitas produksi, salah satu komponen struktural yang berperan penting adalah *pad eye*, yaitu pelat baja berlubang yang berfungsi sebagai titik angkat (*lifting point*) dan dihubungkan dengan *shackle* atau *hook* dari alat angkat. *Pad eye* menerima beban secara langsung selama proses pengangkatan sehingga menjadi salah satu komponen kritis yang harus memiliki kekuatan struktural yang memadai. Kegagalan *pad eye* dapat menyebabkan kerusakan struktur, kerugian material, bahkan membahayakan keselamatan pekerja. Oleh karena itu, analisis kekuatan *pad eye* perlu dilakukan untuk memastikan komponen mampu bekerja secara aman selama proses *lifting*[5].



Gambar 1.1 : Posisi 4 titik *lifting pad eye* Module M26 Proyek AGOGO

(Sumber : Internal document PT. VME Process)



Gambar 1.2 : Detail View komponen *pad eye* Module M26 Proyek AGOGO

(Sumber : Internal document PT. VME Process)

Objek penelitian ini adalah *Module M26 Produced Water Treatment* pada Proyek AGOGO milik PT. VME Process dengan berat total sebesar 1.307,95 MT. *Module* tersebut menggunakan empat titik lifting *pad eye* dengan dimensi yang identik dan material berupa NV F42Z, NV D36, serta NV A36. Selama pelaksanaan proyek, analisis kekuatan *pad eye* dilakukan menggunakan perhitungan manual berbasis spreadsheet Microsoft Excel yang mengacu pada standar DNV-ST-N001, AISC, dan DNV OS-H205. Hingga saat ini belum pernah dilakukan verifikasi menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) terhadap desain *pad eye* yang digunakan.

Pada proyek-proyek sebelumnya, analisis kekuatan *pad eye* dilakukan melalui perhitungan manual menggunakan spreadsheet (Microsoft Excel) berdasarkan standar DNV-ST-N001, AISC[6], [7] sebagai acuan tegangan izin material baja struktural, ASME BTH-1 section 3-1.3.1 yang menetapkan *Nominal Design Factor* (Nd) sebesar 3 untuk *Design Category* B[8], serta DNV OS-H205 sebagai acuan penentuan *Dynamic Amplification Factor* (DAF)[9]. Pendekatan tersebut telah menjadi dasar evaluasi kekuatan *pad eye* sebelum proses lifting dilaksanakan.

Belum diterapkannya verifikasi menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) pada proyek-proyek sebelumnya bukan disebabkan oleh adanya kegagalan desain ataupun kecelakaan kerja, melainkan karena proses analisis yang diterapkan perusahaan selama ini telah mengandalkan *structural analysis* dan perhitungan manual berbasis spreadsheet Microsoft Excel sesuai standar yang berlaku. Berdasarkan informasi dari engineer PT. VME Process, pendekatan tersebut telah dianggap memadai dalam mendukung proses perancangan *pad eye* sehingga simulasi berbasis FEA belum menjadi bagian dari tahapan verifikasi desain. Selain dianggap memadai, pendekatan perhitungan manual juga dipilih karena lebih efisien dari sisi waktu dan biaya analisis dalam mendukung jadwal proyek, mengingat simulasi FEA memerlukan tahapan pemodelan geometri dan meshing tambahan yang lebih kompleks. Perbedaan pendekatan tersebut dapat menghasilkan nilai respons struktur yang berbeda, sehingga diperlukan evaluasi terhadap hasil kedua metode berdasarkan kriteria penerimaan yang sama. Dalam penelitian ini, hasil perhitungan manual digunakan sebagai dasar pembebanan dan evaluasi awal, sedangkan FEA digunakan untuk mengevaluasi respon struktur pada geometri aktual melalui distribusi tegangan, regangan, deformasi, dan *safety factor*. Selain itu, *mesh convergence study* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil numerik yang diperoleh telah mencapai kondisi yang stabil. Dengan demikian, penerapan FEA dalam penelitian ini dilakukan untuk mengkaji konsistensi hasil antara pendekatan analitis dan pendekatan numerik pada geometri aktual *pad eye*.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur pada *Pad Eye Lifting Module* M26 menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dengan bantuan perangkat lunak SolidWorks Simulation sebagai metode verifikasi numerik yang melengkapi perhitungan manual yang telah dilakukan oleh PT. VME Process. Verifikasi tambahan ini dilakukan untuk mengevaluasi konsistensi hasil antara perhitungan manual dan analisis FEA pada kondisi pembebanan dan geometri *pad eye* yang sama, serta untuk mengidentifikasi respons struktur berupa distribusi tegangan, regangan, deformasi, dan *Safety Factor* yang diperoleh melalui analisis numerik. Selain itu,

penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pemenuhan kriteria penerimaan desain *pad eye* berdasarkan *Safety Factor* (SF) ≥ 3 sesuai *Nominal Design Factor Design Category B* pada ASME BTH-1 section 3-1.3.1 [8] .

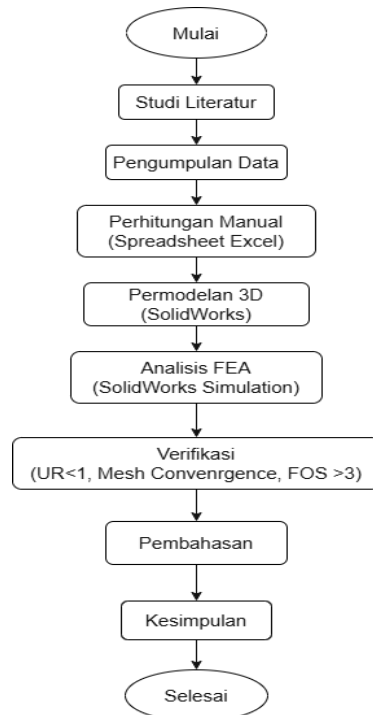
Dalam proses pengangkatan *module* M26, terdapat 4 titik *lifting pad eye* yang bekerja secara bersamaan. Meskipun keempat *pad eye* memiliki dimensi yang identik, beban yang diterima oleh masing-masing *pad eye* tidak selalu sama rata. Hal ini dipengaruhi oleh posisi *Center of Gravity* (COG) *module* terhadap posisi keempat titik *lifting*. Apabila COG tidak berada tepat di tengah keempat titik *lifting*, maka *pad eye* yang posisinya lebih dekat ke COG akan menerima beban lebih besar dibandingkan *pad eye* lainnya. Oleh karena itu, distribusi beban ke masing-masing *pad eye* dihitung menggunakan persamaan kesetimbangan statik berdasarkan prinsip momen [10], sehingga dapat ditentukan *pad eye* mana yang menerima beban terbesar sebagai kasus kritis dalam analisis FEA. Apabila *pad eye* dengan beban terbesar dinyatakan aman dengan nilai *Safety Factor* (SF) > 3 , maka seluruh *pad eye* pada *module* M26 dinyatakan aman.

Adapun beberapa batasan masalah ditetapkan untuk menjaga fokus dan kedalaman analisis pada *pad eye* 2. Analisis hanya dilakukan pada *Module M26 Produced Water Treatment* pada proyek AGOGO milik PT. VME Process. Analisis tegangan pada sambungan las antara *pad eye* dan struktur pendukung tidak dilakukan dalam penelitian ini dan menjadi batasan analisis, sehingga evaluasi difokuskan pada kekuatan *pad eye* 2 terhadap beban yang diterima. Beban yang ditinjau hanya beban statis, tidak termasuk beban angin, beban gelombang, dan efek kelelahan (*fatigue*), karena proses pengangkatan dilakukan di darat dengan kondisi lingkungan yang terkendali. Beban desain yang digunakan adalah berat *module* termasuk *contingency* sebesar 1.373,34 MT dikalikan *Dynamic Amplification Factor* (DAF) 1,08, kemudian didistribusikan ke 4 titik *lifting* berdasarkan posisi COG *module*. Analisis difokuskan pada *pad eye* dengan beban terbesar sebagai kondisi pembebanan kritis. Berdasarkan hasil distribusi beban pada empat titik *lifting* menggunakan posisi COG *module* dan prinsip kesetimbangan statik, *Pad Eye* 2 menerima beban terbesar sebesar 4.774,86 kN. Oleh karena itu, *Pad Eye* 2 dipilih sebagai objek analisis karena merepresentasikan kondisi pembebanan paling kritis dibandingkan *pad eye* lainnya. Keempat *pad eye* memiliki dimensi dan spesifikasi material yang identik, sehingga evaluasi terhadap *Pad Eye* 2 digunakan untuk merepresentasikan kondisi paling kritis dari keempat *pad eye*. Simulasi FEA menggunakan pendekatan *linear static* pada perangkat lunak SolidWorks Simulation, dengan material dianggap homogen dan isotropis sesuai spesifikasi dokumen internal PT. VME Process. Desain *pad eye* dinyatakan aman apabila nilai *Safety Factor* (SF) ≥ 3 sesuai *Nominal Design Factor* untuk *Design Category B* yang ditetapkan dalam standar ASME BTH-1 Section 3-1.3.1 [8].

Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan. Pertama, pengumpulan data berupa spesifikasi desain *pad eye*, material, dimensi, berat *module*, serta posisi *Center of Gravity* (COG) yang diperoleh dari dokumen internal PT. VME Process. Kedua, perhitungan distribusi beban ke empat titik *lifting* berdasarkan posisi COG menggunakan persamaan kesetimbangan statik, kemudian dilanjutkan dengan perhitungan manual menggunakan spreadsheet Microsoft Excel mengacu pada standar DNV-ST-N001, AISC D3.1, DNV OS-H205, dan ASME BTH-1 section 3-1.3.1. Ketiga, pemodelan geometri tiga dimensi *pad eye* dilakukan secara langsung menggunakan perangkat lunak SolidWorks berdasarkan dimensi aktual yang diperoleh dari perusahaan. Keempat, dilakukan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan SolidWorks Simulation untuk memperoleh distribusi tegangan tarik, tegangan *von Mises*, regangan, deformasi total, dan *Safety Factor*. Terakhir, hasil simulasi digunakan sebagai verifikasi terhadap hasil perhitungan manual untuk memastikan bahwa desain *pad eye* memenuhi persyaratan keamanan sesuai standar yang digunakan.

2 Metodologi Penelitian

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



Gambar 2.1 :Diagram alir penelitian

2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperkuat dasar teori terhadap penelitian yang dibahas. Berdasarkan jurnal dan standar teknis yang menjelaskan tentang komponen *lifting* pada struktur *module*, dipelajari teori mengenai geometri dan fungsi komponen *pad eye*, meliputi *main plate*, *check plate*, dan *spacer plate*. Dikaji pula teori kesetimbangan statik pada sistem *multi-point lifting* untuk menentukan distribusi beban pada setiap *pad eye* berdasarkan posisi *Center of Gravity* (COG) *module*. Kajian ini menjadi dasar dalam menentukan *pad eye* yang menerima beban terbesar sebagai objek analisis dan verifikasi menggunakan metode FEA.

Untuk proses analisis, dipelajari metode Finite Element Analysis (FEA) sebagai metode numerik yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap pembebanan statis menggunakan perangkat lunak SolidWorks Simulation. Kajian meliputi prinsip dasar analisis elemen hingga, proses *meshing*, penerapan *boundary condition*, pembebanan, serta parameter keluaran berupa tegangan *von Mises*, regangan, deformasi, dan *Safety Factor* yang digunakan sebagai dasar verifikasi kekuatan *pad eye*.

Selain kajian mengenai metode analisis, studi literatur juga dilakukan terhadap standar-standar yang digunakan dalam penelitian. DNV OS-H205 dikaji sebagai acuan penentuan beban desain dan nilai *Dynamic Amplification Factor* (DAF)[6], sedangkan DNV-ST-N001[7] digunakan sebagai dasar perhitungan manual komponen *pad eye*. Standar AISC D3.1[8] digunakan sebagai acuan evaluasi kekuatan material baja struktural, sedangkan ASME BTH-1 section 3-1.3.1[9] digunakan sebagai acuan penentuan *Nominal Design Factor* (Nd), yaitu 2,00 untuk *Design Category A*, 3,00 untuk *Design Category B*, dan 6,00 untuk *Design Category C*. *Pad eye* pada penelitian ini diklasifikasikan sebagai *Design Category B* sesuai section 2-2.- ASME BTH-1, karena besaran dan variasi beban yang bekerja tidak sepenuhnya dapat diprediksi serta kondisi lingkungan operasi *lifting* tergolong *severe*, sehingga nilai Nd yang digunakan adalah 3,00. ASME B30.20[10] dikaji sebagai standar keselamatan *below-the-hook lifting devices* yang mensyaratkan perancangan perangkat *lifting* mengacu pada ASME BTH-1. Selain itu, dipelajari pula standar DNVGL-OS-B101[11] *Metallic Materials* sebagai acuan spesifikasi dan sifat mekanis material baja *offshore* yang digunakan pada komponen *pad eye*, yaitu NV A36, NV D36, dan NV F42Z, yang selanjutnya digunakan sebagai properti material pada analisis FEA.

2.2 Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dilakukan berdasarkan dokumen desain internal PT. VME Process pada Proyek AGOGO. Data yang dikumpulkan meliputi spesifikasi material, dimensi aktual komponen *pad eye lifting*, data berat *module*, posisi *Center of Gravity* (COG), serta koordinat keempat titik *pad eye*. Spesifikasi material mengacu pada standar DNVGL-OS-B101 *Metallic Materials*, sedangkan data dimensi, berat *module*, posisi COG, dan koordinat

pad eye diperoleh dari dokumen desain internal perusahaan. Spesifikasi material yang digunakan pada setiap komponen *pad eye* disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi material *pad eye lifting*

Komponen	Material	Yield Strength Min (MPa)
<i>Main plate</i>	NV F42Z	420 MPa
<i>Check plate 1</i>	NV D36	355 MPa
<i>Check plate 2</i>	NV D36	355 MPa
<i>Spacer plate</i>	NV A36	355 MPa

Material yang digunakan terdiri atas NV F42Z pada *main plate*, NV D36 pada *check plate*, dan NV A36 pada *spacer plate*. Nilai *yield strength* masing-masing material digunakan sebagai properti material pada analisis FEA.

Dimensi aktual setiap komponen *pad eye* berdasarkan *drawing* konstruksi M26 *Lifting Arrangement Details* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi komponen *pad eye lifting*

Komponen	Dimensi	(mm)
<i>Main plate</i>	Panjang	2970
	Lebar	1646
	Tebal	100
<i>Pad eye Hole</i>	Ø Diameter	236
<i>Check plate 1</i>	Ø Luar (OD)	600
	Ø Dalam (ID)	236
	Tebal (mm)	40
<i>Check plate 2</i>	Ø Luar (OD)	500
	Ø Dalam (ID)	236
	Tebal (mm)	40
<i>Spacer plate</i>	Ø Luar (OD)	400
	Ø Dalam (ID)	236
	Tebal (mm)	16

Dimensi tersebut digunakan sebagai acuan dalam pembuatan model tiga dimensi (3D) pada Solidworks sehingga geometri yang di analisis sesuai dengan kondisi aktual komponen *pad eye*.

Data berat *module*, posisi *Center of Gravity* (COG), dan dimensi *module* yang digunakan dalam penelitian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Lift Weights and COG Summary

Module / Structure Description	Total Weight (MT)	Total Weight (MT) Incl. Con	LOCAL COG			Lifting Span		Dimensions		
			X	Y	Z	X	Y	Length (m)	Width (m)	Height (m)
M26 - Produced Water Treatment	1307.95	1373.34	10.728	10.507	11.077	17.04	20.3	24.000	22.500	24.000

Center of Gravity (COG) merupakan titik pusat distribusi massa suatu struktur yang digunakan sebagai acuan dalam menentukan distribusi beban pada sistem *lifting*. Pada sistem *lifting* dengan beberapa titik angkat, posisi COG terhadap masing-masing titik *lifting* memengaruhi besarnya beban yang diterima oleh setiap *lifting point*. DNVGL-

ST-N001 Section 16.3.3.1[12] menjelaskan bahwa beban pada *lift point* ditentukan berdasarkan distribusi berat struktur terhadap jarak geometris COG dari masing-masing *lift point*. Oleh karena itu, posisi COG dan konfigurasi geometris keempat *pad eye* digunakan sebagai dasar dalam menentukan distribusi *design load* pada penelitian ini.

Koordinat keempat *pad eye* yang digunakan dalam perhitungan distribusi beban berdasarkan posisi *Center of Gravity* (COG) disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Koordinat *Pad Eye*

Koordinat <i>Pad Eye</i>	X (mm)	Y (mm)
<i>Pad Eye 1</i>	1.020	22.200
<i>Pad Eye 2</i>	18.060	22.200
<i>Pad Eye 3</i>	1.020	1.900
<i>Pad Eye 4</i>	18.060	1.900

Koordinat pada Tabel 4 digunakan sebagai dasar dalam menentukan distribusi beban yang diterima oleh masing-masing *pad eye* menggunakan prinsip kesetimbangan statik. Hasil perhitungan distribusi beban tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan *pad eye* yang menerima beban terbesar sebagai objek analisis FEA.

2.3 Perhitungan Manual

Perhitungan manual dilakukan menggunakan *spreadsheet* Microsoft Excel dengan mengacu pada standar DNV-ST-N001[7] sebagai metode perhitungan komponen *pad eye*, AISC D3.1[8] sebagai acuan evaluasi tegangan dan kapasitas material baja struktural, DNV OS-H205[6] sebagai dasar penentuan nilai *Dynamic Amplification Factor* (DAF), serta ASME BTH-1 [9] sebagai acuan penentuan *Nominal Design Factor* untuk evaluasi *Safety Factor*. Parameter yang dihitung meliputi *pin bearing stress*, tegangan tarik (*tension failure*), tegangan geser (*pin pull-out shear*), tegangan kombinasi (*combined stress*), dan nilai *Safety Factor* pada masing-masing komponen *pad eye*. Hasil perhitungan manual digunakan sebagai dasar verifikasi terhadap hasil analisis FEA untuk memastikan bahwa desain *pad eye* memenuhi persyaratan kekuatan sesuai standar yang digunakan. Adapun persamaan yang digunakan dalam perhitungan manual adalah sebagai berikut:

2.3.1 Beban Desain (DAF)

Beban desain (*design load*) yang bekerja pada *pad eye* dihitung berdasarkan berat *module* termasuk *contingency* yang dikalikan dengan nilai *Dynamic Amplification Factor* (DAF) sebesar 1,08 sesuai DNV OS-H205. Beban desain tersebut selanjutnya diuraikan menjadi komponen vertikal dan horizontal berdasarkan sudut *sling* (α) sebagai dasar dalam perhitungan manual maupun pembebanan pada analisis FEA. Nilai F_{design} selanjutnya dinyatakan sebagai *design load* yang digunakan dalam perhitungan distribusi beban pada masing-masing *pad eye* dan sebagai pembebanan pada analisis FEA.

$$F_{design} = W \times DAF$$

Beban tersebut kemudian diuraikan menjadi komponen vertikal dan horizontal berdasarkan sudut *sling* (α):

$$P_v = F_{design} \times \sin \alpha$$

$$P_h = F_{design} \times \cos \alpha$$

2.3.2 Pin Bearing Stress

Kapasitas tumpu *pin* pada pelat dihitung berdasarkan AISC sebagai berikut:

$$F_p = 0,9 \times F_y$$

$$R_n = F_p \times D_{pin} \times t$$

dimana F_y = tegangan leleh material (Mpa), d_{pin} = diameter *pin* *shackle* (mm), t = tebal pelat (mm).

2.3.3 Tegangan Tarik (*Tension Failure*)

Berdasarkan AISC D3.1, kapasitas tarik dihitung pada dua *failure line*:

- *Failure line 1* melewati lubang *pin*:

$$F_{t1} = 0,45 \times F_y$$

$$T_1 = 2 \times \left(r - \frac{d_h}{2} \right) \times t \times F_{t1}$$

- *Failure line 2* tanpa lubang pin:

$$F_{t2} = 0,60 \times F_y$$

$$T_2 = \pi \times r \times t \times F_{t2}$$

di mana r = radius pelat (mm), d_h = diameter lubang pin (mm).

2.3.4 Tegangan Geser (*Pin Pull-Out Shear*)

Kapasitas geser *pin pull-out* dihitung sebagai berikut:

$$F_v = 0,4 \times F_y$$

$$V_n = 2 \times \left(r - \frac{d_h}{2} \right) \times t \times F_v$$

Tegangan geser aktual:

$$f_v = \frac{P_v}{A_s}$$

di mana A_s = luas geser efektif penampang (mm²).

2.3.5 Tegangan Kombinasi (*Combined Stress*)

$$UC = \frac{f_a}{F_t} + \frac{f_{ip}}{F_{bip}} + \frac{f_{op}}{F_{bop}} \leq 1,0$$

di mana:

- f_a = tegangan aksial aktual (Mpa)
- F_t = tegangan tarik izin = $0,6 \times F_y$ (MPa)
- f_{ip}, f_{op} = tegangan lentur *in plane* dan *out of plane* aktual (MPa)
- F_{bip}, F_{bop} = tegangan lentur izin = $0,6 \times F_y$ (MPa)

2.3.6 Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

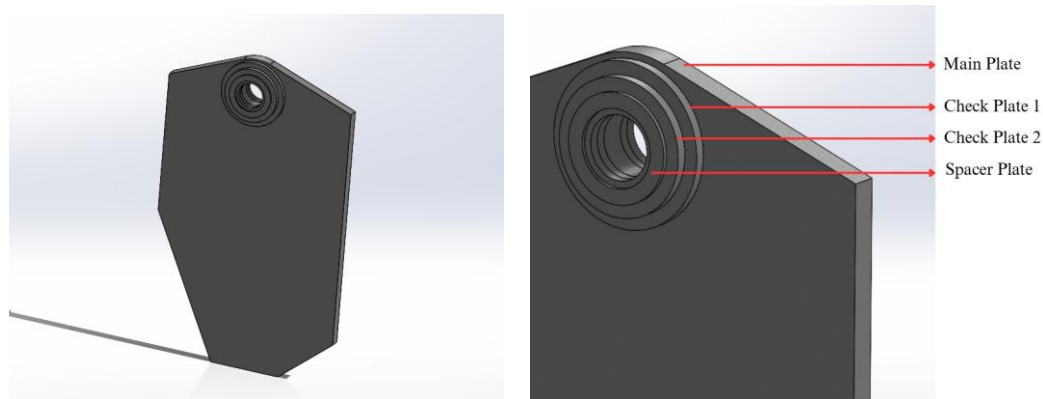
$$SF = \frac{\text{Kapasitas Izin}}{\text{Tegangan Aktual}}$$

Desain *pad eye* dinyatakan memenuhi persyaratan keamanan apabila seluruh parameter memiliki nilai *Unity Check* (Uc) <1,0 serta nilai *Safety Factor* (SF) >3 sesuai *Nominal Design Factor* untuk *Design Category* B yang ditetapkan dalam standar ASME BTH-1 section 3-1.3.1[9]. Hasil perhitungan manual selanjutnya digunakan sebagai dasar verifikasi terhadap hasil analisis FEA untuk memastikan bahwa desain *pad eye* memenuhi persyaratan kekuatan sesuai standar yang digunakan.

2.4 Pemodelan 3D

Pemodelan geometri *pad eye* dilakukan secara langsung menggunakan perangkat lunak SolidWorks berdasarkan dimensi aktual yang diperoleh dari dokumen desain internal PT. VME Process pada Proyek AGOGO. Model tiga dimensi dibuat sesuai konfigurasi aktual yang terdiri atas *main plate*, *check plate*, dan *spacer plate*, sehingga merepresentasikan bentuk geometris *pad eye* yang digunakan pada proses *lifting*.

Model tiga dimensi yang telah dibuat selanjutnya digunakan sebagai geometri utama pada analisis *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan SolidWorks Simulation[13]. Penggunaan perangkat lunak yang sama untuk proses pemodelan dan simulasi bertujuan untuk menjaga kesesuaian geometri selama proses analisis serta meminimalkan potensi perubahan model akibat proses konversi data.



Gambar 2.2 Model 3D Pad Eye SolidWorks

2.5 Analisis FEA

Tahap analisis dilakukan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) melalui perangkat lunak SolidWorks Simulation[13]. Model geometri *pad eye* yang telah dibuat selanjutnya diberikan properti material, kondisi batas (*boundary condition*), dan pembebanan sesuai hasil perhitungan manual. Pembebanan yang digunakan merupakan beban desain pada *pad eye* kritis yang diperoleh dari hasil distribusi beban berdasarkan posisi *Center of Gravity* (COG) dan ketentuan standar DNV-ST-N001. Material yang digunakan pada simulasi disesuaikan dengan spesifikasi aktual, yaitu NV A36, NV D36, dan NV F42Z.

Pada simulasi, bagian bawah *pad eye* yang terhubung dengan struktur *module* dianggap sebagai tumpuan tetap (*fixed support*). Diskretisasi model dilakukan menggunakan elemen solid tetrahedral dengan ukuran *mesh* akhir sebesar 15 mm, yang dipilih berdasarkan hasil *mesh convergence study* sehingga menghasilkan solusi numerik yang telah memenuhi kondisi konvergen. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan *linear static*[14] karena pembebanan yang ditinjau merupakan pembebanan statis selama proses *lifting*. Nilai *Dynamic Amplification Factor* (DAF) sebesar 1,08 mengacu pada standar DNV OS-H205 Section 3, Table 3-1 untuk operasi *lifting inshore* dengan berat *module* pada rentang 1.000–2.500 ton. Efek kelelahan (*fatigue*), beban angin, dan beban gelombang tidak dimasukkan dalam analisis karena *pad eye* yang ditinjau digunakan pada proses pengangkatan di darat (*onshore*), sehingga beban dominan yang bekerja berupa pembebanan statis. Parameter hasil yang dievaluasi pada analisis FEA meliputi distribusi tegangan tarik, tegangan *von Mises*, regangan, deformasi total, dan *Safety Factor*. Hasil analisis tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar verifikasi terhadap hasil perhitungan manual untuk memastikan bahwa desain *pad eye* memenuhi persyaratan kekuatan sesuai standar yang digunakan.

2.6 Verifikasi Hasil

Pada tahap verifikasi, hasil analisis Finite Element Analysis (FEA) digunakan untuk memverifikasi hasil perhitungan manual yang telah dilakukan perusahaan terhadap desain *pad eye*. Verifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa desain memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan standar yang digunakan serta memberikan keyakinan tambahan terhadap keamanan desain sebelum digunakan pada proses *lifting*. Mengingat Proyek AGOGO telah beroperasi, penelitian ini merupakan verifikasi bersifat retrospektif (*retrospective verification*), yaitu mengevaluasi kembali desain *pad eye* yang telah digunakan untuk memastikan bahwa desain tersebut memenuhi persyaratan keamanan sesuai standar yang berlaku.

Kriteria penerimaan pada simulasi FEA menggunakan nilai tegangan maksimum (*peak stress*), bukan nilai rata-rata, karena pendekatan konservatif berbasis nilai kritis sesuai untuk evaluasi keamanan struktur yang menahan beban statis besar seperti *pad eye lifting*. Penggunaan nilai puncak memastikan bahwa titik dengan konsentrasi tegangan tertinggi pada geometri tetap berada dalam batas aman, sehingga kesimpulan keamanan desain didasarkan pada kondisi paling kritis (titik dengan tegangan tertinggi), bukan kondisi rata-rata di seluruh geometri, agar area yang berpotensi gagal lebih dulu tidak terlewat dalam evaluasi.

Acceptance criteria pada penelitian ini meliputi empat aspek. Pertama, hasil perhitungan manual dinyatakan memenuhi persyaratan apabila seluruh parameter memiliki nilai *Unity Check* (UC) < 1,0 sesuai DNV-ST-N001. Kedua, hasil simulasi FEA dinyatakan telah konvergen apabila perubahan nilai tegangan maksimum akibat penyempurnaan ukuran *mesh* menunjukkan deviasi kurang dari 5%, sehingga solusi numerik dianggap stabil. Ketiga, tegangan *von Mises* hasil simulasi harus lebih kecil dari *yield strength* material yang digunakan sehingga material tetap berada pada daerah elastis. Keempat, desain *pad eye* dinyatakan memenuhi persyaratan keamanan apabila nilai

Safety Factor (SF) ≥ 3 sesuai *Nominal Design Factor* untuk *Design Category B* yang ditetapkan dalam standar ASME BTH-1 section 3-1.3.1[9].

Tabel 5.*Acceptance Criteria* verifikasi hasil penelitian

Parameter	Kriteria	Standar
Unity Check	<1	DNV-ST-N001
Mesh Convergence	Deviasi <5%	Literatur FEA
Von Mises	<Yield Strength	DNV-OS-B101 Metallic Materials
Safety Factor	>3	ASME BTH-1 section 3-1.3.1

Melalui tahapan verifikasi tersebut, hasil analisis FEA digunakan untuk memberikan keyakinan tambahan bahwa desain *pad eye* yang telah dirancang berdasarkan perhitungan manual memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan sesuai standar yang digunakan. Hasil verifikasi selanjutnya disajikan dalam bentuk distribusi tegangan tarik, tegangan *von Mises*, regangan, deformasi total, dan *Safety Factor* pada Bab 3 sebagai dasar pembahasan hasil penelitian.

3 Analisa Data dan Pembahasan

3.1 Hasil Perhitungan

3.1.1 Design Load

Hasil perhitungan beban desain (*design load*) berdasarkan total berat *module*, *contingency*, dan *Dynamic Amplification Factor* (DAF) disajikan pada Tabel 5.

Melalui tahapan verifikasi tersebut, hasil analisis FEA digunakan untuk memberikan keyakinan tambahan bahwa desain *pad eye* yang telah dirancang berdasarkan perhitungan manual memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan sesuai standar yang digunakan. Hasil verifikasi selanjutnya disajikan dalam bentuk distribusi tegangan tarik, tegangan *von Mises*, regangan, deformasi total, dan *Safety Factor* pada Bab 3 sebagai dasar pembahasan hasil penelitian.

Tabel 6. *Design Load*

Deskripsi	Nilai
Total Weight Including Contingency (MT)	1373.34
DAF (Dynamic Amplification Factor)	1.08
Design Weight (MT)	1483.21
Gravity	9.81
Design Load (kN)	14550.263

Berdasarkan tabel 6, total berat module setelah ditambahkan nilai *contingency* 1.373,34 MT. untuk memperhitungkan efek dinamis selama proses pengangkatan, digunakan Dynamic Amplification Factor (DAF) sebesar 1,08 sesuai DNV OS-H205[6], sehingga diperoleh design load sebesar 14.550,263 kN. Nilai design load ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan distribusi beban pada keempat *pad eye* dan sebagai pembebanan pada analisis FEA.

3.1.2 Distribusi Beban *Pad Eye*

Hasil perhitungan distribusi beban pada keempat *pad eye* berdasarkan posisi *Center of Gravity* (COG) module disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Distribusi beban *Pad Eye*

<i>Pad Eye</i>	Nilai
----------------	-------

<i>Pad Eye 1</i>	3606.23
<i>Pad Eye 2</i>	4774.86
<i>Pad Eye 3</i>	2654.48
<i>Pad Eye 4</i>	3514.69
Total Design Load (kN)	14550.263

Berdasarkan Tabel 7, design load didistribusikan ke empat *pad eye* menggunakan prinsip kesetimbangan statik berdasarkan posisi *Center of Gravity* (COG) *module* dan konfigurasi geometris titik *lifting*. Distribusi beban pada masing-masing *pad eye* mempertimbangkan posisi COG dan jarak geometrisnya terhadap setiap titik *lifting*. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *Pad Eye 2* menerima beban terbesar sebesar 4.774,86 kN, sedangkan *Pad Eye 3* menerima beban terkecil sebesar 2.654,48 kN. Oleh karena itu, *Pad Eye 2* dipilih sebagai objek analisis karena merepresentasikan kondisi pembebanan paling kritis.

Dengan demikian, pengaruh konfigurasi *pad eye* lainnya terhadap *Pad Eye 2* telah diperhitungkan pada tahap distribusi beban melalui posisi COG dan jarak geometris masing-masing titik *lifting*. Setelah beban pada setiap *pad eye* diperoleh, analisis kekuatan lokal dilakukan pada *Pad Eye 2* berdasarkan beban yang diterimanya. *Pad Eye* lainnya tidak diberikan sebagai beban tambahan langsung pada *Pad Eye 2* karena pengaruh konfigurasinya telah diperhitungkan dalam penentuan distribusi beban sistem *lifting*.

3.1.3 Perhitungan manual

Berdasarkan hasil distribusi beban pada Subbab 3.1.2, *Pad Eye 2* menerima beban terbesar sebesar 4.774,86 kN sehingga dipilih sebagai objek perhitungan manual. Perhitungan dilakukan menggunakan Microsoft Excel berdasarkan persamaan yang telah dijelaskan pada Subbab 2.3 untuk memperoleh nilai *utilization ratio* setiap parameter kekuatan *pad eye*. Adapun contoh perhitungan manual untuk beberapa parameter utama disajikan sebagai berikut:

3.1.3.1 Pin Bearing Stress

Main Plate

$$F_p = 0,9 \times 420 = 378 \text{ MPa}$$

$$R_n = 378 \times 230,1 \times 100$$

$$R_n = 8.698,69 \text{ kN}$$

Check Plate

$$F_p = 0,9 \times 355 = 319,5 \text{ MPa}$$

$$R_n = 319,5 \times 230,1 \times 80$$

$$R_n = 5.882,00 \text{ kN}$$

Bearing capacity

$$R_n = 8.698,69 + 5.882,00 = 14.580,70$$

Utilization Ratio

$$R_n = 632,75 \times 9,81 = 6205,1$$

$$UC = \frac{6205,1}{14.580,70} = 0.43$$

3.1.4 Resume Utilization Ratio

Hasil perhitungan manual berupa nilai *utilization ratio* untuk setiap parameter kekuatan *pad eye* disajikan pada Table 8.

Tabel 8. Resume Utilization Ratio

Parameter	Utilization Ratio
-----------	-------------------

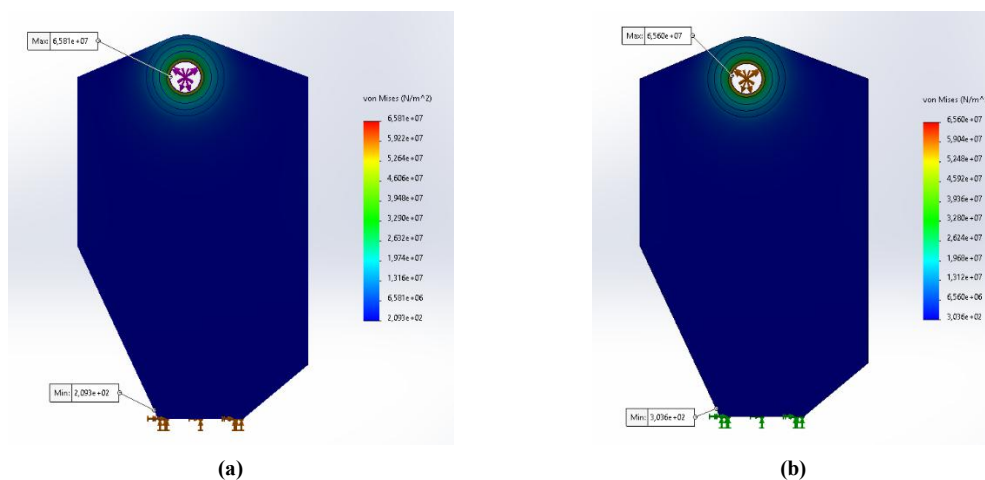
<i>Pin Bearing Stress</i>	0.43
<i>Stress due to pressure between elastic bodies</i>	0.28
<i>Pin Pull Out Shear</i>	0.45
<i>Tension Failure</i>	0.46
<i>Inplane Bending Stress</i>	0.01
<i>Outplane Bending Stress</i>	0.38
<i>Axial Stress</i>	0.04
<i>Combined Stress</i>	0.428
<i>Shear Stress (main plate)</i>	0.84
<i>Shear Stress (stiffener)</i>	0.17
<i>Von Misses</i>	0.65

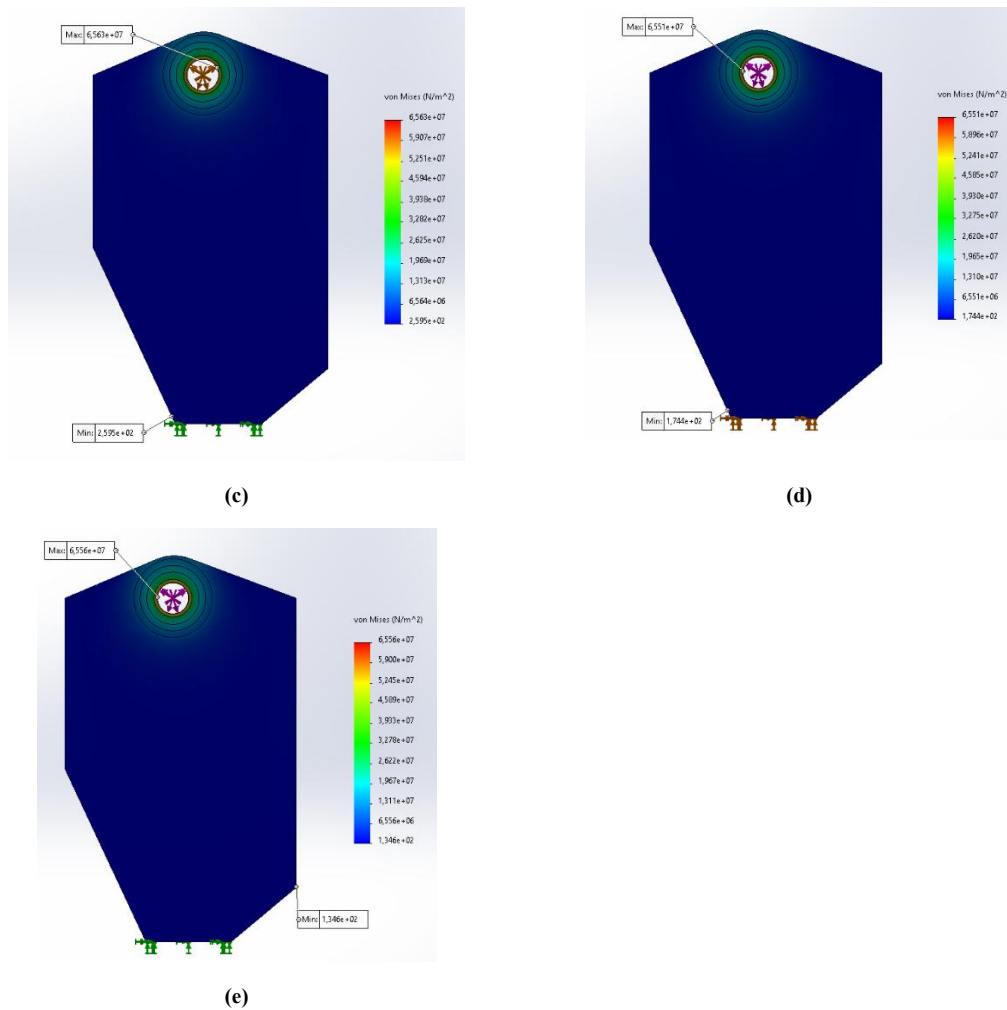
Berdasarkan hasil perhitungan manual yang ditunjukkan pada Tabel 8, seluruh parameter memiliki nilai *utilization ratio* kurang dari 1,0. Hal ini menunjukkan bahwa desain *pad eye* telah memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan standar DNV-ST-N001 dan AISC yang digunakan dalam proses perancangan. Dengan demikian, desain *pad eye* dinyatakan aman secara perhitungan manual dan layak untuk dilakukan evaluasi lebih lanjut menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA).

3.2 Mesh Convergence Study

Mesh convergence study dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) telah mencapai kondisi konvergen sehingga solusi numerik yang diperoleh dapat dipercaya. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan ukuran *mesh* menjadi 40 mm, 30 mm, 25 mm, 20 mm, dan 15 mm. Parameter yang diamati meliputi tegangan maksimum (*von Mises*), *displacement maksimum*, *equivalent strain*, *safety factor* (SF) , serta persentase deviasi pada setiap variasi ukuran *mesh*. Hasil simulasi tegangan *von Mises* pada setiap variasi ukuran *mesh* (40 mm, 30 mm, 25 mm, 20 mm, dan 15 mm) ditunjukkan pada Gambar 3.1 .c

Hasil simulasi tegangan *von Mises* pada setiap variasi ukuran *mesh* (40 mm, 30 mm, 25 mm, 20 mm, dan 15 mm) ditunjukkan pada Gambar 3.1 .





Gambar 3.1 : Hasil simulasi tegangan *von Mises* pada variasi ukuran mesh (a) 40 mm, (b) 30 mm, (c) 25 mm, (d) 20 mm, (e) 15 mm.

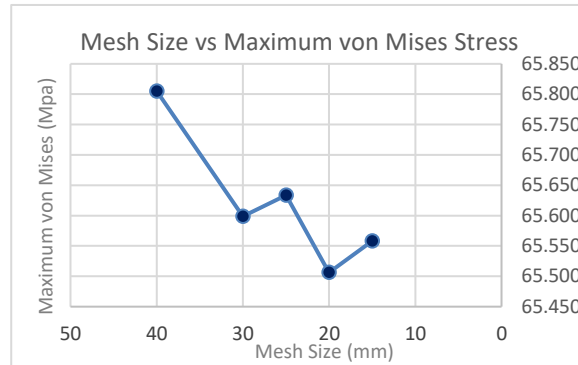
Secara visual, distribusi tegangan *von Mises* pada setiap variasi ukuran *mesh* menunjukkan pola yang relatif serupa, sehingga evaluasi konvergensi selanjutnya dilakukan berdasarkan nilai numerik yang dirangkum pada Tabel 9.

Tabel 9. *Mesh Convergence*

<i>Mesh</i> (mm)	<i>Stress</i> (MPa)	<i>Displacement</i> (mm)	<i>Strain</i>	<i>SF (Safety Factor)</i>	Deviasi %			
					Stress	Disp.	Strain	SF
40	65,805	0,04295	0,000250	5,49	-	-	-	-
30	65,599	0,04288	0,000254	5,48	0,31	0,18	1,60	0,28
25	65,634	0,04285	0,000254	5,43	0,05	0,06	0,00	0,82
20	65,506	0,04283	0,000260	5,43	0,19	0,04	2,36	0,01
15	65,558	0,04281	0,000261	5,44	0,08	0,04	0,38	0,21

Berdasarkan Tabel 9, perubahan nilai tegangan maksimum, displacement, equivalent strain, dan *safety factor* pada setiap variasi ukuran mesh relatif kecil. Nilai deviasi tegangan maksimum berkisar antara 0,05–0,31%, sedangkan deviasi *displacement* berada pada rentang 0,04–0,18%. Deviasi equivalent strain berkisar antara 0,00–2,36%, sementara deviasi *safety factor* berada pada rentang 0,01–0,82%. Seluruh nilai deviasi berada di bawah *acceptance criteria* sebesar 5%, sehingga menunjukkan bahwa hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen. Ukuran *mesh* 15 mm dipilih sebagai ukuran mesh akhir karena telah menghasilkan solusi numerik yang stabil untuk analisis FEA.

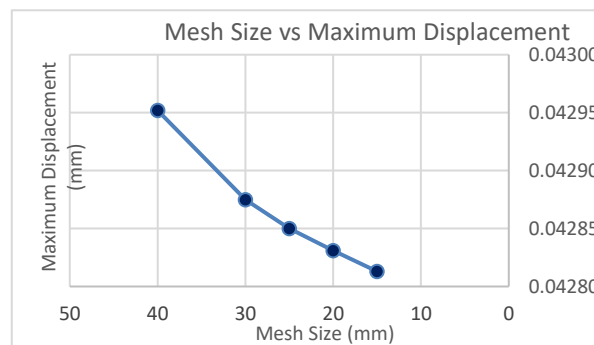
Hubungan antara ukuran *mesh* dan nilai maksimum tegangann *von Mises* hasil *mesh convergence study* ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 : Grafik Mesh Size vs Maximum von Mises Stress

Berdasarkan Gambar 3.2, nilai tegangan maksimum (*von Mises*) menunjukkan perubahan yang relatif kecil pada setiap penyempurnaan ukuran *mesh*. Nilai tegangan maksimum berada pada kisaran 65,5 MPa hingga 65,8 MPa, sehingga menunjukkan kecenderungan konvergen seiring dengan penyempurnaan ukuran *mesh*. Hal ini mengindikasikan bahwa penyempurnaan ukuran *mesh* tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap hasil tegangan maksimum.

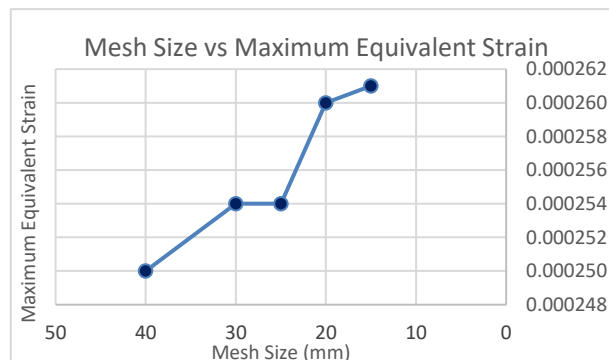
Grafik hubungan ukuran *mesh* terhadap nilai maksimum *displacement* hasil *mesh convergence study* ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 : Grafik Mesh Size vs Maximum Displacement

Gambar 3.3 menunjukkan bahwa nilai *displacement* maksimum mengalami sedikit penurunan seiring dengan penyempurnaan ukuran *mesh*. Perubahan *displacement* yang relatif kecil menunjukkan bahwa respons deformasi struktur telah mencapai kondisi yang stabil, sehingga hasil simulasi dapat digunakan sebagai dasar analisis lebih lanjut.

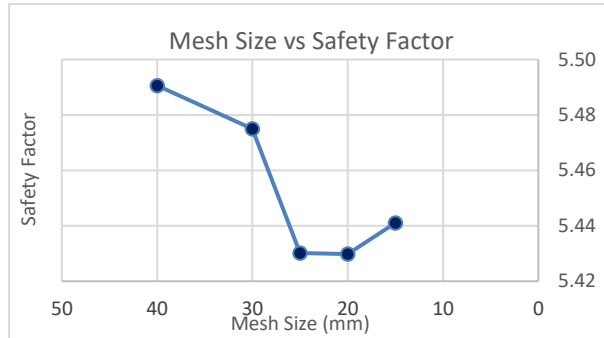
Grafik hubungan ukuran *mesh* terhadap nilai maksimum *equivalent strain* hasil *mesh convergence study* ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 : Grafik Mesh Size vs Maximum Equivalent Strain

Gambar 3.4 menunjukkan bahwa nilai *equivalent strain* mengalami sedikit peningkatan seiring dengan penyempurnaan ukuran *mesh* dari 40 mm menjadi 15 mm. Meskipun terjadi peningkatan, perubahan yang ditunjukkan relatif kecil sehingga hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen.

Grafik hubungan ukuran *mesh* terhadap nilai *safety factor* hasil *mesh convergence study* ditunjukkan pada Gambar 3.5.

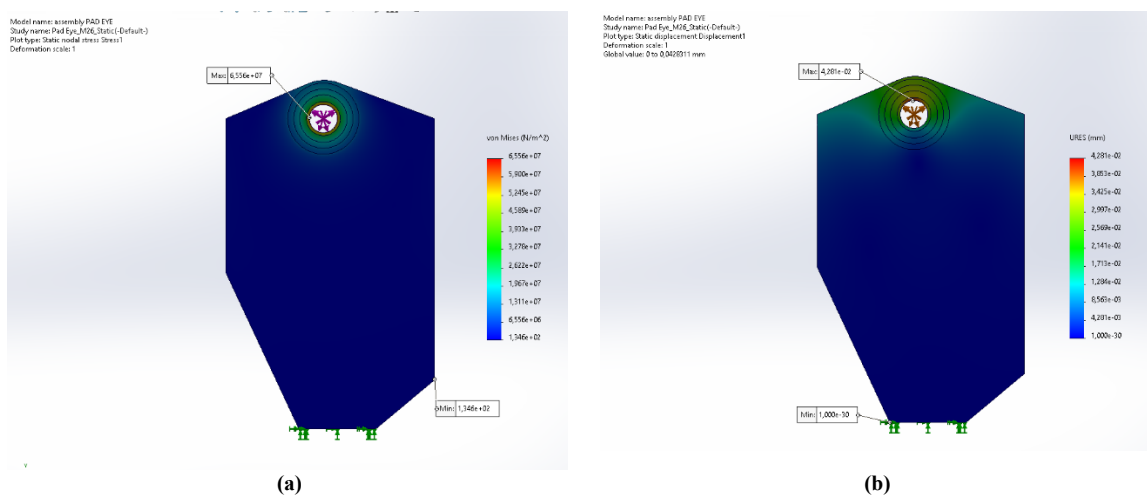


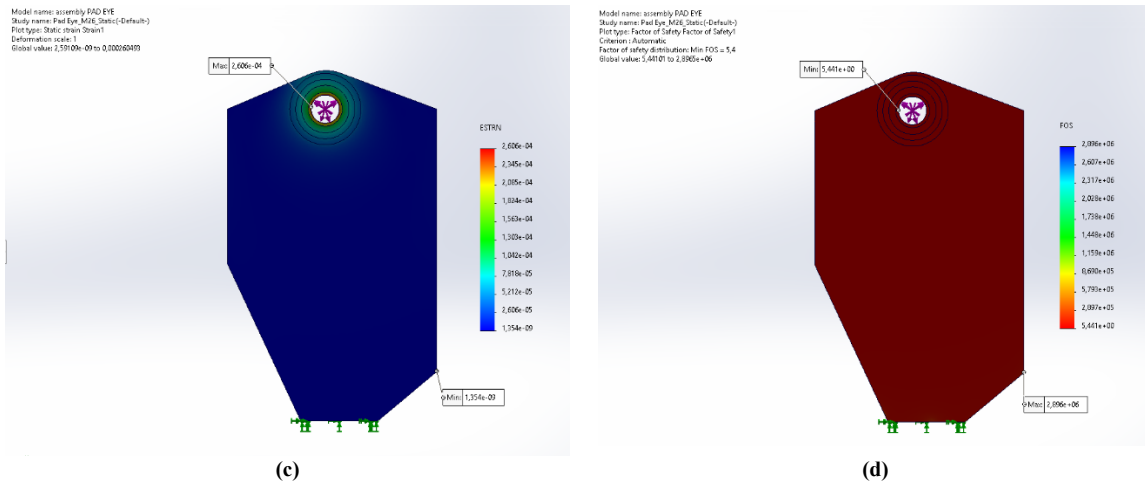
Gambar 3.5 : Grafik Mesh Size vs Safety Factor

Gambar 3.5 menunjukkan bahwa nilai *safety factor* mengalami perubahan yang relatif kecil pada setiap variasi ukuran *mesh* dengan kisaran nilai 5,43–5,49. Perubahan tersebut tidak signifikan, sehingga menunjukkan bahwa hasil simulasi telah stabil dan mencapai kondisi konvergen. Oleh karena itu, ukuran *mesh* 15 mm dipilih sebagai ukuran *mesh* akhir pada analisis FEA.

3.3 Simulasi FEA (*Finite Element Analysis*)

Berdasarkan hasil *mesh convergence study*, ukuran *mesh* 15 mm dipilih sebagai ukuran *mesh* akhir karena telah menghasilkan solusi numerik yang konvergen. Berdasarkan hasil perhitungan manual, *pad eye* yang menerima beban terbesar adalah sebesar 486,73 ton. Nilai tersebut merupakan hasil konversi dari beban terbesar sebesar 4.774,86 kN yang diperoleh dari hasil distribusi beban pada *pad eye* 2 sebagaimana ditunjukkan pada Subbab 3.1.2. Sesuai ketentuan DNV-ST-N001 Section 16.8.3, beban tersebut kemudian dikalikan dengan *Consequence Factor* sebesar 1,30, karena *pad eye* termasuk *lifting point* beserta sambungannya ke struktur (*lift points including their attachments to structure*)[7]. Dengan demikian diperoleh *design load* sebesar 632,75 ton. Nilai *design load* tersebut selanjutnya digunakan sebagai pembebanan pada simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) untuk menganalisis distribusi tegangan (*von Mises stress*), *displacement*, *equivalent strain*, dan *safety factor*. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.6.





Gambar 3.6 : (a) von Mises Stress, (b) Displacement, (c) Strain, (d) SF

Berdasarkan Gambar 3.6(a), distribusi tegangan *von Mises* menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan maksimum terjadi di sekitar lubang pin (*pin hole*) pada *main plate*, yang merupakan daerah penerima beban terbesar selama proses pengangkatan. Hasil simulasi menggunakan ukuran mesh 15 mm menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar 65,56 MPa, sedangkan nilai minimum sebesar 1,35 MPa. Nilai tegangan maksimum tersebut masih jauh di bawah *yield strength* material NV F42Z sebesar 420 MPa, sehingga menunjukkan bahwa material masih mengalami deformasi elastis dan belum mencapai kondisi luluh (*yielding*).

Gambar 3.6(b), nilai *displacement* maksimum sebesar 0,04281 mm terjadi pada bagian atas *pad eye* di sekitar lubang pin, sedangkan nilai minimum sebesar 0 mm berada pada daerah *fixed support*. Nilai perpindahan yang sangat kecil menunjukkan bahwa deformasi struktur akibat pembebanan masih berada dalam batas yang dapat diterima.

Gambar 3.6(c) menunjukkan bahwa distribusi *equivalent strain* mengikuti pola distribusi tegangan, dengan regangan maksimum terkonsentrasi di sekitar lubang pin. Hasil simulasi menunjukkan nilai *equivalent strain* maksimum sebesar 0,000261, sedangkan nilai minimum sebesar 0. Nilai regangan yang rendah menunjukkan bahwa deformasi material masih berada pada daerah elastis.

Gambar 3.6(d), hasil simulasi menunjukkan nilai minimum *safety factor* sebesar 5,44, sedangkan nilai maksimum sebesar $2,90 \times 10^6$. Nilai *safety factor* maksimum sebesar $2,90 \times 10^6$ merupakan nilai pada area dengan tegangan aktual mendekati nol, sehingga secara matematis menghasilkan rasio *safety factor* yang sangat besar. Nilai tersebut bukan merepresentasikan kondisi kritis dan tidak digunakan sebagai acuan evaluasi keamanan, parameter yang relevan untuk menentukan kelayakan desain adalah nilai *safety factor* minimum, yaitu sebesar 5,44, yang terjadi pada area dengan tegangan tertinggi (sekitar lubang pin). Nilai minimum tersebut lebih besar dari batas minimum *safety factor* sebesar 3 yang digunakan perusahaan sebagai kriteria penerimaan desain. Oleh karena itu, *pad eye* dinyatakan memenuhi persyaratan keamanan terhadap pembebanan yang dianalisis.

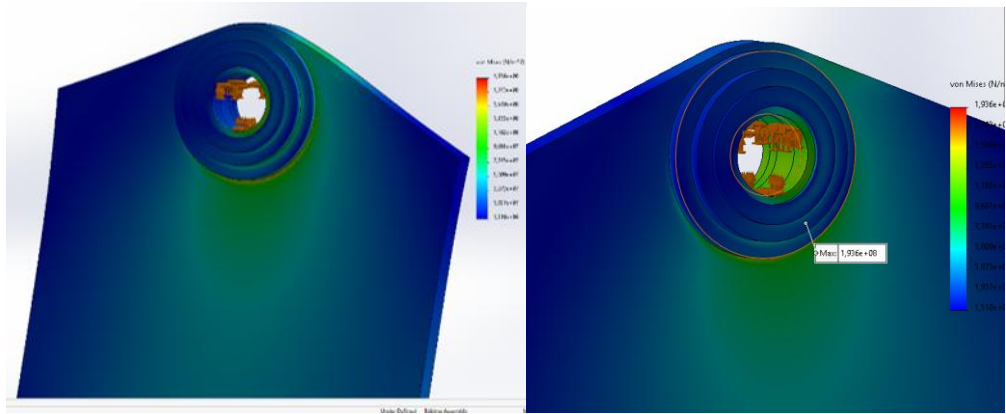
Secara keseluruhan, hasil simulasi FEA menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan, perpindahan, dan regangan terbesar terjadi pada area sekitar lubang pin sebagai lokasi penerimaan beban utama. Meskipun demikian, nilai tegangan maksimum sebesar 65,56 MPa, *displacement* maksimum sebesar 0,04281 mm, dan *equivalent strain* maksimum sebesar 0,000261 masih berada dalam kondisi yang aman. Selain itu, nilai minimum *safety factor* sebesar 5,44, yang lebih besar dari batas minimum 3, menunjukkan bahwa desain *pad eye* memenuhi persyaratan keamanan untuk digunakan pada proses pengangkatan.

3.4 Analisis Tegangan pada Lubang Pin

Analisis tegangan pada area lubang pin dilakukan untuk mengevaluasi respons struktur pada lokasi yang mengalami perubahan kontinuitas geometri akibat adanya lubang pin. Berdasarkan hasil simulasi FEA, distribusi tegangan *von Mises* pada area sekitar lubang pin menunjukkan peningkatan tegangan pada bagian tepi lubang. Nilai tegangan *von Mises* maksimum yang diperoleh pada area tersebut adalah sebesar 193,6 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa area di sekitar lubang pin merupakan salah satu lokasi kritis yang perlu diperhatikan dalam evaluasi kekuatan *pad eye*.

Peningkatan tegangan pada tepi lubang pin tersebut secara kualitatif mengindikasikan adanya efek konsentrasi tegangan (*stress concentration*) akibat perubahan kontinuitas geometri di sekitar lubang. Meskipun demikian, perhitungan *stress concentration factor* (SCF) secara kuantitatif, yaitu rasio antara tegangan lokal terhadap tegangan nominal pada penampang, belum dilakukan dalam penelitian ini dan dapat menjadi bahan kajian lebih lanjut.

Nilai tegangan *von Mises* sebesar 193,6 MPa kemudian dievaluasi terhadap kekuatan material dan kriteria Safety Factor yang digunakan dalam penelitian. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa tegangan pada area lubang pin masih berada dalam batas penerimaan desain. Dengan demikian, meskipun terjadi peningkatan tegangan pada tepi lubang akibat perubahan kontinuitas geometri, kondisi tersebut tidak menyebabkan Pad Eye 2 melampaui kriteria penerimaan yang ditetapkan.



Gambar 3.7 : Distribusi tegangan von Mises pada area lubang pin

3.5 Verifikasi Hasil

Verifikasi hasil penelitian dilakukan untuk memastikan bahwa hasil perhitungan manual dan simulasi *Finite Element Analysis*(FEA) telah memenuhi kriteria penerimaan berdasarkan standar yang digunakan. Verifikasi perhitungan manual dilakukan menggunakan nilai *Utilization Ratio* (UC), sedangkan hasil simulasi FEA diverifikasi melalui *mesh convergence study*, tegangan *von Mises*, dan *safety factor*.

Tabel 10. Verifikasi Hasil Perhitungan Manual dan Simulasi

Metode	Parameter Verifikasi	Kriteria Penerimaan	Hasil	Status
Manual (Excel)	Utilization Ratio	UC<1	0,01–0,84	Memenuhi
Simulasi FEA	Von Mises	<420 MPa	65,56 MPa	Memenuhi
Simulasi FEA	Safety Factor	≥ 3	5,44	Memenuhi
Simulasi FEA	Mesh Convergence	Deviasi < 5%	0,04–2,36%	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 10, hasil perhitungan manual menunjukkan bahwa seluruh parameter memiliki nilai *utilization ratio* sebesar 0,01–0,84 sehingga memenuhi persyaratan karena seluruh nilai UC < 1 sesuai DNV-ST-N001. Selanjutnya, hasil simulasi FEA menunjukkan bahwa *mesh convergence* memenuhi *acceptance criteria* dengan deviasi 0,04–2,36% (< 5%), tegangan *von Mises maksimum* sebesar 65,56 MPa masih berada di bawah yield strength material NV F42Z (420 MPa), dan nilai *Safety Factor* minimum sebesar 5,44 lebih besar dari batas minimum 3 sesuai ASME BTH-1 section 3-1.3.1. Dengan demikian, hasil perhitungan manual dan simulasi FEA memberikan kesimpulan yang konsisten bahwa desain pad eye memenuhi persyaratan kekuatan dan aman digunakan pada proses lifting.

Tabel 11. Perbandingan Kuantitatif Perhitungan Manual dan Simulasi FEA

Parameter	Perhitungan Manual	Simulasi FEA	Selisih (%)
Design Load (kN)	6.206,10	6.206,10	0,00
Tegangan Von Mises	245,14	65,56	73,26

Berdasarkan Tabel 11, *design load* yang digunakan pada perhitungan manual dan simulasi FEA menunjukkan nilai yang sama karena beban hasil perhitungan manual digunakan sebagai pembebanan pada simulasi FEA, sehingga kondisi pembebanan kedua metode dapat dinyatakan konsisten. Nilai tegangan von Mises hasil perhitungan

manual sebesar 245,14 MPa, sedangkan hasil simulasi FEA sebesar 65,56 MPa. Perbedaan tersebut terjadi karena kedua metode menggunakan pendekatan analisis yang berbeda. Perhitungan manual menggunakan persamaan analitis berdasarkan standar untuk mengevaluasi kapasitas atau tegangan pada parameter dan penampang tertentu, sedangkan FEA menghitung respons tegangan secara numerik pada keseluruhan geometri model dengan mempertimbangkan bentuk geometri, kondisi batas (*boundary condition*), distribusi pembebanan, dan diskretisasi *mesh*. Selain itu, hasil FEA yang digunakan telah melalui *mesh convergence study* sehingga respons numerik yang diperoleh telah mencapai kondisi yang stabil.

Konsistensi hasil antara perhitungan manual dan simulasi FEA dalam penelitian ini tidak ditentukan berdasarkan kesamaan nilai tegangan secara langsung, tetapi berdasarkan pemenuhan kriteria penerimaan desain yang digunakan. Pada perhitungan manual, indikator yang digunakan adalah nilai *Utilization Ratio* (UC) yang harus lebih kecil dari 1. Pada simulasi FEA, indikator yang digunakan meliputi hasil *mesh convergence* dengan deviasi di bawah 5%, tegangan *von Mises* yang berada di bawah *yield strength* material, serta *Safety Factor* minimum yang memenuhi batas penerimaan. Apabila kedua metode memenuhi kriteria penerimaan tersebut dan memberikan kesimpulan yang sama terhadap kelayakan desain, maka hasil FEA dapat digunakan sebagai verifikasi numerik yang melengkapi perhitungan manual. Dengan demikian, FEA dalam penelitian ini tidak digunakan untuk menggantikan perhitungan manual, tetapi untuk memberikan pendekatan numerik yang dapat dibandingkan dengan hasil analitis berdasarkan indikator penerimaan yang telah ditetapkan.

Meskipun demikian, terdapat perbedaan nilai tegangan *von Mises* yang cukup besar antara perhitungan manual dan simulasi FEA, yaitu dengan selisih sebesar 73,26%. Perbedaan tersebut tidak dapat dinilai hanya berdasarkan besarnya persentase selisih, tetapi perlu dikaitkan dengan kriteria penerimaan desain yang digunakan pada masing-masing metode. Hasil perhitungan manual tetap memenuhi kriteria berdasarkan nilai *Utilization Ratio* (UC), sedangkan hasil simulasi FEA memenuhi kriteria berdasarkan tegangan *von Mises* terhadap *yield strength* material, *Safety Factor* minimum, dan hasil *mesh convergence*. Dengan demikian, perbedaan nilai tegangan tersebut tidak mengubah keputusan kelayakan desain pada kondisi pembebanan yang dianalisis.

Perbedaan nilai tersebut juga tidak dapat digunakan secara langsung untuk menyatakan bahwa salah satu metode lebih benar daripada metode lainnya karena kedua metode memiliki pendekatan analisis yang berbeda. Perhitungan manual menggunakan persamaan analitis berdasarkan parameter kekuatan dan kondisi kritis tertentu, sedangkan FEA mengevaluasi respons struktur secara numerik pada geometri aktual dengan mempertimbangkan kondisi batas, distribusi pembebanan, dan mesh yang telah memenuhi konvergensi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini perbedaan hasil antara kedua metode dipandang sebagai konsekuensi dari perbedaan pendekatan analisis dan tidak memberikan dampak terhadap keputusan penerimaan desain, karena kedua metode tetap menghasilkan kesimpulan bahwa desain memenuhi kriteria yang digunakan.

Kesimpulan

Penelitian ini telah menganalisis kekuatan *Pad Eye Lifting Module* M26 menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) sebagai verifikasi numerik terhadap perhitungan manual. Berdasarkan hasil penelitian, perhitungan manual dan simulasi FEA memberikan kesimpulan yang konsisten terhadap kelayakan desain *pad eye* berdasarkan kriteria penerimaan yang digunakan. Dengan demikian, penggunaan FEA sebagai metode verifikasi tambahan dalam penelitian ini dapat diterapkan untuk melengkapi evaluasi analitis yang telah dilakukan melalui perhitungan manual.

Hasil simulasi FEA menunjukkan bahwa respons struktur *pad eye* tetap memenuhi kriteria penerimaan yang digunakan. Hal tersebut ditunjukkan oleh hasil *mesh convergence* yang memenuhi batas deviasi, tegangan *von Mises* yang berada di bawah *yield strength* material, serta *Safety Factor* minimum yang memenuhi batas penerimaan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa desain *pad eye* memenuhi persyaratan terhadap pembebanan yang dianalisis.

Hasil verifikasi menunjukkan bahwa perhitungan manual dan simulasi FEA memberikan kesimpulan yang konsisten mengenai kelayakan desain *pad eye*, meskipun terdapat perbedaan nilai respons tegangan antara kedua metode. Konsistensi tersebut ditunjukkan melalui pemenuhan kriteria penerimaan masing-masing metode. Dengan demikian, FEA berfungsi sebagai metode verifikasi numerik yang melengkapi perhitungan manual, bukan sebagai pengganti perhitungan tersebut. Secara praktis, pendekatan ini dapat digunakan sebagai metode verifikasi tambahan pada evaluasi desain *pad eye* untuk kondisi pembebanan yang serupa.

5 Daftar Pustaka

- [1] P. A. R Azmi, M. Yusoff, and M. T. Mohd Sallehud-din, "A Review of Predictive Analytics Models in the Oil and Gas Industries," Jun. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/s24124013.

- [2] A. M. Bujor, E. V. C. Rusu, and C. Gasparotti, "Floating production storage offloading concept," *Analele Universității "Dunărea de Jos" din Galați. Fascicula XI, Construcții navale/ Annals of "Dunărea de Jos" of Galati, Fascicle XI, Shipbuilding*, vol. 48, pp. 39–44, Dec. 2025, doi: 10.35219/AnnUgalShipBuilding/2025.48.05.
- [3] M. Ali and A. Fadillah, "Analysis Of Lifting Strength Of Padeye Subsea Structure Using Finite Element Method," 2024.
- [4] W. Hilmansyah, D. Puspitasari, T. Davareza, T. Mesin, and F. Vokasi, "Analisis Kekuatan Lifting Lug pada Proses Dismantling Chimney Berbasis Finite Element Analysis," *JURNAL REKAYASA MESIN (JRM)*, vol. 10, no. 10, pp. 662–670, 2025, [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-rekayasa-mesin>
- [5] I. Kharisma Prayoga and Y. Setyo Hadiwidodo, "Padeye Strength Analysis of Topsides Offloading Platform due to Loadout Using Lifting Method," *International Journal of Offshore and Coastal Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 1–5, 2024.
- [6] DNV, "DNV-OS-H205 Lifting Operations Standard," Apr. 2014, Accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <http://www.dnv.com>
- [7] DNV GL, "DNVGL-ST-N001: Marine Operations and Marine Warranty," Jan. 2020, Accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <http://www.dnvgl.com>
- [8] American Institute of Steel Construction (AISC), "ANSI_AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings," pp. 1–6, Jul. 2016, Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: <https://www.aisc.org>
- [9] The American Society of Mechanical Engineers (ASME), "ASME BTH-1-2020: Design of Below-the-Hook Lifting Devices," pp. 1–86, 2021, Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: <https://www.asme.org>
- [10] The American Society of Mechanical Engineers (ASME), "Design of Below-the-Hook Lifting Devices," New York, NY, USA, Jun. 2021. [Online]. Available: <http://cstools.asme.org/>
- [11] DNV GL, "OFFSHORE STANDARDS Metallic materials," Oslo, Norway, 2017. [Online]. Available: <http://www.dnvgl.com>,
- [12] "DNVGL-ST-N001-Marine-Operations-and-Marine-Warranty-Complete-Documents (06-09-2016) 2 (1)".
- [13] Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corporation, "WHAT'S NEW SOLIDWORKS 2022," Waltham, Massachusetts, 2022. Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: <https://help.solidworks.com>
- [14] Daniel W. Baker; William Haynes, "Engineering Statics Open and Interactive," Jun. 2026. Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: <https://engineeringstatics.org>