

Analisis Kekuatan Lokal *Deck Barge* Akibat Penambahan *Crane* Menggunakan Pendekatan FEM

Muhammad Nidzam Karnyoto^{*1}, Yusuf Nurhuda^{*} and Ifti Luthviana Dewi^{*}

^{*} Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: 4412531007.Muhammad@students.polibatam.ac.id

Abstrak

Modifikasi *deck barge* menjadi *deck crane barge* menyebabkan perubahan distribusi beban pada struktur dek akibat penambahan *crane*. Pembebanan yang bekerja pada *crane foundation* berpotensi menimbulkan konsentrasi tegangan yang dapat memengaruhi kekuatan lokal struktur, sehingga diperlukan analisis untuk memastikan struktur tetap memenuhi persyaratan klasifikasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan lokal struktur dek akibat penambahan *crane* menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) serta mengevaluasi efektivitas penambahan konstruksi sebagai upaya penguatan. Analisis dilakukan menggunakan Ansys Mechanical dengan pendekatan *linear static analysis* pada *local structural model* di area *crane foundation*. Pembebanan mengacu pada data teknis vendor berupa *vertical force*, *horizontal force*, *bending moment*, dan *torsion moment* dengan 16 *loadcase* yang terdiri atas delapan kondisi *existing deck* dan delapan kondisi *reinforcement deck*. Kriteria evaluasi dilakukan berdasarkan tegangan Von Mises dan deformasi total, kemudian dibandingkan dengan *allowable stress* menurut klasifikasi RINA sebesar 209.44 MPa untuk material ASTM A36 dan 316.40 MPa untuk *Grade AH36*. Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi *existing deck* menghasilkan tegangan maksimum sebesar 2620.8 MPa sehingga belum memenuhi persyaratan kekuatan. Setelah dilakukan *reinforcement* berupa penambahan *insert plate*, *deck stiffener*, *king post*, *bracket*, dan komponen pendukung lainnya, tegangan maksimum menurun menjadi 209.03 MPa untuk ASTM A36 dan 295.39 MPa untuk *Grade AH36*, sedangkan deformasi maksimum berkurang dari 143.51 mm menjadi 15.86 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa modifikasi konstruksi mampu meningkatkan kekuatan lokal dan memenuhi persyaratan klasifikasi RINA.

Kata kunci: *Deck Crane Barge*, FEA, Kekuatan Dek, PLEM, *Crane*

Abstract

The modification of a deck barge into a deck crane barge alters the load distribution on the deck structure due to the installation of a crane. The loads acting on the crane foundation may generate stress concentrations that affect the local structural strength. Therefore, structural analysis is required to ensure compliance with classification requirements. This study aims to analyze the local structural strength of the deck subjected to crane installation using the Finite Element Method (FEM) and to evaluate the effectiveness of structural reinforcement as a strengthening measure. The analysis was performed using ANSYS Mechanical with a linear static analysis approach on a local structural model in the crane foundation area. The applied loads were based on the crane vendor's technical data, including vertical force, horizontal force, bending moment, and torsion moment, with 16 load cases consisting of eight existing deck conditions and eight reinforcement deck conditions. The structural response was evaluated based on the maximum Von Mises stress and total deformation, and compared with the allowable stresses specified by the RINA Classification Rules, namely 209.44 MPa for ASTM A36 and 316.40 MPa for Grade AH36. The results show that the existing deck produced a maximum Von Mises stress of 2620.8 MPa, indicating that the structure did not satisfy the required strength criteria. After reinforcement by installing an insert plate, deck stiffeners, king post, brackets, and other supporting structural components, the maximum stress was reduced to 209.03 MPa for ASTM A36 and 295.39 MPa for Grade AH36, while the maximum deformation decreased from 143.51 mm to 15.86 mm. These results demonstrate that the proposed structural reinforcement effectively improves the local structural strength and satisfies the requirements of the RINA Classification Rules.

Keywords : *Deck Crane Barge*, FEA, Deck Strength, PLEM, *Crane*

1 Pendahuluan

Industri minyak dan gas merupakan sektor energi yang mencakup eksplorasi, produksi, pemrosesan, transportasi, hingga distribusi minyak bumi dan gas alam. Pada operasi lepas pantai, sistem produksi dapat terdiri dari sistem bawah laut yang berfungsi menyalurkan fluida dari *reservoir* menuju fasilitas produksi [1]. Salah satu komponen utama dalam sistem tersebut adalah PLEM (*Pipeline End Manifold*), yaitu struktur bawah laut yang ditempatkan pada ujung *pipeline* untuk menghubungkan *pipeline* dengan struktur subsea lainnya melalui *jumper* [2]. Pada sistem CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*), PLEM berfungsi sebagai titik terminasi aliran fluida yang selanjutnya diteruskan melalui *subsea hose* menuju CALM buoy sebelum ditransfer ke kapal tanker menggunakan *floating hose* [3]. Oleh karena itu, proses instalasi PLEM dan CALM buoy memerlukan sarana angkat berkapasitas besar, seperti *deck crane barge*, untuk mengangkat, memindahkan, dan menempatkan struktur secara aman pada lokasi yang telah direncanakan.

Deck crane barge adalah kapal *barge* yang dilengkapi *crane* pada dek untuk kegiatan *loading, unloading, lifting*, dan pekerjaan konstruksi laut [4]. Kapal ini memiliki area dek yang luas sehingga dapat digunakan sebagai platform kerja untuk mengangkat dan memindahkan komponen berat. *Deck crane barge* yang digunakan dalam penelitian ini termasuk *non self-propelled vessel*, sehingga tidak dapat bergerak sendiri dan membutuhkan *tugboat* untuk proses *towing* menuju lokasi kerja [5]. Selain itu, kapal ini menggunakan acuan klasifikasi RINA, sehingga evaluasi kekuatan struktur dek perlu mengacu pada batas tegangan izin yang berlaku [6].

Kapal yang digunakan dalam penelitian ini sebelumnya merupakan *deck barge* yang kemudian dimodifikasi menjadi *deck crane barge*. Salah satu bentuk modifikasi tersebut adalah penambahan *crane* pada dek kapal. Penambahan *crane* menyebabkan perubahan distribusi beban pada struktur dek, terutama pada area pondasi *crane, girder, stiffener, dan frame* [7]. Penelitian tentang penambahan *crane* juga menunjukkan bahwa *crane* dapat memengaruhi kekuatan serta stabilitas struktur dek kapal [8]. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi terhadap kekuatan lokal struktur dek untuk memastikan bahwa modifikasi yang dilakukan tetap memenuhi persyaratan klasifikasi dan aman selama operasi.

Untuk mengetahui respons struktur dek terhadap penambahan *crane*, digunakan FEA (*Finite Element Analysis*). FEA merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dengan tetap mempertahankan kondisi geometri, pembebanan, dan batas yang sebenarnya [9]. Dalam bidang perkapalan, FEA penting karena struktur kapal memiliki bentuk kompleks dan menerima berbagai jenis pembebanan. Pada penelitian ini, analisis dilakukan menggunakan *software* Ansys untuk mengevaluasi respons *deck strength* akibat penambahan *crane* [8].

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas analisis kekuatan struktur dek akibat pembebanan *crane* menggunakan metode elemen hingga. Penelitian [4] menganalisis kekuatan konstruksi *deck crane barge* berkapasitas 250 ton dengan tiga variasi konstruksi pada satu orientasi operasi *crane*. Penelitian [10] mengevaluasi respons struktur dek kapal *tanker* 6500 DWT terhadap pembebanan *crane* pada tiga sudut putar *crane*. Selanjutnya, penelitian [11] menganalisis kekuatan konstruksi akibat penambahan *deck crane* pada kapal *landing craft tank* 1500 DWT menggunakan tiga variasi sudut operasi *crane*. Penelitian [12] mengevaluasi kekuatan konstruksi pada *mooring storage tanker* dengan mempertimbangkan tiga arah pembebanan, sedangkan penelitian [8] menganalisis kekuatan struktur dek akibat penambahan *boat crane* menggunakan tiga sudut operasi *crane*. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, analisis umumnya masih dilakukan pada jumlah variasi sudut pembebanan yang terbatas dan belum membandingkan kondisi struktur sebelum dan sesudah dilakukan *reinforcement*. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis kekuatan lokal *crane foundation* pada *deck barge* menggunakan delapan sudut operasi *crane* yang dikaji pada dua kondisi struktur, yaitu *existing deck* dan *reinforcement deck*, sehingga memberikan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap pengaruh orientasi *crane* dan efektivitas penguatan struktur.

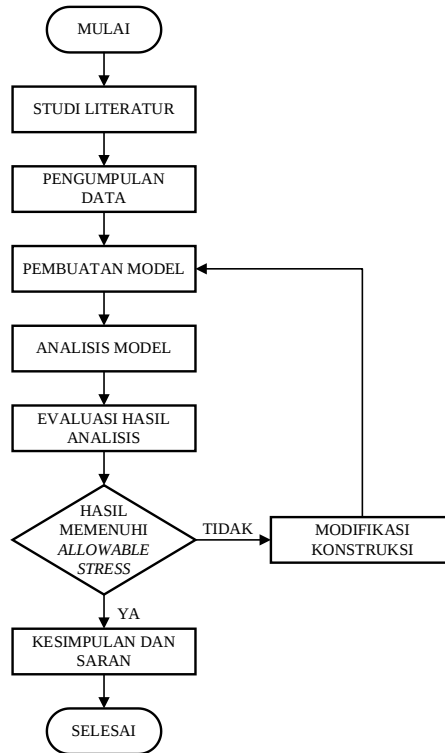
Penelitian ini dibatasi pada analisis kekuatan lokal struktur *crane foundation* akibat penambahan *crane* menggunakan metode *finite element analysis* dengan pendekatan *linear static analysis*. Pemodelan dilakukan menggunakan *local structural model* pada area pembebanan *crane* dengan material ASTM A36. Pembebanan mengacu pada data teknis *vendor* berupa *vertical force, horizontal force, bending moment, dan torsion moment*. Analisis tidak mempertimbangkan pengaruh kondisi lingkungan laut, seperti gelombang, arus, dan angin, maupun gerakan kapal selama operasi. Evaluasi struktur dilakukan berdasarkan distribusi tegangan Von Mises, deformasi total, serta perbandingan terhadap tegangan izin sesuai ketentuan klasifikasi RINA.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui reaksi kekuatan dek terhadap penambahan *crane*, terutama tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur dek. Manfaat penelitian ini adalah memberikan dasar teknis dalam mengevaluasi kekuatan lokal *crane foundation* pada *deck barge* sebagai acuan perencanaan *reinforcement* agar memenuhi persyaratan klasifikasi RINA. *Crane* tersebut nantinya digunakan untuk instalasi PLEM di laut, sehingga kekuatan dek harus dipastikan aman sebelum kapal dioperasikan.

2 Metodologi Penelitian

2.1 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini, diperlukan alur penelitian dari tahap awal hingga akhir untuk mencapai kesimpulan. Penelitian ini dimulai dari identifikasi masalah hingga evaluasi hasil untuk menentukan apakah struktur aman atau tidak. Jika hasil analisis menunjukkan nilai yang tidak memenuhi dari nilai *allowable stress* yang sudah ditentukan, maka akan dilakukan kembali modifikasi pada struktur hingga mencapai nilai yang diinginkan. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Flowchart Penelitian

2.2 Objek dan Pengumpulan Data Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah kapal *barge* yang dimodifikasi menjadi *deck crane barge*. Kapal ini nantinya akan digunakan untuk mendukung kegiatan *offshore*, khususnya pekerjaan *lifting* dan instalasi *Pipeline End Manifold* (PLEM). Fokus pada penelitian ini adalah struktur dek yang ada di area *crane* karena pada area tersebut terjadi pembebanan lokal akibat penambahan *crane*.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode numerik dengan pendekatan *Finite Element Method* (FEM). Analisis dilakukan untuk melihat bagaimana respons dari struktur dek terhadap pembebanan *crane* berdasarkan distribusi tegangan dan deformasi struktur.

Teknik pengambilan data dilakukan melalui studi dokumen dan pengumpulan data teknis kapal, diantaranya adalah gambar konstruksi, spesifikasi material, dan spesifikasi data operasi *crane*. Data diperoleh dari gambar konstruksi kapal, spesifikasi *crane* dari *vendor*, serta klasifikasi RINA yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan *allowable stress* pada analisis.

Ukuran utama kapal yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1

Ukuran Utama Kapal Barge

Ukuran Utama	Nilai	Unit
<i>Length Over All</i> (LOA)	91.44	m
<i>Beam</i> (B)	24.384	m
<i>Depth</i> (D)	6.096	m

Material yang digunakan pada struktur kapal adalah ASTM A36. Sifat mekanik material digunakan sebagai *input* pada pemodelan *finite element* untuk menentukan kekakuan struktur, respons tegangan, dan deformasi akibat pembebanan *crane*. Sifat mekanik material ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2
Sifat Mekanik Material ASTM A36 dan Grade AH36 [13]

Sifat Material	ASTM A36	Gr. AH36	Unit
<i>Tensile Strength</i>	400-550	490-620	MPa
<i>Yield Point</i>	250	355	MPa
<i>Elongation in 200 mm</i>	0.2	0.19	
<i>Elongation in 50 mm</i>	0.23	0.22	
<i>Modulus of Elasticity</i>	200	200	GPa
<i>Shear Modulus</i>	79.3	80	GPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0.26	0.29	
<i>Density</i>	7850	7850	kg/m ³

Data konstruksi kapal yang digunakan dalam pemodelan meliputi tebal pelat, ukuran *stiffener*, *girder*, *bulkhead*, *pillar*, dan *diagonal brace*. Komponen tersebut menjadi bagian penting karena beban *crane* tidak hanya diterima oleh pelat dek, tetapi juga disalurkan ke konstruksi yang ada di bawahnya. Ukuran konstruksi kapal ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3
Ukuran Konstruksi Plate dan Profile

Komponen	Ukuran Material (mm)
<i>Deck Plate</i>	14
<i>Deck Longitudinal</i>	L 150x90x10
<i>Deck Transverse Web</i>	L 482.6x127x10
<i>Deck Girder</i>	PL. 482.6x10 + 254x12 FF
<i>Bottom Plate</i>	12
<i>Bottom Longitudinal</i>	L 125x75x9
<i>Bottom Transverse Web</i>	L 482.6x127x9
<i>Bottom Girder</i>	PL. 482.6x9 + 254x12 FF
<i>Side Plate</i>	12
<i>Side Longitudinal</i>	L 125x75x8.6
<i>Side Web</i>	L 381x101.6x10
<i>Transv. Bulkhead Plate</i>	8
<i>Transv. Bulkhead Stiffener</i>	L 125x75x9
<i>Transv. Bulkhead Girder</i>	L 381x101.6x8
<i>Pillar</i>	I-Beam 200x200x8x12
<i>Web Frame Diagonal Brace</i>	I-Beam 150x150x7x10

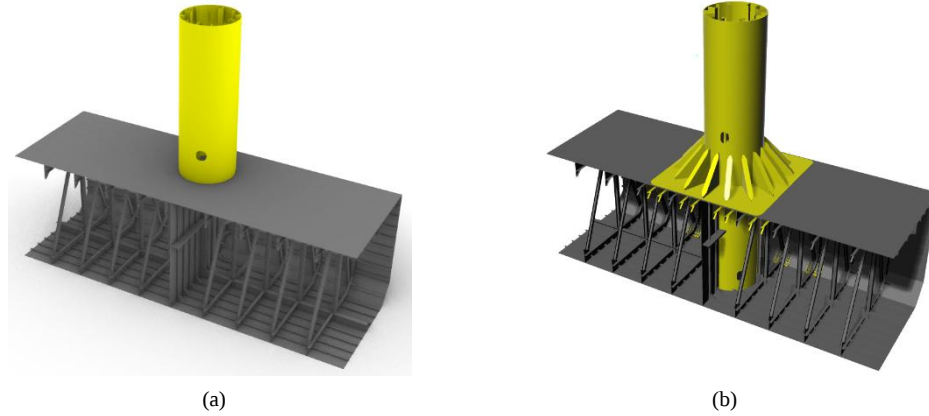
Crane yang akan ditambahkan memiliki *Safe Working Load* (SWL) sebesar 30 ton. Data pembebanan *crane* yang digunakan meliputi *vertical force*, *horizontal force*, *bending moment*, dan *torsion moment*. *Vertical force* merupakan gaya vertikal yang bekerja pada *crane foundation*, sedangkan *horizontal force* merupakan gaya lateral yang bekerja selama operasi *crane*. Selain itu, *bending moment* menunjukkan kecenderungan struktur mengalami momen guling akibat pembebanan, sedangkan *torsion moment* merupakan momen puntir yang bekerja pada *crane foundation* [14]. Komponen pembebanan tersebut digunakan sebagai *input* beban pada analisis elemen hingga. Spesifikasi *crane* ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4
Spesifikasi dan Konversi Reaction Load Crane

Deskripsi	Data Vendor	Input Ansys
<i>Safe Working Load</i> (SWL)	30 t	-
<i>Vertical Force</i> (Fa)	131 t	1,284,664 N
<i>Horizontal Force</i> (Fr)		117,679 N
<i>Horizontal Force</i> (Fr) @ 45°	12 t	X = 83,210 N Y = 83,210 N
<i>Torsion Moment</i> (Ts)	263 tm	2,579,135,800 N.mm
<i>Bending Moment</i> (Mt)		21,888,331,200 N.mm
<i>Bending Moment</i> (Mt) @ 45°	2232 tm	X = 15,477,238,991 N.mm Y = 15,477,238,991 N.mm
<i>Max. Working Radius</i>	30 m	-
<i>Min. Working Radius</i>	5 m	-

2.3 Variasi Loadcase Analisis

Analisis dibagi menjadi dua kondisi struktur yaitu *existing deck* dan *reinforcement deck*. Kondisi *existing deck* merupakan kondisi awal struktur dengan *king post* beserta konstruksi di dalamnya sebelum dilakukan penambahan konstruksi, sedangkan *reinforcement deck* merupakan kondisi setelah dilakukan modifikasi dan penambahan konstruksi pada area *crane foundation* untuk meningkatkan kekuatan lokal struktur dek. Perbandingan konfigurasi kedua kondisi ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 5.

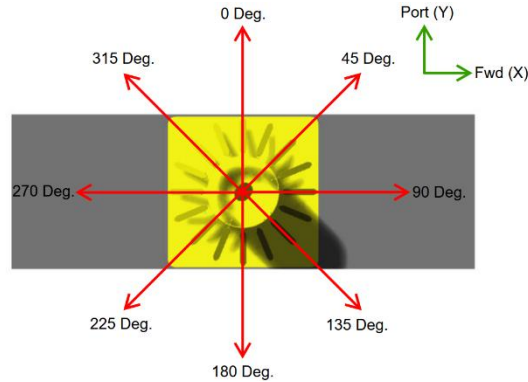


Gambar 2: Perbandingan Konfigurasi Crane Foundation (a) Existing Deck dan (b) Reinforcement Deck

Tabel 5
Perbandingan Konstruksi Crane Foundation Pada Kondisi Existing dan Reinforcement

Komponen	Kondisi Existing Deck			Kondisi Reinforcement Deck		
	Deskripsi Material	Qty	Material Grade	Deskripsi Material	Qty	Material Grade
Platform Plate	Plate 8 mm, Ø2780	3	ASTM A36	Plate 12 mm, Ø2780	3	Grade AH36
King Post Shell Plate	Plate 20 mm, Ø2840	1	ASTM A36	Plate 30 mm, Ø2840	1	Grade AH36
Bracket (Outside King Post)	-	-	-	B 1700x1500x32	16	Grade AH36
Ring Manhole King Post (Above M.D.)	FB 75x6 mm	2	ASTM A36	L 75x75x10 mm	2	Grade AH36
Insert Plate	-	-	-	Plate 30 mm, 5940x5940 mm	1	ASTM A36
Bracket (Inside King Post)	B 650x450x20	16	ASTM A36	B 650x450x20	28	ASTM A36
Platform Stiffener	L 75x75x6 mm	12	ASTM A36	L 75x75x6 mm	12	ASTM A36
Bracket Flg. (Outside King Post)	-	-	-	Plate 250x20 mm	16	ASTM A36
King Post Girder	T 400x250x20 mm	4	ASTM A36	T 400x250x20 mm	10	ASTM A36
King Post Stiffener	FB 250x20 mm	8	ASTM A36	FB 250x20 mm	16	ASTM A36
Deck Stiffener	-	-	-	FB 200x20 mm	10	ASTM A36
Deck Girder	-	-	-	L 482.6x127x10 mm	8	ASTM A36
Bracket for Deck Girder	-	-	-	B 381x381x8 mm	8	ASTM A36
Bilge Stiffener	-	-	-	FB 125x20 mm	32	ASTM A36
King Post Shell Plate (Below M.D.)	-	-	-	Plate 16 mm, Ø2840	1	ASTM A36
Ring Manhole King Post (Below M.D.)	-	-	-	FB 100x10 mm	4	ASTM A36

Analisis dilakukan pada delapan orientasi operasi *crane*, yaitu 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, dan 315°. Variasi orientasi digunakan untuk mengevaluasi perubahan respons struktur akibat perubahan arah pembebanan *crane* serta mengidentifikasi kondisi pembebanan yang paling kritis. Penggunaan delapan orientasi dengan *interval* 45° mengacu pada evaluasi struktur *crane foundation* yang mempertimbangkan arah pembebanan dalam satu putaran operasi *crane* [15]. Orientasi sudut operasi *crane* yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Orientasi Sudut Operasi Crane

Delapan orientasi crane tersebut diterapkan pada masing-masing kondisi *existing deck* dan *reinforcement deck*, sehingga diperoleh total 16 *loadcase* analisis. Variasi orientasi pembebanan digunakan untuk mengevaluasi pengaruh arah operasi crane terhadap distribusi tegangan dan deformasi struktur pada area *crane foundation*.

2.4 Pemodelan dan Analisis *Finite Element*

Analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak Ansys Mechanical dengan metode elemen hingga menggunakan pendekatan *linear static analysis*. Pendekatan ini digunakan karena pembebanan crane diasumsikan bekerja secara statis dan material masih berada dalam daerah elastis, sehingga respons struktur dapat dievaluasi berdasarkan distribusi tegangan dan deformasi. Pemodelan difokuskan pada area *crane foundation* menggunakan *local structural model* untuk memperoleh distribusi tegangan dan deformasi secara lebih detail pada daerah yang menerima pembebanan lokal akibat operasi crane.

Boundary condition diterapkan pada bagian tertentu model untuk merepresentasikan struktur terhadap konstruksi kapal utama dan mencegah *rigid body motion* selama proses analisis. Pembebanan crane diberikan pada area *pedestal crane* sesuai data *vertical force*, *horizontal force*, *bending moment*, dan *torsion moment*.

Setelah *boundary condition* dan pembebanan diterapkan, dilakukan proses *general meshing* pada seluruh model menggunakan ukuran elemen (*mesh size*) sebesar 100 mm. Ukuran elemen tersebut dipilih untuk merepresentasikan geometri model dengan baik serta menjaga efisiensi waktu komputasi, kemudian digunakan secara konsisten pada seluruh analisis *loadcase*.

Hasil *finite element analysis* yang diamati meliputi tegangan von mises, deformasi total, dan lokasi kritis struktur. Tegangan Von Mises digunakan sebagai parameter evaluasi kekuatan struktur karena mampu merepresentasikan tegangan ekuivalen pada material akibat kombinasi tegangan multiaksial. Tegangan von mises diberikan oleh:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 + 3\tau_{12}^2} \quad (1)$$

Keterangan:

σ_{VM} = Tegangan von mises

σ_1, σ_2 = Tegangan normal

τ = Tegangan geser

Nilai tegangan maksimum dari hasil *finite element analysis* akan dibandingkan dengan tegangan izin berdasarkan ketentuan dari klasifikasi RINA [6]. Tegangan izin diberikan oleh rumus berikut:

$$\frac{R_y}{\gamma_R \gamma_m} \geq \sigma_{VM} \quad (2)$$

Keterangan:

R_y = Minimum tegangan leleh material (MPa)

γ_R = *Partial safety factor* pada ketidakpastian terkait *resistance*

γ_m = *Partial safety factor* pada ketidakpastian terkait material

σ_{VM} = Tegangan von mises

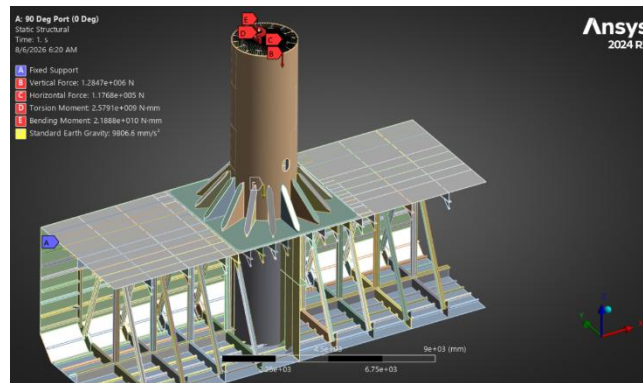
Berdasarkan ketentuan klasifikasi RINA, material dengan kategori *Grade A* memiliki *minimum yield stress* (R_y) sebesar 235 MPa, sedangkan untuk material *Grade AH36*, *minimum yield stress* (R_y) yang digunakan adalah 355 MPa [16]. Selain itu, nilai *partial safety factor* yang digunakan untuk analisis struktur umum adalah $\gamma_R = 1.10$ dan $\gamma_m = 1.02$.

Struktur dinyatakan aman apabila tegangan maksimum hasil dari simulasi lebih kecil dari tegangan yang diizinkan. Selain evaluasi tegangan, analisis juga dilakukan terhadap deformasi total untuk mengetahui perpindahan dan kekakuan struktur akibat pembebanan *crane*.

3 Analisa Data dan Pembahasan

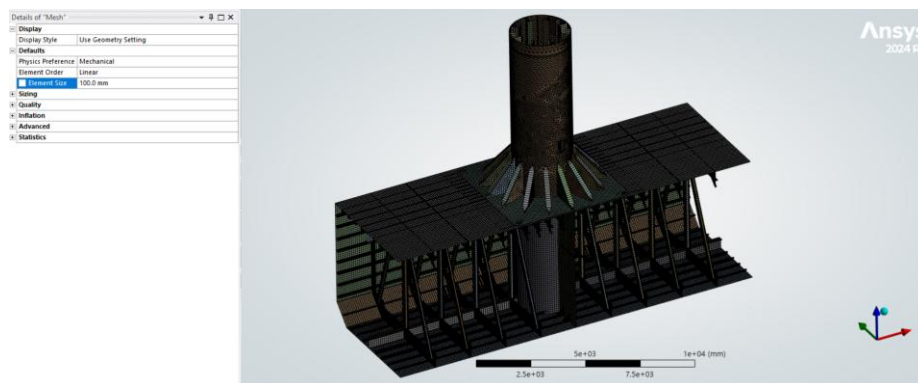
3.1 Implementasi Model *Finite Element*

Analisis kekuatan lokal dilakukan pada area *crane foundation* menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* Ansys Mechanical. Model tiga dimensi yang telah dibuat berdasarkan data konstruksi kapal kemudian diberikan *boundary condition* berupa *fixed support* serta pembebanan yang diperoleh dari data teknis vendor, yaitu *vertical force*, *horizontal force*, *bending moment*, dan *torsion moment*. Selain itu, pada model juga diterapkan *standard earth gravity* sebesar 9806.65 mm/s^2 untuk memperhitungkan pengaruh berat struktur selama proses analisis. Kondisi model, *boundary condition*, dan pembebanan yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4: Penerapan *Boundary Condition* dan Pembebanan

Setelah seluruh parameter analisis diterapkan, proses *meshing* dilakukan pada model menggunakan ukuran elemen (*mesh size*) sebesar 100 mm. Ukuran elemen tersebut dipilih agar mampu merepresentasikan geometri struktur dengan baik serta menghasilkan keseimbangan antara ketelitian hasil analisis dan efisiensi waktu komputasi. Seluruh analisis pada penelitian ini menggunakan ukuran elemen yang sama untuk menjaga konsistensi hasil. Hasil proses *meshing* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5: Hasil *Meshing*

3.2 Perhitungan Tegangan Izin Berdasarkan RINA

Parameter yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur adalah tegangan von mises maksimum. Nilai tegangan maksimum hasil analisis kemudian dibandingkan dengan tegangan izin berdasarkan ketentuan klasifikasi RINA.

Nilai tegangan izin dihitung menggunakan tegangan leleh minimum material sebesar 235 MPa untuk material ASTM A36, dan 355 MPa untuk material Grade AH36. Selain itu terdapat nilai *partial safety factor resistance* sebesar 1.10, dan *partial safety factor material* sebesar 1.02. Perhitungan tegangan izin ditunjukkan sebagai berikut.

$$\sigma_{allowable} = \frac{235}{1.10 \times 1.02} = 209.44 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$\sigma_{allowable} = \frac{355}{1.10 \times 1.02} = 316.40 \text{ MPa} \quad (4)$$

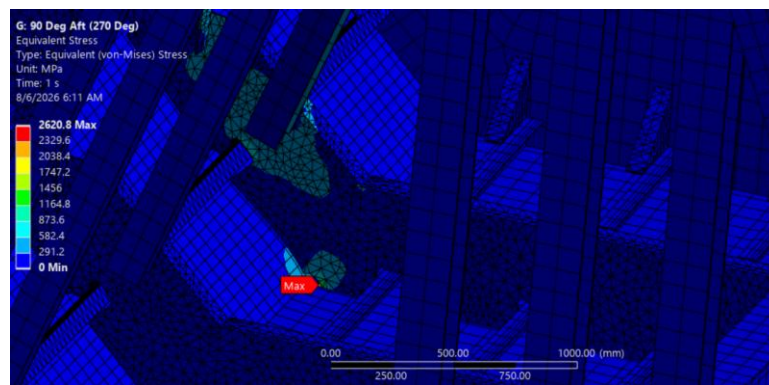
Nilai tegangan izin sebesar 209.44 MPa dan 316.40 MPa digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi hasil analisis pada setiap *loadcase*. Struktur dinyatakan memenuhi persyaratan apabila nilai tegangan Von Mises maksimum tidak melebihi nilai tersebut.

3.3 Analisis Kekuatan *Existing Deck*

Analisis awal dilakukan pada kondisi *existing deck* untuk mengevaluasi kemampuan struktur dalam menerima pembebanan *crane* sebelum dilakukan modifikasi konstruksi. Evaluasi dilakukan pada delapan *loadcase* yang mewakili variasi orientasi operasi *crane*. Hasil analisis ditunjukkan pada Tabel 6 dan Gambar 6.

Tabel 6
Hasil Analisis Pada Kondisi *Existing Deck*

<i>Loadcase</i>	Sudut <i>Crane</i>	<i>Stress Max.</i> (ASTM A36)	Deformasi	<i>Allowable Stress</i> (ASTM A36)
LC-01	Crane 0°	2015.2 MPa	66.28 mm	209.44 MPa
LC-02	Crane 45°	1839.3 MPa	110.91 mm	
LC-03	Crane 90°	2512.6 MPa	143.2 mm	
LC-04	Crane 135°	1831.7 MPa	104.72 mm	
LC-05	Crane 180°	1860.9 MPa	64.18 mm	
LC-06	Crane 225°	1989.3 MPa	110.28 mm	
LC-07	Crane 270°	2620.8 MPa	143.51 mm	
LC-08	Crane 315°	1761.1 MPa	109.84 mm	



Gambar 6: Tegangan Von Mises pada LC-07

Tabel 6 menunjukkan hasil analisis Von Mises pada seluruh *loadcase* kondisi *existing deck*. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh *loadcase* belum memenuhi tegangan izin berdasarkan klasifikasi RINA. Gambar 6 menunjukkan distribusi tegangan Von Mises pada kondisi kritis, yaitu LC-07 dengan orientasi crane 270°. Tegangan maksimum sebesar 2620.8 MPa terkonsentrasi pada area sambungan *bracket* dengan *bottom plate*. Nilai tersebut melebihi tegangan izin sebesar 209.44 MPa, sehingga kondisi *existing deck* belum memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan klasifikasi RINA. Selain itu, deformasi maksimum yang terjadi sebesar 143.51 mm.

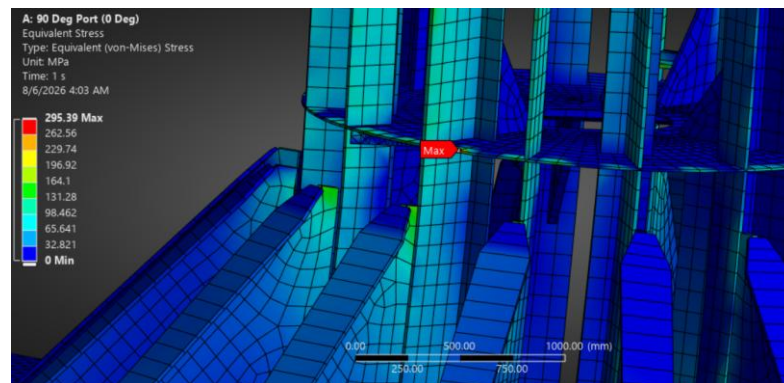
3.4 Analisis Kekuatan *Reinforcement Deck*

Berdasarkan hasil analisis pada kondisi *existing deck*, dilakukan modifikasi konstruksi pada area *crane foundation*. Modifikasi tersebut dirancang berdasarkan lokasi konsentrasi tegangan yang diperoleh dari hasil analisis *existing deck*. Setelah modifikasi diterapkan, analisis kembali dilakukan menggunakan delapan *loadcase* yang sama sehingga hasil kedua kondisi dapat dibandingkan secara langsung. Hasil analisis ditunjukkan pada Tabel 7 dan Gambar 7.

Tabel 7

Hasil Analisis Pada Kondisi *Reinforcement Deck*

<i>Loadcase</i>	Sudut <i>Crane</i>	<i>Stress Max.</i> (ASTM A36)	<i>Stress Max.</i> (Grade AH36)	Deformasi	<i>Allowable Stress</i> (ASTM A36)	<i>Allowable Stress</i> (Grade AH36)
LC-09	Crane 0°	209.03 MPa	295.39 MPa	14.82 mm	209.44 MPa	316.40 MPa
LC-10	Crane 45°	185.21 MPa	226.62 MPa	15.37 mm		
LC-11	Crane 90°	194.45 MPa	239.89 MPa	15.83 mm		
LC-12	Crane 135°	163.41 MPa	229.27 MPa	14.53 mm		
LC-13	Crane 180°	163.97 MPa	252.83 MPa	13.21 mm		
LC-14	Crane 225°	172.5 MPa	256.25 MPa	14.24 mm		
LC-15	Crane 270°	208.02 MPa	253 MPa	15.86 mm		
LC-16	Crane 315°	147.76 MPa	237.46 MPa	15.66 mm		



Gambar 7: Tegangan Von Mises Pada LC-09

Tabel 7 menunjukkan hasil analisis von mises pada semua *loadcase* dengan kondisi *reinforcement deck*. Hasil tegangan dari semua *loadcase* menunjukkan bahwa semua *loadcase* memenuhi tegangan izin dari RINA.

Dibandingkan dengan kondisi *existing deck*, distribusi tegangan pada model *reinforcement deck* menunjukkan penyebaran tegangan yang lebih merata pada area *crane foundation*. Penambahan *insert plate*, *deck stiffener*, dan konstruksi lainnya terbukti meningkatkan kekakuan lokal sehingga konsentrasi tegangan pada daerah kritis mengalami penurunan.

Nilai tegangan maksimum sebesar 295.39 MPa untuk material grade AH36 dan 209.03 MPa untuk material ASTM A36, berada di bawah tegangan izin sebesar 316.40 MPa dan 209.44 MPa, sehingga kondisi *reinforcement deck* telah memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan klasifikasi RINA. Selain itu, deformasi maksimum juga menurun dari 143.51 mm menjadi 15.86 mm, yang menunjukkan bahwa penambahan konstruksi mampu meningkatkan kekakuan lokal struktur sekaligus memperbaiki distribusi beban pada *crane foundation*.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *finite element method* (FEM), penambahan *crane* pada *deck barge* menyebabkan peningkatan tegangan lokal yang signifikan pada area *crane foundation*. Pada kondisi *existing deck*, tegangan von mises maksimum yang diperoleh sebesar 2620.8 MPa, sehingga melebihi tegangan izin berdasarkan klasifikasi RINA sebesar 209.44 MPa untuk material ASTM A36. Hasil tersebut menunjukkan bahwa struktur *existing deck* belum memenuhi persyaratan kekuatan untuk menerima pembebanan *crane* dan memerlukan modifikasi konstruksi.

Modifikasi konstruksi terbukti mampu meningkatkan kekakuan lokal struktur serta memperbaiki distribusi beban pada area *crane foundation*. Setelah dilakukan *reinforcement*, tegangan von mises maksimum menurun menjadi 209.03 MPa untuk material ASTM A36 dan 295.39 MPa untuk material *Grade AH36*. Sedangkan deformasi maksimum berkurang dari 143.51 mm menjadi 15.86 mm. Seluruh hasil analisis pada kondisi *reinforcement deck* menunjukkan nilai tegangan yang berada di bawah batas tegangan izin RINA, sehingga struktur dinyatakan memenuhi persyaratan kekuatan untuk kondisi pembebanan yang dianalisis.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa variasi orientasi operasi *crane* memberikan pengaruh terhadap respons struktur, sehingga analisis pada beberapa *loadcase* diperlukan untuk mengidentifikasi kondisi pembebanan yang paling kritis. Dengan demikian, pendekatan *finite element method* mampu digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kekuatan lokal *crane foundation* serta menentukan kebutuhan *reinforcement* pada modifikasi *deck barge* menjadi *deck crane barge*.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan analisis kekuatan struktur *deck crane barge*. Pengembangan dapat dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan yang lebih kompleks melalui pengaruh lingkungan laut, seperti gelombang, arus, dan angin, serta gerakan kapal yang ditimbulkan oleh kondisi perairan. Pendekatan tersebut diharapkan mampu merepresentasikan kondisi operasi menjadi lebih realistis sehingga evaluasi terhadap respons dan kekuatan struktur menjadi lebih komprehensif.

5 Daftar Pustaka

- [1] L. M. R. Silva and C. Guedes Soares, "Optimisation of offshore oilfield development including the risk of failure of subsea manifolds," *Ocean Eng.*, vol. 324, no. February, p. 120668, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.120668.
- [2] Y. Bai and Q. Bai, *Subsea Structural Engineering Handbook*. Gulf Professional Publishing (Elsevier), 2010.
- [3] I. J. Wichers, "Guide to Single Point Moorings," 2012.
- [4] K. Abdullah, M. Lukman Arif, A. Prasetya Utomo, D. Oktavina Radianto, and C. Author, "Construction Strength Analysis of a 250-Tonne Capacity Deck Crane Barge with Longitudinal Variation," *J. Ilm. Teknol. Marit.*, vol. 17, no. 2, pp. 65–74, 2023.
- [5] A. P. Crowle, "Floating Offshore Wind : A Review of Installation Vessel Requirements," 2024.
- [6] Registro Italiano Navale, "Rules for the Classification of Ships Part B-Hull & Stability," no. January, 2026.
- [7] D. A. Dragatogiannis, G. Zaverdinos, and A. Galanis, "Structural Analysis of Deck Reinforcement on Composite Yacht for Crane Installation," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 6, 2024, doi: 10.3390/jmse12060934.
- [8] M. Fendy Firmansyah, E. Pranatal, J. Teknik Perkapalan, and I. Teknologi Adhi Tama Surabaya, "Analisis Kekuatan Struktur Deck Akibat Penambahan Boat Crane Pada Kapal FastUtility Vessel 40 M Dengan Metode Fem Analysis," no. Senastitan V, pp. 15–2025, 2025.
- [9] S. S. Bhavikatti, *Finite Element Analysis*. New Age International (P) Limited, Publishers, 2005.
- [10] W. A. Akbar Trihantoro, Imam Pujo Mulyatno, "Analisa Kekuatan Struktur Deck Crane Kapal Tanker 6500 DWT Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 2, pp. 152–160, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/26745>
- [11] M. I. Raendi Meivando Gea, Ahmad Fauzan Zakki, "ANALISA STRUKTUR KONTRUKSI GELADAK AKIBAT PENAMBAHAN DECK CRANE PADA LANDING CRAFT TANK 1500DWT BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA," *Tek. Perkapalan*, no. 1, pp. 127–136, 2015.
- [12] T. Rachman Hakim, Handayanu, and Mas Murtedjo, "Analisis Kekuatan Konstruksi Crane Pedestal Pada Mooring Storage Tanker Niria," *J. Tek. Its*, vol. 1, no. July, 2012.
- [13] ASTM A36, "Standard Specification for Carbon Structural Steel," *Standards*, vol. 14, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1520/A0036.
- [14] American Petroleum Institute, "API Specification 2C : Offshore Pedestal-Mounted Cranes," 2013.
- [15] F. Tahmasebi, "Finite Element Strength Assessment of a Crane Foundation Deck in a MultiCat Fish Farm Support Vessel," *Int. J. Aquac.*, vol. 16, no. 2, pp. 61–73, 2026, doi: 10.5376/ija.2026.16.0006.
- [16] R. I. Navale, "Rules for the Classification of Ships Part D-Materials & Welding," no. January, 2026.