

Perbandingan Kekuatan Pondasi Crane Kapal Utility Terhadap Modifikasi Stiffener dan Bracket Berdasarkan Persyaratan Klasifikasi Bureau Veritas (BV)

Muhamad Ramadhan^{*1}, Mutiarani^{*1}, Yusuf Nurhuda^{2*}

^{*} Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: muhamadramadhan340@gmail.com

Abstrak

Pondasi crane pada kapal *utility* merupakan komponen struktural yang berfungsi menyalurkan beban operasional crane ke struktur geladak sehingga harus memiliki kekuatan, kekakuan, dan tingkat keamanan yang memadai. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja struktur pondasi crane melalui variasi konfigurasi *bracket* dan *stiffener* berdasarkan persyaratan *Bureau Veritas* (BV). Analisis dilakukan menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) pada perangkat lunak *SolidWorks Simulation* dengan material baja ASTM A36 dan pembebanan statis sebesar 33 ton. Parameter evaluasi meliputi tegangan Von Mises, deformasi, dan *safety factor* untuk menentukan konfigurasi struktur yang paling optimal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh variasi memenuhi persyaratan *Bureau Veritas* dengan nilai tegangan Von Mises di bawah tegangan izin sebesar 165 MPa serta memiliki *safety factor* di atas batas minimum 1,52. Model asli menghasilkan tegangan sebesar 98,7 MPa, deformasi 0,60 mm, dan *safety factor* 2,5. Keunggulan model ini terletak pada desain yang lebih sederhana sehingga lebih mudah diproduksi dan berpotensi memberikan efisiensi fabrikasi, meskipun menghasilkan konsentrasi tegangan paling tinggi dibandingkan variasi lainnya. Variasi 1 memberikan kinerja struktur terbaik dengan tegangan Von Mises sebesar 86 MPa, deformasi 0,57 mm, dan *safety factor* 2,9. Peningkatan jumlah serta penataan *bracket* dan *stiffener* pada daerah kritis mampu meningkatkan kekakuan struktur, memperbaiki distribusi beban, serta menurunkan konsentrasi tegangan sehingga menghasilkan tingkat keamanan tertinggi. Variasi 2 menghasilkan tegangan sebesar 92 MPa, deformasi 0,60 mm, dan *safety factor* 2,7. Konfigurasi ini menunjukkan peningkatan kekuatan dibandingkan model asli dengan jumlah elemen penguat yang lebih sedikit daripada Variasi 1, sehingga memberikan kompromi yang baik antara peningkatan performa struktur dan efisiensi penggunaan material. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, Variasi 1 direkomendasikan sebagai konfigurasi pondasi crane yang paling optimal karena memberikan kombinasi terbaik antara kekuatan struktur, kekakuan, distribusi beban, dan tingkat keamanan sesuai persyaratan *Bureau Veritas*.

Kata kunci: *Bureau Veritas* (BV), crane, kapal *Utility*, *Finite Element Method* (FEM), tegangan Von Mises, Deformasi.

Abstract

The crane foundation on a utility vessel is a structural component that transfers the crane's operational loads to the deck structure; therefore, it must possess adequate strength, stiffness, and safety margins. This study aims to compare the structural performance of crane foundations through variations in bracket and stiffener configurations based on Bureau Veritas (BV) requirements. The analysis was performed using the Finite Element Method (FEM) in SolidWorks Simulation software, with ASTM A36 steel as the material and a static load of 33 metric tons. Evaluation parameters included von Mises stress, deformation, and safety factor to determine the most optimal structural configuration. The simulation results show that all variations meet Bureau Veritas requirements, with Von Mises stress values below the allowable stress of 165 MPa and safety factors above the minimum limit of 1.52. The original model produced a stress of 98.7 MPa, a deformation of 0.60 mm, and a safety factor of 2.5. The advantage of this model lies in its simpler design, making it easier to manufacture and potentially improving fabrication efficiency, even though it produces the highest stress concentration compared to the other variations. Variation 1 delivers the best structural performance with a Von Mises stress of 86 MPa, a deformation of 0.57 mm, and a safety factor of 2.9. Increasing the number and arrangement of brackets and stiffeners in critical areas enhances

structural stiffness, improves load distribution, and reduces stress concentrations, thereby achieving the highest level of safety. Variation 2 yields a stress of 92 MPa, a deformation of 0.60 mm, and a safety factor of 2.7. This configuration demonstrates an increase in strength compared to the original model while using fewer reinforcing elements than Variation 1, thus providing a good compromise between improved structural performance and material efficiency. Based on the results of this comparison, Variation 1 is recommended as the most optimal crane foundation configuration because it provides the best combination of structural strength, stiffness, load distribution, and safety level in accordance with Bureau Veritas requirements.

Keywords: Bureau Veritas (BV), crane, utility vessel, Finite Element Method (FEM), Von Mises stress, deformation.

1. Pendahuluan

Kapal *utility* merupakan salah satu jenis kapal kerja yang banyak digunakan untuk mendukung berbagai aktivitas operasional di pelabuhan maupun wilayah lepas pantai. Kapal ini berperan dalam pengangkutan logistik, peralatan kerja, serta mendukung berbagai kegiatan konstruksi dan pemeliharaan infrastruktur maritim. Untuk menunjang pelaksanaan tugas tersebut, kapal *utility* umumnya dilengkapi dengan *crane* yang berfungsi sebagai alat bantu pengangkatan dan pemindahan beban. Dalam operasinya *crane* yang digunakan pada kapal menghasilkan beban terpusat yang bekerja pada pondasi *crane* dan selanjutnya diteruskan ke struktur geladak serta konstruksi penyangga di bawahnya [1]. Oleh karena itu, pondasi *crane* harus dirancang dengan kekuatan dan kekakuan yang memadai agar mampu menyalurkan beban secara aman. Untuk mendukung kinerja struktur tersebut, digunakan *bracket* dan *stiffener* sebagai elemen penguat. Perbedaan susunan dan konfigurasi kedua komponen ini dapat memengaruhi penyebaran beban, besarnya tegangan, serta deformasi yang terjadi pada pondasi *crane*. Apabila beban tidak tersalurkan secara merata, dapat timbul konsentrasi tegangan dan deformasi yang berlebihan sehingga berpotensi menurunkan tingkat keamanan struktur kapal [2].

Berbagai penelitian terdahulu telah menganalisis kekuatan struktur *deck crane* menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Salah satu penelitian yang dilakukan oleh Akbar Trihantoro, Imam Pujo Mulyatno, dan Wilma Amiruddin (2022) mengkaji pengaruh variasi sudut putar dan sudut elevasi *crane* terhadap distribusi tegangan, area kritis, dan faktor keamanan struktur *deck crane* pada kapal tanker 6.500 DWT. Namun, penelitian tersebut belum membahas pengaruh variasi jumlah dan konfigurasi *bracket* serta *stiffener* pada struktur pondasi *crane*. Padahal, kedua komponen tersebut berperan penting dalam meningkatkan kekakuan struktur dan mendistribusikan beban secara lebih merata. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis perbandingan variasi *bracket* dan *stiffener* pada pondasi *crane* kapal *utility* untuk memperoleh konfigurasi yang paling efektif berdasarkan nilai tegangan, deformasi, dan faktor keamanan sesuai dengan ketentuan *bureau veritas* (BV) [3] [4].

Menurut *Bureau Veritas Rules for Lifting Appliances* (NR 526), struktur pendukung *crane* harus dirancang untuk menahan kombinasi beban statis dan dinamis yang terjadi selama proses pengangkatan. Selain itu, *Bureau Veritas Rules for the Classification of Steel Ships* (NR 467) memiliki persyaratannya bahwa beban terpusat yang berasal dari *crane* harus disalurkan secara efektif melalui elemen-elemen penguat struktur, seperti *girder*, *bracket*, *stiffener*, dan *web frame*. Persyaratan tersebut bertujuan untuk mencegah terjadinya konsentrasi tegangan yang dapat menurunkan keandalan struktur kapal. Salah satu permasalahan dalam konstruksi kapal yakni bagaimana mendesain konstruksi yang kuat, kokoh, dan tidak memerlukan material yang banyak (ringan). Sehingga *engineer* kapal merencanakan kekuatan berdasarkan resiko deformasi yang berlebih pada konstruksi (*yield point*), konstruksi akan ditinjau dari aspek *safety factor*.

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah desain pondasi *crane* yang diperoleh dari data awal belum memenuhi persyaratan teknis dan kriteria kekuatan struktur yang ditetapkan oleh regulasi klasifikasi kapal. Beban operasional yang bekerja pada *crane* dapat menimbulkan tegangan dan deformasi pada struktur pondasi serta geladak kapal.

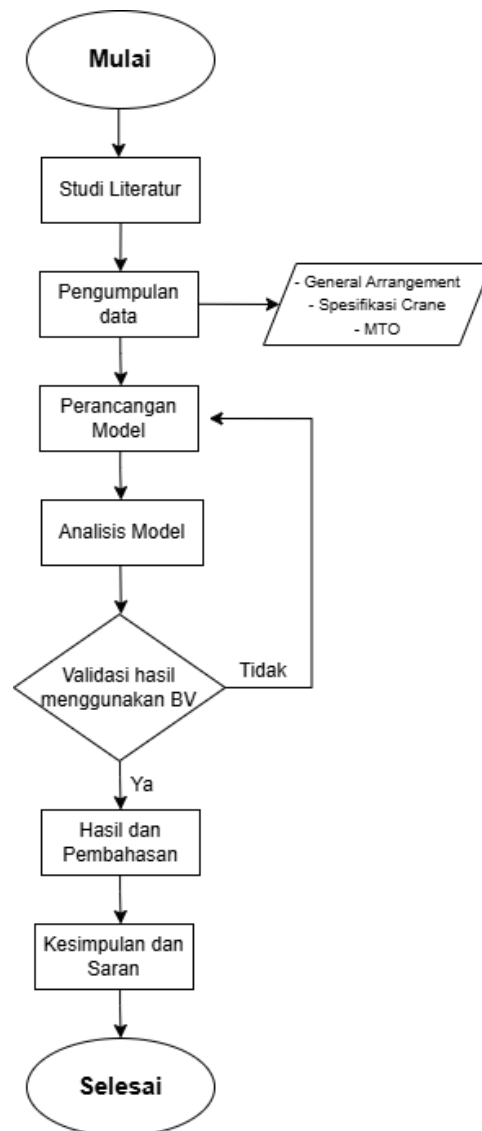
Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kekuatan struktur pondasi *crane* kapal *utility* dengan beberapa variasi konfigurasi *bracket* dan *stiffener* sehingga dapat diperoleh desain yang mampu menghasilkan distribusi beban yang lebih baik, tegangan yang lebih rendah, deformasi yang lebih kecil, serta faktor keamanan yang lebih tinggi. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam proses perancangan pondasi *crane* yang lebih aman, efisien, dan sesuai dengan persyaratan klasifikasi kapal.

Batasan masalah pada penelitian ini hanya membahas analisis kekuatan struktur pondasi *crane* yang terpasang pada kapal *utility* dengan panjang 50 meter menggunakan material ASTM A36. Kajian difokuskan pada pengaruh variasi susunan *bracket* dan *stiffener* terhadap respon struktur pondasi *crane* akibat beban *crane* yang bekerja. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element*

Method/FEM) dengan bantuan perangkat lunak *SolidWorks Simulation*. Parameter yang dievaluasi meliputi distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan struktur. Penelitian ini hanya mempertimbangkan kondisi pembebanan statik, sudut *boom* dan radius sehingga pengaruh beban gelombang, getaran, korosi, kelelahan material (*fatigue*), serta faktor lingkungan lainnya tidak termasuk dalam ruang lingkup pembahasan [5] [6].

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian di bidang rekayasa teknik (*engineering design*) yang bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan kekuatan struktur pondasi *crane* pada kapal *utility* dengan variasi modifikasi konstruksi pada area pondasi perubahan susunan *bracket* dan *stiffener*. Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi konstruksi terhadap kemampuan struktur dalam menahan beban kerja yang diterima selama proses pengangkatan. Pengkajian dilakukan secara numerik menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) dengan bantuan perangkat lunak *SolidWorks Simulation* guna memperoleh nilai tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada setiap model yang diteliti, sehingga dapat ditentukan *design* struktur yang paling efektif dan memenuhi persyaratan kekuatan konstruksi, adapun tahapan penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1.



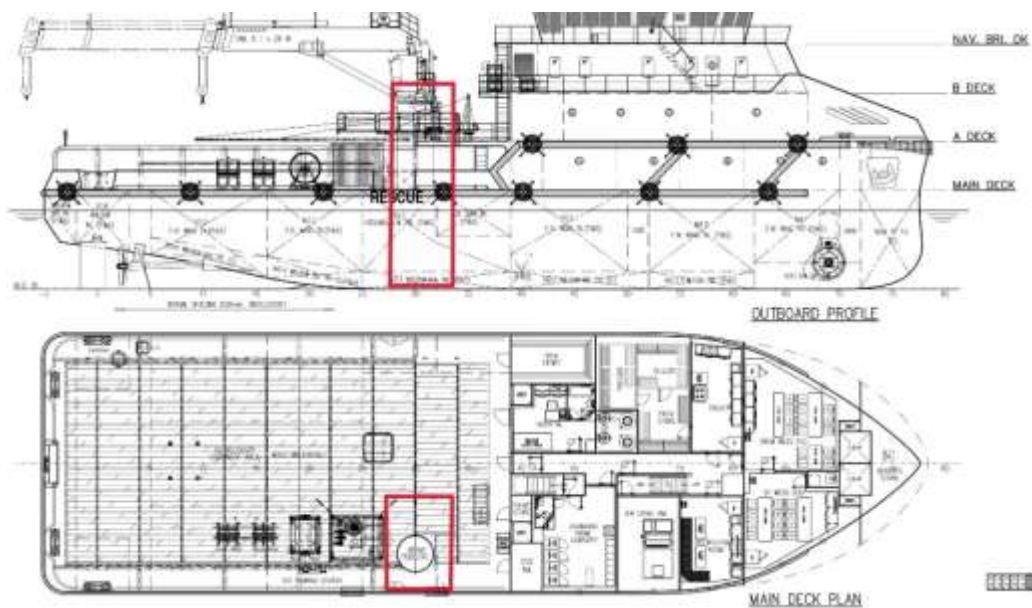
Gambar 1. Flow Chart Penelitian

2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilaksanakan untuk memperkuat landasan teori serta memperluas pemahaman terhadap permasalahan yang menjadi fokus penelitian. Kegiatan ini dilakukan melalui penelaahan berbagai sumber ilmiah, seperti jurnal, buku, dan peraturan klasifikasi yang berkaitan dengan struktur pondasi *crane* pada kapal *utility*, karakteristik serta fungsi *bracket* dan *stiffener*, konsep tegangan, regangan, deformasi, serta respon struktur terhadap pembebanan. Selain itu, metode elemen hingga (*Finite Element Method* atau FEM) dipelajari sebagai dasar dalam pelaksanaan analisis numerik terhadap kekuatan struktur. Studi literatur juga mencakup ketentuan teknis yang diterbitkan oleh *bureau veritas* (BV), khususnya yang berkaitan dengan batas tegangan yang diizinkan dan nilai faktor keamanan minimum sebagai acuan dalam menilai kelayakan serta kekuatan struktur pondasi *crane* pada kapal *utility* [7].

2.2 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data konstruksi kapal *utility* dengan panjang 50 meter yang dijadikan sebagai objek analisis kekuatan struktur pondasi *crane*. Pondasi *crane* yang diteliti terletak pada sisi kanan (*starboard side*) kapal, tepatnya pada *Frame 29* hingga *Frame 35*. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method* atau FEM) berdasarkan data konstruksi, spesifikasi material, dan pembebanan yang bekerja pada struktur. Evaluasi hasil simulasi mengacu pada ketentuan *bureau veritas* (BV), khususnya terkait batas tegangan yang diizinkan dan faktor keamanan konstruksi. Posisi pondasi *crane* pada kapal ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Drawing kapal 50 m Utility Boat (tampak samping dan tampak atas)

Ukuran utama kapal meliputi *Length over all* (LOA) sebesar 50 meter dan *Length Between Perpendiculars* (LBP) sebesar 46,54 meter. *Breadth (Moulded)* adalah 14,50 meter, sedangkan *Height (Moulded)* mencapai 5,60 meter. Kapal ini memiliki *Max draught* sedalam 4,50 meter. Detail ukuran utama kapal dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Ukuran Utama Kapal Utility

Ukuran Utama	Dimensi
<i>Length Over All (LOA)</i>	50 m
<i>Length Between Perpendicular (LBP)</i>	46,54 m
<i>Beam (Moulded)</i>	14,50 m
<i>Height (Moulded)</i>	5,6 m
<i>Draught</i>	4,50 m

Spesifikasi Material Konstruksi

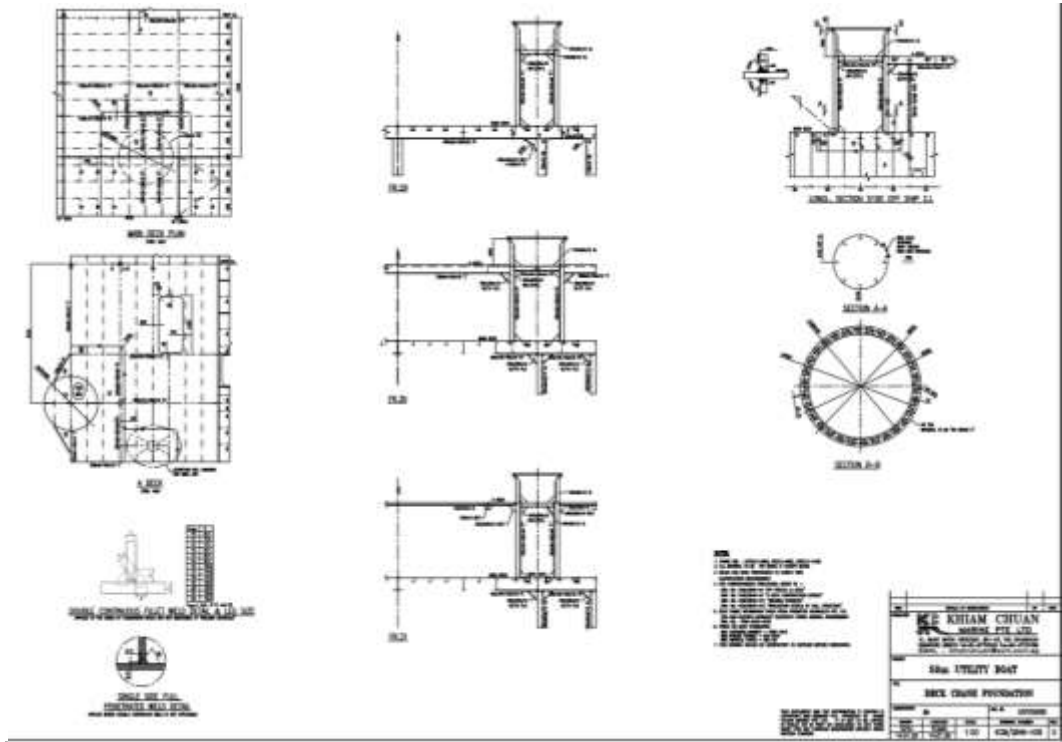
Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ASTM A36, yang termasuk dalam kategori baja karbon rendah dengan karakteristik kekuatan yang memadai, mudah dibentuk, serta memiliki kemampuan pengelasan yang baik. Karakteristik tersebut menjadikan baja ASTM A36 banyak diterapkan pada berbagai konstruksi di bidang perkapalan. Oleh karena itu, material ini dipilih sebagai bahan struktur pondasi crane yang dianalisis dalam penelitian. Adapun komposisi kimia baja ASTM A36 dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kandungan Kimia dari Baja ASTM A36

Parameter	ASTM A36
Jenis Material	Carbon Steel
Density	7850 kg/m ³
Yeald Strength	250 Mpa
Ultimate strength	400-550 Mpa
Modulus Elastisitas	200 Gpa
Poisson Ratio	±0.3

Konstruksi Crane

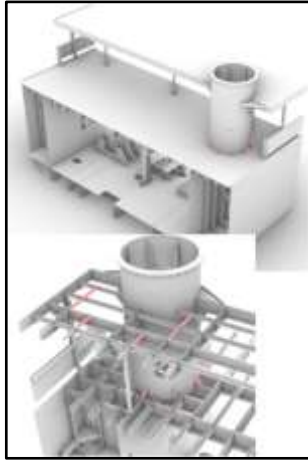
Dalam penelitian ini, data yang digunakan diperoleh dari perusahaan dalam bentuk gambar konstruksi (*drawing*) dan 3D yang di design menggunakan *software FORAN* pondasi *crane* pada kapal *utility*. Data tersebut dimanfaatkan sebagai dasar dalam proses pemodelan dan analisis kekuatan struktur pondasi *crane* menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method* atau FEM). Gambar konstruksi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk merepresentasikan kondisi aktual struktur sehingga hasil analisis yang diperoleh dapat menggambarkan perilaku struktur secara lebih akurat. Adapun gambar konstruksi pondasi *crane* yang menjadi objek penelitian ditampilkan pada Gambar 3.



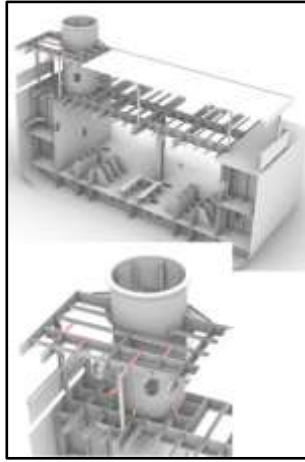
Gambar 3. Drawing Konstruksi Crane Kapal 50 m Utility Boat

Pada gambar di bawah ini menunjukkan tiga konfigurasi struktur pondasi crane yang digunakan dalam penelitian, yaitu Variasi 1, Model Asli, dan Variasi 2. Perbedaan utama dari ketiga model terletak pada konfigurasi serta jumlah bracket dan stiffener yang berfungsi sebagai elemen pengaku pada area pondasi crane. Variasi 1 menggunakan konfigurasi pengaku yang lebih rapat untuk meningkatkan distribusi beban dan kekakuan struktur. Model asli merupakan desain awal yang dijadikan sebagai acuan pembandingan tanpa perubahan konfigurasi. Sementara itu, Variasi 2 menggunakan konfigurasi pengaku yang berbeda dari model asli dengan penyesuaian posisi dan

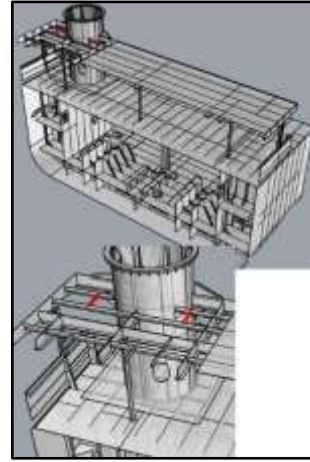
jumlah *bracket* maupun *stiffener* untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap distribusi tegangan, *deformasi*, dan faktor keamanan struktur berdasarkan hasil simulasi metode *Finite Element Method* (FEM) dari ketiga variasi tersebut saya lampirkan dalam bentuk gambar dan tabel, gambar 4(a), gambar 4(b), gambar 4(c) dan Tabel 3.



Gambar 4(a). Variasi 1



Gambar 4(b). Model asli



Gambar 4(c). Variasi 2

Tabel 3. Variasi konfigurasi *bracket* dan *stiffener*

Variasi	Jumlah Bracket	Jumlah Stiffener	Modifikasi Design
Variasi 1	12	6	Penambahan dan pengaturan posisi <i>bracket</i> serta <i>stiffener</i> pada area yang diperkirakan menerima tegangan tinggi, termasuk pada bagian pondasi kolom <i>crane</i> .
Model asli	10	4	Desain awal (<i>existing design</i>) yang diperoleh dari data kapal.
Variasi 2	8	2	Penambahan <i>bracket</i> dan <i>stiffener</i> pada area yang dianggap kritis serta pemindahan posisi <i>bracket</i> ke bagian dalam kolom <i>crane</i> .

2.3 Desain Permodelan

Proses desain pemodelan geometri konstruksi kapal dan pondasi *crane* kapal *utility* dilakukan dalam dua tahap:

1. Pembuatan model 3D yang berpatokan pada *basic drawing* yang diberikan oleh *vendor* drawing menggunakan *software Rhinoceros* yang memvisualisasikan bentuk konstruksi kapal dan pondasi *crane* yang terletak pada *Frame* 29 sampai 35 dengan melakukan variasi modifikasi *stiffener* dan *bracket*.
2. Impor model 3D ke *software solidwork simulation* untuk dilakukan analisis FEM

2.4 Simulasi dan Analisis FEM

Dalam penelitian ini, analisis kekuatan pondasi *crane* pada kapal *utility* dilakukan dengan menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM). Pembebanan diasumsikan bekerja secara statis berdasarkan berat sendiri *crane* dan di tambah dengan berat maksimal, berat *crane* sebesar (*self-weight*) sebesar 8 ton atau setara dengan 78.480 *Newton* dan berat beban maksimal 25 ton atau setara dengan 245.250 *Newton* total berat 33 ton atau setara dengan 323.730 *Newton*, yang diteruskan ke struktur pondasi *crane* melalui sistem penyangga. Material yang digunakan adalah baja *ASTM A36*, yang umum digunakan pada konstruksi maritim karena memiliki sifat mekanis yang baik, dengan modulus elastisitas sebesar 200 GPa serta tegangan luluh sebesar 250 MPa. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan konfigurasi *bracket* dan *stiffener* terhadap kekuatan struktur pondasi *crane*. Hasil yang diperoleh mencakup nilai tegangan, deformasi, dan faktor keamanan (*safety factor*) yang digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kinerja struktur. Dengan demikian, dapat diketahui kemampuan setiap variasi desain dalam menahan beban kerja serta memenuhi persyaratan kekuatan yang berlaku [8].

Untuk menentukan apakah desain *sideboard* ini aman dan layak, digunakan 2 tolak ukur utama:

1. Faktor keamanan Menurut *Bureau Veritas (BV) NR467 – Rules for the Classification of Steel Ships*, evaluasi kekuatan struktur tidak didasarkan pada penggunaan rumus faktor keamanan (*Safety Factor*) secara langsung, melainkan menggunakan metode *Allowable Stress Design (ASD)*. Dalam metode ini, kekuatan struktur dievaluasi berdasarkan batas tegangan izin yang ditentukan sebagai persentase tertentu dari tegangan luluh material. Dengan demikian, faktor keamanan dapat dihitung dari perbandingan antara tegangan luluh material (*yield strength*) dan tegangan izin (*allowable stress*) yang ditetapkan oleh *bureau veritas*, adapun kriteria penilaian nilai *Safety Factor (SF)* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.

$$\text{Rumus : } FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM}} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- SF = *Safety Factor*
- σ_y = Tegangan luluh (*Yield Strength*) material (MPa)
- σ_{VM} = Hasil Tegangan Von Mises Stress (MPa)

Perhitungan *Safety Factor*:

$$SF = \frac{250}{165}$$

$$SF = 1,52$$

Tabel 4. *Safety Factor (SF)*

$SF < 1 \rightarrow$ gagal
$SF \approx 1 \rightarrow$ berbahaya
$SF \geq 1,52 \rightarrow$ aman
$SF \geq 2 \rightarrow$ sangat aman

2. Tegangan maksimum tidak boleh melebihi dari tegangan izin diatur dalam *Bureau Veritas (BV) NR467 – Rules for the Classification of Steel Ships, Part E, Chapter 8, Section 4, Article 5 mengenai Allowable Stress* [9].

$$\text{Rumus : } \sigma_{vm} \leq 1,1 \times \alpha \times Re \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

- σ_{vm} = Tegangan Von Mises hasil analisis FEM (MPa)
- α = Faktor tegangan untuk kondisi pembebanan statis (*Static Load Case*)
- Re = Tegangan luluh (*Yield Strength*) material (MPa)

Perhitungan tegangan izin :

Material yang digunakan adalah ASTM A36 dengan tegangan luluh:

$$Re = 250 \text{ Mpa}$$

Sehingga tegangan izin menurut *Bureau Veritas* adalah:

$$\sigma_{izin} = 1,1 \times 0,6 \times 250$$

$$\sigma_{izin} = 165 \text{ MPa}$$

Jika nilai tegangan *Von Mises* maksimum lebih kecil ($\leq$) dari tegangan izin *Bureau Veritas*, maka konstruksi pondasi *crane* dinyatakan memenuhi persyaratan kekuatan dan berada dalam kondisi aman terhadap beban yang diberikan.

Berdasarkan perhitungan numerik yang dilakukan, penelitian ini bertujuan untuk menilai kekuatan pondasi *crane* dengan variasi jumlah dan konfigurasi *stiffener* serta *bracket* yang telah dirancang. Analisis dilakukan untuk memastikan bahwa struktur mampu menahan beban *crane* secara aman tanpa mengalami kegagalan struktur maupun deformasi yang melebihi batas yang diizinkan sesuai persyaratan yang berlaku.

3. Analisis dan Pembahasan

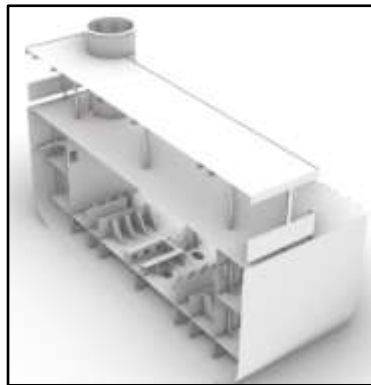
Analisis pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan tiga variasi desain pondasi *crane* yang memiliki perbedaan pada jumlah dan susunan *bracket* serta *stiffener*. Model asli merupakan desain awal yang digunakan sebagai model acuan, sedangkan Variasi 1 dan Variasi 2 merupakan desain hasil modifikasi. Pengkajian difokuskan pada pengaruh perubahan konfigurasi struktur terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pondasi *crane*. Variasi 1 dirancang dengan penambahan serta penataan *bracket* dan *stiffener* pada area yang berpotensi mengalami tegangan tinggi, termasuk pada bagian pondasi kolom *crane*. Sementara itu, Variasi 3 dikembangkan dengan menambahkan *bracket* dan *stiffener* pada area yang dianggap kritis serta memindahkan posisi *bracket* ke bagian dalam kolom *crane* untuk

memanfaatkan ruang yang tersedia secara lebih optimal. Melalui perbandingan ketiga variasi tersebut, diharapkan dapat diperoleh konfigurasi pondasi *crane* yang memberikan kinerja struktur terbaik dalam menahan beban kerja, memiliki tingkat keamanan yang memadai, serta memenuhi persyaratan kekuatan struktur yang berlaku. Analisis dilakukan menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) untuk mengevaluasi respons struktur terhadap pembebanan yang diberikan.

Penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian Akbar Trihantoro dkk. (2022), yaitu menganalisis kekuatan struktur *crane* menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) berdasarkan parameter tegangan, *deformasi*, dan faktor keamanan. Perbedaannya terletak pada objek dan variabel penelitian. Penelitian sebelumnya menganalisis struktur *deck crane* kapal tanker 6.500 DWT dengan variasi sudut putar dan sudut elevasi *crane*, sedangkan penelitian ini mengkaji pondasi *crane* kapal *utility* dengan variasi konfigurasi *bracket* dan *stiffener*. Hasil penelitian Akbar Trihantoro dkk. menunjukkan bahwa tegangan maksimum mencapai 147,08 MPa dan masih memenuhi persyaratan BKI, sehingga struktur dinyatakan aman. Sebaliknya, penelitian ini menunjukkan bahwa seluruh variasi memenuhi persyaratan Bureau Veritas (BV) dengan tegangan *Von Mises* di bawah 165 MPa dan *safety factor* di atas 1,52. Variasi 1 memberikan kinerja terbaik dengan tegangan 86 MPa, deformasi 0,57 mm, dan *safety factor* 2,9, yang menunjukkan bahwa penambahan serta penataan *bracket* dan *stiffener* mampu meningkatkan kekakuan struktur dan memperbaiki distribusi beban. Dengan demikian, penelitian sebelumnya membuktikan bahwa kondisi operasi *crane* memengaruhi besarnya tegangan struktur, sedangkan penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi *bracket* dan *stiffener* berpengaruh terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada optimalisasi desain pondasi *crane* melalui modifikasi konfigurasi *bracket* dan *stiffener*, yang belum dikaji pada penelitian sebelumnya.

3.1 Modelling 3D Struktur

Pemodelan pondasi *crane* dilakukan menggunakan perangkat lunak *Rhinoceros* (Rhino) untuk menghasilkan model tiga dimensi yang sesuai dengan desain penelitian. Model yang dibuat terdiri atas tiga variasi pondasi *crane* dengan perbedaan jumlah dan konfigurasi *bracket* serta *stiffener*. Model asli digunakan sebagai desain awal, sedangkan Variasi 1 dan Variasi 2 merupakan hasil modifikasi. Setelah proses pemodelan selesai, model diekspor dalam format STEP untuk diimpor ke *SolidWorks Simulation* dan dianalisis menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM). Analisis dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada setiap variasi desain, adapun model struktur pondasi *crane* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.



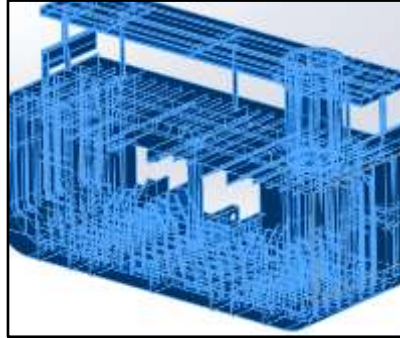
Gambar 5. Model Struktur

3.1.1 Pendefinisian Material

Tahap awal analisis kekuatan pondasi *crane* dilakukan dengan menentukan sifat material yang digunakan pada model struktur. Material yang dipilih adalah baja ASTM A36 yang umum digunakan pada konstruksi maritim karena memiliki karakteristik mekanis yang baik. Baja tersebut memiliki tegangan luluh sebesar 250 MPa dan modulus elastisitas sebesar 200 GPa. Selanjutnya, data material dimasukkan ke dalam perangkat lunak analisis berbasis *Finite Element Method* (FEM) sebagai parameter untuk mensimulasikan respons struktur pondasi *crane* terhadap beban yang bekerja.

3.1.2 Koneksi Antar Komponen (*Body Connection*)

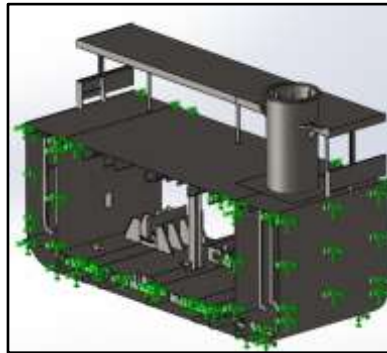
Pada proses analisis, hubungan antara *bracket*, *stiffener*, dan pelat pondasi *crane* ditetapkan menggunakan jenis *Bonded Contact*. Pengaturan ini mengasumsikan bahwa tidak terjadi perpindahan atau pergerakan relatif antar komponen yang saling terhubung, sehingga seluruh elemen struktur bekerja sebagai satu kesatuan. Asumsi tersebut disesuaikan dengan kondisi konstruksi sebenarnya, di mana sambungan antar komponen dilakukan melalui proses pengelasan, adapun konfigurasi *body connection* pada model struktur dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. *Body Connection*

3.1.3 Boundary Condition

Sebelum analisis dilakukan, kondisi batas (*boundary condition*) pada model pondasi *crane* terlebih dahulu ditentukan. Kondisi batas yang digunakan berupa tumpuan jepit (*fixed geometry*) yang diterapkan pada bagian dasar pondasi yang terhubung dengan *deck* kapal. Penerapan kondisi batas ini bertujuan untuk menahan pergerakan dan perpindahan struktur selama proses simulasi, sehingga perilaku struktur dapat dianalisis sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Letak penerapan kondisi batas pada model ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. *Boundary Condition*

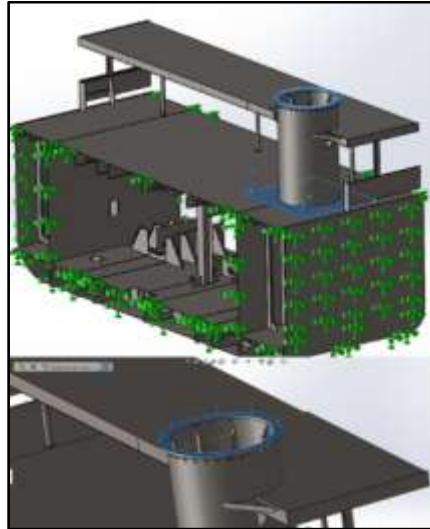
3.1.4 Pemberian Beban

Beban yang digunakan dalam penelitian ini adalah beban *crane* dengan berat 8 ton dan beban angkut maksimal 25 ton yang bekerja pada pondasi *crane* kapal. Beban tersebut dikonversi menjadi gaya untuk digunakan sebagai beban masukan pada analisis metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Besarnya gaya dihitung berdasarkan massa *crane* dan percepatan gravitasi. Dengan massa *crane* sebesar 8.000 kg + 25.000 kg dan percepatan gravitasi 9,81 m/s², diperoleh gaya sebesar 323.730 N. Nilai gaya tersebut kemudian diterapkan pada pondasi *crane* sesuai dengan kondisi pembebanan yang direncanakan, adapun pemberian beban pada model struktur dapat dilihat pada Gambar 8.

$$F = m \times g \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

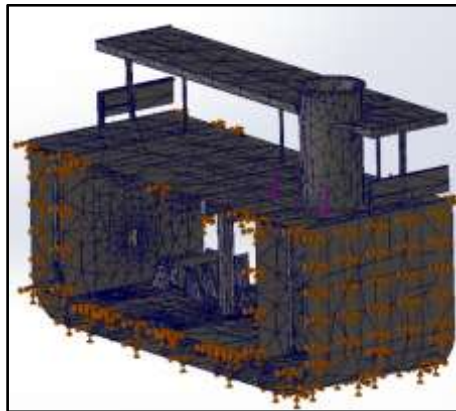
- F = gaya (N)
- m = massa (kg)
- g = percepatan gravitasi (m/s²)



Gambar 8. Pemberian beban pada struktur

3.1.5 Meshing

Proses *meshing* dilakukan dengan membagi model pondasi *crane* menjadi elemen-elemen yang lebih kecil untuk mempermudah analisis menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Pada penelitian ini digunakan kualitas *mesh fine* agar hasil analisis menjadi lebih akurat. Selain itu, parameter *Blended Curvature-Based Mesh* diterapkan karena model pondasi *crane* memiliki bentuk yang beragam dan cukup kompleks, terutama pada bagian *bracket* dan *stiffener*. Pengaturan *mesh* tersebut bertujuan untuk memperoleh hasil analisis tegangan dan deformasi yang lebih baik, adapun proses *meshing* pada model struktur dapat dilihat pada Gambar 9.

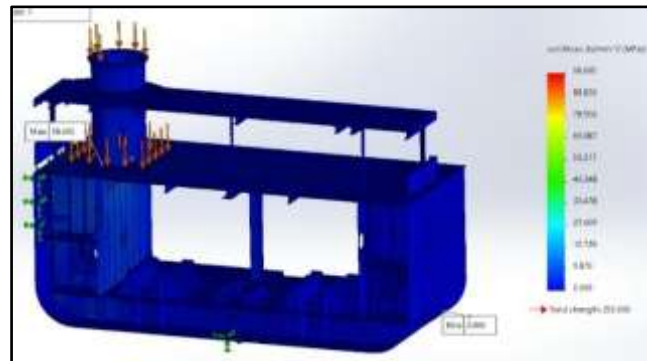


Gambar 9. Meshing Model

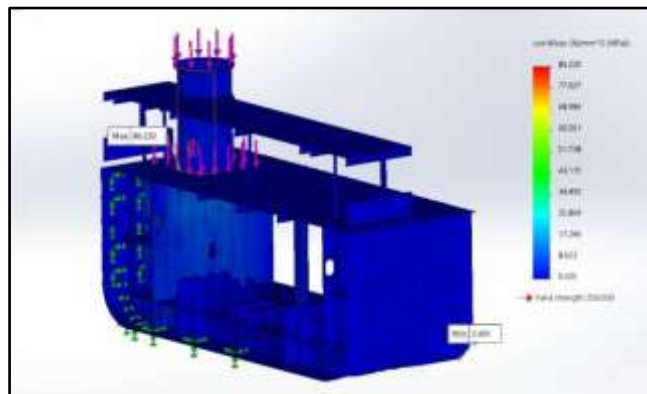
3.2 Hasil Analisa Kekuatan

Analisis kekuatan pondasi *crane* kapal dilakukan dengan menerapkan tiga variasi konfigurasi *bracket* dan *stiffener*. Masing-masing variasi dianalisis untuk mengetahui pengaruh perubahan konfigurasi terhadap respons struktur pondasi *crane*. Hasil yang diperoleh dari setiap variasi kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi kinerja struktur berdasarkan nilai tegangan, deformasi, dan faktor keamanan. Adapun hasil analisis tersebut disajikan sebagai berikut.

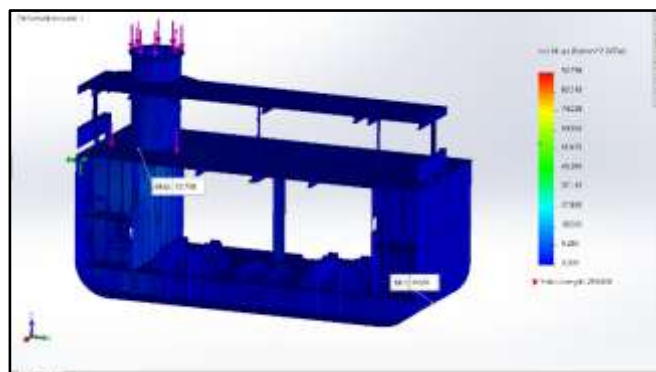
1. Tegangan *Von Mises*, untuk mengevaluasi apakah tegangan yang terjadi masih berada di bawah tegangan izin, adapun hasil analisis distribusi tegangan *Von Mises* pada setiap model variasi dapat dilihat pada Gambar 10 sampai dengan Gambar 12.



Gambar 10. *Von Mises* Model Asli

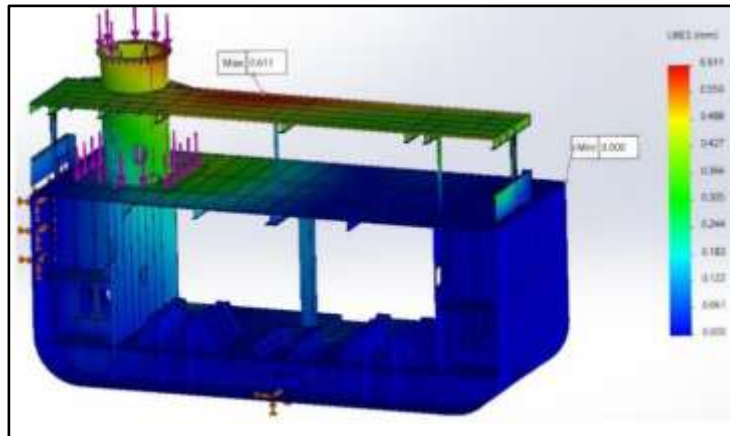


Gambar 11. *Von Mises* Variasi 1

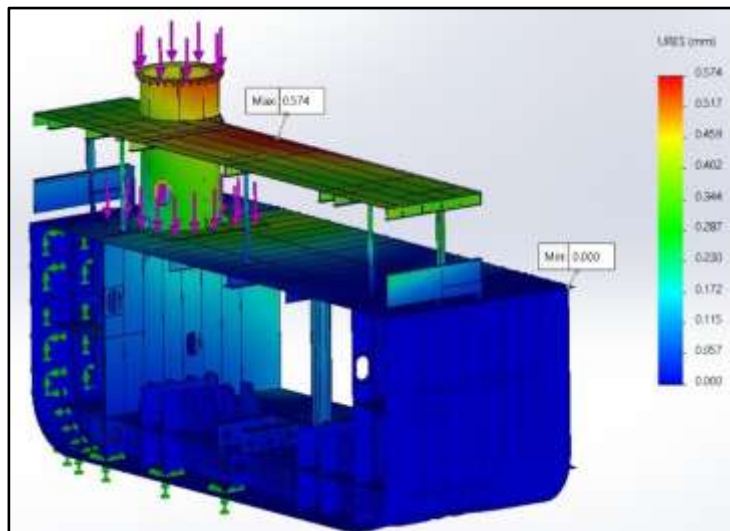


Gambar 12. *Von Mises* Variasi 2

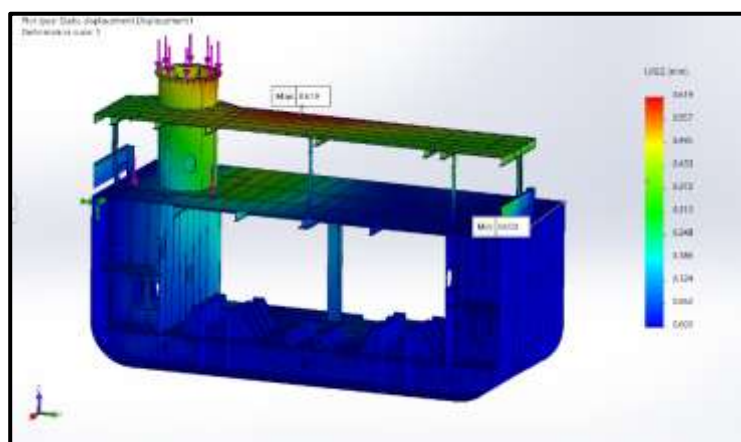
2. Deformasi Total, untuk mengetahui besarnya perubahan bentuk *sideboard* akibat pembebanan, adapun hasil analisis deformasi pada setiap model variasi dapat dilihat pada Gambar 13 sampai dengan Gambar 15.



Gambar 13. Deformasi Model Asli



Gambar 14. Deformasi Variasi 1



Gambar 15. Deformasi Variasi

3. Faktor keamanan (*Safety Factor*) merupakan nilai yang diperoleh dari perbandingan antara tegangan luluh (*yield strength*) material dengan tegangan maksimum yang dihasilkan dari analisis. Nilai tersebut digunakan untuk mengevaluasi tingkat keamanan suatu struktur dalam menahan beban kerja. Semakin besar nilai faktor keamanan, semakin besar pula kemampuan struktur untuk menahan beban tanpa mengalami kegagalan akibat mencapai batas tegangan luluh material.

Visualisasi hasil analisis berupa distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan ditampilkan dalam lampiran. Perbandingan hasil antar variasi konfigurasi modifikasi *Stiffener* dan *Bracket* kemudian disajikan dalam bentuk tabel agar dapat ditentukan konfigurasi yang paling efisien, yaitu yang memiliki kekuatan memadai dan mampu menyalurkan beban secara merata, adapun perbandingan hasil analisis berdasarkan regulasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Analisis Sesuai Regulasi

Model Variasi	Hasil Tegangan (Mpa)	Tegangan Izin (Mpa)	<i>Safety Factor</i>	Standard	Deformasi (mm)	Beban yang Diberikan (Ton)	Status
Model Asli	98,7	165	2,5	1,52	0.6	33	Memenuhi
Variasi 1	86	165	2,9	1,52	0.57	33	Memenuhi
Variasi 2	92	165	2,7	1,52	0.6	33	Memenuhi

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kekuatan struktur pondasi *crane* kapal *utility* menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM), seluruh variasi konfigurasi *bracket* dan *stiffener* memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan ketentuan *Bureau Veritas* (BV). Hal ini ditunjukkan oleh nilai tegangan *Von Mises* pada setiap model yang masih berada di bawah tegangan izin sebesar 165 MPa, nilai deformasi yang tidak melebihi batas maksimum 5 mm, serta nilai *safety factor* yang lebih besar dari batas minimum 1,52. Dengan demikian, model asli, Variasi 1, dan Variasi 2 dinyatakan mampu menahan beban statis sebesar 33 ton dan memenuhi kriteria keamanan struktur yang dipersyaratkan. Berdasarkan hasil perbandingan ketiga variasi, Variasi 1 menunjukkan kinerja struktur yang paling optimal. Variasi ini menghasilkan nilai tegangan *Von Mises* terendah sebesar 86 MPa, deformasi terkecil sebesar 0,57 mm, serta nilai *safety factor* tertinggi sebesar 2,9 dibandingkan model lainnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan dan penataan *bracket* serta *stiffener* pada area yang mengalami konsentrasi tegangan mampu meningkatkan distribusi beban dan kekakuan struktur secara lebih efektif. Oleh karena itu, konfigurasi Variasi 1 direkomendasikan sebagai desain pondasi *crane* yang paling baik karena memberikan tingkat keamanan struktur yang lebih tinggi serta telah memenuhi persyaratan kekuatan sesuai standar *Bureau Veritas* (BV).

4.1 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar analisis yang dilakukan tidak hanya terbatas pada pembebanan statis, tetapi juga dikembangkan dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan dinamis yang terjadi selama operasi *crane* di atas kapal. Analisis tersebut dapat dilakukan dengan memasukkan pengaruh gerakan kapal akibat gelombang, perubahan sudut boom, variasi radius kerja *crane*, serta beban kejutan (*impact load*) yang timbul selama proses pengangkatan dan pemindahan beban. Dengan mempertimbangkan kondisi operasional yang lebih realistis, hasil analisis diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai respons dan perilaku struktur pondasi *crane* selama masa operasinya. Selain itu, analisis kelelahan material (*fatigue analysis*) perlu dilakukan, terutama pada area sambungan antara *bracket*, *stiffener*, dan pelat pondasi, karena bagian-bagian tersebut merupakan lokasi yang berpotensi mengalami pembebanan berulang sehingga lebih rentan terhadap terjadinya retak maupun kegagalan struktur dalam jangka panjang. Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk melakukan optimasi berat konstruksi dengan mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan, kekakuan, dan massa struktur. Dengan demikian, peningkatan kapasitas struktur dapat dicapai tanpa menyebabkan penambahan berat yang berlebihan, sehingga efisiensi desain, kemudahan proses fabrikasi, serta performa kapal secara keseluruhan dapat tetap dipertahankan.

5. Daftar Pustaka

- [1] M. Fendy Firmansyah and Erifive Pranatal, “Analisis Kekuatan Struktur Deck Akibat Penambahan Boat Crane Pada Kapal Fast Utility Vessel 40 M Dengan Metode Fem Analysis,” 2025.
- [2] A.-N. Magnolia, “ANALISIS STATIK LINEAR STRUKTUR CRANE MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA BERBASIS SIMULASI BEAM PADA BERBAGAI MATERIAL DAN KONDISI PEMBEBANAN,” 2025.
- [3] A. Trihantoro, I. P. Mulyatno, and W. Amiruddin, “Analisa Kekuatan Struktur Deck Crane Kapal Tanker 6500 DWT Menggunakan Metode Elemen Hingga,” Apr. 2022.
- [4] A. J. Asmara, I. Nadiansyah, A. J. Magmadian, A. A. Dhombo, H. Sraun, and A. B. Prasetyo, “Desain dan Analisis Tegangan Double Crane Hook Kapasitas 5 Ton Menggunakan Metode Elemen Hingga,” 2023.
- [5] E. S. G. Rean, P. N. A. Nugroho, and E. Sofia, “Finite Element-Based Structural Evaluation of a Rescue Boat Crane Mount on LCT 153 Vessel,” *J. Konversi Energi Dan Manufaktur*, Jul. 2025, doi: 10.21009/JKEM.10.2.3.
- [6] D. A. Saputra, E. Pranatal, and B. Setyono, “Analisis Kekuatan Pondasi Mesin Kapal SPOB Menggunakan Finite Element Method”.
- [7] A. A. Anfara and E. Pranatal, “Analisis Kekuatan Pondasi Towing winch Kapal OSV S-140 Menggunakan Metode FEM”.
- [8] K. Fajri and I. P. Mulyatno, “Analisa Kekuatan Deck pada Kapal Landing Craft Tank (LCT) 1100 DWT akibat Perubahan Muatan Menggunakan Metode Elemen Hingga,” vol. 11, no. 2, 2023.
- [9] Bureau Veritas (BV) NR467 – Rules for the Classification of Steel Ships, Part E, Chapter 8, Section 4, Article 5 mengenai Allowable Stress.