

Pemodelan dan Analisis Beban pada Pondasi *Windlass* Kapal *Tugboat* Menggunakan Metode Elemen Hingga

Ranjit^{*1}, Novebriantika, S.T., M.T.* dan 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: ranjitpratama1234@gmail.com

Abstrak

Kekuatan dudukan mesin jangkar di kapal tugboat sangatlah penting demi kelancaran proses berlabuh, mengingat resiko kegagalan akibat konsentrasi tegangan tinggi dari transfer beban. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kapabilitas struktural pondasi dalam menahan pembebanan yang diaplikasikan. Dengan mengaplikasikan Metode Elemen Hingga (MEH) melalui simulasi perangkat lunak *Solidworks*, model 3D pondasi dengan menggunakan material ASTM A36 dianalisis statis dengan beban 3000 kg. Parameter kunci yang diinventigasi adalah tegangan *Von Mises*, deformasi, dan Faktor Keamanan. Hasil simulasi menunjukkan tegangan *Von Mises* maksimum 18.41 MPa berada secara signifikan di bawah batas luluh material yaitu 250 Mpa, mengindikasikan tidak terjadi *yielding*. Deformasi maksimum tercatat sebesar 0.080 mm, menunjukkan kekakuan yang memadai. Nilai minimum *Factor of Safety* 13.6 jauh melampaui standar minimum *rules* BKI. Dengan demikian, disimpulkan bahwa desain pondasi dinyatakan aman secara struktural untuk menahan beban operasional 3000 kg.

Kata kunci : Mesin Jangkar, Tugboat, Metode Elemen Hingga, Analisis Tegangan, Solidworks, ASTM A36

Abstract

The strength of the anchor engine mount on a tugboat is very important for the smooth running of the anchoring process, given the risk of failure from high stress concentrations caused by load transfer. This research aims to evaluate the foundation's structural capability to withstand the applied loads. Applying the Finite Element Method (FEM) via Solidworks software simulation, a 3D model of the foundation, using ASTM A36 material, was statically analyzed under a 3000 kg load. The key parameters investigated were Von Mises Stress, deformation and Factor of Safety. The simulation result showed that the maximum Von Mises Stress 18.41 was significantly below the material's yield strength 250 MPa, indicating that no yielding occurred. The maximum recorded deformation was 0.080 mm, which indicates adequate stiffness. The minimum Factor of Safety of 13.6 far exceeds the minimum standard set by BKI regulations. Consequently, it is concluded that the foundation design is structurally safe to withstand the 3000 kg operational load.

Keywords : Windlass, Tugboat, Finite Element Method, Stress Analysis, Solidworks, ASTM A36

1 Pendahuluan

Kapal *Tugboat* merupakan jenis kapal tunda, Kapal ini digunakan di pelabuhan maupun untuk pelayaran pantai, serta cocok untuk kegiatan menarik, mendorong, dan menggandeng kapal [1]. Untuk menjalankan fungsinya, kapal *tugboat* dilengkapi dengan berbagai peralatan vital, salah satunya adalah *windlass* atau mesin mesin derek jangkar [2]. Kekuatan struktural pondasi atau pondasi *windlass* sangat vital. Sebagai penopang utama, dudukan ini harus mampu menahan beban dan tegangan yang ekstrem saat berlabuh, khususnya saat menghadapi kondisi laut yang berat. Transfer beban dari *windlass* ke dudukan dapat menciptakan titik – titik konsentrasi tegangan tinggi, yang bisa berujung pada kerusakan struktural jika desainnya tidak memadai.

1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana kemampuan pondasi *windlass* pada kapal *tugboat* dengan material ASTM A36 dalam menahan beban operasional sebesar 3000 kg berdasarkan analisis metode elemen hingga?
2. Sejauh mana tegangan maksimum yang terjadi pada pondasi *windlass* berada dibawah batas *yield strength* material ASTM A36 sehingga dapat dikategorikan aman secara struktural?
3. Apakah nilai deformasi dan faktor keamanan hasil simulasi memenuhi batas toleransi serta standar minimum yang ditetapkan oleh BKI sehingga pondasi *windlass* layak digunakan dalam operasi?

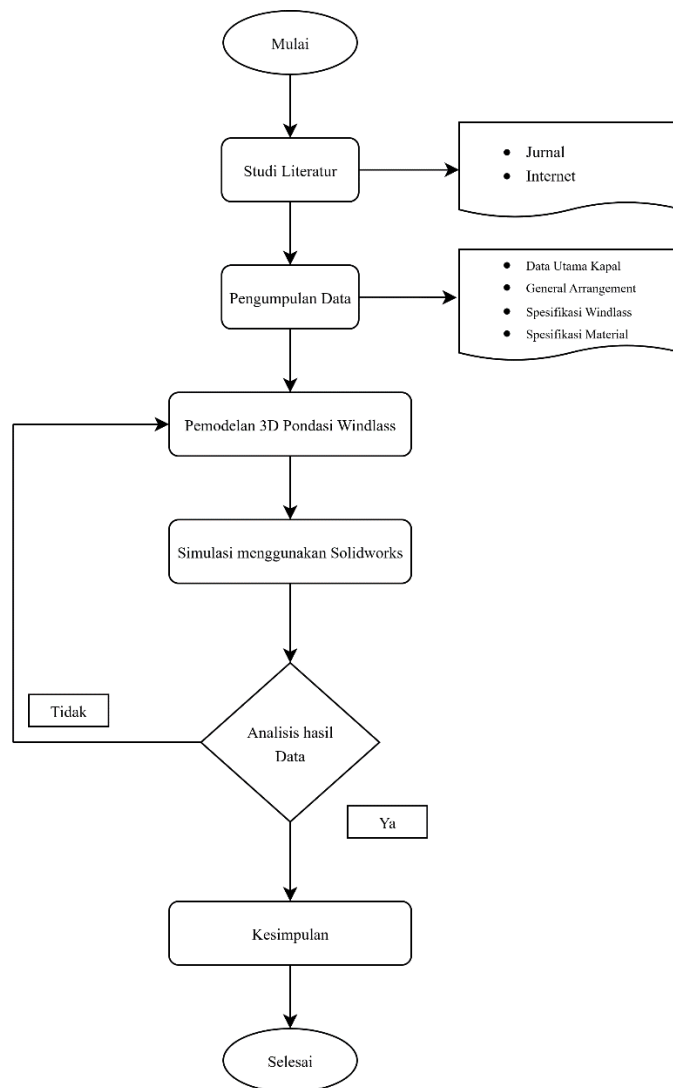
Tujuan dari analisis pondasi *windlass* ini adalah untuk memastikan bahwa pondasi *windlass* dengan dimensi yang telah ditentukan memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan beban yang diterapkan ke atasnya dan meminimalisir resiko gangguan struktural pada pondasi *windlass*. Metode Elemen Hingga (MEH) telah terbukti andal dalam menyelesaikan permasalahan dibidang mekanika kontinu, dengan menggunakan fitur statis untuk menganalisis tegangan dan regangan. Analisis tegangan dari desain itu sendiri dapat dengan mudah dihitung menggunakan perangkat lunak, salah satunya Solidworks. Oleh karena itu, peneliti melakukan simulasi dengan menggunakan *Software Solidworks* [5].

Dalam penelitian ini, batasan masalah yang muncul adalah analisis akan fokus pada respons struktural dari elemen – elemen ini dalam kondisi stabil atau diam. Simulasi statis tidak memperhitungkan beban dinamis seperti getaran dari peralatan yang beroperasi, suhu, korosi, ombak, dan tekanan. Nilai beban yang akan diberikan sebesar 3000 kg didapatkan dari beban *windlass* yang dipakai. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah memastikan bahwa pondasi *windlass* dengan dimensi yang telah ditentukan memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan beban yang telah diterapkan keatasnya, dengan meminimalkan resiko gangguan atau kegagalan pada sistem jangkar yang disebabkan oleh masalah struktural.

2 Metodologi Penelitian

2.1. Diagram Alur

Dalam pengujian ini, ada beberapa tahapan yang harus dilalui yaitu studi literatur, pengumpulan data, pemodelan 3D, simulasi, analisis hasil data dan kesimpulan. Alur tahapan proses pengujian dapat ditampilkan dengan diagram alur pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur

2.2. Studi Literatur

Tahap ini mencakup penelusuran, evaluasi, dan kompilasi sumber – sumber pustaka yang kredibel serta relevan untuk dijadikan landasan referensi dalam penelitian ini. Sebagai contoh, penelitian oleh Dapas (2011) menerapkan metode ini untuk analisis struktur rangka batang, dimana setiap elemen diasumsikan hanya mengalami gaya tekan dan tarik aksial. Demikian pula, Nicholasta, Kurdi, & Satrijo (2023) menggunakan MEH untuk menganalisis tegangan pada bejana tekan industri yang dikenai beban berupa tekanan internal dan gradien termal untuk memastikan integritas strukturalnya. Dan Alhakim (2021) memfokuskan analisis pada simulasi beban operasional ekstrem untuk optimasi desain profil. Kedua studi tersebut berhasil menunjukkan efektivitas MEH, fokus kajiannya terbatas pada struktur rekayasa darat dengan karakteristik pembebanan yang spesifik dan berbeda dari aplikasi maritim. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengisi kekosongan tersebut dengan mengaplikasikan metode elemen hingga pada konteks maritim yang spesifik, dan penelitian ini berfokus pada verifikasi desain awal (*existing design*) yaitu untuk menganalisis kekuatan pondasi *windlass* pada kapal *tugboat*. Keunggulan penelitian ini terletak pada analisis komponen 3D yang kompleks dan kritis, yang mengalami

konsentrasi tegangan. Dengan demikian, hasil analisis tidak hanya berfungsi sebagai verifikasi kekuatan struktural, tetapi juga dapat menjadi acuan praktis bagi peningkatan desain demi menunjang keselamatan operasional kapal sesuai standar klasifikasi.

2.2.1. Parameter yang Diuji

Penelitian ini menganalisis beberapa parameter utama, yaitu:

1. *Von Mises Stress*, untuk mengevaluasi apakah material sudah melampaui titik leleh (*yield strenght*)
2. *Safety Factor*, untuk menunjukkan seberapa aman struktur tersebut dari kegagalan.
3. *Deformation*, untuk mengetahui perubahan bentuk pada struktur.

2.3. Pengumpulan Data

2.3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan dikapal *Tugboat* yang berada di PT. XYZ yang memiliki panjang keseluruhan 26 meter, lebar 8 meter, dan tinggi 3,65 meter. PT. XYZ merupakan perusahaan galangan kapal yang bergerak di bidang pembangunan kapal baru. Perusahaan ini berlokasi di Sagulung, Kecamatan Batu Aji, Kota Batam, Provinsi Kepulauan Riau.



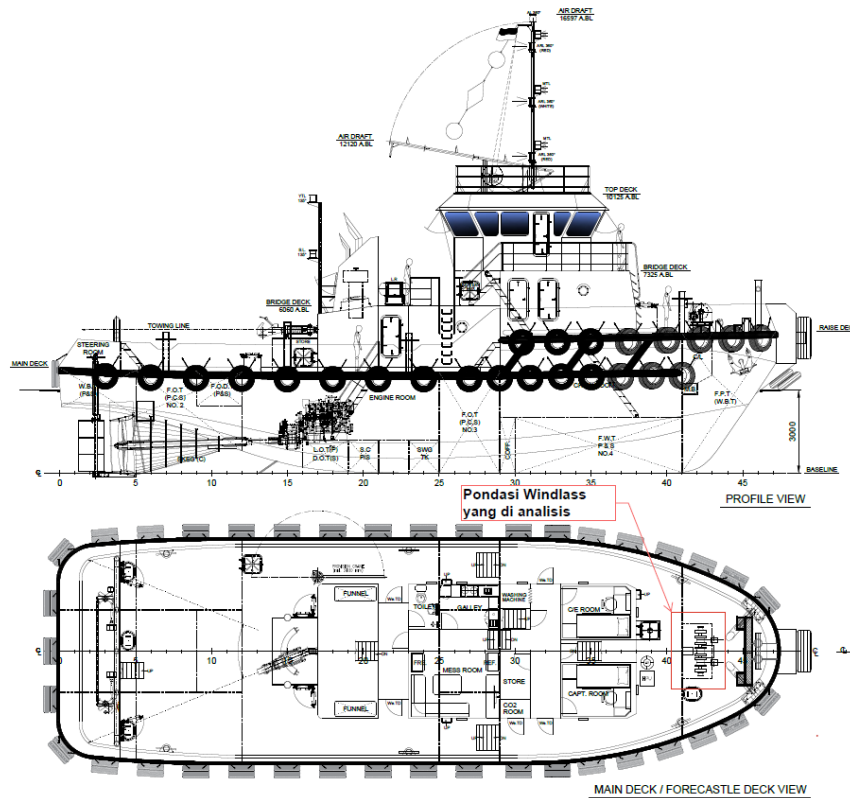
Gambar 2. Kapal *TugBoat*

2.3.2. *General Arrangement*

Tugboat adalah kapal kerja yang didesain secara spesifik untuk mengendalikan pergerakan kapal lain melalui metode penarikan (*towing*) dan pendorongan (*pushing*). Prinsip desainnya yang mengutamakan rasio daya terhadap dimensi yang tinggi memungkinkan kapal ini memiliki kapabilitas manuver superior di lingkungan perairan terbatas seperti pelabuhan. Untuk menjamin performa operasional, rancang bangunnya yang stabil didukung oleh sistem propulsi bertenaga signifikan yang mampu melawan tagangan dinamis secara efektif.

Tabel 1. Dimensi Utama Kapal

Dimensi	
Panjang	26 m
Lebar	8 m
Tinggi	3,65 m



Gambar 3. General Arrangement

2.3.3. Spesifikasi Windlass

Setiap komponen permesinan diatas kapal harus dipilih berdasarkan kesesuaiannya terhadap kebutuhan operasional dan standar yang berlaku. Mesin jangkar yang menjadi objek dalam penelitian ini memiliki serangkaian spesifikasi yang menjadi dasar kriteria pemilihan. Rincian mengenai spesifikasi tersebut, dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Windlass

Dimensi	
Panjang	1.810 mm
Lebar	770 mm
Tinggi	1.000 mm

2.3.4. Spesifikasi Material Grade

Penentuan material yang digunakan pondasi windlass perlu memperhatikan seperti kekuatan bahan, kualitas komponen, dan biaya. Pada material ASTM A36 Steel memiliki minimum yield strength 250 MPa dan tensile strength 400 MPa [6]. Berikut material grade dari ASTM A36 dapat ditampilkan pada tabel 3 dibawah ini.

Tabel 3. Material Grade

MATERIAL	THICKNESS	YIELD STRENGTH	TENSILE STRENGTH
ASTM A36	3-100 mm	250 MPa	400 MPa

2.3.5. Penentuan Beban Pada Pondasi Windlass

Dalam penelitian ini, salah satu komponen beban mati (*dead load*) yang diperhitungkan

adalah berat dari mesin windlass itu sendiri. Mesin ini memiliki massa 29400 N. N dikarenakan massa jenis yang digunakan dalam software yaitu Newton. Maka berat mesin windlass yaitu 3000 kg bila di konversikan dalam satuan N menjadi 29400 N. Beban ini menjadi acuan utama dalam analisis kekuatan struktur pondasi *windlass*. Konversi massa ke gaya dilakukan dengan rumus berikut.

$$F = m \cdot g \quad [1]$$

Keterangan:

F = gaya (Newton, N)

m = massa (kilogram, kg)

g = percepatan gravitasi (9.81 m/s² dipermukaan bumi)

2.4. Pemodelan 3D Pondasi *Windlass*

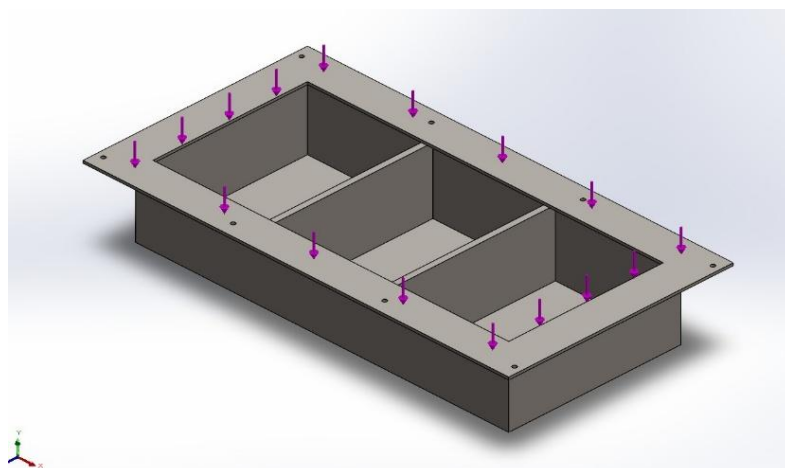
Pada penelitian ini desain 3D pondasi *windlass* kapal *tugboat* menggunakan *software solidworks*. *Software Solidworks* adalah perangkat lunak CAD (*Computer-Aided-Design*) yang berbasis 3D, digunakan untuk merancang, memodelkan, dan menganalisis komponen dan struktur teknik. Ukuran pondasi *windlass* yang digunakan dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 4. Dimensi Pondasi *Windlass*

Dimensi Pondasi <i>Windlass</i>	
Panjang	1.460 mm
Lebar	770 mm
Tinggi	266 mm

Tabel 5. Dimensi Plat di tengah

Dimensi Plat di tengah	
Panjang	530 mm
Lebar	256 mm
Tebal	20 mm



Gambar 4. 3D Pondasi *Windlass*

2.5. Simulasi menggunakan *Solidworks*

Untuk metode yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan metode elemen hingga (MEH) dibawah ini akan dijabarkan bagaimana untuk melakukan pengujian *statis* menggunakan

solidworks Simulation. Langkah – langkah simulasi untuk mengetahui beban statis dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Pembuatan desain menggunakan *software solidworks*.
2. Kemudian, memulai study static *solidworks simulation*.
3. Selanjutnya pemilihan material dengan cara klik kanan kemudian pilih "edit material" lalu pilih "ASTM A36" lalu klik "apply" dan "close".
4. Selanjutnya klik "mesh" dan pilih "create mesh", lalu klik "ok".
5. Lalu penempatan titik tumpuan (*fixed geometry*) pada pondasi *windlass*.
6. Kemudian penempatan beban pengujian. Disini beban yang diberikan pada pondasi *windlass* sebesar 3000 kg yang didapatkan dari *windlass* yang dipakai dan diberikan ke arah *direction -y*.
7. Selanjutnya menjalankan "Run This Study".
8. Memperoleh hasil pengujian beban statis.

Pada pengujian ini, acuan yang dipakai untuk pengujian *stress* pada *solidworks*, batasan maksimum yang dipakai sebesar 250 Mpa [7].

3 Analisis Hasil Data

Data diperoleh dari hasil simulasi pengujian pada pondasi *windlass* yang dikenai pembebanan sebesar 3000 kg, dengan menggunakan *software Solidworks*.

3.1. Pengujian Stress

Pada gambar 5 & 6 dibawah ini, menampilkan hasil pengujian tegangan / *stress* pada pondasi *windlass* dilakukan dengan tipe *Von Mises*. Berdasarkan ketentuan yang tercantum dalam dokumen *Rules BKI Vol. II 2017 Rules for Hull*, setiap elemen struktural wajib melalui proses analisis guna memastikan bahwa tagangan yang timbul berada di bawah batas tagangan ijin material yang telah ditetapkan sesuai standar klasifikasi. Dengan nilai maksimal 18.409.474.00N/mm² (MPa) dan nilai minimal 0.00N/mm² (MPa). Nilai maksimal tegangan dari material ASTM A36 adalah 250 MPa. Karena nilai maksimal pengujian tegangan / *stress* dari pondasi *windlass* yang menggunakan material ASTM A36 lebih rendah dari nilai tegangan maksimal material ASTM A36, maka pondasi *windlass* di kategorikan aman. Analisis tegangan pada pondasi *windlass* dilakukan untuk memastikan bahwa gaya kerja tidak melampaui batas ijin material. Perhitungan tegangan normal didasarkan pada hubungan antara gaya dan luas penampang, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [2]$$

Keterangan:

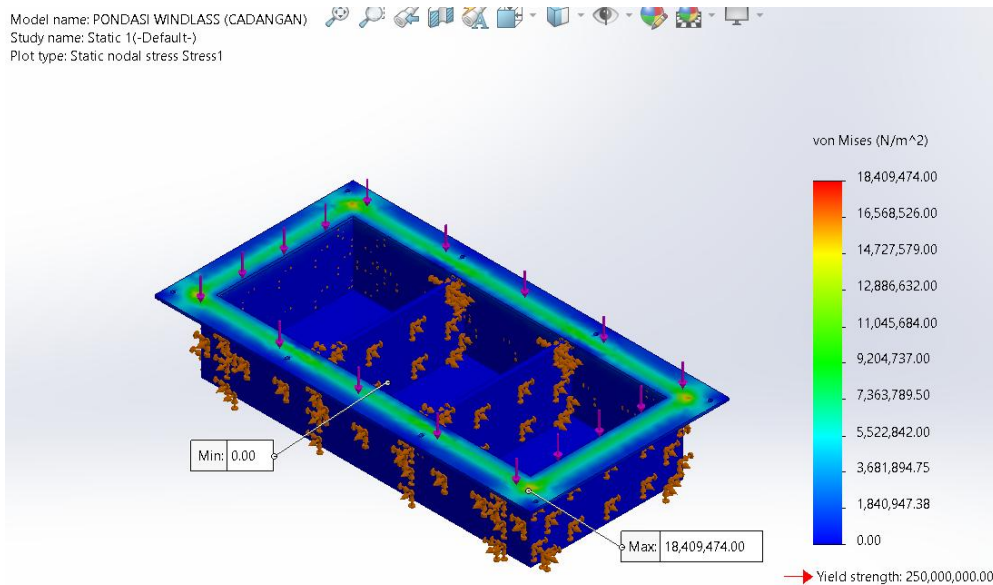
σ = tegangan normal (Pa atau MPa)

F = gaya yang bekerja tegak lurus penampang (N)

A = luas penampang (m²)

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0.00N/m ² Node: 18501	18,409,474.00N/m ² Node: 15903

Gambar 5. Hasil Analisis *Von Mises Stress*



Gambar 6. Grafik hasil analisis Von mises stress

3.2. Pengujian Displacement

Pada gambar 7 & 8 di bawah ini, menampilkan hasil pengujian displacement pada pondasi windlass merupakan langkah penting dalam memastikan bahwa sistem pendukung mampu menahan beban dan tetap stabil tanpa mengalami pergeseran signifikan. Nilai perubahan yang diperoleh dari simulasi dengan batas toleransi yang di tetapkan oleh Rules BKI vol. II 2017 Rules for Hull. Perubahan maksimum yang ditunjukkan pada diagram berwarna merah sebesar 0.080 mm dan perubahan minimum sebesar 0 mm. Deformasi struktur dianalisis menggunakan pendekatan elastisitas linear, dengan rumus berikut digunakan untuk menghitung perpindahan akibat gaya aksial:

$$\delta = \frac{F.L}{A.E} \quad [3]$$

Keterangan:

δ = deformasi (m atau mm)

F = gaya aksial (N)

L = panjang awal elemen (m)

A = luas penampang (m²)

E = modulus elastisitas material (Pa)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad [4]$$

Keterangan:

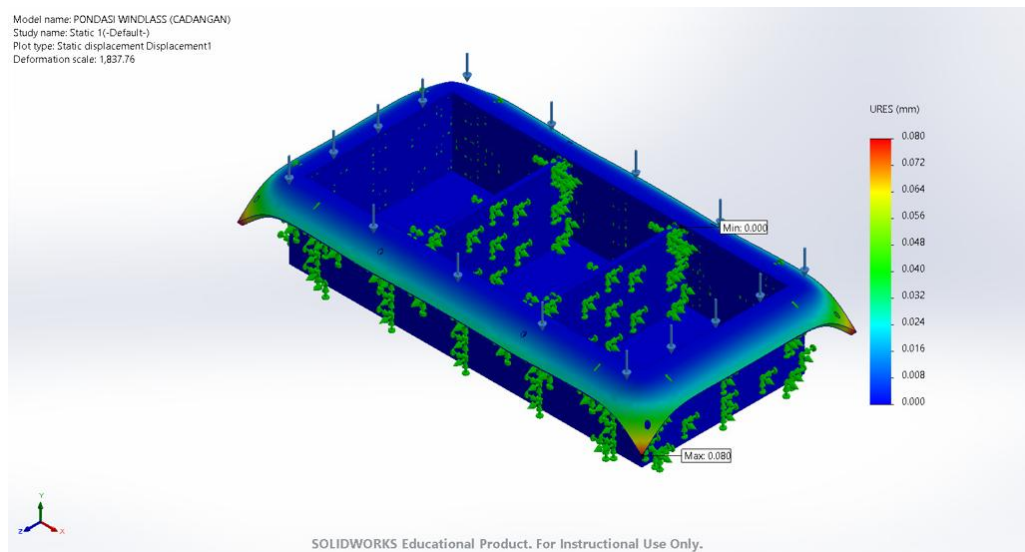
ε = regangan (strain)

ΔL = perubahan panjang

L = panjang awal

Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000mm Node: 1	0.080mm Node: 45

Gambar 7. Hasil Analisis Displacement



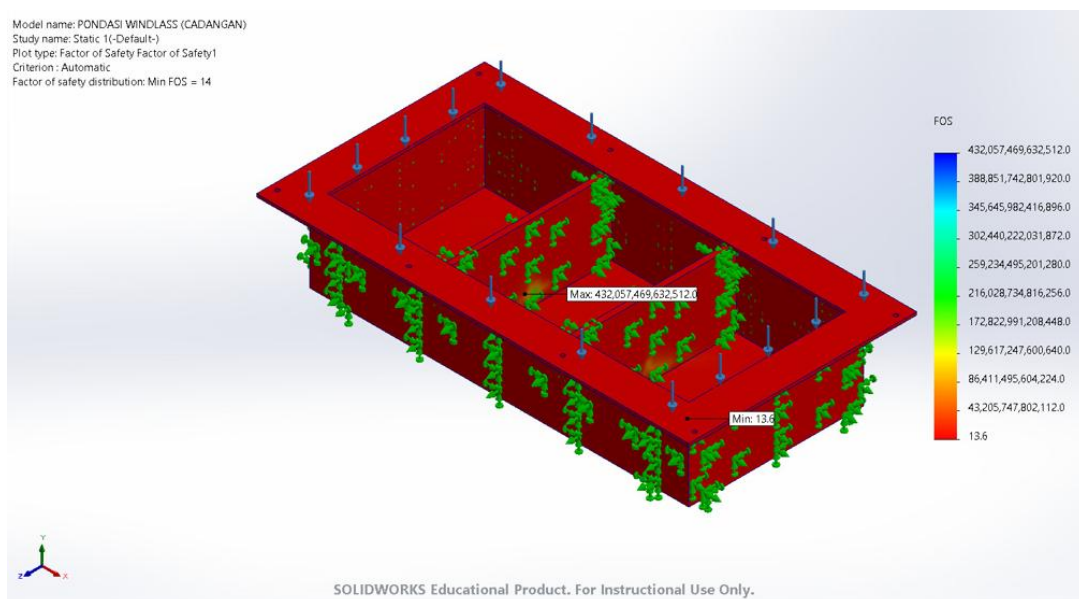
Gambar 8. Grafik hasil analisis *Displacement*

3.3. Pengujian Factor of Safety

Pada gambar 9 & 10 di bawah ini, menampilkan hasil dari pengujian factor of safety atau faktor keamanan pada pondasi *windlass* digunakan untuk menunjukkan apakah pondasi *windlass* tersebut aman digunakan. Berdasarkan hasil yang didapatkan dari pengujian tersebut menunjukkan angka faktor keamanan minimum (FOS) sebesar 13.6. Pengujian faktor keamanan beban statis (S) umum sebesar 1,1 mengacu pada *Rules BKI Konsolidasi Vol. II 2022 Rules for Hull minimum safety factor* [8]. Dengan demikian rangka ini mampu menahan beban sebesar 3000 kg dari segi faktor keamanan.

Name	Type	Min	Max
Factor of Safety1	Automatic	13.6 Node: 15903	432,057,469,632,512.0 Node: 18501

Gambar 9. Hasil Analisis *Safety Factor*



Gambar 10. Grafik hasil *Safety Factor*

4 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah memastikan bahwa struktur pondasi *windlass* mampu menahan beban dengan aman dan kaku. Tujuan utamanya adalah meminimalkan resiko kegagalan struktural pada pondasi yang disebabkan oleh beban kerja saat *windlass* beroperasi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM). Dalam penelitian ini, dilakukan simulasi dan analisis beban menggunakan metode elemen hingga untuk menentukan distribusi *stress*, deformasi, dan *safety factor* pada pondasi *windlass* yang digunakan sebagai penopang *windlass* dengan nilai beban 3000 kg. Berdasarkan hasil simulasi, pengujian *stress* pada pondasi *windlass* dengan menggunakan material *carbon steel* ASTM A36, struktur pondasi *windlass* memperoleh tegangan maksimum 18.41 Mpa dan tegangan minimum 0.00 Mpa. Nilai tegangan maksimum ini masih dibawah nilai *yield strength* sebesar 250 Mpa sehingga bisa dikatakan bahwa struktur ini kuat menahan benturan. Dan pada pengujian displacement didapatkan perubahan maksimum sebesar 0.80 mm dan perubahan minimum sebesar 0 mm. Dan pada pengujian *safety factor*, didapatkan hasil *safety factor* dengan nilai minimum 13.6. Dengan demikian rangka ini mampu menahan beban sebesar 3000 kg dan dari segi faktor keamanan, karena nilai *safety factor* pada pondasi *windlass* ini melebihi batas nilai minimum. Hal ini berdasarkan nilai minimum *safety factor* yaitu sebesar 1,1 yang ditetapkan oleh *Rules* BKI Vol. II 2017 *Rules for Hull*. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pondasi *windlass* mampu menahan beban yang telah dirancang sebesar 3000 kg berdasarkan data dari hasil pengujian analisis.

5 Daftar Pustaka

- [1] Damanik, L., Mulyatno, I. P., & Arswendo A., B. (2016). KAJIAN TEKNIK KEKUATAN KONSTRUKSI KAPAL *TUGBOAT* 2 x 800 HP DENGAN METODE ELEMEN HINGGA. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 4(1), 113–122.
- [2] Alhakim, F. (2021). ANALISA PERHITUNGAN KEKUATAN STRUKTUR PONDASI *WINDLASS* PADA KAPAL *HARBOUR TUG* DENGAN METODE ELEMEN HINGGA [Tugas Akhir, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya].
- [3] Dapas, S. O. (2011). Aplikasi metode elemen hingga pada analisis struktur rangka batang. *Jurnal Ilmiah MEDIA ENGINEERING*, 1(2), 156–160.
- [4] Nicholasta, K. L., Kurdi, O., & Satrijo, D. (2023). Analisa tegangan pada bejana tekan berskala industri menggunakan metode elemen hingga. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 11(2), 123–124.
- [5] Prasetyo, E., Hermawan, R., Ridho, M. N. I., Hajar, I. I., Hariri, H., & Pane, E. A. (2020). Analisis kekuatan rangka pada mesin transverse ducting flange (TDF) menggunakan software solidworks. *Rekayasa*, 13(3), 235–242.
- [6] N. T. U. K. 21 F. Str. , K. 61002, U. Prof. Dr. Dmitry Breslavsky, “European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database.”
- [7] Restu, F., Hakim, R., & Anwar, F. S. (2017). Analisa kekuatan material ASTM A36 pada konstruksi ragam terhadap variasi gaya cekam dengan menggunakan software SolidWorks 2013. *Jurnal Integrasi*, 9(2), 118–123.
- [8] Rules BKI Vol. II 2017. Rules for Hull
- [9] Rules BKI Konsolidasi Vol. II 2022. Rules for Hull