

Analisis Kekuatan Struktur *Swamp Barge Majestic Megadrill* Dengan Penerapan Metode *Refloating* Menggunakan *A-Frame & Waterbag*

Jonathan Aritonang¹, Tiwi Gustria Ningsih² and Ihsan Saputra³

*** Politeknik Negeri Batam**

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: artjonathan.ja@gmail.com

Abstrak

Swamp Drill Barge Majestic Megadrill merupakan unit pengeboran tipe *self-elevating barge* yang dioperasikan oleh Megadrill, sebuah perusahaan kontraktor pengeboran yang bergerak di bidang jasa pengeboran minyak dan gas bumi dengan spesialisasi operasi di wilayah perairan dangkal (*shallow water* dan *swamp area*). Unit pengeboran ini dirancang untuk mendukung kegiatan eksplorasi dan pengembangan lapangan minyak dan gas pada kondisi geografis dengan keterbatasan kedalaman air. Pada suatu kondisi operasi, *barge* mengalami tenggelam sebagian (*partially submerged condition*), sehingga diperlukan analisis teknis terhadap struktur kapal akibat pembebanan selama proses pemulihan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis struktur pada bagian *main hull* dan *A-frame support* menggunakan pendekatan analisis rekayasa berbasis *Finite Element Analysis* (FEA). Metode penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pengumpulan data teknis kapal, pembuatan model 3D struktur utama menggunakan perangkat lunak SolidWorks, serta simulasi pembebanan menggunakan SolidWorks Simulation dengan kondisi batas yang disesuaikan dengan kejadian di lapangan. Beban yang dianalisis meliputi efek beban tambahan dari sistem *A-frame* dan *water bag* sebesar 55 ton yang digunakan dalam proses pemulihan daya apung (*refloating*). Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah ASTM A36, sedangkan evaluasi hasil tegangan akibat pembebanan mengacu pada ketentuan tegangan yang diizinkan (*allowable stress*) berdasarkan American Bureau of Shipping (ABS) Class. Nilai momen jungkit (*righting moment*) yang diperoleh dari perhitungan menggunakan *water bag* 55 ton adalah sebesar 5.781.513,39 N.m. Nilai maksimum *von Mises stress* yang terjadi adalah sebesar 59,8 MPa pada struktur *A-frame* dan 85,9 MPa pada struktur *barge*, dengan kondisi kritis terjadi pada bagian *existing web*. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi masih memenuhi batas *allowable stress* ABS sebesar 149,7 MPa, dengan nilai *safety factor* sebesar 1,67, sehingga struktur dinyatakan aman terhadap pembebanan yang dianalisis.

Kata kunci: *Swamp Barge, FEA, Capsizing, Solidworks*

Abstract

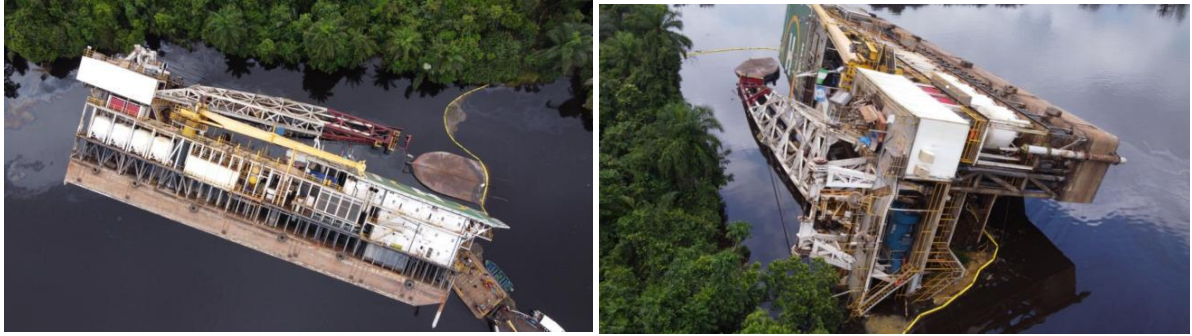
The Swamp Drill Barge Majestic Megadrill is a self-elevating barge type drilling unit operated by Megadrill, a drilling contractor company specializing in oil and gas services within shallow water and swamp areas. This drilling unit is designed to support exploration and field development activities in geographical conditions with limited water depth. During an operational condition, the barge experienced a partially submerged state, necessitating a technical analysis of the ship's structure due to the loading during the recovery process. This study aims to analyze the structural components of the main hull and A-frame support using a Finite Element Analysis (FEA) engineering approach. The research methodology was conducted through several stages, including the collection of technical ship data, the creation of a 3D main structure model using SolidWorks software, and loading simulations using SolidWorks Simulation with boundary conditions adjusted to field occurrences. The analyzed loads include the additional effects from the A-frame system and a 55-ton water bag used in the refloating process. The material used in this study is ASTM A36, while the evaluation of stress results due to loading refers to the allowable stress requirements based on the American Bureau of Shipping (ABS) Class. The righting moment value

obtained from the calculations using the 55-ton water bag is 5,781,513.39 N.m. The maximum von Mises stress occurred at 59.8 MPa on the A-frame structure and 85.9 MPa on the barge structure, with critical conditions occurring on the existing web. The analysis results indicate that the stress levels remain within the ABS allowable stress limit of 149.7 MPa, with a safety factor of 1.67. therefore, the structure is declared safe for the analyzed loading conditions.

Keywords: *Swamp Barge, FEA, Capsizing, Solidworks*

1 Pendahuluan

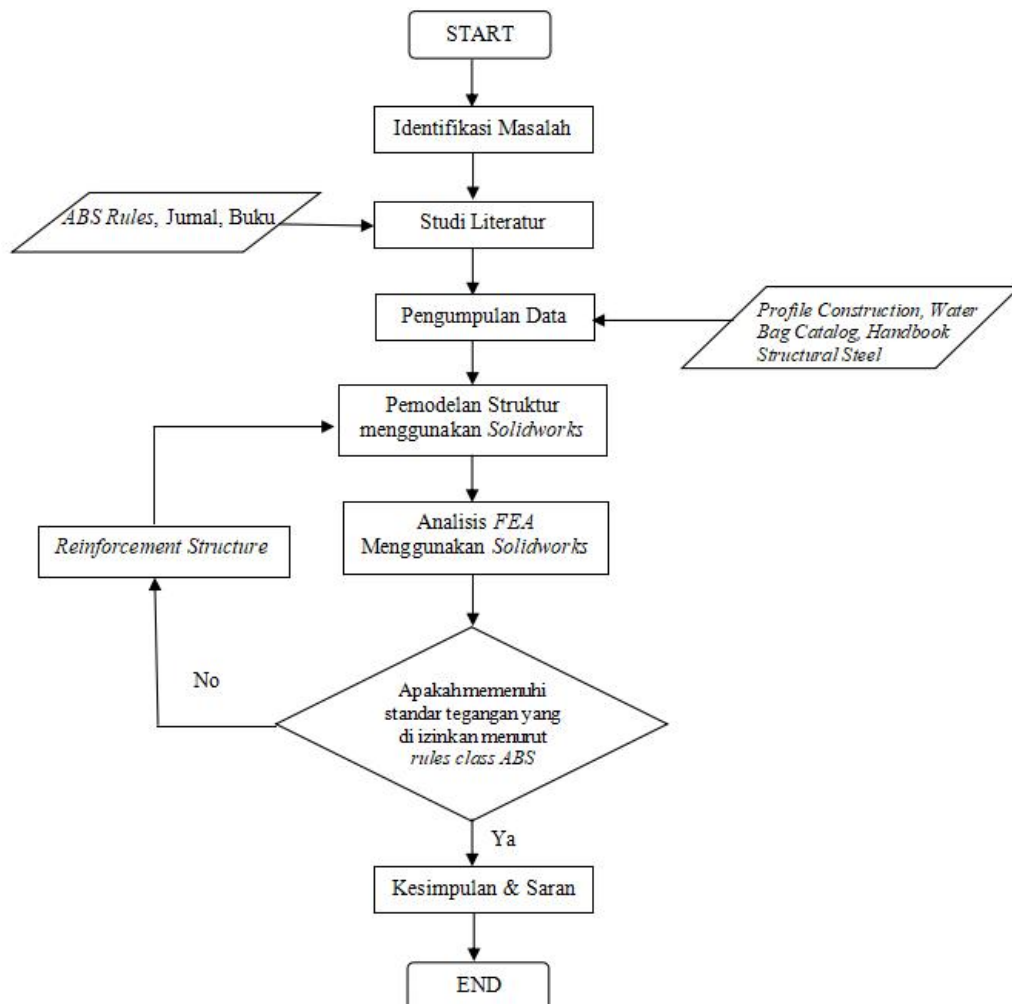
Industri minyak dan gas bumi merupakan salah satu sektor strategis yang membutuhkan dukungan sarana dan prasarana pengeboran yang andal, khususnya pada wilayah perairan dangkal dan daerah rawa (*swamp area*). Kondisi geografis tersebut menuntut penggunaan unit pengeboran khusus yang mampu beroperasi secara efektif pada kedalaman air yang terbatas serta memiliki mobilitas dan stabilitas yang memadai. Megadrill merupakan perusahaan kontraktor pengeboran yang bergerak di bidang jasa pengeboran minyak dan gas, dengan spesialisasi pada operasi pengeboran di perairan dangkal (*shallow water*), rawa (*swamp*), dan *inland water*. Perusahaan ini mengoperasikan berbagai unit rig pengeboran, termasuk *Swamp Drill Barge*, yang dirancang khusus untuk mendukung kegiatan eksplorasi dan pengembangan lapangan minyak dan gas di wilayah dengan keterbatasan kedalaman air. Salah satu unit pengeboran yang dioperasikan oleh Megadrill adalah *Swamp Drill Barge Majestic Megadrill*, yang menjadi objek kajian dalam penelitian ini. *Swamp Drill Barge Majestic Megadrill* merupakan jenis kapal pengeboran yang dirancang untuk beroperasi di wilayah perairan dangkal (*swamp area*) dalam kegiatan eksplorasi minyak dan gas bumi. Pada suatu kondisi operasi menuju lokasi ladang minyak di Sapele, Nigeria, kapal tersebut mengalami insiden tenggelam sebagian sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1[1]. Kapal tenggelam membutuhkan tindakan penyelamatan, metode penyelamatan kapal ke posisi semula dapat disesuaikan dengan kondisi kapal itu sendiri. Metode yang umum dilakukan seperti metode *lifting* dan *airbags* [2]. Metode pemulihan daya apung [3]. Kondisi geografis lokasi yang berupa sungai sempit dan dangkal membatasi penggunaan peralatan berat untuk menegakkan kembali posisi “Majestic”. Sebagai solusi, pihak Megadrill mengusulkan penerapan sistem yang memanfaatkan lengan kantilever (*A-Frame*) dan *water bag* (kantong berisi air sebagai pemberat), untuk membantu proses pengembalian kapal ke posisi semula. Situasi ini kemudian memunculkan kebutuhan akan kajian teknis guna menganalisis struktur serta merancang metode pengapungan kembali (*refloating*) dengan memperhatikan aspek keselamatan struktur dan efisiensi pelaksanaan. Metode tersebut dinilai efektif untuk kondisi perairan dangkal di mana penggunaan *crane barge* berukuran besar tidak memungkinkan. Dengan sistem ini, gaya apung tambahan diberikan secara bertahap hingga kapal mencapai kondisi seimbang dan kembali mengapung dengan stabil. Proses analisis dilakukan dengan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) berbasis perangkat lunak *Solidworks Simulation*, yang berfungsi untuk menampilkan distribusi tegangan (*stress distribution*) akibat beban kerja. Melalui hasil analisis ini, dapat diidentifikasi area-area kritis yang mengalami kerusakan dan diperoleh gambaran mengenai kapasitas kekuatan struktur. Hasil *Stress* kemudian harus mengacu kepada aturan yang mengatur tentang tegangan yang diizinkan (*allowable stress*) berdasarkan rules yang di gunakan yaitu American Bureau of Shipping (ABS) Class. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai pembebanan optimum water bag pada sistem A-Frame dan main hull Swamp Barge Majestic Megadrill yang mampu mengembalikan kapal ke posisi semula secara aman. Secara khusus, penelitian ini ditujukan untuk menghitung nilai momen jungkit (*righting moment*) yang diperlukan agar kapal dapat kembali ke posisi *even keel* setelah mengalami kemiringan akibat beban operasional. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan nilai tegangan maksimum, dan faktor keamanan (*factor of safety*) pada struktur *barge* dan *A-Frame*, dengan menggunakan pendekatan FEA guna mengevaluasi kemampuan struktur dalam menahan beban kerja tersebut secara aman dan efisien. Penelitian ini dibatasi pada ruang lingkup analisis struktur *Swamp Barge Majestic Megadrill* antara *frame 22* hingga *frame 28*, yang dianggap mewakili area kritis pada sistem *main hull* dan *A-Frame*. Pemodelan geometri serta proses analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak Solidworks dengan pendekatan *linear static analysis* untuk mengetahui distribusi tegangan dan faktor keamanan pada struktur. Nilai tegangan yang diizinkan dalam analisis ini mengacu pada standar dan ketentuan yang ditetapkan oleh American Bureau of Shipping (ABS). Selain itu, penelitian ini tidak mencakup analisis stabilitas kapal secara keseluruhan, melainkan hanya difokuskan pada respon struktur akibat pembebanan *waterbag*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademis maupun praktis dalam bidang rekayasa struktur lepas pantai dan perkapalan. Secara akademis, penelitian ini dapat menjadi referensi ilmiah dalam penerapan metode FEA untuk menganalisis respon struktur terhadap beban kerja besar.



Gambar 1. *Partially submerged condition swamp barge Majestic Megadrill*

2 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian dalam konteks teknik adalah rangkaian langkah teknis dan logis yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan rekayasa (*engineering problem*) secara terukur, teruji, dan bisa dipertanggungjawabkan.



Gambar 2. Diagram alir

2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian dalam tugas akhir ini adalah struktur *A-frame* dan *main hull swamp barge* majestic megadrill. Penelitian difokuskan pada analisis kekuatan struktur serta respon tegangan yang terjadi pada daerah sambungan dan titik tumpuan beban akibat adanya gaya yang bekerja pada *A-frame*.

2.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah metode analisis numerik berbasis elemen hingga (*Finite Element Method* - FEM) dengan tahapan sebagai berikut: [4]

- a. Studi Literatur
Melakukan kajian terhadap referensi terkait desain *A-frame*, struktur *hull barge*, teori kekuatan material, serta regulasi klasifikasi American Bureau of Shipping (ABS) Class.
- b. Pengumpulan Data
Data yang digunakan antara lain:
 - 1) Data dimensi dan konfigurasi *A-frame* serta *main hull swamp barge* Majestic Megadrill
 - 2) Data material, material yang digunakan dalam penelitian ini *grade* ASTM A36 [5]
 - 3) Data pembebanan : berat *waterbag* dan reaksi beban ke struktur *hull*

2.3 Pemodelan Struktur

Membuat model geometri *A-frame* dan *Main hull* menggunakan Solidworks dengan simplifikasi model (*idealization*) sesuai kebutuhan analisis agar hasil tetap representatif namun efisien secara komputasi.

2.4 Analisis FEA

Melakukan analisis numerik untuk mengetahui:

- a. Distribusi tegangan (*von mises stress*)
Distribusi tegangan menunjukkan penyebaran nilai tegangan di seluruh bagian struktur akibat beban yang bekerja. Dalam FEA, hasil ini biasanya divisualisasikan dengan kontur warna (*color plot*) area warna merah menunjukkan tegangan tinggi, sedangkan biru menunjukkan tegangan rendah. *Von Mises stress* sendiri adalah nilai tegangan ekuivalen yang digunakan untuk memprediksi kegagalan *material ductile* (seperti baja) berdasarkan teori *distortion energy*. Jika nilai *Von Mises stress* melebihi *yield strength material*, maka material dianggap *yielding* (mulai mengalami deformasi plastis). [6]
- b. Faktor keamanan struktur (*safety factor*)
Faktor keamanan adalah rasio antara kekuatan material terhadap tegangan kerja aktual. Digunakan untuk menentukan seberapa aman struktur terhadap kegagalan.
 - 1) Jika $FOS > 1$, struktur aman (belum mencapai batas *yield*).
 - 2) Jika $FOS \approx 1$, struktur kritis.
 - 3) Jika $FOS < 1$, struktur gagal (*yielding* atau *collapse*).
- c. Area kritis yang mengalami konsentrasi tegangan
Area kritis adalah bagian struktur yang mengalami akumulasi tegangan tertinggi (*stress concentration*) akibat bentuk geometri, beban, atau sambungan tertentu.

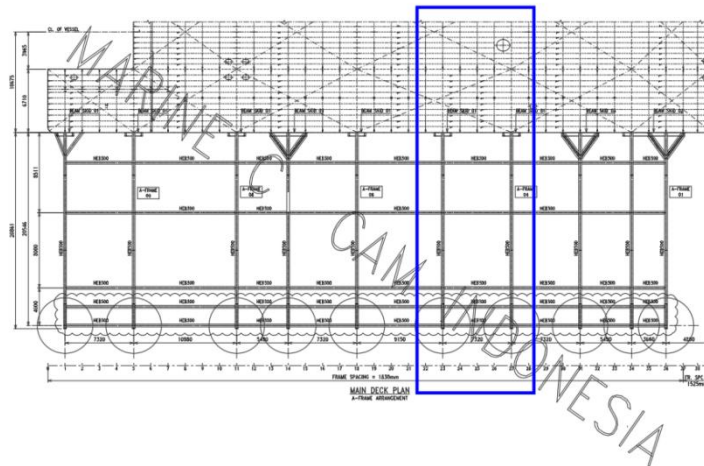
2.5 Evaluasi

Membandingkan hasil simulasi dengan standar *allowable stress* dari ABS serta memastikan struktur memenuhi batas aman terhadap beban operasi.

2.6 Kesimpulan & Saran

Menarik kesimpulan mengenai kelayakan struktur *A-frame* dan *main hull* terhadap beban operasi lifting serta memberikan rekomendasi perbaikan desain bila diperlukan.

Dalam industri *engineering marine & oil and gas*, simplifikasi terhadap obyek yang akan dianalisis merupakan tahap yang sangat krusial karena kesalahan pada tahap ini dapat mengakibatkan ketidakakuratan hasil hingga kerugian komersial. Pemilihan wilayah analisis harus mampu merepresentasikan tingkah laku struktur secara keseluruhan tanpa memerlukan beban komputasi yang berlebihan. Sesuai dengan aturan resmi ABS, klasifikasi geometri pada penelitian ini menggunakan tipe partial yang mencakup area kritis tertentu seperti *global, partial, grillage, frame, local*. Detail mengenai pembatasan area atau wilayah yang akan dianalisis tersebut dapat dilihat pada gambar 4 berikut.



Gambar 4. Analisis Region

3.4 Torsional Calculation

Konsep Hukum II Newton menunjukkan semua benda yang terkena torsi akan berotasi sesuai dengan titik tumpunya. Secara matematis, torsi dapat dihitung dengan rumus:

$$\tau = l \times F \quad (1)$$

dengan l adalah lengan gaya / jarak dari sumbu rotasi ke titik di mana gaya bekerja (meter), F adalah gaya yang bekerja (newton), dan θ adalah sudut antara arah gaya dan garis yang menghubungkan titik penerapan gaya dengan sumbu rotasi. Pada analisa ini panjang lengan gaya dari sumbu rotasi terhadap blok model yaitu 13.8 m dan berat blok pada model yaitu 248.786 kg, dan nilai percepatan gravitasi adalah 9.81 m/s^2 , maka hasil *resisting moment* nya yaitu sebesar 33.680.151,108 N.m. Nilai *overturning moment* yang di perlukan pada proses *salvage barge* harus lebih besar dari pada nilai *resisting moment*.

$$\Sigma F = 0$$

$$\tau \text{ Blok} = \tau \text{ A Frame} + \tau \text{ Waterbag} + F. \text{ Buoyancy}$$

$$(l \times m \text{ Blok} \times g) = (l \times m \text{ A Frame} \times g) + (l \times m \text{ Waterbag} \times g) + (\text{Displacement})$$

Rekapitulasi:

Memakai muatan 10 Ton

$$(13,8 \times 248.786 \times 9,81) = (27,3 \times 86.500 \times 9,81) + (30,2 \times 10.000 \times 9,81) + (810 + 620)$$

$$33.680.151,108 > 26.129.874,5$$

Memakai muatan 20 Ton

$$(13,8 \times 248.786 \times 9,81) = (27,3 \times 86.500 \times 9,81) + (30,2 \times 20.000 \times 9,81) + (810 + 620)$$

$$33.680.151,108 > 29.092.494,5$$

Memakai muatan 25 Ton

$$(13,8 \times 248.786 \times 9,81) = (27,3 \times 86.500 \times 9,81) + (30,2 \times 25.000 \times 9,81) + (810 + 620)$$

$$33.680.151,108 > 30.573.804,5$$

Memakai muatan 35 Ton

$$(13,8 \times 248.786 \times 9,81) = (27,3 \times 86.500 \times 9,81) + (30,2 \times 25.000 \times 9,81) + (810 + 620)$$

$$33.680.151,108 > 33.536.424,5$$

Memakai muatan 55 Ton

$$(13,8 \times 248.786 \times 9,81) = (27,3 \times 86.500 \times 9,81) + (30,2 \times 55.000 \times 9,81) + (810 + 620)$$

$$33.680.151,108 < 39.461.664,5$$

$$\Sigma F = - (13,8 \times 248.786 \times 9,81) + (27,3 \times 86.500 \times 9,81) + (30,2 \times 55.000 \times 9,81) + (810 + 620)$$

$$= 5.781.513,39 \text{ Nm (ok)}$$

3.5 Allowable stress

Tegangan ijin (*allowable stress*) adalah nilai batas maksimum tegangan yang masih diperbolehkan terjadi pada suatu struktur hasil analisis elemen hingga, sehingga struktur tersebut tetap aman dan tidak mengalami kegagalan. Penelitian ini mengacu pada *rules class ABS Pt.3, Ch.2, Sect. 20, Guidance on Finite Element Analysis* (2023) [8]

$$F = F_y / F_S \quad (2)$$

for static loading:

F_y = yield strength of the material, 250 MPa

$$F = 250 / 1.67$$

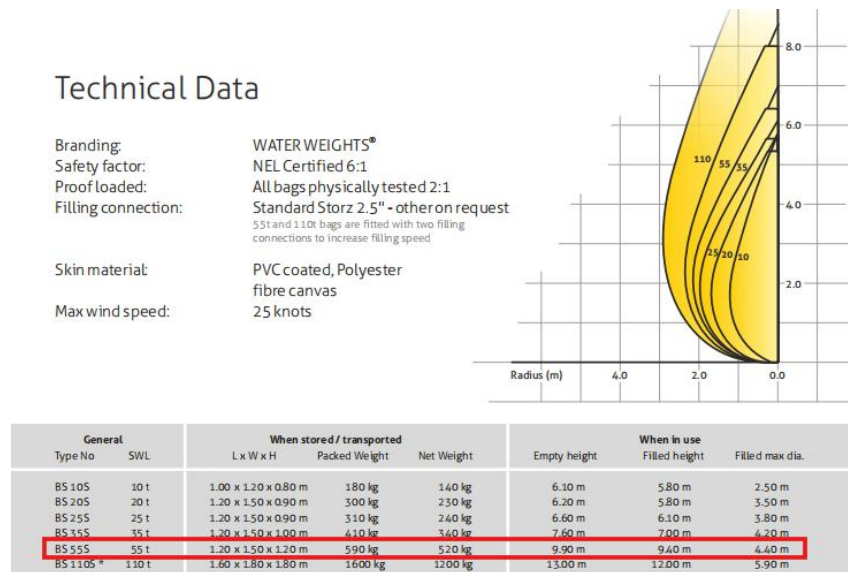
F_S = Factor of Safety, 1.67 for axial and bending stress

$$F = 149.70 \text{ MPa}$$

Maka, *allowable stress* untuk material ASTM36 adalah 149.70 MPa

3.6 Load Variation

Akurasi dalam analisis struktur sangat bergantung pada pemilihan kondisi pembebanan yang realistis di dalam perangkat lunak simulasi. Berdasarkan perhitungan awal, estimasi beban operasional yang dapat diterapkan pada struktur adalah sebesar 55 ton. Untuk memastikan parameter ini sesuai dengan standar industri, rujukan dibuat berdasarkan data teknis resmi yang mencakup faktor keamanan, berat bersih, serta dimensi alat saat digunakan. Butiran teknis lengkap mengenai peralatan pembebanan yang dipilih ini ditunjukkan pada gambar 5. Penggunaan data katalog ini penting untuk menjamin hasil simulasi memiliki korelasi yang tepat dengan kondisi nyata di lapangan.

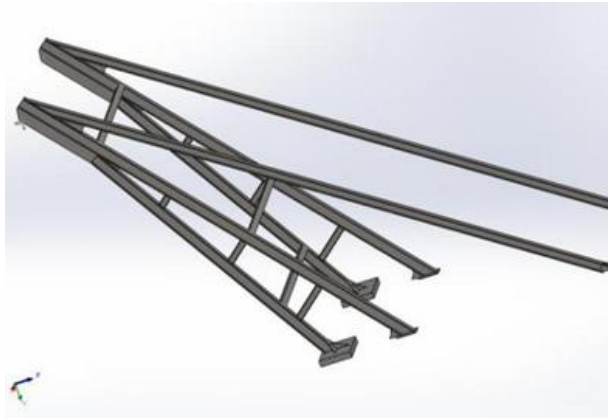


Gambar 5. Water bag catalog

3.7 Running Analysis

a. Modelling

Tahap pemodelan merupakan langkah krusial dalam analisis numerik untuk memastikan bahwa kondisi fisik aktual, termasuk geometri, material, dan konfigurasi struktur, dapat direpresentasikan secara akurat dalam simulasi. Dalam penelitian ini, pemodelan dilakukan secara mendetail untuk mencerminkan interaksi antara komponen utama, sehingga hasil analisis yang diperoleh memiliki tingkat validitas yang tinggi. Proses transformasi desain dari bentuk fisik ke dalam model digital yang mencakup struktur *A-frame* dan integrasinya pada barge ditunjukkan pada gambar 6. Model ini nantinya akan menjadi dasar dalam penginputan beban dan kondisi batas (*boundary condition*) pada tahap simulasi selanjutnya.



Gambar 6(a) A-frame



Gambar 6(b) A-frame install to barge

Gambar 6. Modelling menggunakan software Solidworks

b. Mechanical Properties

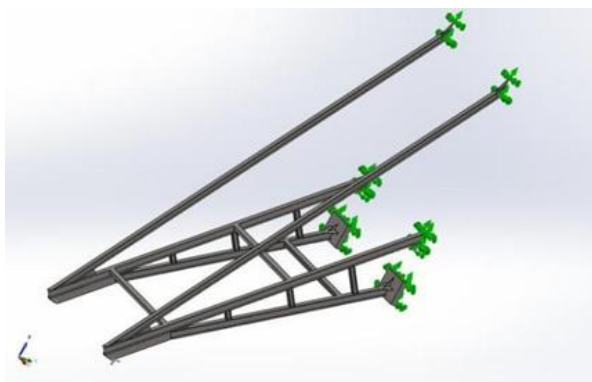
Mechanical properties adalah sifat-sifat mekanik yang menunjukkan bagaimana suatu material berperilaku ketika diberikan gaya atau beban dari luar. Sifat ini menggambarkan kemampuan material untuk menahan deformasi, kerusakan, atau kegagalan saat digunakan dalam suatu aplikasi teknik.

Tabel 2. Material Properties ASTM36

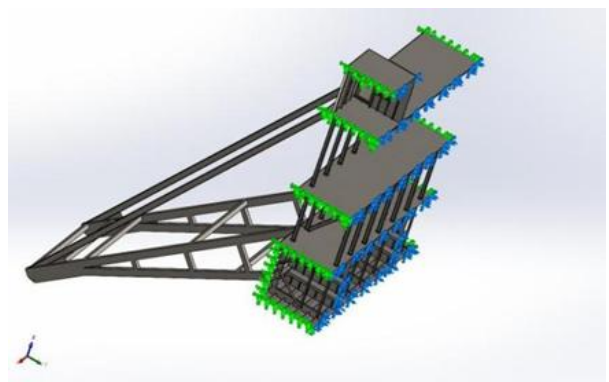
<i>Mechanical Properties</i>	<i>Metric</i>
<i>Tensile Strength, Ultimate</i>	400-550 MPa
<i>Tensile Strength, Yield</i>	250 MPa
<i>Modulus of Elasticity</i>	200 GPa
<i>Poissons Ratio</i>	0.26
<i>Density</i>	7.85 g/cm ³

c. Boundary Condition

Penentuan *boundary condition* atau kondisi batas merupakan tahapan kritis untuk mendefinisikan bagaimana suatu model berinteraksi dengan lingkungan simulasinya, termasuk menentukan bagian struktur yang ditahan (*fix*) atau diberikan beban tertentu. Dalam analisis ini, penetapan kondisi batas dilakukan pada struktur *A-frame* dan *barge* guna memastikan model berperilaku sesuai dengan kondisi tumpuan aktual di lapangan. Tanpa pengaturan yang akurat, hasil simulasi tidak akan merepresentasikan distribusi tegangan yang sebenarnya. Penempatan *fix constraint* pada komponen-komponen tersebut dapat dilihat pada gambar 7 berikut.



Gambar 7(a) Fix constraint on A-frame



Gambar 7(b) Fix constraint on barge

Gambar 7. Boundary condition menggunakan software Solidworks

d. Force

Pemberian beban (*force*) dalam metode FEA merupakan tahap krusial untuk memprediksi respons struktur terhadap tekanan mekanik yang diterima pada titik-titik tertentu. Beban tersebut diterapkan pada bagian *node*, elemen, atau permukaan model agar simulasi dapat mencerminkan pengaruh gaya nyata yang bekerja saat operasional berlangsung. Melalui tahapan ini, integritas struktur dapat diuji secara virtual sebelum diimplementasikan pada kondisi sebenarnya. Detail mengenai distribusi dan arah pembebanan pada komponen *A-frame* dapat dilihat pada gambar 8 berikut.



Gambar 8(a) Beban diterapkan pada *A-frame*

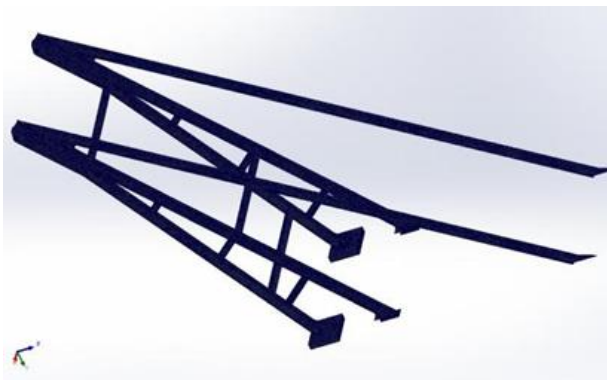


Gambar 8(b) Beban diterapkan pada *A-frame*

Gambar 8. Beban diterapkan pada *A-frame* menggunakan *software* Solidworks

e. *Mesh*

Mesh adalah proses dan hasil pembagian suatu model kontinu (geometri nyata) menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung, yang disebut finite elements, untuk memungkinkan penyelesaian numerik menggunakan metode elemen hingga. Hasil pembagian elemen pada struktur *A-frame* dan integrasinya pada *barge* dapat dilihat pada gambar 9 berikut.



Gambar 9(a) Tampilan *mesh* pada *A-frame*



Gambar 9(b) Tampilan *mesh* pada *barge*

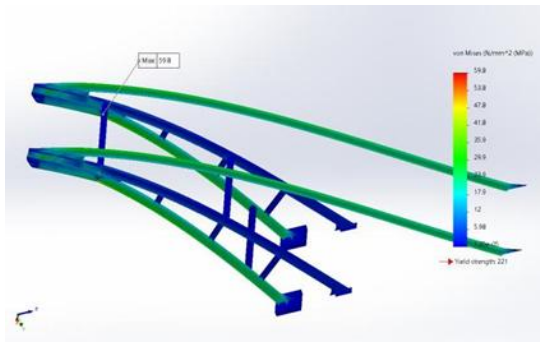
Gambar 9. *Meshes* menggunakan *software* Solidworks

3.8 Result

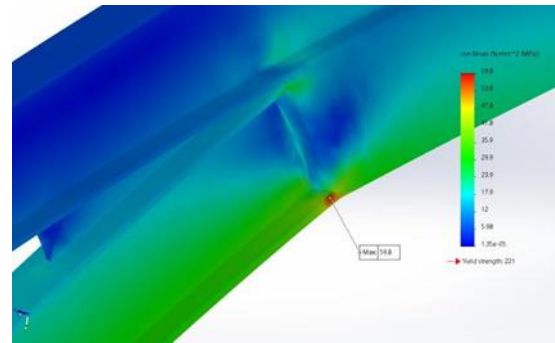
Hasil atau *result* merupakan keluaran (*output*) yang diperoleh dari seluruh rangkaian proses simulasi untuk merepresentasikan respons struktur terhadap kondisi batas (*boundary condition*), pembebanan (*load*), serta sifat material yang telah ditentukan sebelumnya. Tahapan ini menjadi inti dari penelitian untuk memvalidasi apakah desain sistem evakuasi yang dirancang mampu menahan beban operasional secara aman. Secara keseluruhan, data yang dihasilkan mencakup distribusi tegangan dan faktor keamanan yang akan menjadi dasar pengambilan keputusan teknis.

a. *Max Von Mises Stress*

Von Mises stress adalah tegangan maksimum ekuivalen yang dihitung dari kombinasi tegangan normal dan geser dalam kondisi tegangan tiga dimensi. Pada saat *analysis* nilai *stress* yang didapat pada *A-frame* adalah 59.8 MPa dan nilai *stress* pada *barge* adalah 85.9 MPa. Perbandingan ilustrasi mengenai distribusi kontur warna dan lokasi tegangan puncak pada kedua komponen tersebut masing-masing ditunjukkan pada gambar 10 dan gambar 11. Nilai-nilai ini selanjutnya akan dibandingkan dengan tegangan izin (*allowable stress*) sesuai dengan standar kelas ABS yang digunakan dalam penelitian ini. [9]

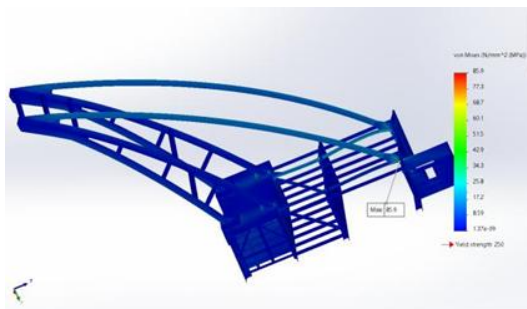


Gambar 10(a) *Von mises stress pada A-frame*

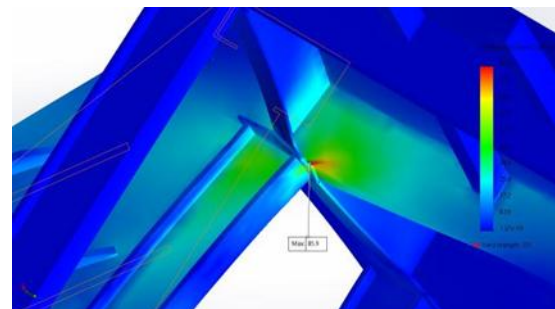


Gambar 10(b) *Max von mises stress pada A-frame*

Gambar 10. Tegangan maksimum pada *A-frame*



Gambar 11(a) *Von mises stress pada barge*

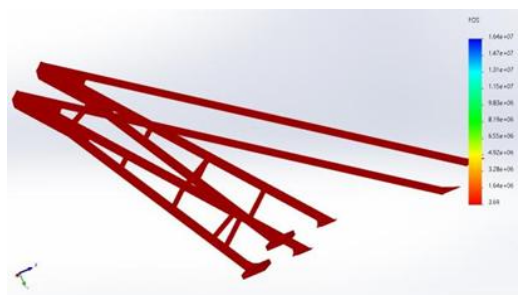


Gambar 11(b) *Max von mises stress pada barge*

Gambar 11. Tegangan maksimum pada *barge*

b. *Factor of Safety*

Nilai batas maksimum tegangan yang masih diperbolehkan terjadi pada suatu struktur hasil analisis elemen hingga, sehingga struktur tersebut tetap aman dan tidak mengalami kegagalan. Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan metode elemen hingga, diperoleh hasil bahwa nilai faktor keamanan struktur berada di atas 1,67, yang mengindikasikan bahwa desain berada dalam kategori aman menurut standar teknis yang berlaku. Ilustrasi mengenai sebaran nilai keamanan pada seluruh bagian kapal tersebut dapat dilihat pada gambar 12 berikut.



Gambar 12(a) *Factor of safety pada A-frame*



Gambar 12(b) *Factor of safety pada A-frame*

Gambar 12. *Factor of safety barge*

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penentuan nilai pembebanan optimum *water bag* yaitu 55 ton pada sistem *A-Frame* dan *main hull swamp barge* Majestic Megadrill berhasil dilakukan untuk memastikan kemampuan kapal kembali ke kondisi *even keel* secara aman. Perhitungan momen jungkit (*overturning moment*) sebesar 39.461.664,5 N.m. menunjukkan bahwa pembebanan *water bag* 55 ton yang diterapkan mampu menghasilkan momen pemulih yang lebih besar dari pada *resisting moment* yaitu sebesar 33.680.151,12 N.m. yang memadai untuk mengatasi kemiringan akibat beban operasional tanpa menimbulkan kondisi ketidakstabilan tambahan. Hasil analisis tegangan menggunakan metode FEA menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur *A-Frame* yaitu sebesar 59.8 MPa dan *barge* yaitu sebesar 85.9 MPa. Tentunya hasil analisis ini memenuhi *allowable stress* dari ABS dimana nilai tegangan yang di ijin kan yaitu sebesar 149.7 MPa. dengan nilai *safety factor* 1.67.

Daftar Pustaka

- [1] *Oilfield Africa Review*, "Industry Trends and Offshore Safety Operations," 2023.
- [2] M. E. Saputro, "Analisa Teknis Pengangkatan Kapal Menggunakan Metode Lifting dan Airbags," *Other thesis*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2020.
- [3] I. Zilakos, E. Chatzidouros, and N. Tsouvalis, "An innovative ship salvage concept and its effect on the hull structural response," *Journal of Marine Engineering and Technology*, 2020.
- [4] K. J. Bathe, "Finite Element Procedures," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2008.
- [5] ASTM International, *Standard Specification for Carbon Structural Steel (ASTM A36)*, West Conshohocken, PA, 2004.
- [6] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 7th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [7] D. Siregar and M. Suwandi, "Analisis distribusi tegangan Von Mises pada struktur rangka menggunakan metode elemen hingga," *Jurnal Mesin dan Industri (MESI)*, vol. 7, no. 2, pp. 45–52, 2023.
- [8] Y. Hao, J. Feng, and J. Hu, "Probabilistic distribution of Von Mises stress and strength evaluation of structures under static–random vibration combined condition," *Journal of Vibration and Shock*, vol. 39, no. 5, pp. 188–193, 2020.
- [9] M. J. González and J. L. Velázquez, "Stress analysis and failure criteria in ductile materials using Von Mises equivalent stress," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 2, no. 9, pp. 124–129, 2018.