

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

1.1 Permodelan

Berdasarkan data teknis kapal *harbour tug* yang diperoleh dari gambar *General Arrangement* (GA), spesifikasi teknis *ship launching* airbag, serta hasil perancangan *load spreader* yang telah dijelaskan pada Bab III, dilakukan proses pemodelan tiga dimensi sebagai tahapan awal sebelum analisis numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) untuk menghasilkan representasi geometrik yang mampu menggambarkan kondisi aktual sistem *launching* kapal secara mendekati keadaan sebenarnya.

Tahap pemodelan merupakan bagian yang sangat penting dalam analisis elemen hingga karena kualitas model geometri akan sangat mempengaruhi ketelitian hasil simulasi. Model yang dibangun harus mampu merepresentasikan bentuk, dimensi, serta hubungan antar komponen yang terlibat pada proses *launching*, sehingga distribusi beban dan respons struktur yang diperoleh dari simulasi dapat menggambarkan kondisi lapangan secara realistis. Oleh karena itu, seluruh dimensi utama model mengacu pada data teknis kapal dan gambar *General Arrangement* (GA) sehingga tidak terjadi penyimpangan terhadap konfigurasi struktur aktual.

Sistem yang dimodelkan pada penelitian ini terdiri atas tiga komponen utama, yaitu keel kapal sebagai media penerima beban utama, *load spreader* sebagai elemen penyebar beban, dan *ship launching* airbag sebagai media penumpu elastis. Ketiga komponen tersebut dimodelkan sebagai suatu sistem yang saling berinteraksi selama proses *launching* sehingga mekanisme perpindahan beban dari badan kapal menuju airbag dapat dianalisis secara menyeluruh. Beban gravitasi kapal diasumsikan diteruskan melalui lunas (*keel*) menuju struktur *load spreader*, kemudian didistribusikan ke seluruh airbag melalui luas bidang kontak yang lebih besar dibandingkan apabila airbag bersentuhan langsung.

Material yang digunakan pada struktur *load spreader* adalah ASTM A131 Grade AH36, yaitu baja konstruksi kapal yang memiliki kekuatan luluh (*yield strength*) sebesar 355 MPa. Material ini dipilih karena merupakan baja yang umum digunakan pada konstruksi kapal dan memiliki kombinasi antara kekuatan mekanik, ketangguhan, serta

kemampuan pengelasan yang baik. Seluruh elemen struktur *load spreader* diasumsikan bersifat homogen, isotropik, dan berperilaku elastis linier selama proses analisis, sehingga karakteristik material dapat direpresentasikan menggunakan parameter modulus elastisitas, rasio Poisson, dan tegangan luluh sesuai data material.

Model yang telah selesai dibuat kemudian diekspor ke perangkat lunak ANSYS Workbench untuk dilakukan proses *pre-processing*, yang meliputi pendefinisian material, pembentukan mesh, penentuan kondisi batas (*boundary condition*), serta pemberian pembebanan. Tahapan ini menjadi dasar dalam memperoleh hasil analisis berupa distribusi tegangan ekuivalen (*Equivalent von Mises Stress*), deformasi total (*Total Deformation*), serta faktor keamanan (*Safety Factor*) pada struktur *load spreader*.

Data dimensi tersebut menjadi acuan utama dalam menentukan ukuran model tiga dimensi sehingga geometri *load spreader* yang dirancang dapat menyesuaikan bentuk dasar kapal pada area lunas. Keselarasan dimensi antara kapal dan *load spreader* diperlukan agar distribusi beban yang dianalisis selama simulasi mampu menggambarkan kondisi aktual proses *launching*.

Untuk mendukung pemerataan distribusi beban selama proses *launching*, pada bagian bawah lunas kapal ditambahkan struktur *load spreader* berupa konstruksi baja sementara. Struktur ini dirancang sebagai elemen penyebar beban (*load distributing structure*) yang berfungsi memperbesar luas bidang kontak antara lunas kapal dengan airbag. Dengan bertambahnya luas kontak, tekanan lokal (*contact pressure*) yang diterima setiap airbag dapat dikurangi sehingga distribusi gaya menjadi lebih seragam. Selain meningkatkan efektivitas penyaluran beban, penggunaan *load spreader* juga diharapkan mampu menurunkan konsentrasi tegangan pada struktur bawah kapal, mengurangi risiko deformasi lokal, serta meningkatkan tingkat keamanan proses *launching* secara keseluruhan.

Tabel 4. 1. Dimensi Harbour Tug

Panjang kapal	31.5 m
Lebar kapal	11,65 m
Draft (<i>from keel</i>)	5,3 m
Kecepatan maksimum	12 knot
Sistem propulsi	2 x Azimuth
Jenis kapal	<i>Harbour tug</i>

Untuk mendukung distribusi beban selama proses *launching*, ditambahkan struktur *load spreader* berupa plat baja sementara yang dipasang pada bagian bawah keel kapal. Struktur ini dirancang sebagai elemen penyebar beban yang berfungsi memperbesar area kontak antara kapal dan airbag sehingga tekanan lokal yang diterima airbag dapat dikurangi.

1.1.1 Perencanaan *Load spreader*

Pelat baja *load spreader* berfungsi sebagai media distribusi beban kapal secara merata ke seluruh airbag yang digunakan selama proses *launching*. Tanpa adanya *load spreader*, beban terpusat pada titik-titik tertentu di sepanjang lunas kapal (*keel*) dapat menyebabkan konsentrasi tegangan yang berpotensi merusak struktur lambung.

Perencanaan *load spreader* merupakan tahapan utama dalam penelitian ini karena struktur tersebut berfungsi sebagai media penyebar beban (*load distribution structure*) antara lunas kapal (*keel*) dan sistem ship *launching* airbag selama proses *launching*. Pada kapal harbour tug yang memiliki karakteristik lunas tinggi (*bar keel*), luas bidang kontak antara lunas dan airbag relatif kecil sehingga beban kapal cenderung terpusat pada beberapa titik kontak. Kondisi tersebut dapat mengakibatkan meningkatnya tekanan kontak (*contact pressure*) dan konsentrasi tegangan (*stress concentration*) baik pada struktur kapal maupun pada permukaan airbag. Oleh karena itu, diperlukan suatu struktur tambahan yang mampu memperbesar luas bidang kontak sehingga distribusi beban menjadi lebih merata.

Konsep dasar perancangan *load spreader* pada penelitian ini mengacu pada prinsip mekanika struktur, yaitu bahwa semakin

besar luas bidang kontak yang menerima gaya tekan, maka besarnya tekanan yang bekerja pada permukaan kontak akan semakin kecil.

Pada penelitian ini, *load spreader* dirancang sebagai struktur baja sementara yang dipasang pada bagian bawah lunas kapal selama proses *launching* berlangsung. Struktur ini tidak termasuk bagian dari konstruksi permanen kapal, melainkan hanya digunakan sebagai alat bantu peluncuran (*launching equipment*) sehingga setelah proses *launching* selesai, *load spreader* dapat dilepas kembali. Dengan konsep tersebut, modifikasi terhadap konstruksi utama kapal dapat diminimalkan tanpa mengurangi efektivitas distribusi beban selama proses peluncuran.

Dimensi keseluruhan *load spreader* disesuaikan dengan ukuran utama kapal harbour tug yang menjadi objek penelitian, sehingga mampu menopang area bawah kapal secara optimal. Panjang struktur mengikuti panjang daerah yang menerima beban utama selama *launching*, sedangkan lebarnya dirancang agar dapat memperluas bidang kontak dengan seluruh airbag yang digunakan.

Selain mempertimbangkan dimensi keseluruhan, konfigurasi struktur *load spreader* juga dirancang menggunakan sistem rangka yang terdiri atas balok memanjang (*longitudinal beam*), balok melintang (*transverse beam*), dan elemen pengaku (*stiffener*). Dengan demikian, beban yang awalnya terkonsentrasi pada area lunas dapat disebarkan ke area yang lebih luas sehingga respon struktur menjadi lebih merata.

Material yang digunakan pada *load spreader* adalah baja ASTM A131 Grade AH36, yang merupakan baja konstruksi kapal dengan kekuatan luluh (*yield strength*) sebesar 355 MPa. Material ini dipilih karena memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, ketahanan terhadap deformasi plastis, kemampuan pengelasan yang baik, serta telah banyak diaplikasikan pada konstruksi kapal. Penggunaan material AH36 juga memungkinkan struktur *load spreader* menahan pembebanan yang berasal dari berat kapal tanpa mengalami kegagalan material selama proses *launching*.

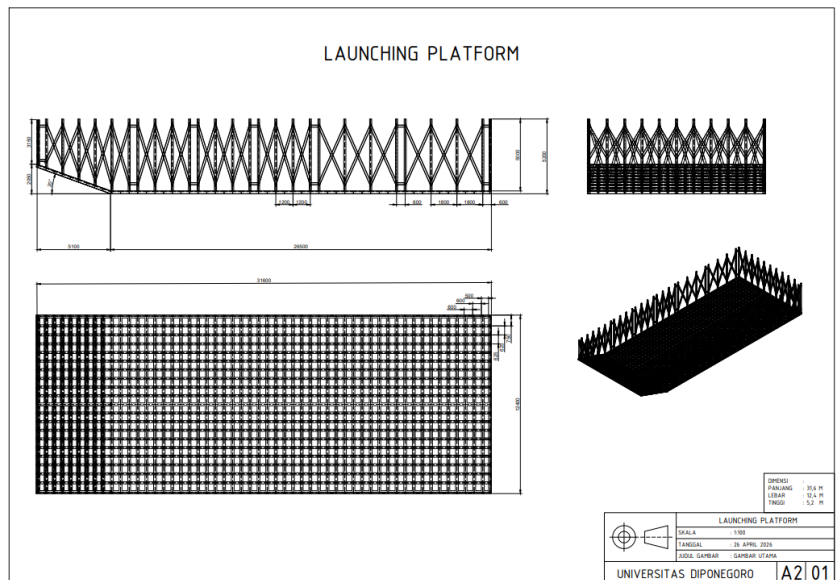
Dalam proses perancangan, seluruh elemen struktur diasumsikan saling terhubung secara kaku, sehingga beban yang diterima dapat diteruskan secara kontinu ke seluruh bagian struktur. Sambungan antar elemen diasumsikan memiliki kualitas pengelasan yang baik sehingga tidak terjadi pelemahan lokal

akibat sambungan. Asumsi tersebut digunakan untuk memperoleh representasi perilaku struktur secara menyeluruh selama proses analisis numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA).

Beban yang bekerja pada *load spreader* berasal dari berat kapal yang diteruskan melalui lunas menuju struktur *load spreader*. Dengan distribusi beban yang lebih merata, nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur dapat ditekan sehingga faktor keamanan (*Safety Factor*) meningkat.

Rancangan *load spreader* yang telah dibuat selanjutnya dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan perangkat lunak CAD untuk memudahkan proses analisis numerik pada ANSYS Workbench. Model tiga dimensi tersebut mempertahankan dimensi utama dan konfigurasi struktur hasil perancangan sehingga mampu merepresentasikan kondisi aktual selama proses *launching*. Selanjutnya model akan digunakan sebagai objek utama dalam simulasi *Static Structural*, sehingga distribusi tegangan ekuivalen (*Equivalent von Mises Stress*), deformasi total (*Total Deformation*), dan faktor keamanan (*Safety Factor*) dapat dievaluasi secara kuantitatif.

Gambar 4. 1. Perencanaan Load spreader



Gambar 4.1 menunjukkan hasil perancangan tiga dimensi *load spreader* yang digunakan dalam penelitian ini. Struktur

tersebut terdiri atas sistem rangka memanjang dan melintang dengan pelat dasar sebagai media kontak terhadap airbag. Konfigurasi tersebut dirancang untuk menghasilkan kekakuan struktur yang memadai, memperbesar luas bidang kontak, serta mendistribusikan beban kapal secara lebih merata menuju sistem airbag selama proses *launching*.

1.1.2 Detail Elemen Struktur *Load spreader*

Setelah konfigurasi umum *load spreader* dirancang, tahap berikutnya adalah menentukan detail elemen struktur yang akan membentuk sistem *load spreader* secara keseluruhan. Penentuan jenis profil, dimensi penampang, serta tata letak setiap elemen dilakukan berdasarkan kebutuhan distribusi beban selama proses *launching* kapal menggunakan ship *launching* airbag. Seluruh elemen struktur dirancang agar mampu bekerja secara terpadu dalam menerima beban vertikal dari kapal, mendistribusikannya ke seluruh bidang *load spreader*, dan selanjutnya meneruskan beban tersebut menuju airbag secara lebih merata.

Secara mekanis, beban kapal pertama kali diterima oleh bagian atas *load spreader* yang bersentuhan langsung dengan lunas kapal. Beban tersebut kemudian diteruskan menuju balok memanjang dan balok melintang yang saling terhubung sehingga terbentuk jalur distribusi beban ke seluruh struktur. Dengan mekanisme tersebut, beban yang semula hanya terkonsentrasi pada area lunas dapat disebarkan ke area yang jauh lebih luas sehingga tekanan kontak pada airbag menjadi lebih kecil.

Pemilihan dimensi masing-masing elemen tidak hanya mempertimbangkan kekuatan terhadap beban statis, tetapi juga mempertimbangkan kekakuan struktur selama proses *launching*. Struktur yang terlalu fleksibel akan mengalami deformasi yang besar sehingga distribusi beban menjadi tidak merata, sedangkan struktur yang terlalu kaku akan meningkatkan berat konstruksi dan menyulitkan proses fabrikasi maupun pemasangan. Oleh karena itu, setiap profil dipilih dengan mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan, kekakuan, dan efisiensi material.

1. *Vertical Wall Stiffener*

Vertical wall stiffener merupakan elemen pengaku vertikal yang dipasang pada bagian dinding samping *load spreader*. Elemen ini menggunakan profil *T-Beam* dengan dimensi $150 \times 150 \times 7 \times 10$ mm. Penggunaan profil T dipilih karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang cukup baik serta mampu meningkatkan kekakuan pelat dinding tanpa menambah massa struktur secara berlebihan.

Fungsi utama *vertical wall stiffener* adalah meningkatkan kekuatan pelat samping terhadap beban tekan yang muncul akibat distribusi gaya dari struktur utama. Ketika *load spreader* menerima beban kapal, sebagian gaya akan diteruskan menuju dinding samping melalui balok melintang. Apabila pelat samping tidak diperkuat, maka pelat tersebut berpotensi mengalami deformasi lokal akibat gaya tekan yang bekerja.

Selain berfungsi sebagai pengaku terhadap beban tekan, *vertical wall stiffener* juga meningkatkan kekakuan torsi struktur secara keseluruhan. Kekakuan torsi menjadi penting karena distribusi beban pada proses *launching* tidak selalu terjadi secara simetris. Perbedaan distribusi beban akibat posisi airbag maupun ketidaksempurnaan permukaan landasan dapat menghasilkan momen puntir pada *load spreader*. Dengan adanya pengaku vertikal, deformasi akibat puntiran dapat diminimalkan sehingga bentuk struktur tetap stabil selama proses peluncuran.

2. Diagonal dan Horizontal *Wall Stiffener*

Selain pengaku vertikal, struktur *load spreader* juga dilengkapi dengan diagonal dan horizontal *wall stiffener* menggunakan profil *T-Beam* $150 \times 75 \times 9$ mm. Kedua elemen tersebut berfungsi sebagai sistem pengaku tambahan yang bekerja bersama *vertical wall stiffener* dalam mempertahankan kekakuan struktur.

Horizontal stiffener berfungsi meningkatkan kekakuan dinding terhadap pembebanan lateral yang muncul akibat distribusi beban dari balok utama. Dengan adanya pengaku horizontal, deformasi pelat samping dapat ditekan sehingga distribusi gaya menuju elemen lainnya menjadi lebih merata.

Secara keseluruhan, kombinasi antara vertical, horizontal, dan diagonal *stiffener* membentuk sistem rangka yang mampu meningkatkan kekakuan lokal maupun global struktur *load spreader*. Sistem tersebut juga membantu mengurangi deformasi pada pelat samping sehingga distribusi beban menuju airbag tetap seragam.

3. *Center, Border, dan Transversal Beam*

Center beam, border beam, dan transverse beam merupakan elemen utama pada struktur *load spreader*. Ketiga elemen ini menggunakan profil I-Beam $200 \times 200 \times 8 \times 12$ mm yang memiliki kapasitas lentur dan kekakuan yang tinggi.

Center beam dipasang sepanjang garis tengah struktur dan berfungsi sebagai jalur utama distribusi beban dari lunas kapal menuju struktur *load spreader*. Karena posisi center beam berada tepat di bawah lunas kapal, elemen ini menerima proporsi beban terbesar dibandingkan elemen lainnya.

Border beam dipasang pada kedua sisi luar struktur sebagai elemen pembatas sekaligus penambah kekakuan keseluruhan. Selain mempertahankan bentuk geometri *load spreader*, border beam juga berfungsi mendistribusikan sebagian beban menuju sisi luar.

Transverse beam dipasang tegak lurus terhadap *center beam* dan berfungsi menghubungkan seluruh balok memanjang menjadi satu kesatuan struktur. Elemen ini memiliki peranan penting dalam menyebarkan beban dari garis tengah menuju sisi kiri dan kanan *load spreader*.

4. *Longitudinal Bottom Stiffener*

Longitudinal bottom stiffener merupakan elemen pengaku memanjang yang dipasang pada bagian bawah struktur *load spreader* dan menggunakan profil *T-Beam* $150 \times 150 \times 7 \times 10$ mm. Elemen ini berfungsi sebagai pengaku utama yang meningkatkan kekakuan struktur bagian bawah terhadap pembebanan yang diterima selama proses *launching* kapal. Posisi pengaku yang memanjang searah sumbu *longitudinal* memungkinkan beban yang bekerja dapat didistribusikan secara lebih efektif menuju balok-balok utama penyusun *load spreader*.

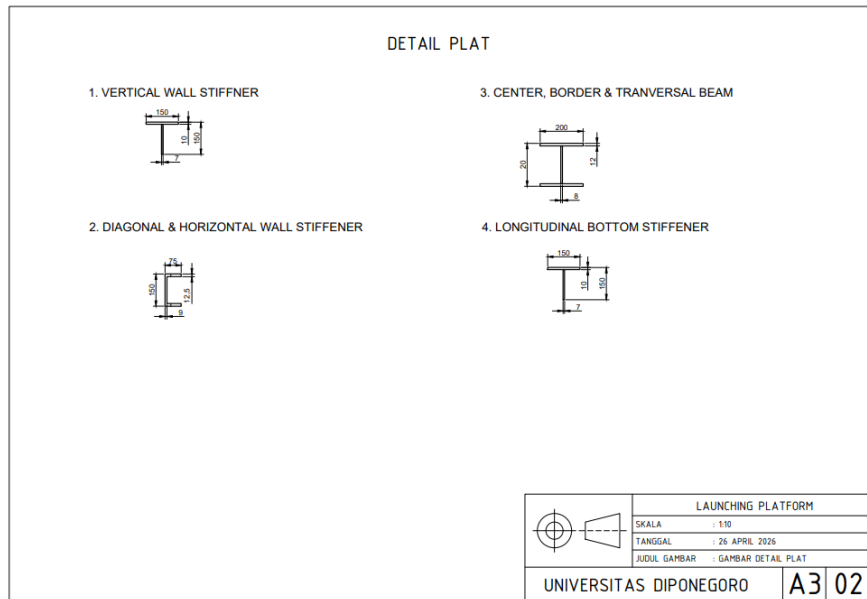
Selama proses *launching*, gaya reaksi yang berasal dari airbag akan diteruskan ke struktur *load spreader* melalui area kontak pada bagian bawah struktur. Pembebanan tersebut menghasilkan kombinasi gaya tekan, gaya geser, dan momen lentur yang dapat menyebabkan deformasi lokal apabila struktur tidak memiliki kekakuan yang memadai. Oleh karena itu, keberadaan *longitudinal bottom stiffener* diperlukan untuk meningkatkan kekakuan bagian bawah struktur sehingga mampu menahan pembebanan tersebut tanpa mengalami lendutan yang berlebihan.

Selain meningkatkan kekakuan, *longitudinal bottom stiffener* juga berfungsi sebagai jalur distribusi gaya reaksi menuju balok memanjang (*center beam*) dan balok melintang (*transverse beam*). Dengan adanya elemen pengaku ini, gaya yang diterima dari airbag tidak terkonsentrasi pada satu titik, tetapi dapat disalurkan secara bertahap ke seluruh sistem rangka *load spreader*. Mekanisme tersebut menghasilkan distribusi beban yang lebih merata sehingga konsentrasi tegangan pada area tertentu dapat dikurangi.

Penggunaan profil *T-Beam* $150 \times 150 \times 7 \times 10$ mm dipilih karena memiliki keseimbangan antara kapasitas kekuatan, kekakuan, dan efisiensi berat struktur. Profil ini mampu meningkatkan momen inersia struktur pada arah

pembebanan utama tanpa menambah massa konstruksi secara signifikan. Dengan demikian, *longitudinal bottom stiffener* berkontribusi dalam menjaga stabilitas struktur *load spreader* selama menerima beban kapal serta mendukung tercapainya distribusi beban yang lebih seragam pada sistem *launching* menggunakan airbag.

Gambar 4. 2. Detail Plat



4.2 Proses Analisis Static Struktural di Ansys Workbench

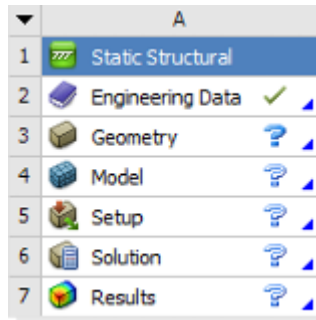
4.2.1 Static Structural Option

Analisis numerik pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench melalui modul Static Structural. Modul ini dipilih karena mampu mensimulasikan respons struktur terhadap pembebanan secara akurat sehingga sesuai untuk menganalisis perilaku struktur *load spreader* selama proses *launching* kapal menggunakan *ship launching* airbag.

Pada penelitian ini, simulasi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *load spreader* dalam

mendistribusikan beban kapal menuju airbag serta mengetahui distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan yang terjadi pada struktur. Beban yang diberikan merupakan representasi dari beban kapal *harbour tug* yang diteruskan melalui *keel* menuju *load spreader*.

Gambar 4. 3. *Static Structural*



4.2.2 *Pre-processing*

Pada tahap *pre-processing*, dilakukan serangkaian persiapan sebelum analisis numerik dijalankan menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench. Tahapan ini diawali dengan penentuan karakteristik material yang digunakan, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan model geometri, pengaturan kontak antar komponen, proses meshing, serta penentuan kondisi batas dan pembebanan. Proses *pre-processing* bertujuan untuk menghasilkan model numerik yang mampu merepresentasikan kondisi aktual sistem *launching* kapal sehingga hasil simulasi yang diperoleh dapat menggambarkan perilaku struktur secara lebih akurat. Adapun tahapan yang dilakukan pada proses *pre-processing* dijelaskan sebagai berikut.

A. *Material Selection*

Tahap material selection merupakan salah satu proses penting pada tahap *pre-processing* karena sifat mekanik material yang digunakan akan memengaruhi respons struktur

terhadap pembebanan selama simulasi. Pada penelitian ini, material yang digunakan pada struktur *load spreader* adalah baja ASTM Grade AH36, yang dipilih karena merupakan baja berkekuatan tinggi yang banyak diaplikasikan pada konstruksi kapal.

Proses pendefinisian material dilakukan melalui menu Engineering Data pada ANSYS Workbench. Parameter material yang dimasukkan meliputi massa jenis (density) sebesar 7.850 kg/m^3 , modulus elastisitas (Young's Modulus) sebesar 200 GPa, rasio Poisson (Poisson's Ratio) sebesar 0,30, serta tegangan luluh (*Yield Strength*) sebesar 355 MPa. Nilai massa jenis, modulus elastisitas, dan rasio Poisson diperoleh dari referensi sifat mekanik baja struktural yang umum digunakan dalam analisis elemen hingga, sedangkan nilai tegangan luluh sebesar 355 MPa mengacu pada spesifikasi material ASTM Grade AH36. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai data masukan agar perangkat lunak dapat menghitung respons struktur sesuai dengan karakteristik mekanik material yang digunakan.

Setelah seluruh parameter berhasil didefinisikan, material ASTM Grade AH36 kemudian diterapkan pada seluruh komponen struktur *load spreader*. Pendefinisian material ini menjadi dasar bagi ANSYS Workbench dalam menghitung distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan akibat pembebanan yang diberikan selama simulasi. Dengan demikian, hasil analisis yang diperoleh diharapkan dapat merepresentasikan perilaku struktur yang mendekati kondisi aktual pada proses launching kapal.

B. Geometry

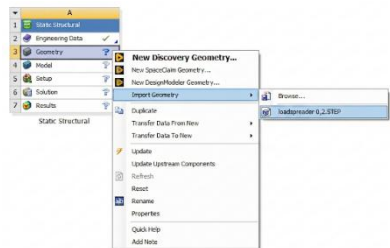
Tahap geometri merupakan proses awal pada pre-processing yang bertujuan untuk memasukkan model tiga dimensi *load spreader* ke dalam perangkat lunak ANSYS Workbench sebagai objek utama yang akan dianalisis

menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Model geometri ini dibuat terlebih dahulu menggunakan Autodesk Inventor Professional berdasarkan dimensi hasil perancangan, kemudian diekspor ke ANSYS Workbench dalam format yang kompatibel untuk proses simulasi.

Pada tahap ini dilakukan pemeriksaan terhadap model geometri untuk memastikan seluruh komponen penyusun *load spreader* telah terhubung dengan baik dan tidak terdapat kesalahan, seperti geometri yang saling bertumpang tindih (*interference*), celah (*gap*), maupun permukaan yang tidak sesuai. Pemeriksaan geometri diperlukan agar proses simulasi dapat berjalan dengan baik serta menghindari terjadinya kesalahan pada tahap analisis.

Model geometri *load spreader* yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu center beam, border beam, transverse beam, vertical wall stiffener, horizontal wall stiffener, diagonal stiffener, dan longitudinal bottom stiffener. Seluruh komponen dirakit (*assembly*) menjadi satu kesatuan struktur sehingga mampu merepresentasikan desain *load spreader* yang akan digunakan dalam proses analisis numerik.

Gambar 4. 4 Tahap Pemilihan Geometri

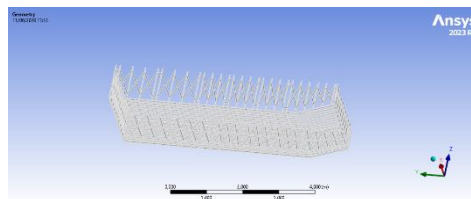


Selain dilakukan penyederhanaan geometri, model *load spreader* juga dibuat dalam skala 0,2 dari ukuran sebenarnya. Penskalaan ini bertujuan untuk mengurangi ukuran model sehingga jumlah elemen yang terbentuk pada proses meshing menjadi lebih efisien dan waktu komputasi dapat dipersingkat. Meskipun dimensi model diperkecil, bentuk

geometri, proporsi antar komponen, serta karakteristik utama struktur tetap dipertahankan sehingga hasil simulasi masih dapat merepresentasikan perilaku struktur pada kondisi sebenarnya.

Setelah proses pemeriksaan selesai dan model dinyatakan sesuai dengan desain yang telah dirancang, geometri *load spreader* siap digunakan pada tahapan pre-processing berikutnya, yaitu pendefinisian material, hubungan kontak (contact), pembentukan mesh, penentuan boundary conditions, serta pemberian pembebanan.

Gambar 4. 5 Geometri di Ansys



C. Meshing

Tahap meshing merupakan proses pembagian model geometri *load spreader* menjadi elemen-elemen kecil (finite elements) yang saling terhubung melalui titik simpul (nodes). Proses ini bertujuan untuk mengubah model geometri menjadi model numerik sehingga dapat dianalisis menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Kualitas mesh sangat berpengaruh terhadap tingkat ketelitian hasil simulasi, sehingga pemilihan jenis dan ukuran elemen dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara akurasi hasil analisis dan efisiensi waktu komputasi.

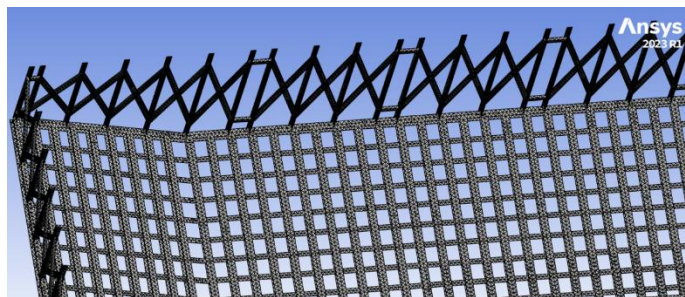
Pada penelitian ini, proses meshing menggunakan elemen tetrahedral dengan ukuran elemen (*element size*) sebesar 26 mm. Jenis elemen tetrahedral dipilih karena mampu mengikuti bentuk geometri *load spreader* yang

memiliki susunan balok dan sambungan dengan bentuk yang kompleks. Selain itu, elemen tetrahedral memiliki kemampuan untuk merepresentasikan geometri tiga dimensi dengan baik sehingga distribusi tegangan dan deformasi pada struktur dapat dianalisis secara lebih akurat.

Hasil proses meshing menghasilkan 1.585.518 nodes dan 816.547 elements. Jumlah node dan elemen tersebut menunjukkan bahwa model telah didiskritisasi menjadi elemen-elemen yang cukup rinci untuk menggambarkan perilaku struktur selama menerima pembebanan. Selanjutnya, kualitas mesh dievaluasi melalui proses evaluasi konvergensi (mesh convergence) untuk memastikan bahwa ukuran elemen yang digunakan telah menghasilkan nilai analisis yang stabil dan tidak mengalami perubahan yang signifikan apabila dilakukan penyempurnaan mesh.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, ukuran elemen 26 mm dinilai telah memberikan keseimbangan antara tingkat akurasi hasil simulasi dan efisiensi waktu komputasi. Oleh karena itu, mesh dengan konfigurasi tersebut digunakan pada seluruh proses simulasi menggunakan ANSYS Workbench. Hasil pembentukan mesh pada model *load spreader* ditunjukkan pada Gambar 4.7.

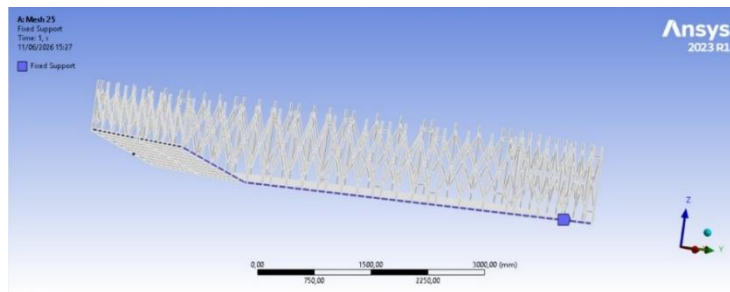
Gambar 4. 6. Proses Meshing



4.2.3 Solution

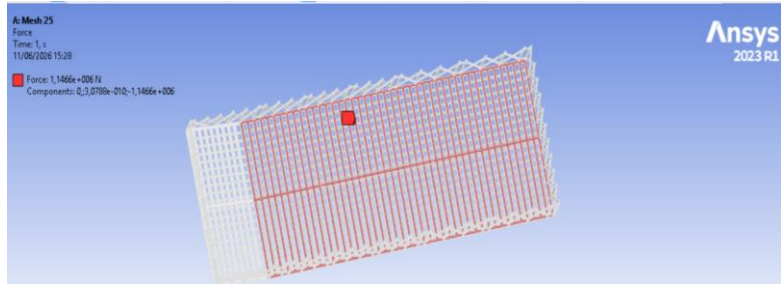
Sebelum proses analisis dilakukan, perlu ditentukan kondisi batas (boundary condition) pada model. Kondisi batas yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Fixed Support, Force, dan *Elastic support*. Pengaturan ini bertujuan untuk menggambarkan kondisi kerja *load spreader* selama menerima beban kapal.

Gambar 4. 7. Fixed Support



Gambar 4.8 menunjukkan pengaturan Fixed Support yang digunakan pada model struktur *load spreader*. Fixed Support berfungsi sebagai tumpuan tetap yang menahan pergerakan struktur pada semua arah. Kondisi ini diberikan pada bagian tertentu yang dianggap tidak mengalami perpindahan selama proses analisis berlangsung. Pemberian Fixed Support diperlukan agar model dapat dianalisis dengan stabil dan menghasilkan distribusi tegangan serta deformasi yang sesuai dengan kondisi yang diinginkan.

Gambar 4. 8 Force



Pada penelitian ini, pembebanan yang diberikan pada model *load spreader* merupakan beban statis yang berasal dari berat kapal harbour tug, yaitu sebesar 585 ton. Sebelum dimasukkan ke dalam perangkat lunak ANSYS Workbench, nilai beban terlebih dahulu dikonversi ke dalam satuan Newton (N) agar sesuai dengan sistem satuan internasional (SI) yang digunakan pada simulasi.

Konversi beban dilakukan berdasarkan persamaan gaya sebagai berikut.

$$F = m \times g$$

dengan:

- F = gaya (N)
- m = massa (kg)
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Massa kapal sebesar 585 ton dikonversi menjadi kilogram sehingga diperoleh:

$$F=585.000 \times 9,81$$

$$F=5.738.850 \text{ N}$$

Nilai tersebut merupakan gaya total yang bekerja pada kapal dalam kondisi ukuran sebenarnya (*full scale*). Karena penelitian ini menggunakan model geometri berskala 0,2 (1:5), maka pembebanan yang diterapkan pada simulasi juga disesuaikan berdasarkan prinsip kesebangunan (*similarity law*).

Pada model berskala, gaya berbanding lurus dengan pangkat tiga dari faktor skala sehingga dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$F_m = \lambda^3 F_p$$

dengan:

- F_m = gaya pada model (N)
- F_p = gaya pada prototipe (N)
- λ = faktor skala geometri (0,2)

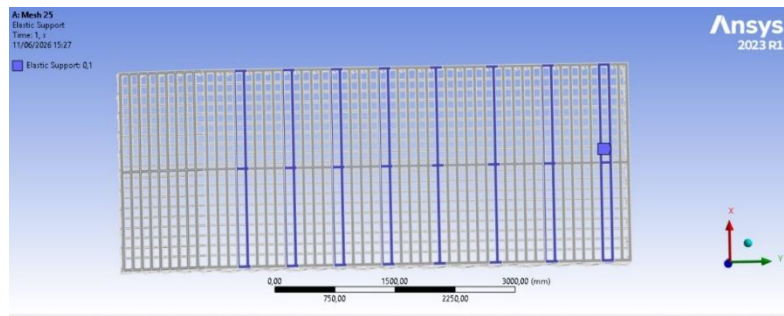
Substitusi nilai ke dalam persamaan menghasilkan:

$$F_m = (0,2)^3 \times 5.738.850$$

$$F_m = 0,008 \times 5.738.850$$

$$F_m = 45.910,8 \text{ N}$$

Gambar 4. 9 Elastic support



Pada penelitian ini, kondisi tumpuan pada struktur *load spreader* dimodelkan menggunakan fitur *Elastic support* pada ANSYS Workbench. Penggunaan *elastic support* bertujuan untuk merepresentasikan perilaku elastis ship launching airbag sebagai media penyangga selama proses launching kapal. Berbeda dengan Fixed Support yang menahan perpindahan secara penuh, *Elastic support* memungkinkan struktur mengalami deformasi sesuai dengan nilai kekakuan (foundation stiffness) yang

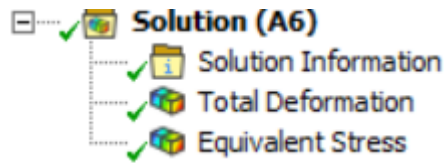
diberikan, sehingga kondisi simulasi lebih mendekati keadaan aktual.

Elastic support diterapkan pada permukaan bawah *load spreader* yang bersentuhan langsung dengan ship launching airbag. Pada kondisi tersebut, airbag tidak bersifat kaku, melainkan mengalami deformasi akibat beban kapal sehingga menghasilkan gaya reaksi yang bergantung pada tingkat kekakuannya. Oleh karena itu, penggunaan *Elastic support* dinilai lebih mampu menggambarkan interaksi antara *load spreader* dan ship launching airbag dibandingkan dengan penggunaan tumpuan tetap.

Pada simulasi ini digunakan nilai foundation stiffness sebesar 2 N/mm^3 . Nilai tersebut dimasukkan ke dalam fitur *Elastic support* pada ANSYS Workbench sebagai representasi kekakuan elastis airbag terhadap beban yang diterima. Dengan nilai kekakuan tersebut, struktur *load spreader* masih dapat mengalami deformasi secara elastis ketika menerima pembebanan, sehingga distribusi tegangan dan deformasi yang dihasilkan dapat menggambarkan kondisi kerja struktur yang lebih realistis selama proses launching.

Penerapan *Elastic support* dengan nilai kekakuan 2 N/mm^3 juga bertujuan untuk menghasilkan distribusi beban yang lebih merata pada permukaan bawah *load spreader*. Dengan demikian, hasil simulasi berupa Equivalent (Von Mises) Stress, Total Deformation, dan Safety Factor dapat digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kinerja struktur terhadap pembebanan yang diberikan. Pengaturan *Elastic support* pada ANSYS Workbench ditunjukkan pada Gambar 4.10

Gambar 4. 10 Solution



tahap berikutnya adalah menambahkan parameter hasil (*results*) pada bagian *Solution*. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan meliputi *Total Deformation* dan *Equivalent Stress (Von Mises Stress)*. *Total Deformation* digunakan untuk mengetahui besarnya deformasi yang terjadi pada struktur *load spreader* akibat pembebanan, sedangkan *Equivalent Stress* digunakan untuk menganalisis distribusi tegangan serta mengidentifikasi area yang mengalami tegangan maksimum. Kedua parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kekuatan dan keamanan struktur *load spreader*.

4.2.4 Post-processing

Pada tahap ini diperoleh hasil dari proses simulasi struktur yang telah dijalankan menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)*. Data yang dihasilkan meliputi nilai minimum dan maksimum *Equivalent Stress (Von Mises Stress)* serta *Total Deformation* yang terjadi pada model yang dianalisis. Selain itu, dilakukan evaluasi terhadap hasil simulasi untuk memastikan bahwa data yang diperoleh telah sesuai dengan kondisi pembebanan, parameter analisis, dan tujuan penelitian sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam pembahasan dan penarikan kesimpulan

4.3 Validasi data hasil dari *Static Structural*

4.3.1 Grid Independen

Uji grid independen (*grid independence test*) dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh ukuran mesh terhadap hasil simulasi menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)*. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil analisis tidak lagi mengalami perubahan yang signifikan akibat

perubahan ukuran elemen, sehingga hasil simulasi yang diperoleh memiliki tingkat akurasi yang baik dan dapat dipertanggungjawabkan.

Pada penelitian ini, uji grid independen dilakukan dengan tiga variasi ukuran elemen, yaitu 25 mm, 25,5 mm, dan 26 mm. Setiap variasi mesh dianalisis menggunakan kondisi material, pembebanan, dan boundary condition yang sama, sehingga perbedaan hasil yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh ukuran elemen yang digunakan.

Parameter yang digunakan sebagai acuan dalam evaluasi grid independen adalah nilai *Equivalent (Von Mises) Stress*, karena parameter tersebut merupakan indikator utama dalam mengevaluasi kekuatan struktur *load spreader*. Nilai tegangan maksimum dari setiap variasi mesh kemudian dibandingkan untuk mengetahui tingkat perubahan hasil simulasi. Hasil uji grid independen ditunjukkan pada Tabel 4.2

Tabel 4. 2 Grid Independen

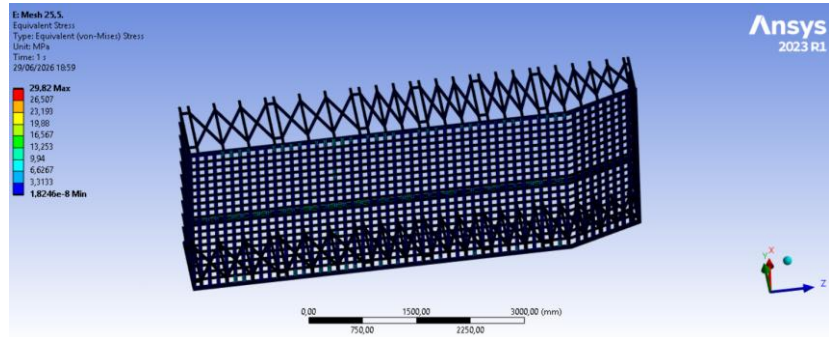
<i>Node</i>	<i>Max Stress Mpa</i>	<i>Difference (%)</i>
1579618	29,637	-
1585518	29,820	0,62
1600817	29,929	0,37

Berdasarkan hasil pengujian, perubahan nilai *Equivalent (Von Mises) Stress* pada ketiga variasi mesh menunjukkan perbedaan yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi telah mendekati kondisi konvergen sehingga perubahan ukuran elemen tidak lagi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil analisis.

4.3.2 *Equivalent (von-Meses) Stress*

Setelah dilakukan pengaturan pembebanan pada model, *simulasi static structural* dijalankan menggunakan perangkat lunak *ANSYS Workbench 2023 R1*. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk kontur distribusi tegangan *Equivalent (von-Mises) Stress* pada seluruh bagian pelat *load spreader*.

Gambar 4. 11 Stress Maksimum



Equivalent (Von Mises) Stress merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan struktur *load spreader* dalam menahan pembebanan selama proses launching. Parameter ini menunjukkan distribusi tegangan ekuivalen pada seluruh bagian struktur sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokasi yang mengalami konsentrasi tegangan terbesar.

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan ANSYS Workbench, diperoleh nilai *Equivalent (Von Mises) Stress* maksimum sebesar 29,820 MPa pada model *load spreader* berskala 0,2. Berdasarkan kontur distribusi tegangan pada Gambar 4.12, tegangan maksimum terjadi pada bagian struktur yang menerima pembebanan terbesar dan berfungsi sebagai jalur utama distribusi gaya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa beban yang diberikan telah terdistribusi ke seluruh struktur *load spreader*, meskipun terdapat konsentrasi tegangan pada beberapa lokasi tertentu.

Karena penelitian ini menggunakan model geometri dengan skala 0,2, maka nilai tegangan hasil simulasi dikonversi ke ukuran sebenarnya berdasarkan metode penskalaan yang digunakan dalam penelitian. Nilai tegangan aktual dihitung menggunakan persamaan:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_m}{\lambda}$$

dengan:

- σ_p = tegangan pada prototipe (MPa)
- σ_m = tegangan pada model (MPa)
- λ = faktor skala geometri (0,2)

Sehingga diperoleh:

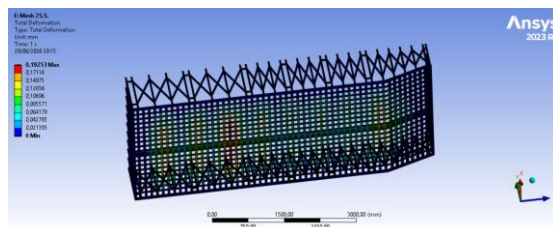
$$\sigma_p = \frac{29,820}{0,2} = 149,10 \text{ MPa}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai Equivalent (Von Mises) Stress pada ukuran sebenarnya adalah sebesar 149,10 MPa. Nilai tersebut masih berada di bawah tegangan luluh (*Yield Strength*) material ASTM A131 Grade AH36 sebesar 355 MPa, sehingga struktur *load spreader* masih bekerja pada daerah elastis dan belum mengalami yielding. Dengan demikian, berdasarkan hasil analisis tegangan ekuivalen, desain *load spreader* dinilai mampu menahan pembebanan yang diberikan selama proses launching kapal dengan tingkat keamanan yang memadai.

4.3.3 Deformasi Total

Selain distribusi tegangan, hasil simulasi *static structural* pada ANSYS juga menampilkan kontur deformasi total (*Total Deformation*) yang terjadi pada pelat *load spreader* akibat pembebanan yang diberikan

Gambar 4. 12 Deformasi Total



Berdasarkan hasil simulasi menggunakan ANSYS Workbench, diperoleh nilai Total Deformation maksimum sebesar 0,19253 mm pada model *load spreader* berskala 0,2. Distribusi deformasi ditunjukkan melalui kontur warna pada Gambar 4.12, di mana warna biru menunjukkan daerah dengan deformasi paling kecil, sedangkan warna merah menunjukkan lokasi dengan deformasi terbesar. Berdasarkan hasil simulasi, deformasi maksimum terjadi pada bagian tengah struktur *load spreader* yang menerima pembebanan terbesar, sedangkan bagian yang berada di sekitar daerah penumpuan mengalami deformasi yang relatif kecil. Pola distribusi tersebut menunjukkan bahwa struktur mengalami perilaku lentur yang wajar akibat pembebanan statis.

Karena penelitian ini menggunakan model geometri berskala 0,2, maka nilai deformasi hasil simulasi dikonversi ke ukuran sebenarnya berdasarkan faktor skala geometri. Perhitungan deformasi aktual dilakukan menggunakan persamaan:

$$\delta_p = \frac{\delta_m}{\lambda}$$

δ_p = deformasi(mm)

δ_m = deformasi pada model (mm)

λ = faktor skala geometri (0,2)

$$\delta_p = \frac{0,19253}{0,2}$$

$$\delta_p = 0,96265 \text{ mm}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa deformasi maksimum pada struktur *load spreader* ukuran sebenarnya adalah sebesar 0,963 mm. Nilai deformasi tersebut tergolong sangat kecil apabila dibandingkan dengan panjang keseluruhan *load spreader*, sehingga menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang baik dalam menahan pembebanan selama proses launching. Dengan demikian, deformasi yang terjadi masih berada dalam batas yang dapat diterima dan tidak

diperkirakan akan memengaruhi fungsi maupun kinerja struktur *load spreader* selama mendistribusikan beban kapal.

4.3.4 *Safety Factor*

Safety Factor merupakan parameter yang menunjukkan tingkat keamanan suatu struktur terhadap pembebanan yang diberikan. Pada ANSYS Workbench, nilai *Safety Factor* dihitung berdasarkan perbandingan antara tegangan luluh (*Yield Strength*) material dengan *Equivalent (Von Mises) Stress* yang terjadi pada struktur. Semakin besar nilai *Safety Factor*, maka semakin besar pula cadangan kekuatan struktur dalam menahan beban kerja.

Pada penelitian ini, analisis *Safety Factor* dilakukan menggunakan material ASTM A131 Grade AH36 yang memiliki tegangan luluh (*Yield Strength*) sebesar 355 MPa. Berdasarkan hasil simulasi, nilai *Equivalent (Von Mises) Stress* maksimum pada ukuran sebenarnya adalah sebesar 149,10 MPa, sehingga diperoleh nilai *Safety Factor* sebagai berikut:

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

dengan:

SF = *Safety Factor*

σ_y = Tegangan luluh (*Yield Strength*) material (MPa)

σ_{max} = Tegangan maksimum yang terjadi pada struktur (MPa)

Berdasarkan hasil analisis diperoleh data sebagai berikut:

$$\sigma_y = 355 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = 149,10 \text{ MPa}$$

Sehingga nilai *Safety Factor* dapat dihitung sebagai berikut:

$$SF = \frac{355}{149,10}$$

$$SF = 2,38$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa struktur *load spreader* memiliki Safety Factor sebesar 2,38, yang berarti struktur masih memiliki cadangan kekuatan sekitar 2,38 kali terhadap beban kerja yang diberikan. Dengan demikian, tegangan kerja yang terjadi masih berada di bawah batas luluh material sehingga struktur diperkirakan masih bekerja dalam daerah elastis dan belum mengalami deformasi permanen.

Berdasarkan ASME BTH-1 – Design of Below-the-Hook Lifting Devices, komponen struktur pada alat bantu pengangkatan harus dirancang dengan faktor keamanan yang memadai terhadap kondisi pembebanan yang bekerja. Nilai Safety Factor yang diperoleh pada penelitian ini berada di atas nilai minimum yang umum digunakan dalam perancangan struktur baja untuk kondisi pembebanan statis, sehingga menunjukkan bahwa desain *load spreader* masih memenuhi aspek kekuatan dan keamanan untuk digunakan pada proses launching kapal.

4.4 Review Running Program dan Keterbatasan Penelitian

Berdasarkan penelitian ada beberapa hal yang memiliki kekurangan, diantaranya:

- a. Penelitian ini menggunakan geometri yang telah diskalakan, sehingga hasil simulasi tidak dikonversi kembali ke geometri ukuran sebenarnya (full scale). Konversi tersebut memerlukan penerapan hukum kesebangunan beserta penyesuaian parameter pembebanan secara konsisten. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan untuk mengesklakan ke ukuran aslinya.
- b. Boundary condition yang diterapkan masih berupa idealisasi melalui penggunaan fixed support dan elastic support, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan boundary condition yang lebih mendekati kondisi operasional di lapangan.