

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Permodelan Konstruksi Kapal

Proses perancangan kapal, ukuran utama (principal dimensions) merupakan parameter fundamental yang menjadi acuan dasar seluruh tahapan desain berikutnya. Ukuran utama kapal mencerminkan karakteristik geometris lambung yang secara langsung mempengaruhi performa hidrodinamis, stabilitas, kapasitas muat, serta keandalan struktural kapal secara keseluruhan.

| Bagian | Ukuran |
|------------------------------------|---------|
| Length Over All (LOA) | 61,3 m. |
| Length Between Perpindicular (LPP) | 55,0 m. |
| Breadth (B) | 13,2 m. |
| Height (H) | 3,9 m |
| Draught (T) | 2,5 m |
| Service Speed (Vs) | 15 kn |

Tabel 4.1 Data Utama Kapal, (Sumber: (Pratama et al., 2020))

Tabel 4.1 menampilkan data utama kapal yang menjadi objek kajian dalam penelitian ini. Berdasarkan tabel tersebut, kapal memiliki panjang keseluruhan (Length Over All/LOA) sebesar 61,3 m dengan panjang antara garis tegak (Length Between Perpindicular/LPP) sebesar 55,0 m, lebar (Breadth) 13,2 m, tinggi (Height) 3,9 m, sarat (Draught) 2,5 m, serta kecepatan dinas (Service Speed) 15 knot. Dimensi-dimensi tersebut menjadi acuan utama dalam proses perancangan struktur lambung kapal. Selanjutnya, untuk mendukung analisis struktural secara menyeluruh.

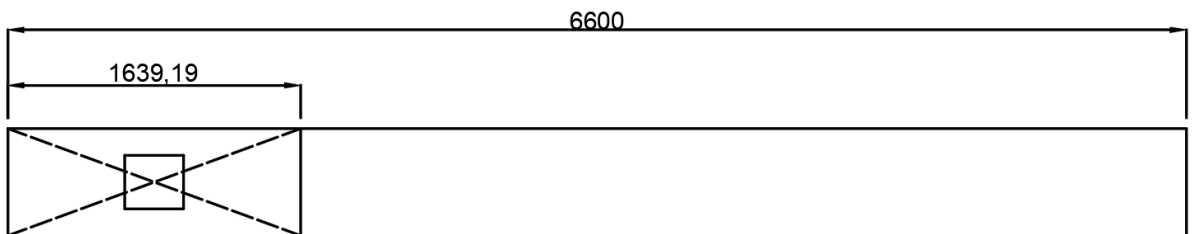
4.1.1 Midship Section

Gambar penampang tengah kapal (midship section) diperlukan untuk menjadi acuan mengenai permodelan struktur yang nantinya akan dilakukan pengujian static structural. informasi struktural meliputi dimensi pelat, profil gading, wrang, geladak, serta tata letak ruang muat maupun tangki.. Untuk mempermudah maka permodelan dilakukan menggunakan software solidworks. Gambar ini selanjutnya menjadi acuan utama dalam proses transformasi geometri dua dimensi menuju pemodelan tiga dimensi, berikut detail dari midship kapal .

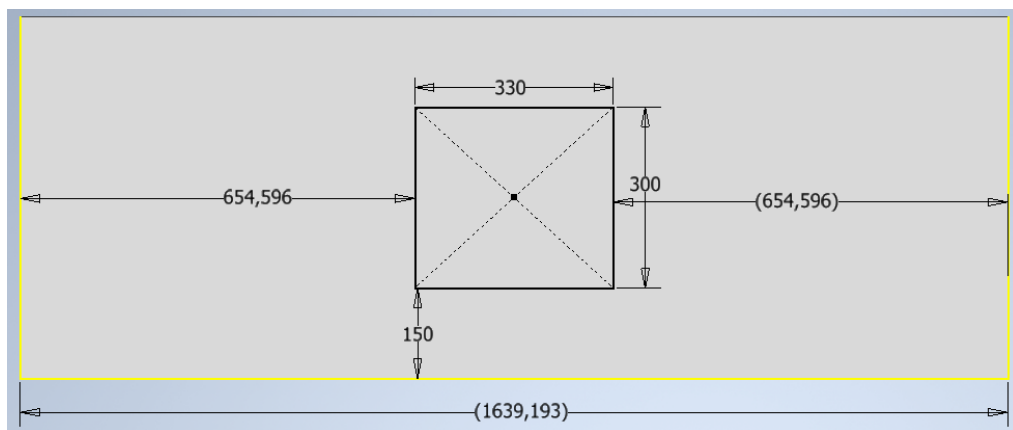
terlampir dan sesuai dengan midship section yang bertujuan untuk memfokuskan beban pada satu titik dan mempermudah pendefinisian beban dan Analisa perilaku terhadap beban yang akan dilakukan penelitian.

4.2 Desain Peletakan Beban

Sebelum dilakukan simulasi, terlebih dahulu ditentukan kondisi pembebanan yang akan diaplikasikan pada konstruksi car deck. Pembebanan diberikan sesuai dengan ketentuan yang berlaku, dimana posisi midspan pada konstruksi car deck ini berada di antara lambung kapal dan girder. Dari beberapa posisi midspan yang tersedia, dipilih posisi yang berada paling ujung sebagai lokasi pembebanan, dengan pertimbangan bahwa frame pada posisi tersebut memiliki ukuran paling kecil sehingga merupakan titik yang paling kritis dan paling rentan terhadap pembebanan. Besarnya beban yang diaplikasikan adalah sebesar 13.067 N secara terdistribusi merata. Lokasi pembebanan pada konstruksi car deck dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.3 Ukuran $\frac{1}{2}$ Lebar Kapal Untuk Penempatan Beban



Gambar 4.4 Detail Ukuran Untuk Penempatan Beban Kendaraan

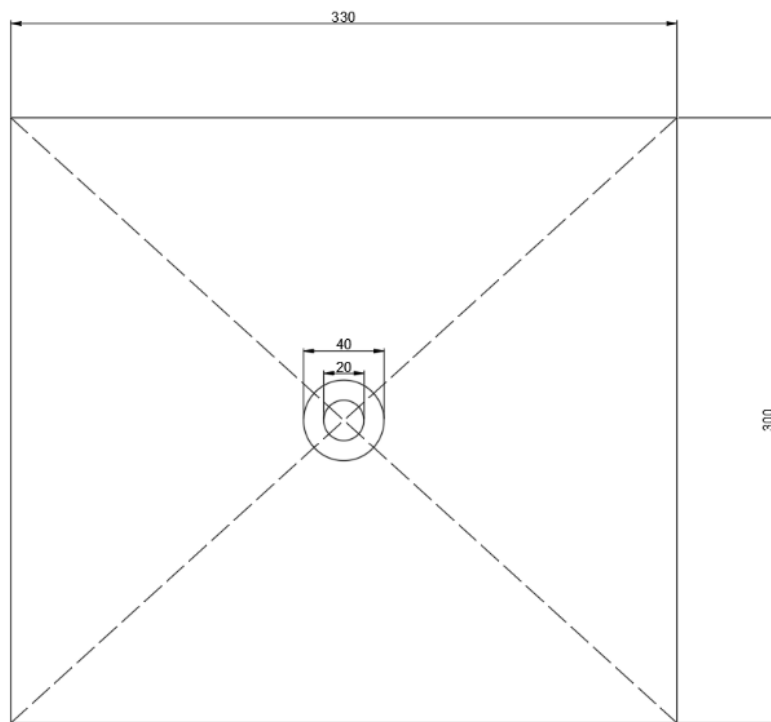
Pada **Gambar 4.3** Tersebut merupakan ukuran dari $\frac{1}{2}$ lebar kapal sebesar **6600 mm**, yang digunakan untuk proses penelitian, hal tersebut bertujuan untuk memfokuskan sebaran beban pada area beban diberikan. Pada **Gambar 4.4** merupakan area paling lemah, diaplikasikan secara terdistribusi merata pada posisi midspan paling ujung konstruksi car deck, yaitu pada daerah di antara lambung kapal dan girder. hal tersebut bertujuan untuk mendapat hasil maksimal dikarenakan menggunakan bagian konstruksi paling lemah, berupa midspan. Lokasi tersebut pada saat pengujian akan diberikan beban sebesar 13.067 N, Pemilihan lokasi ini didasarkan pada pertimbangan bahwa frame pada posisi paling ujung memiliki ukuran yang paling kecil dibandingkan frame lainnya, sehingga daerah tersebut merupakan titik paling kritis yang berpotensi mengalami tegangan dan deformasi paling besar akibat pembebanan. Kondisi tumpuan (boundary condition) ditetapkan pada

bagian lambung kapal dan girder sebagai tumpuan tetap (fixed support). Konfigurasi pembebanan dan kondisi batas ini selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam seluruh proses simulasi static structural pada perangkat lunak ANSYS, baik untuk desain pertama maupun desain kedua, sehingga perbandingan hasil simulasi antar kedua desain dapat dilakukan secara konsisten dan objektif.

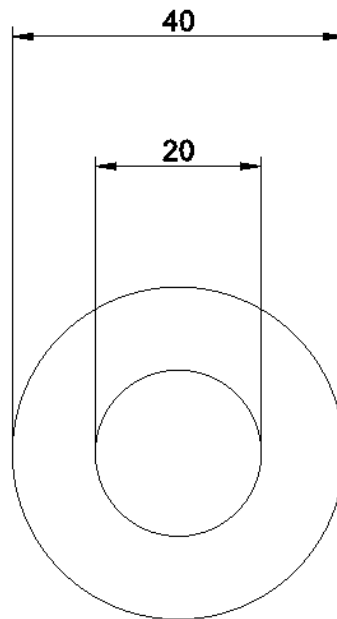
4.3 Pedefinisian Deformasi dan Detail Penambahan Material

Pengujian dilakukan pada empat kondisi geometri spesimen yang berbeda. Keempat kondisi tersebut dirancang untuk merepresentasikan variasi yang mungkin ditemukan pada kondisi nyata, mulai dari kondisi ideal hingga kondisi yang mengalami kerusakan atau modifikasi. Secara berurutan, geometri pengujian yang digunakan meliputi: (1) kondisi normal sebagai acuan dasar, (2) kondisi dengan deformasi, (3) kondisi deformasi dengan penambahan filler sebagai material pengisi, dan (4) kondisi dengan penambahan ketebalan.

Pendefinisian deformasi dilakukan dengan mengacu pada rules BKI dimana hal tersebut nantinya akan digunakan untuk study perbandingan antara kondisi normal, deformasi, dan dengan filler serta ketebalan tambahan untuk memvalidasi hasil dari penelitian ini sendiri. Berikut detail pendefinisian deformasi serta penambahan material terlampir.



Gambar 4.5 Posisi dan ukuran Bagian deformasi



Gambar 4.6 Ukuran Filler



Gambar 4.7 Ketebalan Tambahan Material Beton Cor

Pada **Gambar 4.5** adalah detail yang menginformasikan lokasi deformasi itu terletak yaitu pada bagian Tengah area yang terkena beban kendaraan dengan detail, pada diameter 20 mm terjadi lubang yang Dimana hal tersebut sudah termasuk kategori deformasi menurut rules BKI. Kemudian pada diameter 40 mm terjadi penipisan pelat sebanyak 50%, yang Dimana hal tersebut termasuk kategori deformasi menurut rules BKI.

Pada **Gambar 4.6** adalah detail dari Filler beton cor, ketebalan pada diameter 20 mm yaitu 8 mm (sama dengan ketebalan pelat cardeck), dan pada diameter 40 mm memiliki ketebalan 4 mm. Ketebalan tersebut bertujuan untuk mengisi bagian yang mengalami deformasi atau filler.

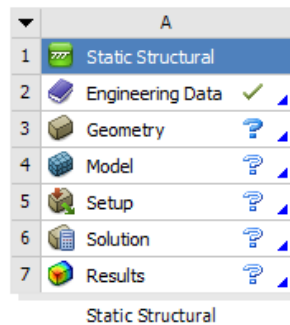
Pada **Gambar 4.7** adalah detail dari ketebalan tambahan yang memiliki detail tambahan berupa peletakan material tambahan berupa beton cor setebal **8 mm** (sama dengan ketebalan pelat cardeck)

4.4 Proses Analisis Static Structural di Ansys Workbench

A. Static Structural option

Analisis numerik dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench dengan modul Static Structural. Modul ini dipilih karena mampu mensimulasikan respons struktur terhadap pembebanan statis secara akurat dan tervalidasi secara teknis. Pengujian dilakukan pada konstruksi car deck dengan

mempertimbangkan keempat variasi geometri spesimen yang telah didefinisikan sebelumnya. Alur kerja simulasi dalam ANSYS Workbench terdiri atas beberapa tahapan yang saling terintegrasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar berikut.



Gambar 4.8 Static Structural Analysis

Berdasarkan gambar di atas, alur kerja simulasi Static Structural pada ANSYS Workbench terdiri atas tujuh tahapan yang harus diselesaikan secara berurutan, meliputi: (1) Static Structural, sebagai modul utama analisis; (2) Engineering Data, yaitu tahap pendefinisian properti mekanis material yang digunakan; (3) Geometry, yaitu tahap pembuatan atau impor geometri model spesimen car deck; (4) Model, yaitu tahap pengaturan mesh dan kontak antar komponen; (5) Setup, yaitu tahap penetapan kondisi batas (boundary condition) dan pembebanan; (6) Solution, yaitu tahap eksekusi proses komputasi numerik; serta (7) Results, yaitu tahap ekstraksi dan visualisasi hasil simulasi. Seluruh tahapan tersebut dilaksanakan secara sistematis untuk memperoleh hasil analisis yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

B. Engineering Data

Pendefinisian properti material merupakan tahap krusial dalam proses simulasi, karena karakteristik mekanis material secara langsung mempengaruhi akurasi dan validitas hasil analisis. Dalam penelitian ini, dua jenis material didefinisikan ke dalam Engineering Data perangkat lunak simulasi, yaitu baja ASTM A36 sebagai material utama spesimen dan concrete sebagai material filler. Seluruh properti mekanis material yang digunakan mengacu pada pustaka material standar (General_Materials.xml) yang tersedia dalam perangkat lunak. Detail pendefinisian material tersebut ditunjukkan pada Gambar berikut

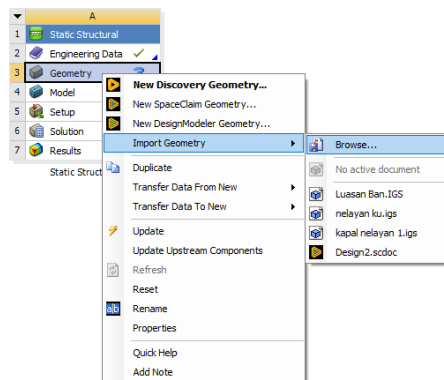
| | A | B | C | D |
|---|------------------------------|---|---|-----------------------|
| 1 | Contents of Engineering Data | | | Source |
| 3 | ASTM A36 | | | General_Materials.xml |
| 4 | cocrete | | | General_Materials.xml |

Gambar 4.9 Mekanikal Properties

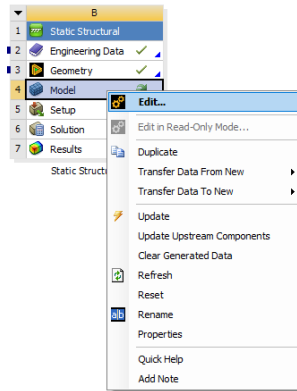
Berdasarkan gambar di atas, terlihat bahwa kedua material telah berhasil didefinisikan dalam Engineering Data dengan sumber referensi yang sudah tertera. Material ASTM A36 digunakan untuk merepresentasikan spesimen baja pada kondisi normal, deformasi, sedangkan material concrete diaplikasikan khusus pada kondisi sebagai material pengisi (filler) pada area deformasi. Material tersebut yang nantinya akan digunakan saat pendefinisian material pada proses analisis static structural pada software ansys.

C. Geometry

Setelah model geometri tiga dimensi selesai dibuat, langkah selanjutnya adalah mengimpor geometri tersebut ke dalam perangkat lunak analisis elemen hingga, yaitu ANSYS Static Structural. Proses impor dilakukan melalui menu Geometry dengan memilih opsi Import Geometry, kemudian memilih file geometri yang telah disiapkan sebelumnya. Setelah proses impor selesai, geometri yang masuk perlu diperiksa dan disesuaikan melalui fitur Edit Model Geometry guna memastikan model telah terbaca dengan benar dan siap untuk tahap pengaturan selanjutnya. Proses impor dan pengeditan geometri model tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 berikut.



Gambar 4.10 Import Geometri

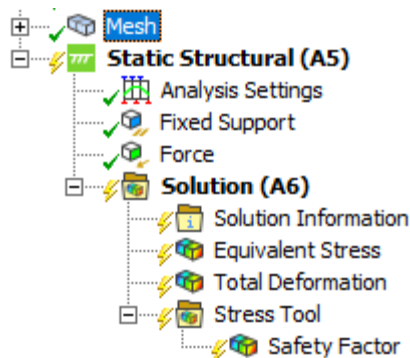


Gambar 4.11 Edit Model Geomety

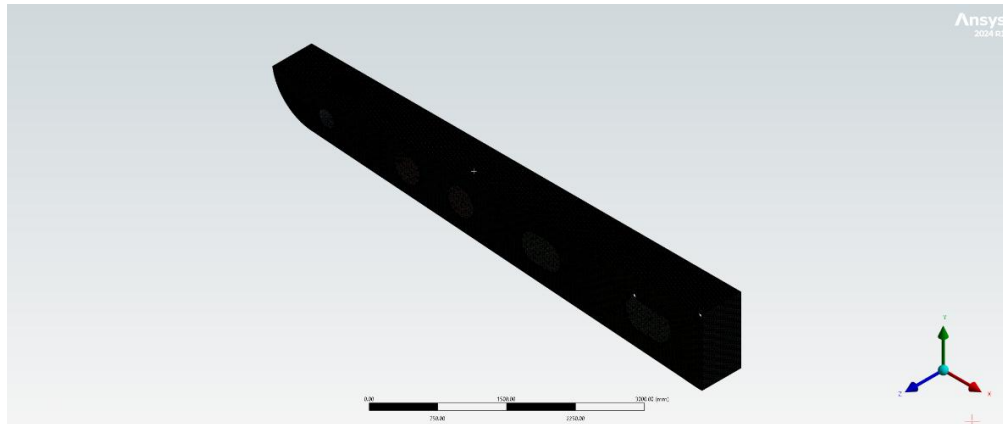
Gambar 4.10 menunjukkan proses Import Geometry pada ANSYS Static Structural, di mana file geometri dipilih melalui menu Browse yang tersedia pada opsi Import Geometry. Sementara itu, **Gambar 4.11** menampilkan tahap selanjutnya yaitu proses Edit Model Geometry, yang dilakukan untuk memeriksa dan menyesuaikan geometri model yang telah berhasil diimpor ke dalam sistem. Kedua proses ini merupakan tahapan awal yang krusial dalam analisis elemen hingga, karena keakuratan geometri model akan secara langsung mempengaruhi kualitas hasil simulasi dan analisis struktural yang dilakukan pada tahap berikutnya.

D. Messing

Setelah geometri konstruksi car deck berhasil diimpor ke dalam lingkungan Mechanical ANSYS, tahap selanjutnya adalah konfigurasi analisis yang meliputi pengaturan mesh, penetapan kondisi batas, pembebanan, serta penentuan parameter output yang akan dievaluasi. Seluruh konfigurasi tersebut dilakukan melalui tree outline pada panel navigasi ANSYS Mechanical. Susunan konfigurasi analisis Static Structural konstruksi car deck ditunjukkan pada Gambar berikut.



Gambar 4.12 Pengaturan Messing Geometry



Gambar 4.13 Visual Hasil Messing Geometri

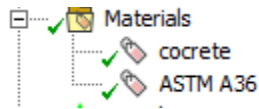
Berdasarkan **Gambar 4.12** di atas, tahap Mesh yang mengatur diskretisasi geometri konstruksi car deck menjadi elemen-elemen hingga (finite element) sebelum proses komputasi dilakukan. Pengaturan mesh merupakan salah satu aspek paling kritis dalam analisis elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA), karena kualitas dan kerapatan mesh secara langsung menentukan akurasi serta konvergensi hasil simulasi. Dalam konteks analisis Static Structural konstruksi car deck, pengaturan mesh yang tepat menjadi mutlak diperlukan mengingat kompleksitas geometri dan variasi kondisi yang diuji.

Konvergensi dalam analisis FEA merujuk pada kondisi di mana hasil simulasi tidak lagi mengalami perubahan signifikan meskipun ukuran elemen mesh diperkecil lebih lanjut. Untuk mencapai konvergensi tersebut, dilakukan mesh convergence study dengan cara memvariasikan ukuran elemen secara bertahap, kemudian membandingkan hasil parameter kritis seperti equivalent stress dan total deformation pada setiap iterasi. Ukuran mesh yang menghasilkan perbedaan hasil di bawah ambang batas toleransi yang ditetapkan yang umumnya kurang dari 5% terhadap iterasi sebelumnya ditetapkan sebagai ukuran mesh optimal yang digunakan dalam simulasi.

Kemudian Pada **Gambar 4.13** Merupakan tampilan dari geometri yang telah diatur ukuran meshing dan telah menunjukkan hasil yang memuaskan (non error meshing) kemudian dapat dilanjutkan untuk langkah selanjutnya. ANSYS juga menampilkan color contour langsung pada model geometri di viewport utama ketika mesh metric diaktifkan. Elemen yang berwarna hijau hingga biru menunjukkan kualitas baik, sedangkan elemen berwarna kuning hingga merah mengindikasikan elemen yang bermasalah dan perlu diperbaiki. Zona merah ini biasanya muncul di area sudut tajam, tepi pelat, atau transisi antara dua ukuran elemen yang berbeda. Jika ditemukan banyak zona merah pada area kritis seperti di bawah titik beban atau tumpuan, mesh di area tersebut perlu diperhalus sebelum simulasi dijalankan.

E. Definisi Material

Salah satu aspek fundamental yang membedakan keempat variasi kondisi pengujian dalam penelitian ini adalah penggunaan material yang diaplikasikan pada masing-masing geometri spesimen konstruksi car deck. Pendefinisian material yang tepat dan akurat dalam lingkungan Mechanical ANSYS menjadi prasyarat utama agar simulasi dapat merepresentasikan perilaku struktural yang mendekati kondisi nyata. Material yang digunakan dalam penelitian ini telah didefinisikan dan ditetapkan ke dalam model sesuai dengan peran dan posisinya pada masing-masing kondisi geometri. Penerapan material pada model simulasi ditunjukkan pada Gambar berikut.



Gambar 4.14 Pengaturan Material Ansys

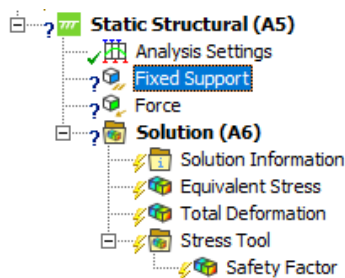
Berdasarkan **Gambar 4.14** di atas, terdapat dua material yang telah berhasil didefinisikan dan diverifikasi dalam Materials tree pada lingkungan Mechanical ANSYS, yaitu Concrete dan ASTM A36, yang masing-masing ditandai dengan indikator centang hijau sebagai konfirmasi bahwa properti mekanis material telah terdefinisi dengan valid dan siap digunakan dalam proses simulasi.

Perbedaan material inilah yang menjadi poin utama dan pembeda mendasar antar variasi kondisi dalam penelitian ini. Material ASTM A36 merupakan baja struktural yang digunakan sebagai material utama konstruksi car deck pada seluruh kondisi pengujian. Sementara itu, material Concrete diaplikasikan secara khusus yakni pada kondisi deformasi dengan penambahan filler, di mana area deformasi pada konstruksi ditutup menggunakan material beton sebagai pengisi.

Dengan demikian, analisis Static Structural yang dilakukan tidak hanya mengevaluasi pengaruh variasi geometri terhadap respons struktural konstruksi car deck, tetapi juga mengkaji secara komparatif bagaimana perbedaan material pengisi (filler) berkontribusi terhadap distribusi tegangan, deformasi total, serta faktor keamanan (safety factor) struktur secara keseluruhan.

F. Solution

Setelah material dan geometri konstruksi car deck terdefinisi dengan baik, tahap selanjutnya adalah penetapan kondisi batas (boundary condition) dan pembebanan pada model simulasi. Kondisi batas dan pembebanan merupakan representasi matematis dari kondisi operasional nyata yang dialami oleh konstruksi car deck, sehingga penetapannya harus dilakukan secara cermat dan sesuai dengan skenario pembebanan yang direncanakan. Selain itu, pada tahap ini juga ditetapkan parameter-parameter output yang akan dievaluasi sebagai hasil simulasi. Konfigurasi lengkap kondisi batas, pembebanan, serta parameter solusi yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar berikut.



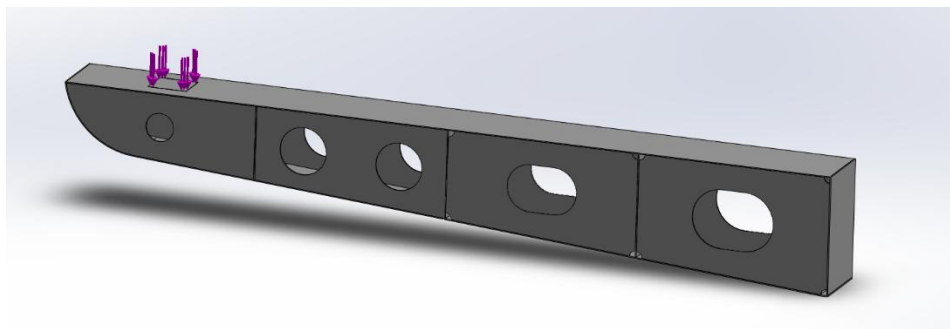
Gambar 4.15 Pengaturan Solution Ansys

Berdasarkan **Gambar 4.15** di atas, konfigurasi analisis Static Structural (A5) terdiri atas tiga komponen utama. Pertama, Analysis Settings yang memuat parameter umum analisis seperti jumlah step pembebanan dan kriteria konvergensi solusi. Kedua, Fixed Support yang merepresentasikan kondisi tumpuan tetap pada konstruksi car deck, di mana seluruh derajat kebebasan (degrees of freedom) pada lokasi tumpuan dikekang

sempurnanya sehingga tidak terjadi translasi maupun rotasi. Ketiga, Force yang merepresentasikan beban yang diaplikasikan pada konstruksi sesuai dengan skenario pembebanan yang ditetapkan.

Adapun parameter output yang dievaluasi dalam Solution (A6) meliputi Solution Information sebagai informasi proses komputasi, Equivalent Stress (tegangan ekuivalen Von Mises) untuk mengevaluasi distribusi tegangan pada seluruh komponen konstruksi, Total Deformation untuk mengukur besaran deformasi maksimum yang terjadi, serta Safety Factor melalui Stress Tool sebagai indikator kuantitatif terhadap keamanan struktural konstruksi car deck.

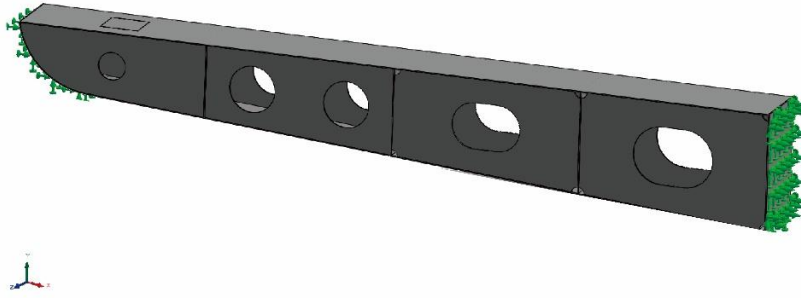
Pembebanan pada konstruksi car deck diaplikasikan secara terpusat pada bagian permukaan atas struktur, merepresentasikan beban operasional yang bekerja tegak lurus terhadap bidang konstruksi. Lokasi aplikasi gaya (Force) tersebut ditunjukkan pada Gambar berikut.



Gambar 4.16 Lokasi Beban

Berdasarkan **Gambar 4.16** di atas, beban gaya diterapkan pada bagian atas konstruksi car deck yang ditandai dengan anak panah berwarna ungu, menunjukkan arah dan titik aplikasi pembebanan yang bekerja secara vertikal ke bawah terhadap permukaan struktur. Penetapan lokasi pembebanan ini didasarkan pada kondisi operasional nyata konstruksi car deck yang menerima beban dari kendaraan maupun muatan yang berada di atasnya.

Untuk pendefinisian tumpuan fixed support di sisi lambung merepresentasikan kondisi sambungan pelat cardeck dengan dinding lambung kapal (side shell). Secara fisik, tepi pelat cardeck pada sisi ini terhubung langsung dan menyatu dengan struktur lambung melalui pengelasan, sehingga tidak memungkinkan terjadinya perpindahan translasi maupun rotasi. Lambung kapal yang masif bertindak sebagai tumpuan kaku yang menahan seluruh gaya dan momen yang diterima pelat. Lokasi penerapan Fixed Support pada geometri konstruksi ditunjukkan pada Gambar berikut.



Gambar 4. 17 Lokasi Fixed Support

Berdasarkan **Gambar 4.17** di atas, kondisi Fixed Support diaplikasikan pada kedua ujung konstruksi car deck, yang ditandai dengan simbol tumpuan berwarna hijau pada sisi kiri dan sisi kanan struktur. Penerapan Fixed Support pada kedua ujung ini mengekang seluruh derajat kebebasan (degrees of freedom) secara penuh, baik translasi maupun rotasi pada ketiga sumbu koordinat, sehingga model merepresentasikan kondisi perletakan jepit-jepit (fixed-fixed) yang sesuai dengan kondisi pemasangan konstruksi car deck pada rangka kapal.

Dengan telah ditetapkannya kondisi pembebanan dan kondisi batas secara komprehensif, model simulasi Static Structural konstruksi car deck telah siap untuk dieksekusi. Hasil analisis yang meliputi distribusi equivalent stress, total deformation, serta safety factor untuk keempat variasi geometri akan dibahas secara menyeluruh pada bab selanjutnya.

4.5 Hasil dan Validasi Hasil Pengujian Static Structural

4.5.1 Kondisi Normal

A. Grid Independent

Sebelum dilakukan simulasi utama, terlebih dahulu dilakukan uji independensi mesh (mesh independence study) untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada jumlah elemen atau node yang digunakan. Uji ini dilakukan dengan membandingkan nilai max stress yang dihasilkan dari tiga variasi jumlah node, yaitu **2.455.972**, **2.589.697**, dan **2.860.051** node. Hasil perbandingan disajikan pada **Tabel 4.2**, berikut.

| Node | Max Stress Mpa | Difference (%) |
|---------|----------------|----------------|
| 2455972 | 112,30 | - |
| 2589697 | 112,30 | 0 |
| 2860051 | 112,31 | 0,01 |

Tabel 4.2 Grid Independent Pada Kondisi Normal

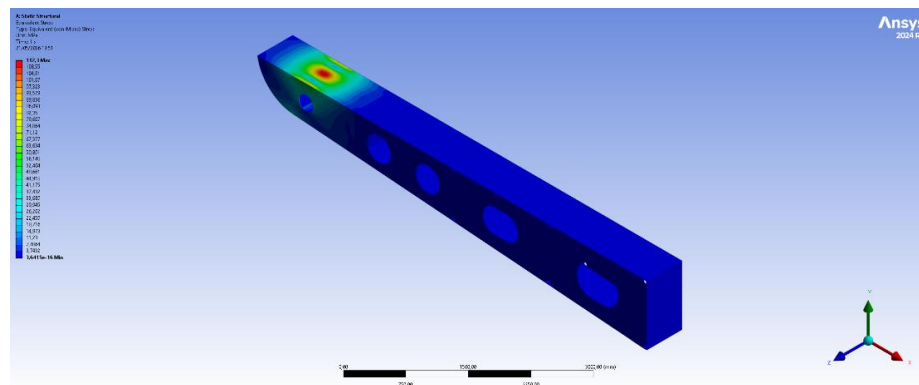
Berdasarkan **Tabel 4.2**, dapat dilihat bahwa peningkatan jumlah node dari **2.455.972** menjadi **2.589.697** tidak menghasilkan perubahan nilai max stress, dengan selisih sebesar **0%**. Demikian pula, peningkatan jumlah node dari **2.589.697** menjadi **2.860.051** hanya menghasilkan perbedaan sebesar **0,01%**, yang berada di bawah batas toleransi konvergensi yang umum digunakan dalam analisis elemen hingga, yaitu sebesar 1–5%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi telah konvergen dan tidak lagi sensitif terhadap penambahan jumlah node. Oleh

karena itu, variasi mesh dengan jumlah node **2.589.697** dipilih sebagai konfigurasi mesh optimal untuk digunakan dalam simulasi selanjutnya, karena menghasilkan nilai yang akurat dengan waktu komputasi yang lebih efisien dibandingkan mesh yang lebih halus.

B. Equivalent (von-Mises) Stress

Setelah dilakukan pengaturan kondisi batas (boundary condition) dan pembebanan pada model, simulasi static structural dijalankan menggunakan perangkat lunak ANSYS. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk kontur distribusi tegangan Equivalent (Von-Mises) Stress pada seluruh bagian rangka. Von Mises Stress digunakan karena struktur pada kenyataannya tidak hanya menerima satu jenis tegangan secara tunggal, melainkan menerima kombinasi tegangan dari berbagai arah secara bersamaan, yaitu tegangan normal pada sumbu X, Y, Z serta tegangan geser di antara bidang-bidangnya. Jika hanya melihat satu komponen tegangan saja maka gambaran kondisi kritis struktur menjadi tidak lengkap dan berpotensi menyesatkan.

Von Mises Stress hadir sebagai solusi dengan cara merangkul seluruh komponen tegangan tersebut menjadi satu nilai tunggal yang representatif. Nilai tunggal inilah yang mencerminkan kondisi tegangan sesungguhnya yang dialami suatu titik pada material, sehingga peneliti cukup membaca satu angka untuk menilai apakah titik tersebut aman atau sudah mendekati batas kritis. Distribusi tegangan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.18**, berikut.



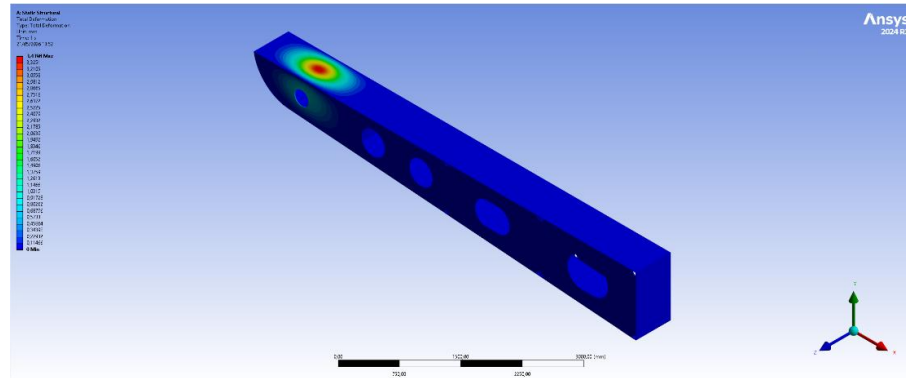
Gambar 4.18 Equivalent (von-Mises) Stress Pada Kondisi Normal

Berdasarkan **Gambar 4.18**, hasil simulasi static structural pada ANSYS menunjukkan bahwa nilai Equivalent (Von-Mises) Stress maksimum yang terjadi pada rangka adalah sebesar **112,30 MPa**. Nilai tegangan maksimum tersebut terjadi pada titik kritis rangka, yang ditunjukkan oleh warna merah pada kontur distribusi tegangan.

Material yang digunakan pada Cardeck keseluruhan adalah baja ASTM A36 dengan nilai yield strength sebesar 250 MPa. Berdasarkan perbandingan tersebut, nilai tegangan maksimum yang terjadi **112,30 MPa** masih berada di bawah nilai yield strength material 250 MPa, sehingga rangka dinyatakan aman dan tidak mengalami kegagalan plastis akibat pembebanan yang diberikan.

C. Deformasi Total

Selain distribusi tegangan, hasil simulasi static structural pada ANSYS juga menampilkan kontur deformasi total (Total Deformation) yang terjadi pada rangka akibat pembebanan yang diberikan. Deformasi total menggambarkan besarnya perpindahan (displacement) maksimum yang dialami oleh rangka secara keseluruhan. Distribusi deformasi total pada rangka dapat dilihat pada **Gambar 4.19**, berikut.

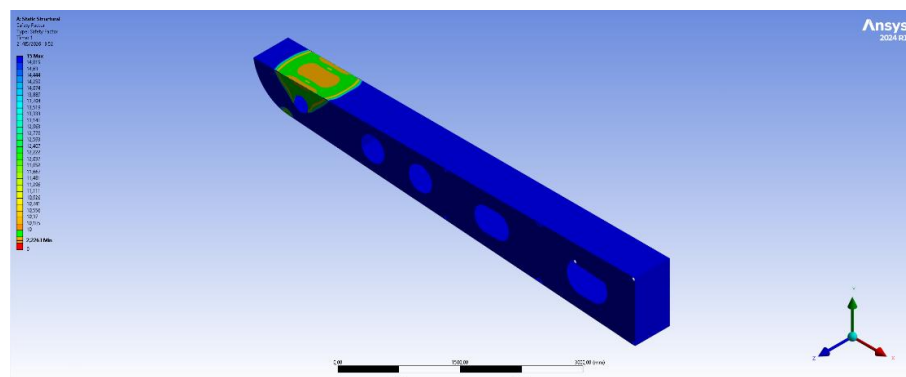


Gambar 4.19 Deformasi Total Pada Kondisi Normal

Berdasarkan **Gambar 4.19**, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai deformasi total maksimum yang terjadi pada rangka adalah sebesar **3,4398 mm**. Nilai deformasi maksimum tersebut terjadi pada titik yang paling jauh dari tumpuan (support), yang ditunjukkan oleh warna merah pada kontur distribusi deformasi, sedangkan daerah yang mendekati warna biru menunjukkan perpindahan yang mendekati nol atau berada pada titik tumpuan.

D. Savety Factor

Untuk mengevaluasi tingkat keamanan rangka secara menyeluruh, dilakukan analisis faktor keamanan (Safety Factor) menggunakan ANSYS Static Structural. Faktor keamanan merupakan rasio antara kekuatan material (yield strength) terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada komponen, yang digunakan untuk menentukan apakah desain rangka telah memenuhi syarat keamanan struktural. Distribusi faktor keamanan pada rangka dapat dilihat pada **Gambar 4.20**, berikut.



Gambar 4.20 Savety Factor Pada Kondisi Normal

Berdasarkan **Gambar 4.20**, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan minimum (minimum safety factor) yang terjadi pada rangka adalah sebesar **2,2263**. Nilai minimum tersebut terjadi pada titik kritis rangka, yaitu pada

daerah yang mengalami tegangan paling tinggi, yang ditunjukkan oleh warna biru pada kontur distribusi faktor keamanan, sedangkan daerah dengan warna merah menunjukkan nilai faktor keamanan yang lebih tinggi dan relatif lebih aman.

Nilai faktor keamanan sebesar $2,2263 \geq 2$ menunjukkan bahwa rangka telah memenuhi syarat keamanan struktural yang umum disyaratkan dalam perancangan, yakni SF minimum ≥ 2 . Dengan demikian, rangka dinyatakan aman untuk digunakan pada kondisi pembebanan yang telah ditentukan, dengan cadangan kekuatan yang cukup untuk mengantisipasi variasi beban maupun ketidakpastian dalam proses manufaktur.

4.5.2 Kondisi Deformasi

A. Grid Independent

Sebelum dilakukan simulasi utama, terlebih dahulu dilakukan uji independensi mesh (mesh independence study) untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada jumlah elemen atau node yang digunakan. Uji ini dilakukan dengan membandingkan nilai max stress yang dihasilkan dari tiga variasi jumlah node, yaitu **3.088.696**, **3.068.395**, dan **3.051.505** node. Hasil perbandingan disajikan pada **Tabel 4.3**, berikut.

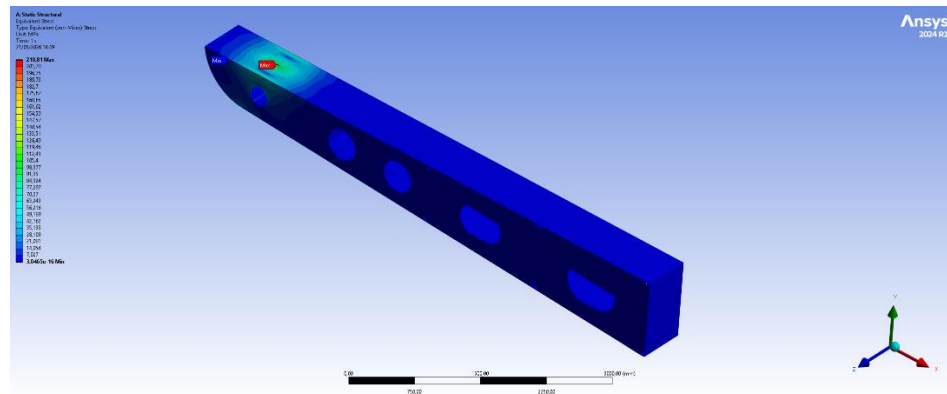
| Node | Max Stress Mpa | Difference (%) |
|---------|----------------|----------------|
| 3088696 | 210,81 | - |
| 3068395 | 212,11 | 0,62 |
| 3051505 | 212,07 | 0,64 |

Tabel 4.3 Grid Independent pada kondisi deformasi

Berdasarkan **Tabel 4.3** Grid Independent pada kondisi deformasi, dapat dilihat bahwa peningkatan jumlah node dari **3.088.696** menjadi **3.068.395** tidak menghasilkan perubahan nilai max stress yang signifikan, dengan selisih sebesar **0,62 %**. Demikian pula, peningkatan jumlah node dari **3.088.696** menjadi **3.051.505** hanya menghasilkan perbedaan sebesar **0,64%**, yang berada di bawah batas toleransi konvergensi yang umum digunakan dalam analisis elemen hingga, yaitu sebesar 1–5%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi telah konvergen dan tidak lagi sensitif terhadap penambahan jumlah node. Oleh karena itu, variasi mesh dengan jumlah node **3.088.696** dipilih sebagai konfigurasi mesh optimal untuk digunakan dalam simulasi selanjutnya, karena menghasilkan nilai yang akurat dengan waktu komputasi yang lebih efisien dibandingkan mesh yang lebih halus.

B. Stres Equivalent

Setelah dilakukan pengaturan kondisi batas (boundary condition) dan pembebanan pada model, simulasi static structural dijalankan menggunakan perangkat lunak ANSYS. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk kontur distribusi tegangan Equivalent (Von-Mises) Stress pada seluruh bagian rangka. Distribusi tegangan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.21**, berikut.



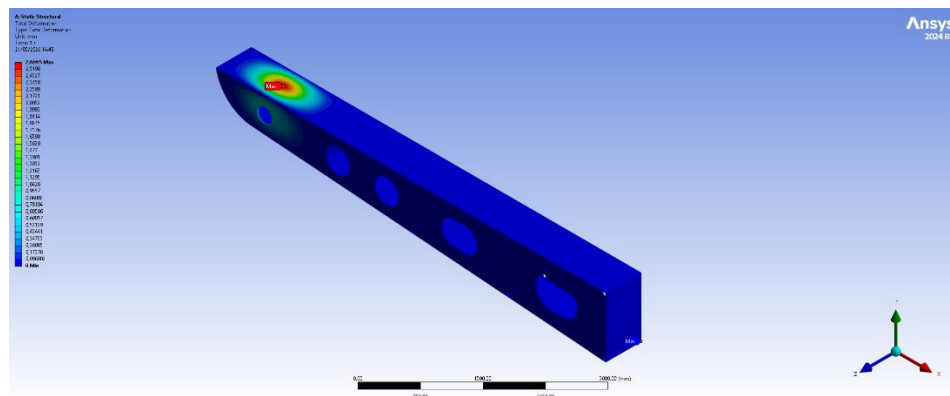
Gambar 4.21 Equivalent (von-Mises) Stress Pada Kondisi Deformasi

Berdasarkan **Gambar 4.21**, hasil simulasi static structural pada ANSYS menunjukkan bahwa nilai Equivalent (Von-Mises) Stress maksimum yang terjadi pada rangka adalah sebesar 210,81 MPa. Nilai tegangan maksimum tersebut terjadi pada titik kritis rangka, yang ditunjukkan oleh warna merah pada kontur distribusi tegangan.

Material yang digunakan pada rangka adalah baja ASTM A36 dengan nilai yield strength sebesar 250 MPa. Berdasarkan perbandingan tersebut, nilai tegangan maksimum yang terjadi **210,81 MPa**.

C. Deformasi Total

Selain distribusi tegangan, hasil simulasi static structural pada ANSYS juga menampilkan kontur deformasi total (Total Deformation) yang terjadi pada rangka akibat pembebanan yang diberikan. Deformasi total menggambarkan besarnya perpindahan (displacement) maksimum yang dialami oleh rangka secara keseluruhan. Distribusi deformasi total pada rangka dapat dilihat pada **Gambar 4.22** berikut.

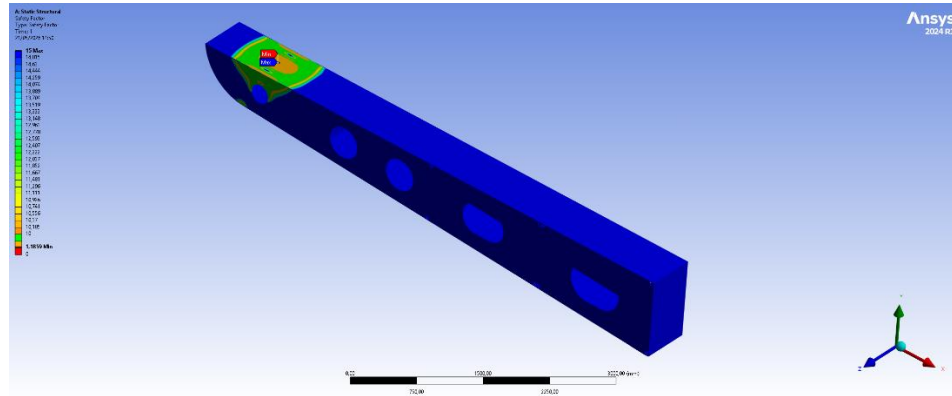


Gambar 4.22 Deformasi Total Pada Kondisi Normal

Berdasarkan **Gambar 4.22**, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai deformasi total maksimum yang terjadi pada rangka adalah sebesar **2,6065 mm**. Nilai deformasi maksimum tersebut terjadi pada titik yang paling jauh dari tumpuan (support), yang ditunjukkan oleh warna merah pada kontur distribusi deformasi, sedangkan daerah yang mendekati warna biru menunjukkan perpindahan yang mendekati nol atau berada pada titik tumpuan.

D. Savety Factor

Untuk mengevaluasi tingkat keamanan rangka secara menyeluruh, dilakukan analisis faktor keamanan (Safety Factor) menggunakan ANSYS Static Structural. Faktor keamanan merupakan rasio antara kekuatan material (yield strength) terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada komponen, yang digunakan untuk menentukan apakah desain rangka telah memenuhi syarat keamanan struktural. Distribusi faktor keamanan pada rangka dapat dilihat pada **Gambar 4.23**, berikut.



Gambar 4.23 Savety Factor Pada Kondisi Deformasi

Berdasarkan **Gambar 4.23**, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan minimum (minimum safety factor) yang terjadi pada rangka adalah sebesar **1,1859**. Nilai minimum tersebut terjadi pada titik kritis konstruksi, yaitu pada daerah yang mengalami tegangan paling tinggi, yang ditunjukkan oleh warna biru pada kontur distribusi faktor keamanan, sedangkan daerah dengan warna merah menunjukkan nilai faktor keamanan yang lebih tinggi dan relatif lebih aman.

4.5.3 Kondisi Deformasi Dengan Filler Beton Cor

A. Grid Independent

Sebelum dilakukan simulasi utama, terlebih dahulu dilakukan uji independensi mesh (mesh independence study) untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada jumlah elemen atau node yang digunakan. Uji ini dilakukan dengan membandingkan nilai max stress yang dihasilkan dari tiga variasi jumlah node, yaitu **3.257.971**, **2.637.449**, dan **2.277.865** node. Hasil perbandingan disajikan pada **Tabel 4.4** berikut.

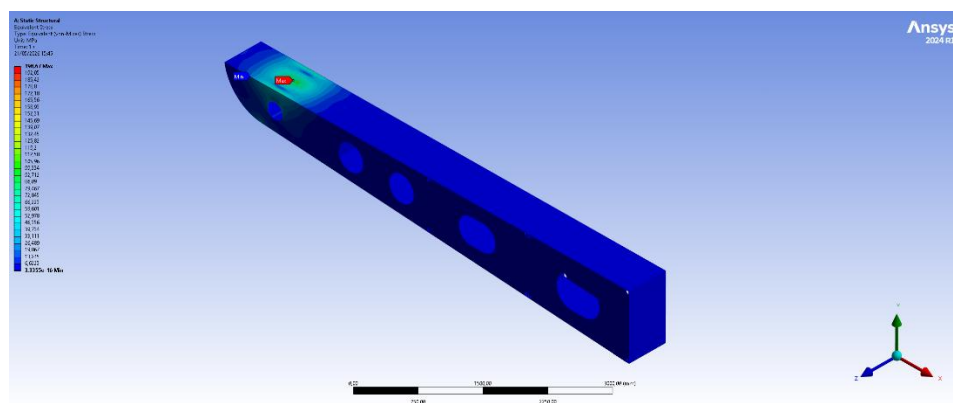
| Node | Max Stress Mpa | Difference (%) |
|---------|----------------|----------------|
| 3257971 | 198,67 | - |
| 2637449 | 198,63 | 0,02 |
| 2277865 | 198,61 | 0,03 |

Tabel 4. 4 Grid Independent Cardeck Deformasi dengan Tambahan Beton Cor Sebagai Filler

Berdasarkan **Tabel 4.4**, dapat dilihat bahwa peningkatan jumlah node dari **3.257.971** menjadi **2.637.449** tidak menghasilkan perubahan nilai max stress yang signifikan, dengan selisih sebesar 0,02%. Demikian pula, peningkatan jumlah node dari **3.257.971** menjadi **2.277.92** hanya menghasilkan perbedaan sebesar 0,03%, yang berada di bawah batas toleransi konvergensi yang umum digunakan dalam analisis elemen hingga, yaitu sebesar 1–5%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi telah konvergen dan tidak lagi sensitif terhadap penambahan jumlah node. Oleh karena itu, variasi mesh dengan jumlah node **3257971** dipilih sebagai konfigurasi mesh optimal untuk digunakan dalam simulasi selanjutnya.

B. Equivalent (von-Mises) Stress

Setelah dilakukan pengaturan kondisi batas (boundary condition) dan pembebanan pada model, simulasi static structural dijalankan menggunakan perangkat lunak ANSYS. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk kontur distribusi tegangan Equivalent (Von-Mises) Stress pada seluruh bagian rangka, yang terdiri dari material baja ASTM A36 sebagai rangka utama dan beton cor sebagai material pengisi (filler). Distribusi tegangan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.24** berikut.

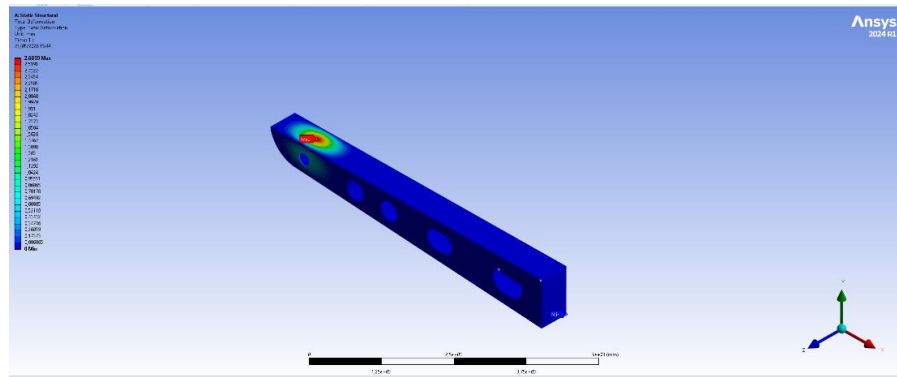


Gambar 4.24 Equivalent (von-Mises) Stress Cardeck Deformasi dengan Tambahan Beton Cor Sebagai Filler

Berdasarkan **Gambar 4.24**, hasil simulasi static structural pada ANSYS menunjukkan bahwa nilai Equivalent (Von-Mises) Stress maksimum yang terjadi pada rangka adalah sebesar **198,67 MPa**. Nilai tegangan maksimum tersebut terjadi pada titik kritis rangka baja, yang ditunjukkan oleh warna merah pada kontur distribusi tegangan.

C. Deformasi Total

Selain distribusi tegangan, hasil simulasi static structural pada ANSYS juga menampilkan kontur deformasi total (Total Deformation) yang terjadi pada rangka akibat pembebanan yang diberikan. Deformasi total menggambarkan besarnya perpindahan (displacement) maksimum yang dialami oleh keseluruhan konstruksi, termasuk rangka baja dan beton cor sebagai material pengisi. Distribusi deformasi total pada rangka dapat dilihat pada **Gambar 4.25** berikut.

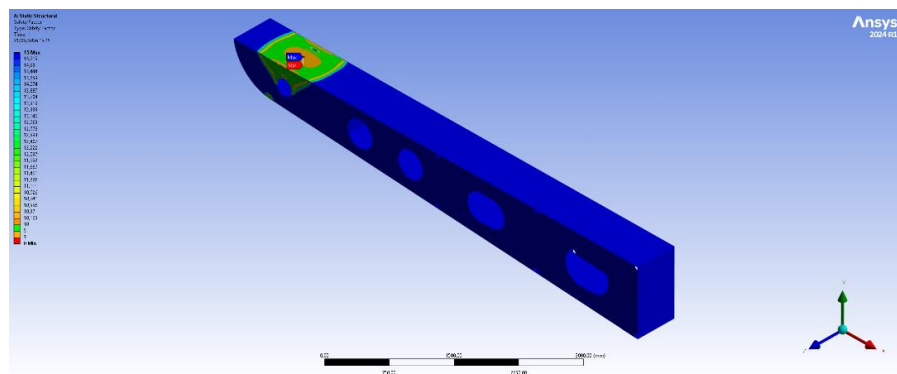


Gambar 4.25 Deformasi Total Cardeck Deformasi dengan Tambahan Beton Cor Sebagai Filler

Berdasarkan **Gambar 4.25**, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai deformasi total maksimum yang terjadi pada konstruksi adalah sebesar **2,6059 mm**. Nilai deformasi maksimum tersebut terjadi pada titik yang paling jauh dari tumpuan (support), yang ditunjukkan oleh warna merah pada kontur distribusi deformasi, sedangkan daerah yang mendekati warna biru menunjukkan perpindahan yang mendekati nol atau berada pada titik tumpuan.

D. Safety Factor

Untuk mengevaluasi tingkat keamanan konstruksi secara menyeluruh, dilakukan analisis faktor keamanan (Safety Factor) menggunakan ANSYS Static Structural. Faktor keamanan merupakan rasio antara kekuatan material (yield strength) terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada komponen. Perlu dicatat bahwa pada simulasi ini terdapat dua material, yaitu baja ASTM A36 dan beton cor sebagai pengisi. Distribusi faktor keamanan pada konstruksi dapat dilihat pada **Gambar 4.26** berikut.



Gambar 4.26 Safety Factor Cardeck Deformasi dengan Tambahan Beton Cor Sebagai Filler

Berdasarkan **Gambar 4.26**, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan minimum pada rangka baja ASTM A36 adalah sebesar **1,2588** sedangkan pada bagian beton cor sebagai material pengisi menunjukkan nilai faktor keamanan sebesar **0 (nol)**.

4.5.4 Kondisi dengan Penambahan ketebalan Beton Cor

A. Grid Independent

Sebelum dilakukan simulasi utama, terlebih dahulu dilakukan uji independensi mesh (mesh independence study) untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada jumlah elemen atau node yang digunakan. Uji ini dilakukan dengan membandingkan nilai max stress yang dihasilkan dari tiga variasi jumlah node, yaitu **2.542.374**, **2.678.465**, dan **2.946.130** node. Hasil perbandingan disajikan pada **Tabel 4.5** berikut.

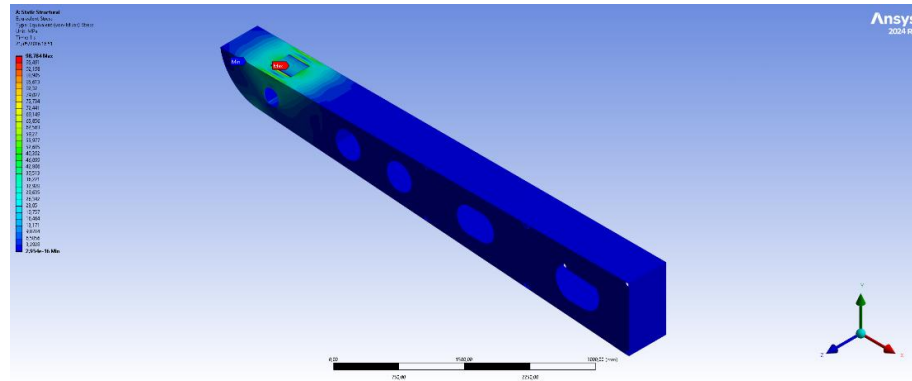
| Node | Max Stress Mpa | Difference (%) |
|---------|-------------------|----------------|
| 2542374 | 98,784 | - |
| 2678465 | 98,787 | 0,003 |
| 2946130 | 98,794 | 0,01 |

Tabel 4. 5 Grid Independent Cardeck Deformasi dengan Tambahan Lapisan Beton Cor

Berdasarkan **Tabel 4.5**, dapat dilihat bahwa peningkatan jumlah node dari **2.542.374** menjadi **2.678.465** tidak menghasilkan perubahan nilai max stress yang signifikan, dengan selisih sebesar **0,003%**. Demikian pula, peningkatan jumlah node dari **2.542.374** menjadi **2.946.130** hanya menghasilkan perbedaan sebesar **0,01%**, yang berada di bawah batas toleransi konvergensi yang umum digunakan dalam analisis elemen hingga, yaitu sebesar 1–5%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi telah konvergen dan tidak lagi sensitif terhadap penambahan jumlah node. Oleh karena itu, variasi mesh dengan jumlah node **2.542.374** dipilih sebagai konfigurasi mesh optimal untuk digunakan dalam simulasi selanjutnya.

B. Stres Equivalent

Setelah dilakukan pengaturan kondisi batas (boundary condition) dan pembebanan pada model, simulasi static structural dijalankan menggunakan perangkat lunak ANSYS. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk kontur distribusi tegangan Equivalent (Von-Mises) Stress pada seluruh bagian rangka, yang terdiri dari material baja ASTM A36 sebagai rangka utama dan beton cor sebagai material pengisi (filler). Distribusi tegangan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 4.27** berikut.

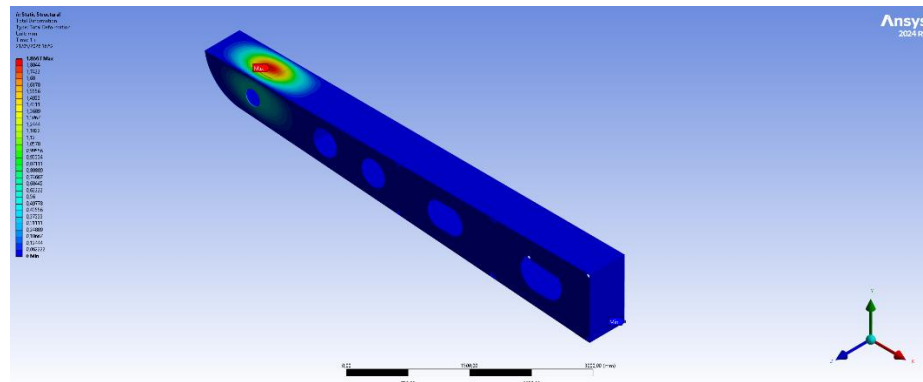


Gambar 4.27 Equivalent (von-Mises) Stress Cardeck Deformasi dengan Tambahan Lapisan Beton Cor

Berdasarkan **Gambar 4.27**, hasil simulasi static structural pada ANSYS menunjukkan bahwa nilai Equivalent (Von-Mises) Stress maksimum yang terjadi pada rangka adalah sebesar **98,784 MPa**. Nilai tegangan maksimum tersebut terjadi pada titik kritis rangka baja, yang ditunjukkan oleh warna merah pada kontur distribusi tegangan.

C. Deformasi Total

Selain distribusi tegangan, hasil simulasi static structural pada ANSYS juga menampilkan kontur deformasi total (Total Deformation) yang terjadi pada rangka akibat pembebanan yang diberikan. Deformasi total menggambarkan besarnya perpindahan (displacement) maksimum yang dialami oleh keseluruhan konstruksi, termasuk rangka baja dan beton cor sebagai material pengisi. Distribusi deformasi total pada rangka dapat dilihat pada **Gambar 4.28** berikut.

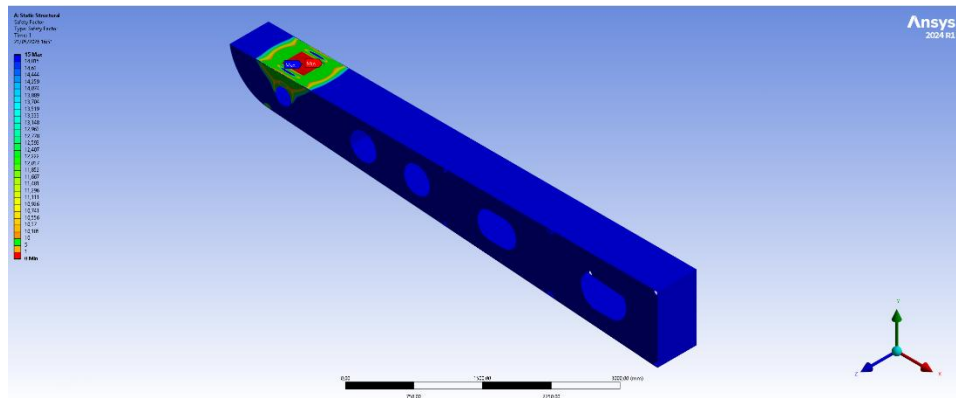


Gambar 4.28 Deformasi Total Cardeck Deformasi dengan Tambahan Lapisan Beton Cor

Berdasarkan **Gambar 4.28**, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai deformasi total maksimum yang terjadi pada konstruksi adalah sebesar **1,8667 mm**. Nilai deformasi maksimum tersebut terjadi pada titik yang paling jauh dari tumpuan (support), yang ditunjukkan oleh warna merah pada kontur distribusi deformasi, sedangkan daerah yang mendekati warna biru menunjukkan perpindahan yang mendekati nol atau berada pada titik tumpuan.

D. Savety Factor

Untuk mengevaluasi tingkat keamanan konstruksi secara menyeluruh, dilakukan analisis faktor keamanan (Safety Factor) menggunakan ANSYS Static Structural. Faktor keamanan merupakan rasio antara kekuatan material (yield strength) terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada komponen. Perlu dicatat bahwa pada simulasi ini terdapat dua material, yaitu baja ASTM A36 dan beton cor sebagai pengisi. Distribusi faktor keamanan pada konstruksi dapat dilihat pada **Gambar 4.29** berikut.



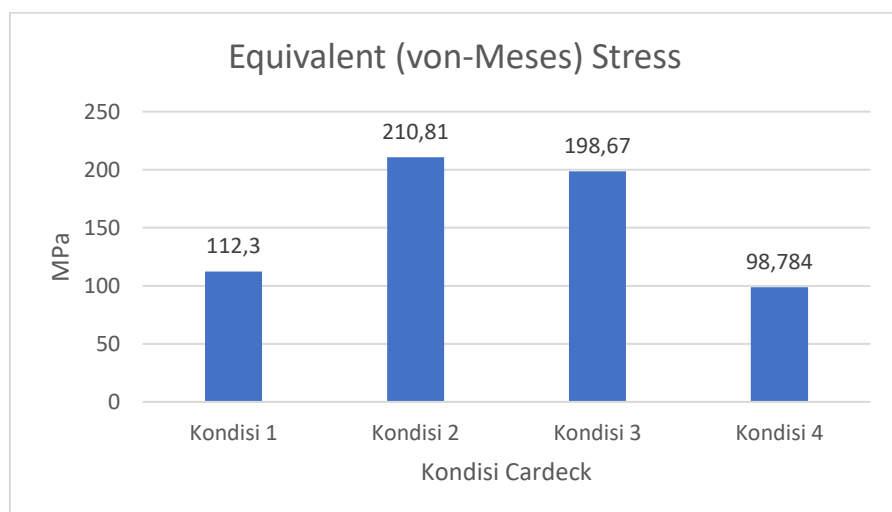
Gambar 4.29 Savety Factor Cardeck Deformasi dengan Tambahkan Lapisan Beton Cor

Berdasarkan **Gambar 4.29**, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan minimum pada rangka baja ASTM A36 adalah sebesar **2,4985**, sedangkan pada bagian beton cor sebagai material tambahan menunjukkan nilai faktor keamanan sebesar 0 (nol).

4.6 Perbandingan Hasil Pada Kondisi Tertentu

A. Equivalent (von-Mises) Stress

Analisis tegangan maksimum dilakukan pada empat kondisi pembebanan yang berbeda pada struktur cardeck. Hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga (FEA) menunjukkan variasi nilai tegangan von Mises maksimum pada setiap kondisi, sebagaimana disajikan pada **Gambar 4.30** berikut.



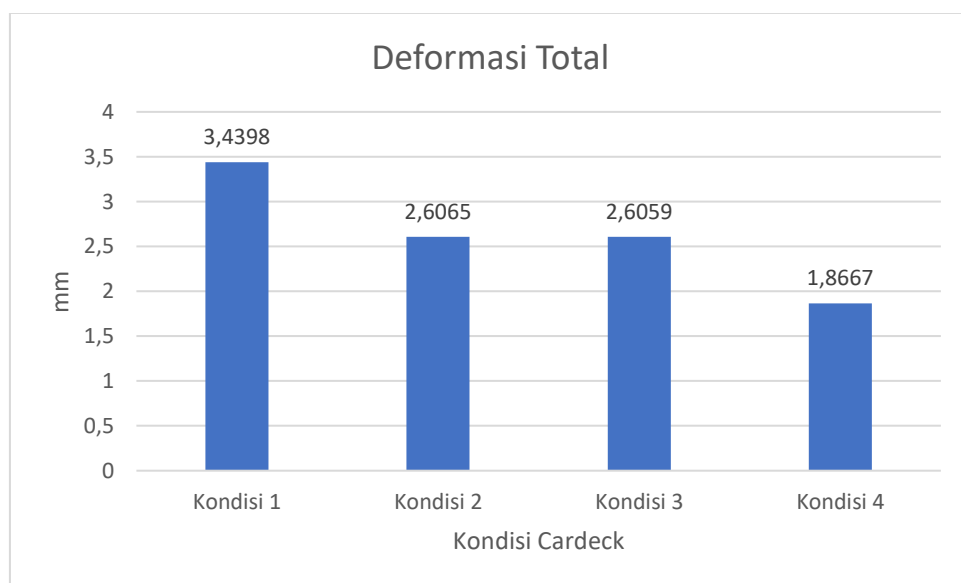
Gambar 4.30 Grafik Perbandingan Hasil Equivalent (von-Mises) Stress

Berdasarkan **Gambar 4.30**, dapat dilihat bahwa tegangan maksimum tertinggi terjadi pada Kondisi 2 dengan nilai 210,81 MPa, diikuti oleh Kondisi 3 sebesar 198,67 MPa. Sementara itu, tegangan terendah terjadi pada Kondisi 4 dengan nilai 98,784 MPa. Kondisi 1 menghasilkan tegangan sebesar 112,3 MPa.

Tingginya tegangan pada Kondisi 2 mengindikasikan bahwa kombinasi pembebanan pada kondisi tersebut memberikan pengaruh paling kritis terhadap struktur cardeck. Nilai-nilai tersebut perlu dibandingkan dengan tegangan izin material yang digunakan untuk memverifikasi keamanan struktur. Apabila tegangan maksimum tidak melebihi tegangan izin, maka struktur dinyatakan aman terhadap kondisi pembebanan yang dianalisis.

B. Deformasi Total

Selain tegangan maksimum, analisis juga dilakukan terhadap deformasi total yang terjadi pada struktur cardeck akibat pembebanan statis. Deformasi total merupakan besaran perpindahan maksimum yang dialami struktur dari posisi semula akibat gaya yang bekerja padanya. Dalam simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS Static Structural, deformasi total dihitung pada empat kondisi pembebanan yang telah ditetapkan. Hasil perbandingan nilai deformasi total pada masing-masing kondisi disajikan pada **Gambar 4.31** berikut.



Gambar 4.31 Grafik Perbandingan Hasil Deformasi Total

Berdasarkan **Gambar 4.31**, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai deformasi total pada keempat kondisi pembebanan berkisar antara 1,8667 mm hingga 3,4398 mm. Deformasi total terbesar terjadi pada Kondisi 1 dengan nilai 3,4398 mm, sedangkan deformasi total terkecil terjadi pada Kondisi 4 dengan nilai 1,8667 mm. Kondisi 2 dan Kondisi 3 menghasilkan nilai deformasi yang hampir identik, masing-masing sebesar 2,6065 mm dan 2,6059 mm.

Tingginya deformasi pada Kondisi 1 mengindikasikan bahwa konfigurasi pembebanan pada kondisi tersebut menghasilkan gaya resultante yang paling besar atau distribusi beban yang paling tidak menguntungkan bagi kekakuan struktur cardeck. Hal ini menjadikan Kondisi 1 sebagai kondisi paling kritis ditinjau dari aspek deformasi.

Sementara itu, kesamaan nilai deformasi pada Kondisi 2 dan Kondisi 3 yang selisihnya hanya sebesar 0,0006 mm menunjukkan bahwa kedua kondisi tersebut memiliki karakteristik pembebanan yang relatif serupa terhadap respons struktural cardeck. Kondisi 4 menghasilkan deformasi paling kecil, yang berarti struktur berada dalam kondisi paling kaku dan paling stabil pada konfigurasi pembebanan tersebut.

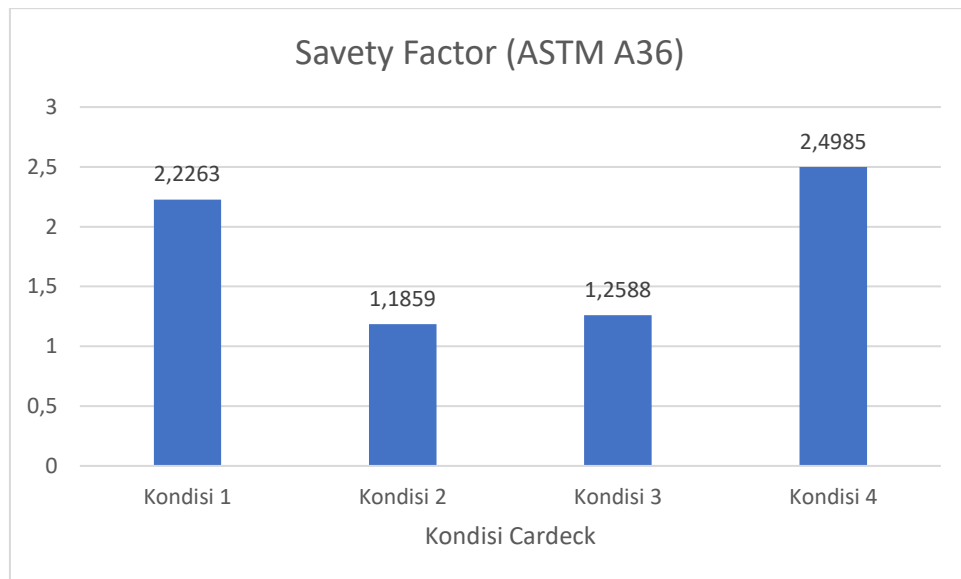
Untuk menilai kelayakan struktural, nilai deformasi total yang diperoleh perlu dibandingkan dengan batas deformasi izin (allowable deflection) yang ditetapkan oleh regulasi atau standar desain yang berlaku, seperti BKI (Biro Klasifikasi Indonesia), DNV, atau standar klasifikasi kapal lainnya. Pada umumnya, batas defleksi maksimum yang diizinkan adalah $L/600$ hingga $L/1000$ dari panjang bentang struktur, tergantung pada jenis dan fungsi komponen. Apabila nilai deformasi pada seluruh kondisi masih berada di bawah batas izin tersebut, maka struktur cardeck dinyatakan aman dan memenuhi kriteria kekakuan untuk semua kondisi pembebanan yang dianalisis.

Jika dikaitkan dengan hasil analisis tegangan maksimum sebelumnya, menarik untuk dicatat bahwa kondisi dengan tegangan tertinggi (Kondisi 2, **210,81 MPa**) tidak selalu menghasilkan deformasi terbesar. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi tegangan dan deformasi dipengaruhi oleh kekakuan lokal dan geometri struktur, sehingga kedua parameter tersebut perlu ditinjau secara bersamaan dalam evaluasi integritas struktural cardeck.

C. Safety Factor

Parameter selanjutnya yang ditinjau dalam analisis struktural cardeck adalah faktor keamanan (safety factor), yang merupakan rasio antara kekuatan material terhadap tegangan aktual yang terjadi pada struktur. Nilai faktor keamanan menjadi indikator utama dalam menentukan apakah suatu struktur mampu menahan beban yang diberikan tanpa mengalami kegagalan. Dalam simulasi ini, perhitungan faktor keamanan mengacu pada properti material ASTM A36 sebagai material utama struktur baja cardeck.

Perlu dicatat bahwa pada Kondisi 3 dan Kondisi 4, terdapat penambahan material beton cor sebagai bagian dari konfigurasi struktural. Namun demikian, perangkat lunak ANSYS tidak menghasilkan nilai faktor keamanan untuk material beton cor tersebut, sehingga nilai yang ditampilkan hanya mencerminkan faktor keamanan pada elemen baja (ASTM A36) saja. Perbandingan nilai faktor keamanan pada keempat kondisi pembebanan disajikan pada **Gambar 4.32** berikut.



Gambar 4.32 Grafik Perbandingan Hasil Savety Factor Material ASTM A36

Berdasarkan **Gambar 4.32**, nilai faktor keamanan struktur cardeck pada material ASTM A36 menunjukkan variasi yang cukup signifikan antar kondisi. Nilai tertinggi dicapai pada Kondisi 4 sebesar 2,4985, diikuti oleh Kondisi 1 sebesar 2,2263. Sementara itu, Kondisi 2 menghasilkan faktor keamanan terendah sebesar 1,1859, dan Kondisi 3 sebesar 1,2588. Nilai faktor keamanan yang tinggi pada Kondisi 4 dan Kondisi 1 mengindikasikan bahwa elemen baja pada kedua kondisi tersebut memiliki cadangan kekuatan yang lebih besar terhadap tegangan yang terjadi, sehingga risiko kegagalan struktural relatif lebih rendah.

Sebaliknya, faktor keamanan pada Kondisi 2 sebesar 1,1859 merupakan nilai yang paling mendekati batas kritis. Hasil ini konsisten dengan temuan pada analisis tegangan maksimum sebelumnya, di mana Kondisi 2 menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 210,81 MPa. Semakin tinggi tegangan yang terjadi, maka semakin kecil rasio cadangan kekuatan yang tersisa, sehingga faktor keamanannya pun menurun. Meskipun demikian, berdasarkan standar desain struktur, faktor keamanan minimum yang umumnya disyaratkan adalah 1,5 untuk struktur baja statis. Dengan demikian, Kondisi 2 ($SF = 1,1859$) dan Kondisi 3 ($SF = 1,2588$) berada di bawah batas minimum yang direkomendasikan, sehingga kedua kondisi tersebut perlu mendapat perhatian khusus dalam evaluasi desain.

Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, pada Kondisi 3 dan Kondisi 4 terdapat penambahan material beton cor dalam model struktur. Namun, nilai faktor keamanan untuk material beton cor tidak ditampilkan dalam hasil simulasi ANSYS Static Structural. Hal ini terjadi karena beberapa alasan teknis, yaitu:

1. ANSYS menghitung faktor keamanan berdasarkan teori kegagalan material logam seperti Von Mises atau Tresca, yang secara spesifik dikembangkan untuk material ulet (ductile) seperti baja. Material beton bersifat getas (brittle) dan memiliki perilaku kegagalan yang berbeda, sehingga teori kegagalan tersebut tidak secara langsung berlaku untuk beton.
2. Apabila properti kegagalan (tensile yield strength) untuk material beton cor tidak didefinisikan secara eksplisit dalam pengaturan material di ANSYS, maka perangkat

lunak tidak dapat menghitung rasio tegangan terhadap kekuatan, sehingga menghasilkan nilai nol atau tidak terdefinisi (undefined).

3. Dalam praktik rekayasa, evaluasi keamanan beton umumnya dilakukan menggunakan kriteria terpisah, seperti perbandingan tegangan tekan aktual terhadap kuat tekan karakteristik beton (f_c) sesuai standar SNI 2847 atau ACI 318, dan bukan melalui faktor keamanan Von Mises.

Oleh karena itu, nilai faktor keamanan yang ditampilkan pada grafik untuk Kondisi 3 dan Kondisi 4 hanya merepresentasikan elemen baja ASTM A36 dan tidak mencakup evaluasi keamanan beton cor. Analisis keamanan terhadap material beton cor perlu dilakukan secara terpisah menggunakan pendekatan dan standar yang sesuai dengan karakteristik material beton.