

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

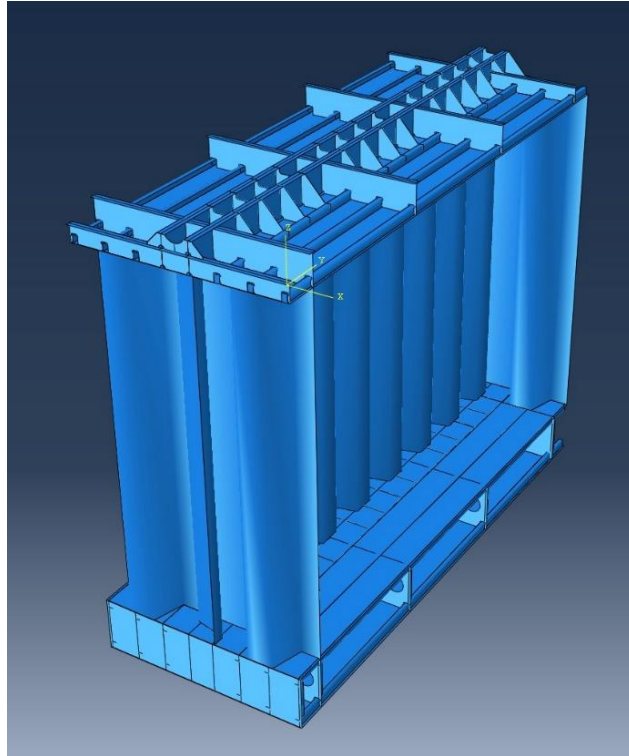
4.1. Model Midship Section

4.1.1. Model Tanpa *Flat Bar Intercostal*

Model tanpa *flat bar intercostal* merupakan model awal (*baseline model*) yang digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan elemen penguat terhadap kekuatan memanjang *corrugated bulkhead*. Model ini merepresentasikan kondisi struktur aktual pada *midship section* kapal *oil tanker 4500 T* sebelum dilakukan modifikasi atau penambahan penguat. Seluruh komponen utama, seperti *corrugated bulkhead*, *double girder*, *solid floor*, *bracket floor*, pelat dasar (*bottom plate*), serta elemen struktur pendukung lainnya dimodelkan sesuai dengan gambar konstruksi kapal sehingga mampu menggambarkan konfigurasi struktur yang sebenarnya.

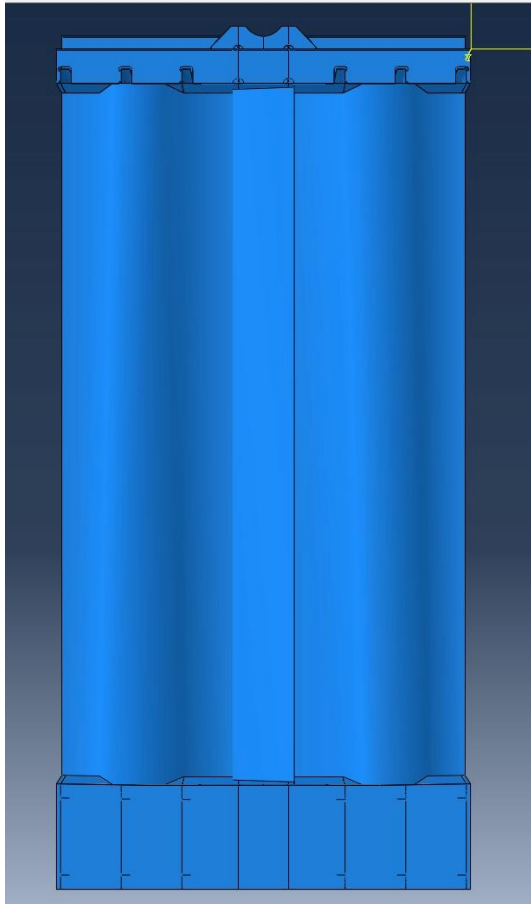
Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1, model ini belum dipasang *flat bar intercostal*, sehingga hubungan antara *corrugated bulkhead* dan *double girder* hanya mengikuti konfigurasi struktur eksisting. Selain itu, model juga mempertahankan kondisi *misalignment double girder* sesuai dengan objek penelitian sehingga pengaruh ketidaksejajaran terhadap distribusi tegangan dan deformasi dapat diamati secara langsung.

Model tanpa *flat bar intercostal* digunakan sebagai kondisi pembanding terhadap model yang telah diberi penguatan. Analisis pada model ini bertujuan untuk memperoleh respons awal struktur berupa distribusi tegangan *Von Mises*, deformasi (*U Magnitude*), dan faktor keamanan (*Safety Factor*) sebelum dilakukan penambahan elemen penguat. Ketiga parameter tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar evaluasi dalam menentukan efektivitas *flat bar intercostal* terhadap peningkatan kekakuan lokal dan kekuatan memanjang *corrugated bulkhead*.



Gambar 4. 1 *Model Midship Section Tanpa Flat Bar Intercostal* (Isometrik) (Sumber: Penulis, 2026)

Gambar 4.2 menunjukkan tampak depan (*front view*) dari model *corrugated bulkhead* tanpa *flat bar intercostal*. Dari tampilan tersebut terlihat bahwa tidak terdapat elemen penghubung tambahan pada daerah sambungan antara *double girder* dan *corrugated bulkhead*. Kondisi ini menyebabkan jalur distribusi beban hanya mengandalkan elemen struktur utama yang telah ada, sehingga daerah sambungan menjadi lokasi yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan apabila menerima pembebanan memanjang. Oleh karena itu, model ini digunakan sebagai kondisi referensi untuk membandingkan perubahan perilaku struktur setelah dilakukan penambahan *flat bar intercostal* pada tahap analisis berikutnya.



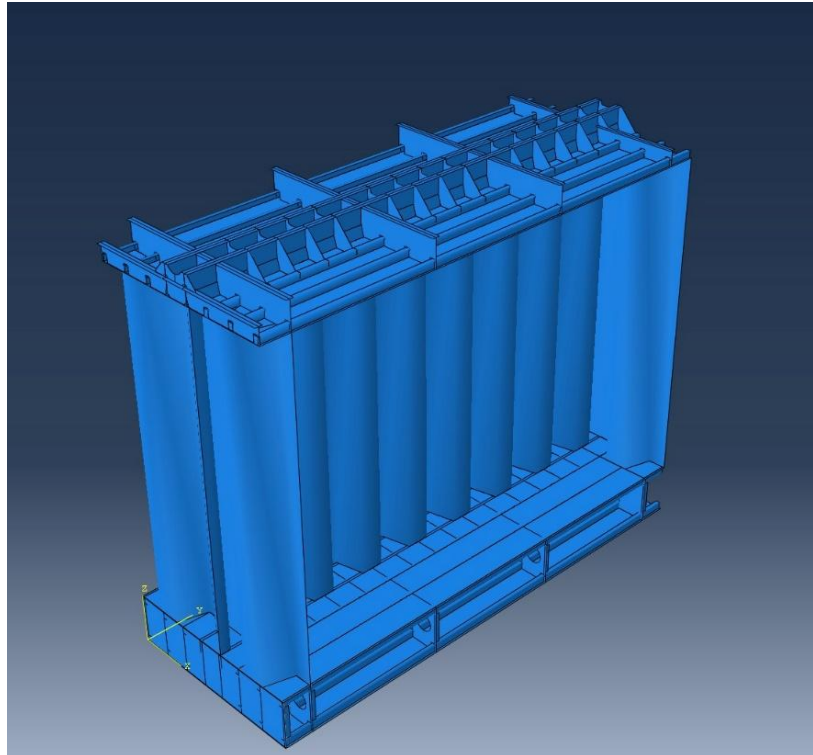
Gambar 4. 2 Tampak Depan *Model Tanpa Flat Bar Intercostal*
(Sumber: Penulis, 2026)

4.1.2. Model dengan *Flat Bar Intercostal*

Model dengan *flat bar intercostal* merupakan *model* modifikasi yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan elemen penguat terhadap kekuatan memanjang *corrugated bulkhead* yang mengalami *misalignment double girder*. Model ini dibangun berdasarkan geometri dasar yang sama dengan model tanpa penguat, sehingga seluruh dimensi, material, kondisi batas, dan pembebanan dibuat identik. Perbedaan utama antara kedua model hanya terletak pada penambahan *flat bar intercostal* sebagai elemen penguat lokal, sehingga perubahan respons struktur yang diperoleh dari hasil simulasi dapat dikaitkan secara langsung dengan pengaruh penambahan penguat tersebut.

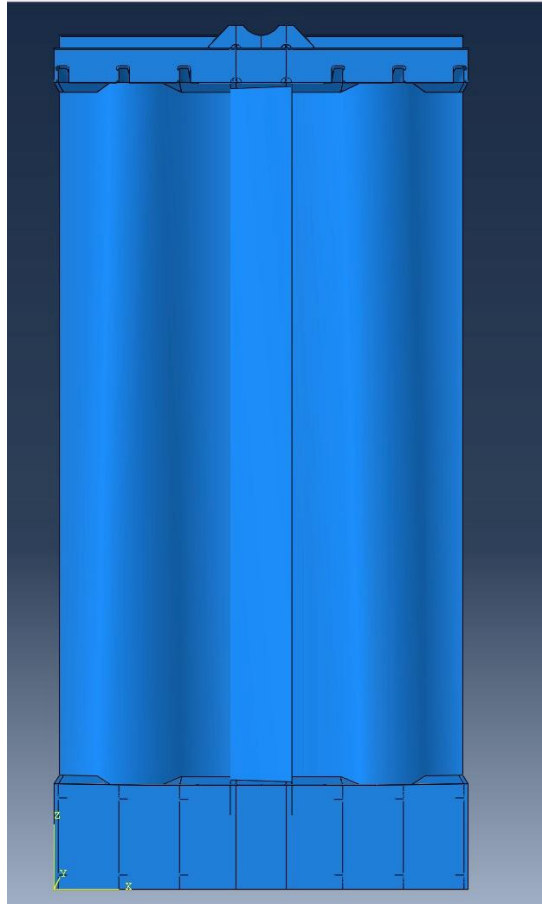
Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.3, *flat bar intercostal* dipasang pada daerah sambungan antara *corrugated bulkhead* dan plat *double bottom* mengikuti konfigurasi struktur aktual.

Penempatan penguat dilakukan pada setiap panel *corrugated bulkhead* yang berada di sepanjang daerah midship section, sehingga mampu meningkatkan kontinuitas struktur pada area yang mengalami *misalignment*. Keberadaan *flat bar intercostal* diharapkan dapat memperbesar kekakuan lokal, memperbaiki jalur distribusi gaya (*load path*), serta mengurangi konsentrasi tegangan yang terjadi pada daerah sambungan. Dengan demikian, beban yang diterima struktur dapat didistribusikan secara lebih merata ke elemen-elemen struktur di sekitarnya.



Gambar 4. 3 *Model Midship Section* dengan *Flat Bar Intercostal*
(Isometrik)
(Sumber: Penulis, 2026)

Gambar 4.4 memperlihatkan tampak depan model setelah dilakukan penambahan flat bar intercostal. Dari gambar tersebut terlihat bahwa elemen penguat dipasang pada daerah sambungan corrugated bulkhead, sehingga menghasilkan konfigurasi struktur yang lebih kaku dibandingkan model tanpa penguat. Penambahan elemen ini diharapkan mampu meningkatkan kemampuan struktur dalam menahan pembebanan memanjang dengan cara mengurangi deformasi lokal, memperbaiki distribusi tegangan, serta meningkatkan faktor keamanan struktur.



Gambar 4. 4 Tampak Depan Model Dengan *Flat Bar Intercostal*
(Sumber: Penulis, 2026)

Model dengan flat bar intercostal selanjutnya digunakan sebagai model pembandingan terhadap model tanpa penguat. Hasil simulasi dari kedua model dibandingkan berdasarkan parameter tegangan *Von Mises*, deformasi (*U Magnitude*), dan *safety factor*. Perbandingan tersebut bertujuan untuk mengetahui sejauh mana penambahan flat bar intercostal mampu meningkatkan kekuatan memanjang *corrugated bulkhead* yang mengalami *misalignment double girder* pada *midship section* kapal *oil tanker*. Analisis terhadap ketiga parameter tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi efektivitas penguatan serta menjawab tujuan utama penelitian.

4.2. Permodelan Finite Element Method

Pemodelan numerik pada penelitian ini dilakukan menggunakan *Finite Element Method* (FEM) untuk menganalisis respons struktur *corrugated bulkhead* terhadap kondisi *misalignment double girder* sebelum dan sesudah penambahan *flat bar intercostal*. Metode ini dipilih karena mampu memodelkan perilaku struktur yang memiliki geometri kompleks serta mampu mengevaluasi distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan secara detail pada setiap elemen struktur.

Tahap pemodelan dimulai dengan dilakukannya proses *pre-processing* yang meliputi pendefinisian sifat material, pemberian kondisi batas (*boundary condition*), penentuan pembebanan, serta pembentukan *mesh*. Setelah seluruh parameter pemodelan selesai ditentukan, simulasi dijalankan menggunakan prosedur *Dynamic Implicit* pada *Finite Element Method* (FEM). Meskipun menggunakan prosedur dinamik, analisis pada penelitian ini diterapkan dengan pendekatan *quasi-static*, yaitu pembebanan diberikan secara bertahap dalam rentang waktu analisis yang cukup panjang sehingga pengaruh gaya inersia dan efek dinamik dapat diabaikan. Pendekatan ini dipilih karena mampu menghasilkan solusi numerik yang lebih stabil pada model yang memiliki geometri kompleks dan banyak *constraint*. Dengan pendekatan *quasi-static*, respons struktur yang diperoleh merepresentasikan perilaku struktur akibat beban statik secara lebih realistis tanpa dipengaruhi oleh osilasi dinamik yang tidak menjadi fokus penelitian. Hasil simulasi kemudian berupa distribusi tegangan *Von Mises*, deformasi (*U Magnitude*), dan *Safety Factor*, yang selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *flat bar intercostal* terhadap peningkatan kekuatan memanjang *corrugated bulkhead*.

Pada penelitian ini seluruh parameter pemodelan dibuat sama antara model tanpa flat bar intercostal dan model dengan flat bar intercostal. Perbedaan hanya terletak pada penambahan elemen penguat flat bar intercostal, sehingga perubahan hasil simulasi yang diperoleh dapat diinterpretasikan sebagai pengaruh langsung dari penambahan penguat terhadap kekuatan memanjang *corrugated bulkhead*.

Tabel 4. 1 *Property Material Marine Steel Grade A*

Parameter	Nilai	Satuan
Massa Jenis	$7,85 \times 10^{-9}$	ton/mm ³
Modulus Elastis	210000	MPa
Rasio Possion	0.3	-
Tegangan Luluh	235	MPa

4.2.1. Properti Material

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah *Marine Steel Grade A*, yang merupakan material standar konstruksi lambung kapal sesuai dengan ketentuan klasifikasi internasional. Material ini dipilih karena memiliki sifat mekanik yang sesuai untuk struktur utama kapal *tanker*, yaitu memiliki kekuatan luluh yang cukup tinggi, keuletan yang baik, serta mampu menahan pembebanan statik maupun dinamik selama masa operasional kapal. Seluruh komponen struktur yang dianalisis, meliputi *corrugated bulkhead*, *double girder*, *bottom structure*, dan *flat bar intercostal*, menggunakan jenis material yang sama sehingga pengaruh perubahan respons struktur hanya berasal dari perubahan konfigurasi geometri dan penambahan elemen penguat.

Pendefinisian material dilakukan pada *Property Module* dengan memasukkan tiga parameter utama, yaitu massa jenis (*Density*), sifat elastis (*Elastic*), dan sifat plastis (*Plastic*). Ketiga parameter tersebut diperlukan agar perangkat lunak mampu merepresentasikan perilaku material secara realistis selama proses simulasi.

a. *Density*

Parameter *Density* digunakan untuk mendefinisikan massa jenis material yang diperlukan pada analisis, karena perhitungan numerik mempertimbangkan pengaruh massa terhadap respons struktur. Nilai massa jenis *Marine Steel Grade A* yang digunakan adalah $7,85 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$, sesuai dengan sistem satuan ton/mm^2 yang digunakan pada penelitian ini. Nilai tersebut setara dengan massa jenis baja sebesar 7850 kg/m^3 , yang merupakan nilai standar untuk baja konstruksi kapal.

b. *Elastic*

Sifat elastis material didefinisikan menggunakan model *Isotropic Elastic* dengan memasukkan *Young's Modulus* sebesar 210.000 MPa dan *Poisson's Ratio* sebesar 0,30. Nilai modulus elastisitas menunjukkan tingkat kekakuan material terhadap deformasi elastis, sedangkan rasio *Poisson* menggambarkan hubungan antara regangan memanjang dan regangan melintang ketika material menerima pembebanan. Pendefinisian sifat elastis ini memungkinkan perangkat menghitung distribusi tegangan dan deformasi selama material masih berada pada daerah elastis.

c. *Plastic*

Penelitian ini menggunakan prosedur analisis *Dynamic Implicit*, maka perilaku plastis material juga dimasukkan ke dalam model numerik. Data plastis didefinisikan menggunakan model *Isotropic Hardening*, dengan memasukkan hubungan antara *Yield Stress* dan *Plastic Strain* berdasarkan karakteristik *Marine Steel Grade A*. Nilai tegangan luluh awal material ditetapkan sebesar

235 MPa, kemudian diikuti beberapa pasangan data tegangan dan regangan plastis untuk menggambarkan perilaku pengerasan (*strain hardening*) setelah material melewati batas elastis.

Pendefinisian sifat plastis ini memungkinkan Abaqus memprediksi perilaku struktur apabila pada daerah tertentu terjadi konsentrasi tegangan yang menyebabkan material memasuki daerah plastis. Dengan demikian, hasil simulasi menjadi lebih representatif dibandingkan apabila material hanya dimodelkan sebagai material elastis linier.

4.2.2. *Boundary Condition*

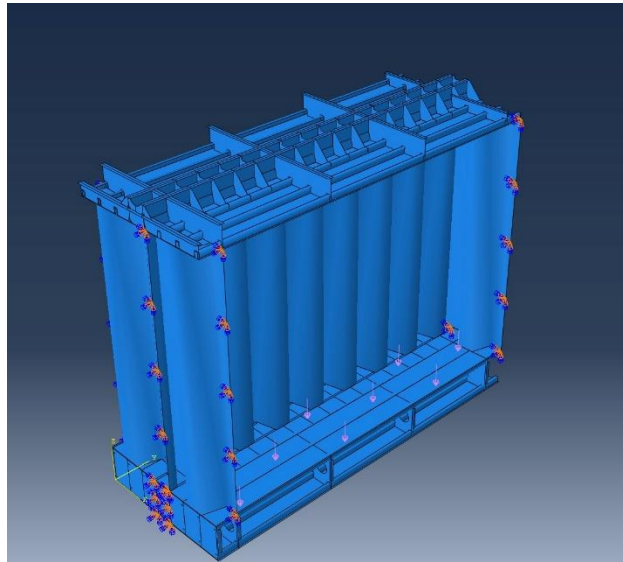
Pemberian *boundary condition* merupakan tahapan penting dalam pemodelan *Finite Element Method* (FEM) karena berfungsi untuk merepresentasikan kondisi penumpuan struktur yang sebenarnya serta mencegah terjadinya pergerakan sebagai benda tegar (*rigid body motion*) selama proses simulasi. Kondisi batas yang tepat akan menghasilkan distribusi tegangan dan deformasi yang lebih representatif terhadap kondisi operasional struktur pada kapal. Pada penelitian ini, *boundary condition* diterapkan pada struktur *corrugated bulkhead* dan *double girder* sesuai dengan konfigurasi *midship section* kapal *oil tanker*.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.5., kondisi batas diberikan pada beberapa titik di sepanjang sisi kiri, sisi kanan, dan bagian bawah *corrugated bulkhead*. Titik-titik tersebut diberikan pembatasan perpindahan (*displacement boundary condition*) untuk menahan pergerakan translasi pada arah tertentu sesuai sistem koordinat global. Pemberian kondisi batas tersebut bertujuan untuk mensimulasikan pengaruh struktur di sekitarnya yang secara aktual masih terhubung dengan konstruksi kapal, sehingga model mampu merepresentasikan kondisi pengekangan pada daerah *midship section*. Dengan adanya pembatasan tersebut, struktur tetap dapat mengalami deformasi akibat pembebanan, namun tidak mengalami perpindahan sebagai satu kesatuan (*rigid body motion*).

Selain diterapkan pada *corrugated bulkhead*, kondisi batas juga diberikan pada bagian *double girder* yang berfungsi sebagai elemen utama penyalur beban memanjang. Pemberian *boundary condition* pada *double girder* bertujuan untuk menjaga stabilitas model numerik serta mempertahankan kontinuitas jalur distribusi gaya selama proses analisis. Dengan kondisi tersebut, beban yang diterapkan pada struktur dapat didistribusikan secara bertahap menuju *corrugated bulkhead* sebagaimana mekanisme kerja struktur kapal yang sebenarnya.

Pada penelitian ini digunakan *Encastre (Fixed) Boundary Condition*, sehingga seluruh derajat kebebasan (*degrees of freedom*) pada titik-titik yang ditentukan dikunci sepenuhnya, baik translasi

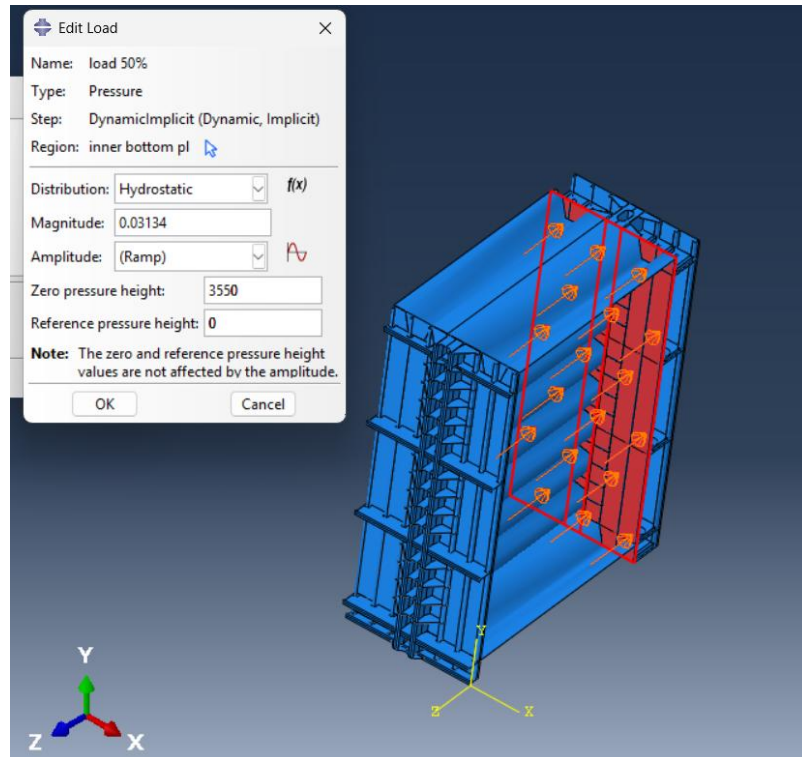
maupun rotasi. Pembatasan ini diterapkan pada lokasi yang berfungsi sebagai penumpu untuk merepresentasikan kondisi struktur yang terikat secara kaku dengan bagian konstruksi kapal lainnya. Dengan pendekatan ini, struktur tidak mengalami perpindahan maupun rotasi pada titik penumpu, sehingga mampu menjaga kestabilan model selama proses analisis serta menghasilkan distribusi tegangan dan deformasi yang sesuai dengan kondisi pengekangan yang diasumsikan.



Gambar 4. 5 Penerapan *Boundary Condition* pada Model FEM
(Sumber: Penulis, 2026)

4.2.3. Pembebanan

Tahap pembebanan merupakan proses pemberian gaya atau tekanan eksternal pada model *Finite Element Method* (FEM) untuk merepresentasikan kondisi kerja struktur yang sebenarnya. Pada penelitian ini, pembebanan diberikan dalam bentuk tekanan hidrostatik (*hydrostatic pressure*) yang berasal dari muatan cair (*cargo oil*) di dalam tangki. Pemilihan pembebanan hidrostatik didasarkan pada karakteristik muatan cair yang menghasilkan distribusi tekanan bervariasi terhadap kedalaman, sehingga lebih mampu merepresentasikan kondisi aktual dibandingkan tekanan merata (*uniform pressure*). Pembebanan diterapkan pada permukaan dalam tangki yang bersentuhan langsung dengan muatan cair, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Penerapan Pembebanan Hidrostatik pada Model FEM
(Sumber: Penulis,2026)

Pada perangkat lunak Abaqus CAE, pembebanan didefinisikan menggunakan fitur *Pressure* dengan tipe distribusi *Hydrostatic* pada langkah analisis *Dynamic Implicit*. Nilai tekanan dimasukkan sebagai *Magnitude*, sedangkan tinggi permukaan fluida ditentukan melalui parameter *Zero Pressure Height*. Amplitudo pembebanan menggunakan fungsi *Ramp*, sehingga tekanan diberikan secara bertahap selama proses analisis. Pendekatan ini sesuai dengan konsep *quasi-static loading*, di mana pembebanan meningkat secara perlahan untuk meminimalkan pengaruh gaya inersia sehingga respons struktur yang diperoleh merepresentasikan kondisi statik.

Besarnya tekanan hidrostatik dihitung menggunakan persamaan:

$$P = \rho gh \quad (4.1.)$$

dengan:

- P = tekanan hidrostatik (Pa atau MPa);
- ρ = massa jenis muatan (*cargo oil*) (900 kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- h = tinggi kolom fluida (m)

Untuk mengevaluasi pengaruh variasi tinggi muatan terhadap respons struktur, penelitian ini menggunakan tiga kondisi pembebanan, yaitu **25%**, **50%**, dan **80%** dari tinggi tangki. Perhitungan tekanan hidrostatik pada masing-masing kondisi ditunjukkan sebagai berikut.

Kondisi Muatan 25%

$$P = \rho gh$$

$$P = 900 \times 9,81 \times 1,775$$

$$P = 15.671,5 \text{ Pa}$$

$$P = 0,01567 \text{ MPa}$$

Dengan tinggi fluida (*Zero Pressure Height*) sebesar 1.775 mm.

Kondisi Muatan 50%

$$P = \rho gh$$

$$P = 900 \times 9,81 \times 3,55$$

$$P = 31.342,95 \text{ Pa}$$

$$P = 0,03134 \text{ MPa}$$

Dengan tinggi fluida (*Zero Pressure Height*) sebesar 3.550 mm.

Kondisi Muatan 80%

$$P = \rho gh$$

$$P = 900 \times 9,81 \times 5,68$$

$$P = 50.148,72 \text{ Pa}$$

$$P = 0,05015 \text{ MPa}$$

Dengan tinggi fluida (*Zero Pressure Height*) sebesar 5.680 mm.

Hasil perhitungan tekanan hidrostatik yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Nilai Pembebanan Hidrostatik
(Sumber: Penulis)

Kondisi Muatan (%)	Tinggi Fluida (mm)	Tekanan (Pa)	Tekanan (MPa)
25	1.775	15.671,50	0,01567
50	3.550	31.342,95	0,03134
80	5.680	50.148,72	0,05015

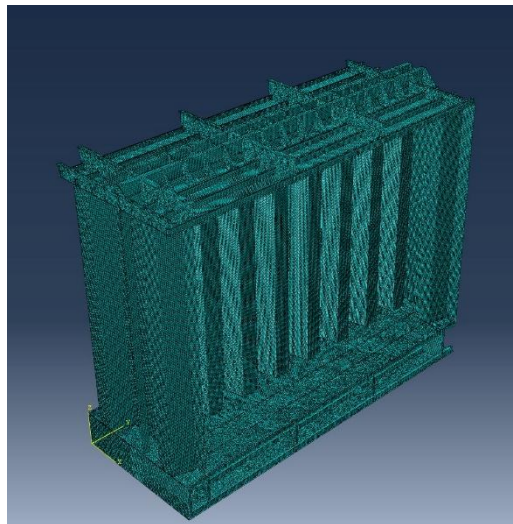
Berdasarkan nilai pembebanan tersebut, terlihat bahwa tekanan hidrostatik meningkat secara linier terhadap tinggi kolom fluida sesuai dengan persamaan $P = \rho gh$. Variasi pembebanan 25%, 50%,

80% digunakan untuk mengevaluasi perubahan distribusi tegangan *Von Mises*, deformasi (*U Magnitude*), dan *Safety Factor* pada tangki akibat perubahan tinggi muatan. Pendekatan ini memungkinkan analisis dilakukan pada beberapa kondisi operasional kapal sehingga efektivitas penambahan *flat bar intercostal* terhadap peningkatan kekuatan memanjang struktur dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

4.2.4. Meshing

Proses meshing merupakan tahapan penting dalam analisis *Finite Element Method* (FEM) yang bertujuan untuk mendiskretisasi geometri kontinu menjadi elemen-elemen hingga (*finite elements*). Melalui proses ini, struktur dibagi menjadi sejumlah elemen kecil yang saling terhubung pada titik simpul (*nodes*), sehingga persamaan diferensial yang menggambarkan perilaku struktur dapat diselesaikan secara numerik. Tingkat ketelitian hasil analisis FEM sangat dipengaruhi oleh kualitas mesh yang digunakan. Oleh karena itu, pemilihan ukuran mesh harus mempertimbangkan keseimbangan antara akurasi hasil simulasi dan waktu komputasi.

Pada penelitian ini, proses meshing dilakukan menggunakan modul *Mesh* pada perangkat lunak Abaqus CAE. Seluruh komponen struktur, meliputi *corrugated bulkhead*, *double girder*, *bottom structure*, *solid floor*, *bracket floor*, dan *flat bar intercostal* didiskretisasi menggunakan elemen tiga dimensi. Ukuran mesh dibuat seragam (*uniform mesh*) pada seluruh model agar distribusi elemen tetap konsisten dan tidak menimbulkan perbedaan tingkat ketelitian pada masing-masing komponen struktur. Hasil proses meshing pada model penelitian ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Hasil *Meshing Model Finite Element*
(Sumber: Penulis, 2026)

Untuk memperoleh ukuran *mesh* yang mampu menghasilkan solusi numerik yang stabil, dilakukan variasi ukuran elemen (*mesh sensitivity study*) pada beberapa konfigurasi. Variasi ukuran *mesh* yang digunakan yaitu 45 mm, 40 mm, 35 mm, dan 30 mm. Setiap ukuran *mesh* menghasilkan jumlah *node* dan elemen yang berbeda sehingga memengaruhi tingkat ketelitian hasil simulasi maupun waktu komputasi.

Pada model tanpa *flat bar intercostal*, variasi ukuran *mesh* menghasilkan jumlah *node* dan elemen seperti pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Jumlah *Node* dan Elemen Model tanpa *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)

Ukuran <i>Mesh</i> (mm)	Jumlah <i>Node</i>	Jumlah Elemen
45	309397	298115
40	391884	379432
35	501520	487788
30	674229	658823

Pada model dengan *flat bar intercostal*, variasi ukuran *mesh* menghasilkan jumlah *node* dan elemen sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Jumlah *Node* dan Elemen Model dengan *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)

Ukuran <i>Mesh</i> (mm)	Jumlah <i>Node</i>	Jumlah Elemen
45	316089	303827
40	400620	387048
35	513184	498124

Berdasarkan Tabel 4.3 dan Tabel 4.4, terlihat bahwa semakin kecil ukuran elemen yang digunakan, semakin besar jumlah *node* dan elemen yang terbentuk pada model. Penambahan jumlah elemen menyebabkan representasi geometri menjadi lebih detail sehingga distribusi tegangan dan deformasi dapat dihitung dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi. Namun, peningkatan jumlah elemen juga menyebabkan waktu komputasi, kebutuhan memori, dan proses konvergensi menjadi lebih besar. Oleh karena itu, pemilihan ukuran *mesh* tidak hanya mempertimbangkan tingkat akurasi, tetapi juga efisiensi proses analisis.

Selanjutnya, ukuran *mesh* yang digunakan dalam analisis utama ditentukan berdasarkan hasil studi konvergensi *mesh* (*grid independence*). Proses ini dilakukan dengan membandingkan perubahan nilai tegangan *Von Mises* maksimum pada setiap variasi ukuran *mesh*. Ukuran *mesh* dinyatakan konvergen apabila perubahan nilai tegangan maksimum antar variasi *mesh* telah menunjukkan perubahan yang relatif kecil, sehingga hasil analisis dianggap telah

independen terhadap ukuran elemen. Dengan pendekatan tersebut, hasil simulasi yang diperoleh pada penelitian ini memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dan dapat digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *flat bar intercostal* terhadap kekuatan memanjang *corrugated bulkhead* yang mengalami misalignment double girder.

4.3. Grid Independence

Analisis *grid independence* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi *Finite Element Method* (FEM) tidak lagi dipengaruhi secara signifikan oleh ukuran *mesh* yang digunakan. Tujuan dari proses ini adalah memperoleh ukuran elemen yang mampu memberikan hasil yang akurat dengan waktu komputasi yang masih efisien. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan sebagai acuan evaluasi adalah tegangan *Von Mises* maksimum (*Von Mises Stress*) dan deformasi maksimum (*U Magnitude*), karena kedua parameter tersebut merupakan indikator utama dalam penilaian kekuatan memanjang *corrugated bulkhead*.

Pengujian *grid independence* dilakukan pada dua konfigurasi model, yaitu model tanpa *flat bar intercostal* dan model dengan *flat bar intercostal*, dengan kondisi pembebanan sebesar 50% kapasitas muatan. Variasi ukuran *mesh* yang digunakan pada model tanpa *flat bar intercostal* digunakan ukuran 45 mm, 40 mm, 35 mm, dan 30 mm, sedangkan pada model dengan *flat bar intercostal* adalah 45 mm, 40 mm, dan 35 mm. Hasil simulasi menunjukkan nilai tegangan maksimum, deformasi maksimum, jumlah elemen sebagaimana disajikan pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6.

Tabel 4. 5 Hasil *Grid Independence* Model tanpa *Flat Bar Intercostal*
(Sumber: Penulis, 2026)

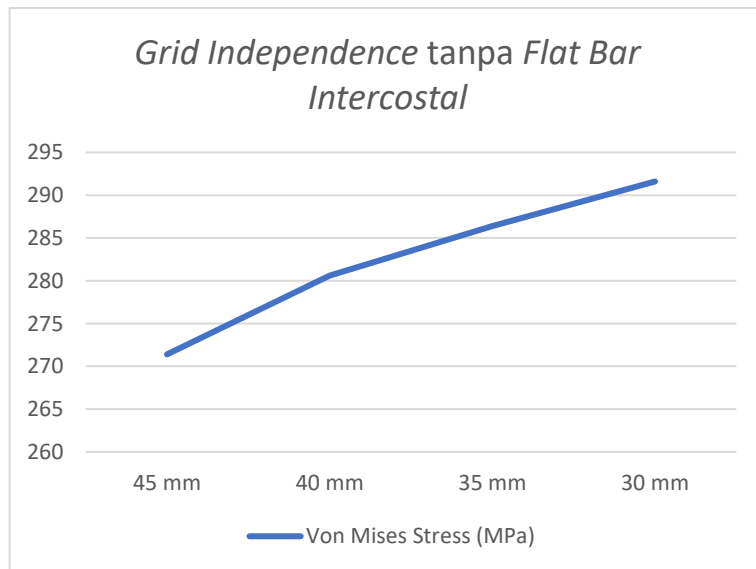
Mesh (mm)	Element	<i>Von Mises</i> (MPa)	Perubahan Stress (%)
45	298115	271,4	-
40	379432	280,6	3,39
35	487788	286,4	2,07
30	658823	291,6	1,82

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.5., model tanpa *flat bar intercostal*, perubahan nilai tegangan *Von Mises* menunjukkan kecenderungan yang semakin kecil seiring dengan penyempurnaan ukuran *mesh*. Tegangan maksimum meningkat dari 271,4 MPa pada *mesh* 45 mm menjadi 280,6 MPa pada *mesh* 40 mm, kemudian menjadi 286,4 MPa pada *mesh* 35 mm, dan 291,6 MPa pada *mesh* 30 mm. Persentase perubahan tegangan berturut-turut sebesar 3,39%, 2,07%, dan 1,82%. Nilai deviasi antar variasi *mesh* yang berada di bawah $\pm 2\%$ menunjukkan bahwa solusi numerik telah mencapai kondisi independensi grid (*grid independence*), sehingga hasil analisis dapat digunakan sebagai representasi yang andal terhadap respons struktur tanpa dipengaruhi secara signifikan oleh ukuran elemen.

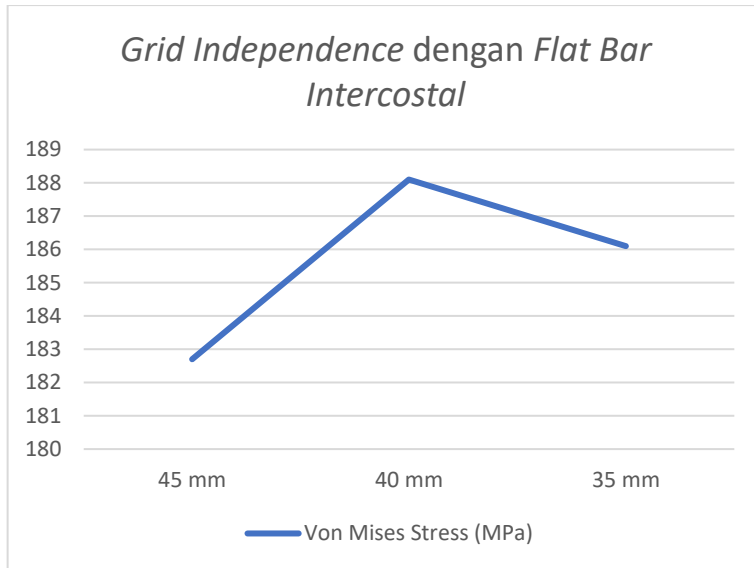
Tabel 4. 6 Hasil *Grid Independence* Model dengan *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)

Mesh (mm)	Element	<i>Von Mises</i> (MPa)	Perubahan Stress (%)
45	303827	182,7	-
40	387048	188,1	2,96
35	498124	186,1	1,06

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.6., model dengan *flat bar intercostal* menunjukkan bahwa penurunan ukuran *mesh* dari 45 mm menjadi 40 mm mengubah nilai tegangan *Von Mises* dari 182,7 MPa menjadi 188,1 MPa atau sebesar 2,96%. Ketika ukuran *mesh* diperkecil menjadi 35 mm, nilai tegangan berubah menjadi 186,1 MPa dengan selisih hanya 1,06% terhadap ukuran *mesh* sebelumnya. Perbedaan nilai yang relatif kecil menunjukkan bahwa hasil analisis telah mencapai kondisi grid independence, sehingga solusi numerik dapat dianggap stabil dan valid karena perubahan yang terjadi masih berada dalam batas toleransi sebesar $\pm 2\%$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan respons struktur mulai mengecil pada ukuran *mesh* 35 mm, sehingga hasil simulasi telah mendekati kondisi konvergen.



Gambar 4. 8 *Grid Independence* tanpa *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 9 *Grid Independence dengan Flat Bar Intercostal*
(Sumber: Penulis, 2026)

Grafik hubungan antara ukuran mesh dan tegangan *Von Mises* maksimum yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. dan Gambar 4.9. Terlihat bahwa semakin kecil ukuran *mesh*, hasil analisis cenderung mendekati nilai yang konstan. Kurva pada kedua model mulai menunjukkan kecenderungan mendatar (*plateau*) pada ukuran *mesh* 35 mm pada model tanpa *flat bar intercostal* dan 40 mm pada model dengan *flat bar intercostal*, yang mengindikasikan bahwa solusi numerik telah mendekati kondisi independen terhadap ukuran elemen.

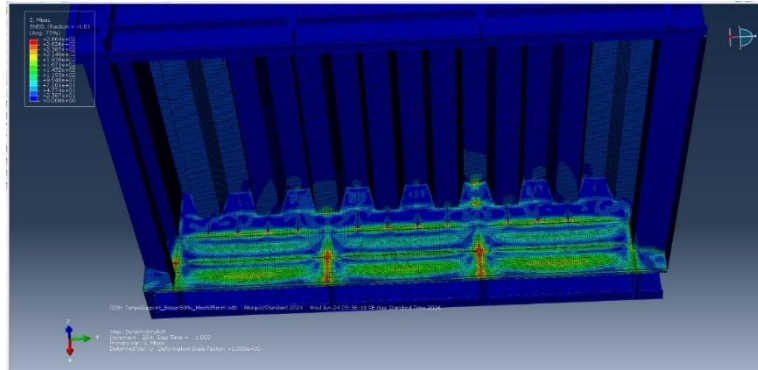
Berdasarkan hasil tersebut, mesh berukuran 35 mm dipilih sebagai mesh yang digunakan pada analisis model tanpa *flat bar intercostal* dan 40 mm pada analisis model dengan *flat bar intercostal*. Pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan bahwa mesh pada ukuran tersebut telah menghasilkan perubahan tegangan yang relatif kecil dibandingkan variasi mesh sebelumnya.

4.4. Hasil Simulasi Model Tanpa *Flat Bar Intercostal*

Model tanpa *flat bar intercostal* digunakan sebagai model acuan (*baseline model*) untuk mengevaluasi perilaku struktur *corrugated bulkhead* yang mengalami *misalignment double girder* tanpa adanya penambahan elemen penguat. Simulasi dilakukan menggunakan metode *Finite Element* (FEM dengan prosedur *Dynamic Implicit* dan pendekatan *quasi-static*. Variasi pembebanan yang digunakan terdiri atas kondisi muatan 25%, 50%, dan 80% kapasitas tangki, sehingga dapat diamati pengaruh peningkatan tekanan hidrostatik terhadap respons struktur.

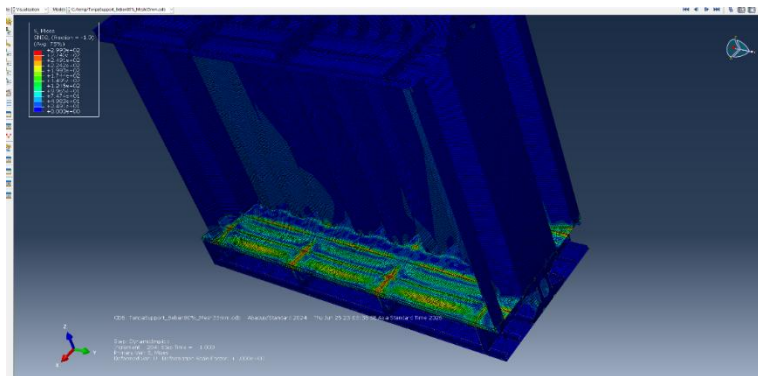
4.4.1. Distribusi Tegangan

Pada kondisi pembebanan 25%, nilai tegangan *Von Mises* maksimum yang diperoleh sebesar 273,9 MPa. Permukaan *corrugated bulkhead* berada pada zona berwarna biru hingga merah yang menunjukkan tingkat tegangan pada daerah sambungan *corrugated bulkhead*. Namun demikian, konsentrasi tegangan juga terlihat pada sambungan *double girder* dengan *bottom structure*, terutama pada daerah sekitar *bracket* dan *sambungan pelat*. Hal ini menunjukkan bahwa jalur distribusi beban mulai terpusat pada daerah tersebut meskipun tekanan hidrostatik yang diberikan masih relatif kecil.



Gambar 4. 11 Distribusi Tegangan Model A Kondisi Muatan 50%
(Sumber: Penulis, 2026)

Pada kondisi pembebanan 50%, tegangan maksimum meningkat menjadi 286,4 MPa. Peningkatan tekanan hidrostatik menyebabkan area dengan tegangan tinggi semakin meluas dibandingkan kondisi 25%. Konsentrasi tegangan masih didominasi pada sambungan antara *corrugated bulkhead*, *double girder*, dan *bottom structure*. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan hidrostatik terutama memengaruhi daerah dengan perubahan geometri dan kekakuan struktur.



Gambar 4. 12 Distribusi Tegangan Model A Kondisi Muatan 80%
(Sumber: Penulis, 2026)

Pada kondisi pembebanan 80%, diperoleh nilai tegangan Von Mises maksimum sebesar 299 MPa, yang merupakan nilai tertinggi di antara seluruh variasi pembebanan. Daerah konsentrasi tegangan semakin jelas terlihat pada sambungan struktur di bagian bawah *corrugated bulkhead*, khususnya pada pertemuan dengan *double girder*, *bottom plate*, dan *solid floor*. Warna merah dan oranye yang muncul pada lokasi tersebut menunjukkan bahwa elemen-elemen tersebut menerima beban paling besar akibat meningkatnya tekanan hidrostatik. Meskipun demikian, distribusi tegangan secara

keseluruhan masih mengikuti jalur transfer beban utama dari *corrugated bulkhead* menuju struktur dasar kapal.

Nilai tegangan *Von Mises* maksimum pada setiap kondisi pembebanan dirangkum pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Hasil Tegangan Model tanpa *Flat Bar Intercostal*
(Sumber: Penulis, 2026)

Kondisi Pembebanan (%)	Tegangan Maksimum (MPa)
25	273,9
50	286,4
80	299

Berdasarkan Tabel 4.7, terlihat bahwa nilai tegangan maksimum meningkat seiring bertambahnya tinggi muatan. Tegangan maksimum naik sebesar 12,5 MPa dari kondisi 25% menuju 50%, kemudian meningkat kembali sebesar 12,6 MPa pada kondisi 80%. Kenaikan ini menunjukkan hubungan yang searah antara tekanan hidrostatik dan respons tegangan struktur. Semakin tinggi kolom fluida, semakin besar tekanan yang diterima *corrugated bulkhead*, sehingga beban yang diteruskan menuju *double girder* dan *bottom structure* juga meningkat.

Selain meningkatkan nilai tegangan maksimum, bertambahnya pembebanan juga menyebabkan area konsentrasi tegangan menjadi lebih luas. Hal ini menunjukkan bahwa struktur tanpa *flat bar intercostal* memiliki kecenderungan mengalami akumulasi tegangan pada daerah sambungan akibat adanya misalignment *double girder*. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa daerah sambungan merupakan lokasi paling kritis terhadap potensi terjadinya deformasi plastis maupun kerusakan lokal apabila struktur menerima pembebanan yang lebih besar atau berulang selama masa operasi kapal.

Hasil simulasi model tanpa flat bar intercostal ini selanjutnya digunakan sebagai kondisi acuan (baseline) untuk dibandingkan dengan model yang telah diberi flat bar intercostal. Perbandingan tersebut bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana penambahan elemen penguat mampu mengurangi konsentrasi tegangan serta meningkatkan kekuatan memanjang *corrugated bulkhead* yang mengalami *misalignment double girder*.

4.4.2. Deformasi

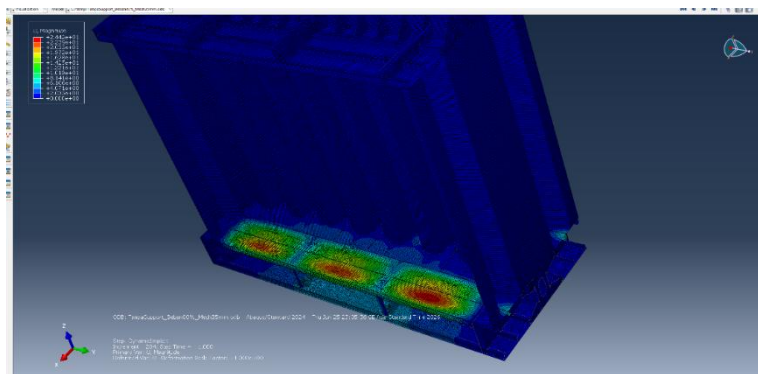
Deformasi merupakan parameter yang menunjukkan perubahan bentuk atau perpindahan struktur akibat pembebanan yang diberikan. Pada penelitian ini, deformasi dievaluasi menggunakan keluaran *U Magnitude* dari hasil simulasi *Finite Element Method* (FEM). Nilai *U Magnitude* menggambarkan besar perpindahan total yang terjadi pada setiap titik struktur akibat tekanan hidrostatik. Analisis deformasi

dilakukan untuk mengetahui tingkat kekakuan (stiffness) model *corrugated bulkhead* tanpa penambahan *flat bar intercostal* pada tiga variasi pembebanan, yaitu 25%, 50%, dan 80% kapasitas muatan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan hidrostatik berbanding lurus dengan meningkatnya deformasi maksimum yang terjadi pada struktur. Berdasarkan hasil analisis, deformasi maksimum pada pembebanan 25% sebesar 14,99 mm, kemudian meningkat menjadi 18,72 mm pada pembebanan 50%, dan mencapai 24,42 mm pada pembebanan 80%. Peningkatan deformasi tersebut menunjukkan bahwa semakin besar tekanan hidrostatik yang bekerja pada tangka muatan, semakin besar pula perpindahan yang dialami struktur akibat bertambahnya gaya yang harus ditransfer menuju sistem penyangga di bagian dasar kapal.

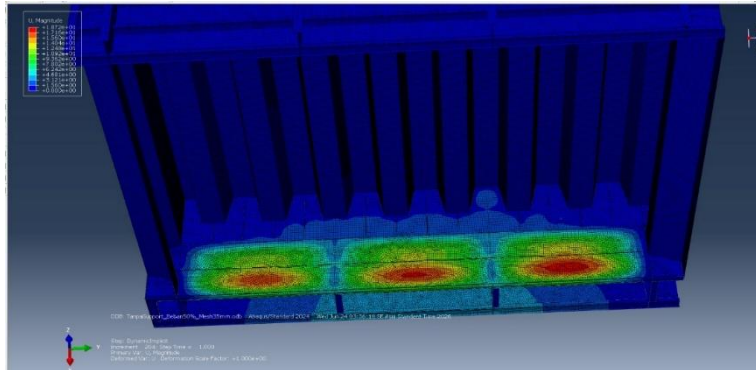
Tabel 4. 8 Hasil Deformasi Model tanpa *Flat Bar Intercostal*
(Sumber: Penulis, 2026)

Kondisi Pembebanan (%)	Deformasi Maksimum (mm)
25	14,99
50	18,72
80	24,42



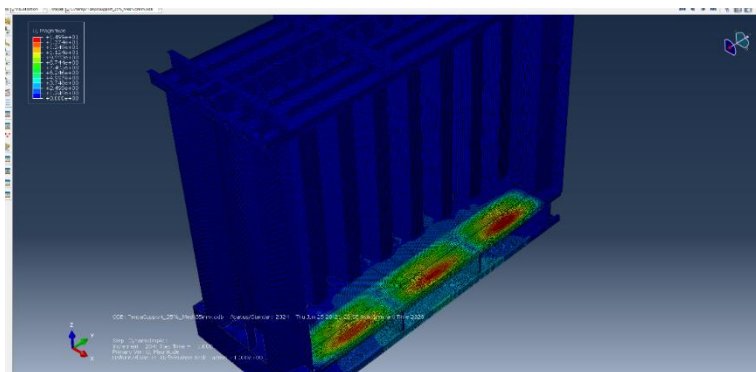
Gambar 4. 13 Deformasi Model A Kondisi Muatan 80%
(Sumber: Penulis, 2026)

Deformasi pada kondisi pembebanan 80%. Kontur warna menunjukkan bahwa deformasi terbesar ditandai dengan warna merah yang terkonsentrasi pada pelat *inner bottom* di sekitar daerah sambungan antara *solid floor*. Sementara itu, sebagian besar permukaan ares sambungan *corrugated bulkhead* masih berada pada zona berwarna biru hingga hijau yang menunjukkan perpindahan relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa geometri bergelombang pada *corrugated bulkhead* masih mampu mempertahankan kekakuan struktur sehingga deformasi tidak menyebar secara signifikan.



Gambar 4. 14 Deformasi Model A Kondisi Muatan 50%
(Sumber: Penulis, 2026)

Pada kondisi pembebanan 50%, pola distribusi deformasi tetap menunjukkan karakteristik yang sama dengan pembebanan 80%, namun luas area yang mengalami deformasi tinggi lebih kecil. Zona berwarna merah dan oranye masih terpusat pada *inner bottom plate* di antara *solid floor*, sedangkan pada area *corrugated bulkhead* tetap mengalami deformasi yang relatif rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa jalur utama perpindahan beban masih didominasi oleh struktur dasar kapal sebelum diteruskan menuju elemen longitudinal lainnya.



Gambar 4. 15 Deformasi Model A Kondisi Muatan 25%
(Sumber: Penulis, 2026)

Pada pembebanan 25%, distribusi deformasi menjadi lebih merata dengan dominasi warna biru dan hijau pada hampir seluruh struktur. Area yang mengalami deformasi maksimum masih berada pada lokasi yang sama, yaitu *inner bottom* diantara *solid floor*, tetapi dengan luas dan intensitas yang jauh lebih kecil dibandingkan pembebanan 50% maupun 80%. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada beban yang lebih rendah, kekakuan struktur masih mampu membatasi perpindahan sehingga perubahan bentuk yang terjadi relatif kecil.

Secara keseluruhan, hasil simulasi memperlihatkan bahwa lokasi deformasi maksimum tidak berpindah meskipun besarnya pembebanan berubah. Konsentrasi deformasi tetap terjadi pada daerah sambungan antara *inner bottom*, *double girder*, dan *corrugated bulkhead*, yang merupakan jalur utama transfer beban menuju struktur dasar kapal. Kondisi ini menunjukkan bahwa daerah tersebut merupakan bagian struktur yang memiliki fleksibilitas paling tinggi sehingga mengalami perpindahan terbesar selama proses pembebanan. Hasil ini juga menjadi dasar untuk mengevaluasi efektivitas penambahan *flat bar intercostal* pada model berikutnya dalam meningkatkan kekakuan struktur dan mengurangi deformasi maksimum yang terjadi akibat kondisi *misalignment*.

4.5. Hasil Simulasi Model Dengan *Flat Bar Intercostal*

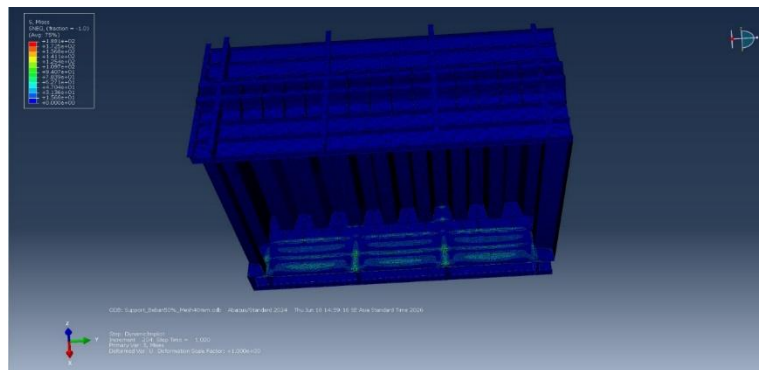
Model kedua merupakan konfigurasi *corrugated bulkhead* yang telah diberi penambahan *flat bar intercostal* pada area yang mengalami *misalignment* antara *double girder* dan *corrugated bulkhead*. Penambahan elemen penguat ini bertujuan untuk meningkatkan kekakuan lokal sehingga jalur distribusi beban menjadi lebih merata serta mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah sambungan. Simulasi dilakukan menggunakan prosedur *Dynamic Implicit* dengan pendekatan *quasi-static* menggunakan parameter pemodelan, kondisi batas, dan pembebanan yang sama seperti model tanpa penguat. Pembebanan diberikan dalam tiga variasi kondisi muatan, yaitu 25%, 50%, dan 80% kapasitas tangki. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi tegangan *Von Mises*, deformasi (*U Magnitude*), dan *Safety Factor* untuk mengetahui efektivitas penambahan *flat bar intercostal* terhadap peningkatan kekuatan struktur.

4.5.1. Distribusi Tegangan

Hasil simulasi pada model yang menggunakan *flat bar intercostal* menunjukkan adanya perubahan distribusi tegangan dibandingkan model tanpa penguat. Berdasarkan hasil analisis, nilai tegangan maksimum yang diperoleh pada pembebanan 25%, 50%, dan 80% berturut-turut sebesar 51,69 MPa, 188,10 MPa, dan 239,00 MPa. Nilai tersebut seluruhnya berada di bawah tegangan luluh (*yield strength*) *Marine Steel Grade A* sebesar 235 MPa untuk pembebanan 25% dan 50%, sedangkan pada pembebanan 80% hanya sedikit melebihi nilai tersebut pada area yang sangat lokal akibat konsentrasi tegangan di sekitar sambungan. Dibandingkan model tanpa *flat bar intercostal*, tegangan maksimum mengalami penurunan yang cukup signifikan pada seluruh variasi pembebanan, menunjukkan bahwa penambahan penguat mampu meningkatkan kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban.

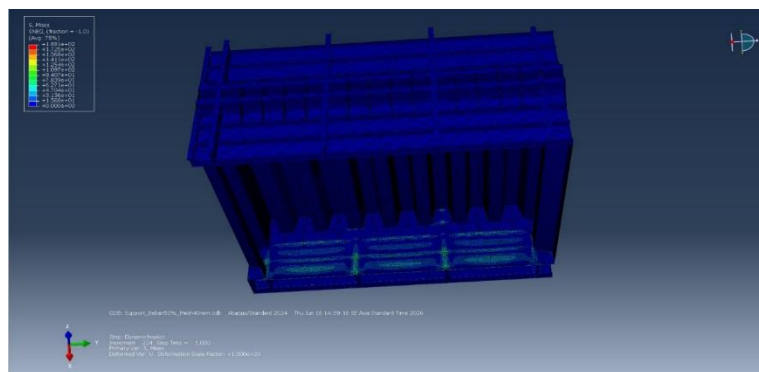
Tabel 4. 9 Hasil Tegangan Model dengan *Flat Bar Intercostal*
(Sumber: Penulis, 2026)

Kondisi Pembebanan (%)	Tegangan Maksimum (MPa)
25	51,69
50	188,10
80	239



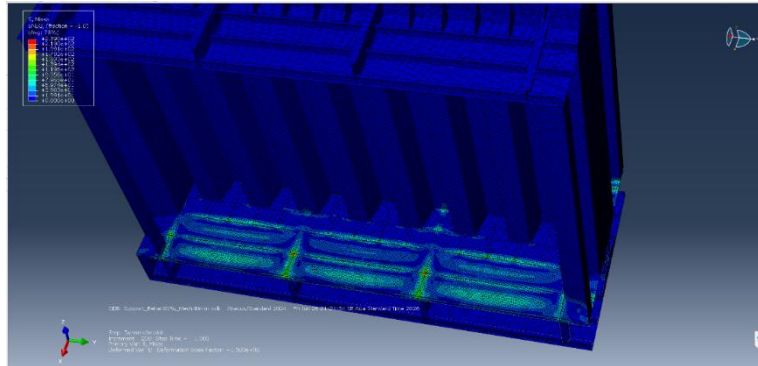
Gambar 4. 16 Distribusi Tegangan Model B Kondisi Muatan 25%
(Sumber: Penulis, 2026)

Pada Gambar 4.16. yang menunjukkan distribusi tegangan untuk pembebanan 25%, hampir seluruh permukaan didominasi oleh warna biru. Hal ini mengindikasikan bahwa tegangan yang terjadi masih relatif rendah. Konsentrasi tegangan hanya muncul pada daerah sambungan *flat bar intercostal* dengan *inner bottom* dan *double girder*, tetapi dengan intensitas yang jauh lebih kecil dibandingkan model tanpa penguat.



Gambar 4. 17 Distribusi Tegangan Model B Kondisi Muatan 50%
(Sumber: Penulis, 2026)

Pada Gambar 4.17. untuk pembebanan 50%, distribusi tegangan mulai meningkat seiring bertambahnya tekanan hidrostatik. Walaupun demikian, kontur warna masih didominasi oleh warna biru hingga hijau, sedangkan zona kuning hanya muncul secara lokal di sekitar sambungan antara *flat bar intercostal*, *floor*, dan *double girder*. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan *flat bar intercostal* mampu memperluas jalur transfer beban sehingga distribusi tegangan menjadi lebih merata.



Gambar 4. 18 Distribusi Tegangan Model B Kondisi Muatan 80%
(Sumber: Penulis, 2026)

Pada Gambar 4.18. dengan pembebanan 80%, konsentrasi tegangan semakin meningkat akibat bertambahnya tekanan hidrostatik. Akan tetapi, area dengan tegangan tinggi tetap terkonsentrasi pada daerah sambungan struktur dan tidak menyebar secara luas ke permukaan sambungan *corrugated bulkhead*. Dibandingkan model tanpa penguat, luasan daerah yang mengalami tegangan tinggi terlihat lebih kecil sehingga menunjukkan bahwa *flat bar intercostal* berhasil meningkatkan kekakuan lokal dan mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah misalignment.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan *flat bar intercostal* memberikan pengaruh positif terhadap perilaku struktur. Penguat tambahan tersebut meningkatkan kontinuitas jalur distribusi gaya dari *corrugated bulkhead* menuju *double girder* sehingga beban dapat disalurkan secara lebih efektif. Akibatnya, konsentrasi tegangan pada daerah sambungan menjadi berkurang dan struktur memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan pembebanan hidrostatik. Hasil ini menunjukkan bahwa *flat bar intercostal* merupakan alternatif penguatan yang efektif untuk meningkatkan kekuatan memanjang pada struktur *corrugated bulkhead* yang mengalami misalignment *double girder*.

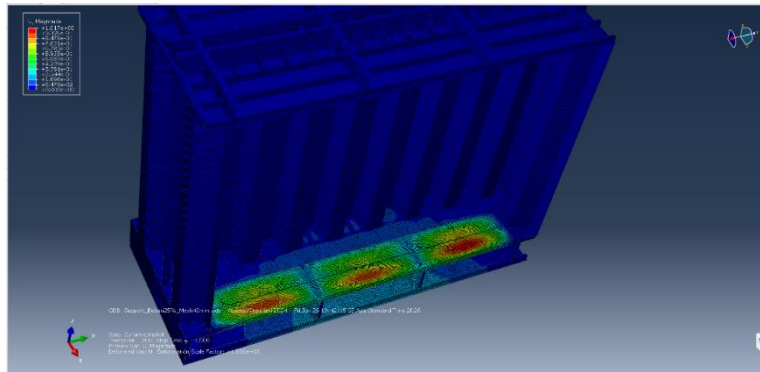
4.5.2. Deformasi

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau perpindahan struktur akibat pembebanan yang bekerja dan menjadi salah satu indikator penting dalam mengevaluasi kekakuan struktur. Pada penelitian ini, deformasi dianalisis menggunakan parameter *U Magnitude* yang diperoleh dari hasil simulasi *Finite Element Method* (FEM). Nilai *U Magnitude* menunjukkan besar perpindahan total yang dialami struktur akibat tekanan hidrostatik pada kondisi pembebanan 25%, 50%, dan 80%. Analisis deformasi pada model yang menggunakan *flat bar intercostal* bertujuan untuk mengetahui sejauh mana penambahan elemen penguat mampu meningkatkan kekakuan struktur dan mengurangi perpindahan akibat kondisi *misalignment* antara *double girder* dan *corrugated bulkhead*.

Berdasarkan hasil simulasi, deformasi maksimum pada model dengan *flat bar intercostal* mengalami peningkatan seiring bertambahnya pembebanan hidrostatik. Nilai deformasi maksimum yang diperoleh pada pembebanan 25%, 50%, dan 80% masing-masing sebesar 1,017 mm, 3,732 mm, dan 7,015 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar tekanan hidrostatik yang diberikan, semakin besar pula perpindahan yang terjadi pada struktur. Akan tetapi, nilai deformasi yang dihasilkan masih relatif kecil dibandingkan model tanpa *flat bar intercostal*, yang menunjukkan bahwa penambahan penguat mampu meningkatkan kekakuan struktur secara signifikan.

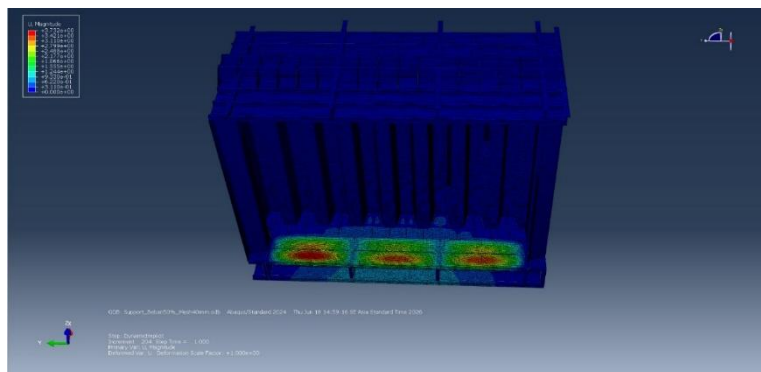
Tabel 4. 10 Hasil Deformasi Model dengan *Flat Bar Intercostal*
(Sumber: Penulis, 2026)

Kondisi Pembebanan (%)	Deformasi Maksimum (mm)
25	1,017
50	3,732
80	7,015



Gambar 4. 19 Deformasi Model B Kondisi Muatan 25%
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Gambar 4.19. pada kondisi pembebanan 25%, hampir seluruh permukaan *corrugated bulkhead*, *double girder*, dan struktur dasar didominasi oleh warna biru. Zona dengan deformasi yang lebih tinggi hanya muncul pada permukaan *inner bottom plate* di antara *solid floor*, ditunjukkan oleh kontur berwarna hijau hingga kuning. Hal ini menunjukkan bahwa pada pembebanan rendah, struktur masih memiliki kekakuan yang tinggi sehingga perpindahan yang terjadi relatif kecil dan terkonsentrasi pada area yang menerima beban secara langsung.



Gambar 4. 20 Deformasi Model B Kondisi Muatan 50%
(Sumber: Penulis, 2026)

Pada kondisi pembebanan 50% sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.20., pola distribusi deformasi tetap menunjukkan karakteristik yang sama. Luasan daerah berwarna hijau hingga merah mulai meningkat pada permukaan *inner bottom*, namun deformasi pada *corrugated bulkhead* masih relatif kecil dan didominasi warna biru. Hal tersebut menunjukkan bahwa *flat bar intercostal* mampu

tegangan *Von Mises* dan deformasi maksimum (*U Magnitude*). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas pemasangan *flat bar intercostal* dalam meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur akibat adanya kondisi *misalignment* antara *corrugated bulkhead* dan *double girder*.

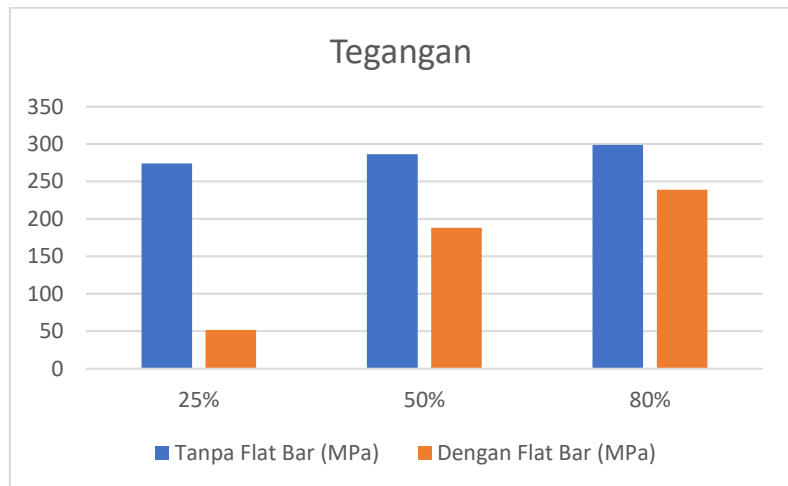
4.6.1. Distribusi Tegangan

Distribusi tegangan dibandingkan berdasarkan nilai tegangan *Von Mises* maksimum yang diperoleh dari hasil simulasi pada kedua model. Nilai tersebut digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pemasangan *flat bar intercostal* dalam mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah kritis struktur.

Tabel 4. 11 Perbandingan Tegangan Maksimum Model tanpa dan dengan *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)

Beban (%)	Tanpa Flat Bar (Mpa)	Dengan Flat Bar (MPa)	Penurunan (%)
25	273,90	51,69	81,13
50	286,40	188,10	34,32
80	299,00	239,00	20,07

Grafik perbandingan tegangan maksimum ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4. 22 Grafik Perbandingan Tegangan Maksimum Model tanpa dan dengan *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.11. dan Gambar 4.22. terlihat bahwa nilai tegangan maksimum pada kedua model meningkat seiring bertambahnya pembebanan hidrostatik. Namun demikian, model yang menggunakan *flat bar intercostal* secara konsisten menghasilkan tegangan yang lebih rendah dibandingkan model tanpa penguat.

Pada kondisi pembebanan 25%, tegangan maksimum turun dari 273,90 MPa menjadi 51,69 MPa, sehingga terjadi penurunan sebesar 222,21 MPa atau 81,13%. Penurunan ini menunjukkan bahwa pada pembebanan rendah, *flat bar intercostal* mampu mendistribusikan beban secara efektif sehingga konsentrasi tegangan pada sambungan *corrugated bulkhead* dan *double girder* berkurang secara signifikan.

Pada pembebanan 50%, tegangan maksimum model tanpa *flat bar* mencapai 286,40 MPa, sedangkan model dengan *flat bar* sebesar 188,10 MPa. Hal ini menunjukkan adanya penurunan sebesar 98,30 MPa atau 34,32%. Meskipun tekanan hidrostatik meningkat, keberadaan *flat bar* tetap mampu mengurangi konsentrasi tegangan dengan memperbaiki jalur distribusi beban menuju elemen struktur di sekitarnya.

Pada kondisi pembebanan 80%, tegangan maksimum model tanpa *flat bar* sebesar 299,00 MPa, sedangkan model dengan *flat bar* sebesar 239,00 MPa. Penurunan yang diperoleh sebesar 60,00 MPa atau 20,07%. Persentase penurunan lebih kecil dibandingkan kondisi pembebanan 25% dan 50% karena semakin besar beban hidrostatik menyebabkan sebagian besar elemen struktur telah bekerja mendekati kapasitas elastisnya, sehingga kontribusi *flat bar* dalam menurunkan tegangan relatif berkurang.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *flat bar intercostal* mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada seluruh variasi pembebanan. Selain menghasilkan nilai tegangan maksimum yang lebih rendah, distribusi tegangan pada model dengan *flat bar* juga terlihat lebih merata dibandingkan model tanpa penguat. Hal ini menunjukkan bahwa *flat bar intercostal* berfungsi sebagai elemen pengaku tambahan yang meningkatkan kekakuan lokal dan membantu mendistribusikan beban hidrostatik secara lebih efektif ke sepanjang struktur *corrugated bulkhead* dan *double girder*. Dengan demikian, pemasangan *flat bar intercostal* terbukti meningkatkan performa struktur melalui penurunan tegangan maksimum hingga 81,13% pada kondisi pembebanan tertentu serta mengurangi potensi terjadinya konsentrasi tegangan pada daerah kritis.

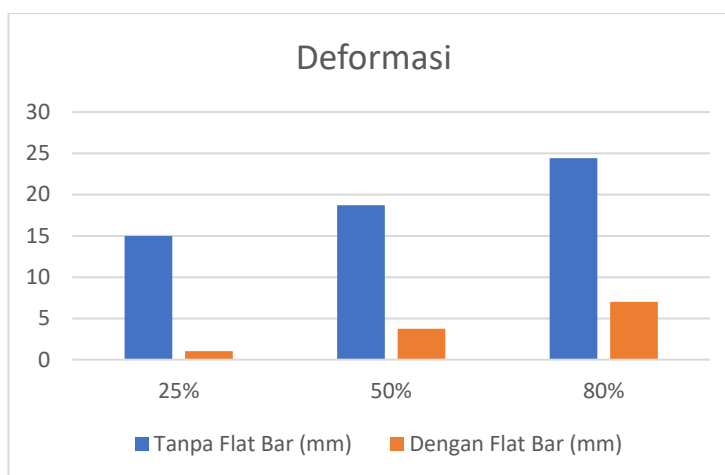
4.6.2. Deformasi

Perbandingan deformasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan *flat bar intercostal* terhadap kekakuan struktur *corrugated bulkhead*. Parameter yang digunakan adalah U Magnitude (deformasi maksimum) yang diperoleh dari hasil simulasi pada kondisi pembebanan 25%, 50%, dan 80%. Semakin kecil nilai deformasi yang dihasilkan, maka semakin tinggi kekakuan struktur dalam menahan beban hidrostatik.

Tabel 4. 12 Perbandingan Deformasi Maksimum Model tanpa dan dengan *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)

Beban (%)	Tanpa Flat Bar (mm)	Dengan Flat Bar (mm)	Penurunan (%)
25	14,99	1,017	93,22
50	18,72	3,732	80,06
80	24,42	7,015	71,27

Grafik perbandingan deformasi maksimum ditunjukkan pada Gambar 4.23.



Gambar 4. 23 Grafik Perbandingan Deformasi Maksimum Model tanpa dan dengan *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.12. dan Gambar 4.23. terlihat bahwa nilai deformasi maksimum pada kedua model meningkat seiring bertambahnya pembebanan hidrostatik. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar tekanan yang diterima struktur, maka perpindahan atau lendutan yang terjadi juga semakin besar. Akan tetapi, model yang menggunakan *flat bar intercostal* menghasilkan deformasi yang jauh lebih kecil dibandingkan model tanpa penguat pada seluruh kondisi pembebanan.

Pada pembebanan 25%, model tanpa *flat bar* mengalami deformasi maksimum sebesar 14,99 mm, sedangkan model dengan *flat bar* hanya mengalami deformasi sebesar 1,017 mm. Dengan demikian terjadi penurunan deformasi sebesar 13,973 mm atau sekitar 93,22%. Hasil ini menunjukkan bahwa pada pembebanan rendah, penambahan flat bar intercostal mampu meningkatkan

kekakuan lokal secara signifikan sehingga lendutan struktur dapat diminimalkan.

Pada pembebanan 50%, deformasi maksimum model tanpa *flat bar* meningkat menjadi 18,72 mm, sedangkan model dengan *flat bar* hanya sebesar 3,732 mm. Penurunan deformasi yang diperoleh mencapai 14,988 mm atau 80,06%. Meskipun beban hidrostatik bertambah, keberadaan *flat bar* masih mampu mempertahankan kekakuan struktur sehingga deformasi yang terjadi tetap jauh lebih rendah dibandingkan model tanpa penguat.

Pada pembebanan 80%, model tanpa *flat bar* menghasilkan deformasi maksimum sebesar 24,42 mm, sedangkan model dengan *flat bar* sebesar 7,015 mm. Nilai tersebut menunjukkan penurunan deformasi sebesar 17,405 mm atau 71,27%. Walaupun persentase penurunannya lebih kecil dibandingkan kondisi pembebanan 25% dan 50%, *flat bar intercostal* masih memberikan kontribusi yang signifikan dalam mengurangi lendutan struktur pada kondisi beban yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa pemasangan *flat bar intercostal* tidak hanya mampu menurunkan tegangan maksimum, tetapi juga meningkatkan kekakuan struktur secara nyata. Penurunan deformasi maksimum berkisar antara 71,27% hingga 93,22%, sehingga distribusi beban menjadi lebih merata dan perpindahan struktur pada area kritis dapat diminimalkan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa *flat bar intercostal* bekerja secara efektif sebagai elemen pengaku tambahan yang meningkatkan stabilitas *corrugated bulkhead* terhadap pembebanan hidrostatik. Hasil tersebut memperkuat temuan pada analisis distribusi tegangan bahwa penambahan *flat bar intercostal* memberikan peningkatan performa struktur baik dari aspek kekuatan maupun kekakuan.

4.7. *Safety Factor*

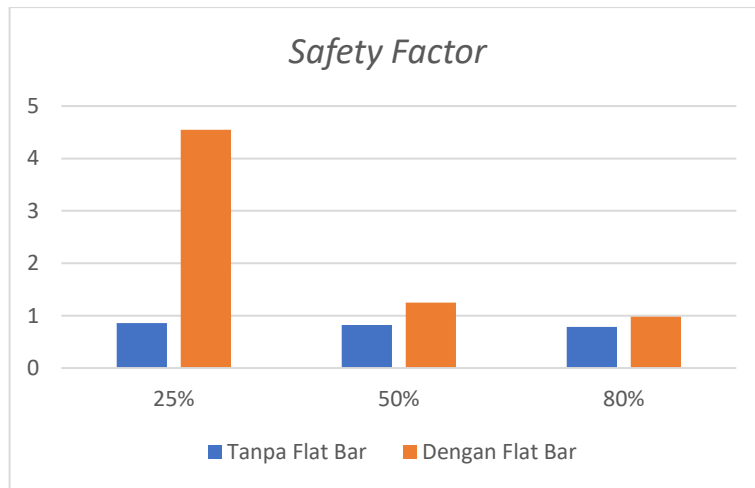
Safety Factor (SF) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat keamanan struktur terhadap kegagalan akibat tegangan yang terjadi. Pada penelitian ini, nilai *Safety Factor* dihitung berdasarkan perbandingan antara tegangan luluh (*yield strength*) material *Marine Steel Grade A* sebesar 235 MPa dengan tegangan *Von Mises* maksimum hasil simulasi. Semakin besar nilai *Safety Factor*, maka semakin aman struktur dalam menerima pembebanan, sedangkan nilai *Safety Factor* yang semakin kecil menunjukkan struktur bekerja mendekati batas luluh material.

Berdasarkan hasil simulasi pada Subbab 4.4. sampai 4.5., diperoleh nilai *Safety Factor* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Perbandingan *Safety Factor* Model tanpa dan dengan *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)

Beban (%)	Tanpa Flat Bar	Dengan Flat Bar
25	0,858	4,55
50	0,820	1,25
80	0,786	0,98

Grafik perbandingan *Safety Factor* ditunjukkan pada Gambar 4.24.



Gambar 4. 24 Grafik Perbandingan *Safety Factor* Model tanpa dan dengan *Flat Bar Intercostal* (Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.13. dan Gambar 4.24. terlihat bahwa model tanpa *flat bar intercostal* memiliki nilai *Safety Factor* yang terus menurun seiring meningkatnya pembebanan. Pada pembebanan 25% diperoleh nilai *Safety Factor* sebesar 0,858, kemudian turun menjadi 0,820 pada pembebanan 50%, dan mencapai 0,786 pada pembebanan 80%. Seluruh nilai tersebut berada di bawah 1,0 sehingga menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi telah melampaui tegangan luluh material *Marine Steel Grade A*. Kondisi ini mengindikasikan bahwa struktur tanpa penguat memiliki potensi mengalami deformasi plastis apabila menerima pembebanan tersebut.

Sebaliknya, model yang menggunakan *flat bar intercostal* menghasilkan *Safety Factor* yang lebih tinggi pada seluruh variasi pembebanan. Pada kondisi beban 25%, *Safety Factor* mencapai 4,55, menunjukkan bahwa tegangan kerja masih jauh di bawah batas luluh material sehingga struktur berada pada kondisi sangat aman. Ketika

pembebanan meningkat menjadi 50% nilai *Safety Factor* menurun menjadi 1,25, namun masih berada di atas nilai minimum sehingga struktur masih bekerja pada daerah elastis. Tetapi pada pembebanan 80%, *Safety Factor* turun menjadi 0,98, yang menunjukkan bahwa tegangan maksimum sudah sangat melewati tegangan luluh material.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *flat bar intercostal* mampu meningkatkan kapasitas struktur dalam menahan beban hidrostatik dengan menurunkan tegangan maksimum secara signifikan. Hal ini berdampak langsung terhadap peningkatan *Safety Factor* dibandingkan model tanpa penguat. Meskipun pada kondisi pembebanan 80% nilai *Safety Factor* model dengan *flat bar* masih sedikit berada di bawah satu, nilainya jauh lebih tinggi dibandingkan model tanpa *flat bar* (0,98 dibandingkan 0,786) sehingga struktur memiliki tingkat keamanan yang lebih baik tetapi belum memenuhi batas keamanan struktur.

Secara keseluruhan *Safety Factor* memperkuat hasil analisis distribusi tegangan dan deformasi pada subbab sebelumnya. Penambahan *flat bar intercostal* terbukti meningkatkan performa struktur *corrugated bulkhead* dengan menurunkan konsentrasi tegangan, mengurangi deformasi, serta meningkatkan tingkat keamanan struktur terhadap kegagalan akibat pembebanan hidrostatik secara signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan *flat bar intercostal* merupakan metode penguatan yang belum cukup efektif untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur pada *corrugated bulkhead* kapal *tanker* dikarenakan pada perhitungan faktor keamanan struktur masih terdapat hasil dibawah 1.

4.8. Validasi Hasil *Finite Element Method*

Tekanan hidrostatik yang diberikan pada penelitian ini, yaitu sebesar 15,67–50,15 kPa (0,01567–0,05015 MPa), merupakan beban eksternal yang bekerja secara merata pada permukaan *corrugated bulkhead*, sedangkan nilai tegangan *Von Mises* sebesar 51,69–299 MPa merupakan respons internal struktur akibat proses transfer beban melalui sistem konstruksi kapal. Oleh karena itu, kedua besaran tersebut tidak dapat dibandingkan secara langsung karena memiliki makna mekanika yang berbeda. Tekanan hidrostatik yang bekerja pada permukaan struktur akan diteruskan melalui *corrugated bulkhead*, *double girder*, *solid floor*, dan *bottom structure* sehingga menghasilkan kombinasi gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur yang selanjutnya menimbulkan distribusi tegangan internal. Sesuai teori mekanika struktur, besarnya tegangan tidak hanya dipengaruhi oleh besar beban yang diberikan, tetapi juga oleh geometri penampang, kekakuan struktur, kondisi batas, serta jalur distribusi gaya (*load path*). Pada model yang mengalami *misalignment*, perubahan geometri pada daerah sambungan menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan (*stress concentration*), sehingga tegangan lokal dapat mencapai nilai yang jauh lebih besar dibandingkan tekanan hidrostatik yang diberikan. Dengan

demikian, hasil simulasi yang menunjukkan tegangan maksimum hingga 299 MPa masih berada dalam rentang yang dapat dijelaskan secara teoritis dan konsisten dengan perilaku struktur berdinding tipis yang memiliki diskontinuitas geometri.

Untuk memastikan bahwa tegangan maksimum tersebut bukan merupakan akibat *stress singularity*, dilakukan evaluasi melalui uji *grid independence*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan nilai tegangan maksimum pada ukuran mesh yang lebih halus relatif kecil, yaitu hanya sekitar 1,82% dari mesh 35 mm ke 30 mm, sehingga solusi numerik telah menunjukkan kecenderungan konvergen dan tidak mengalami peningkatan tegangan yang tidak terbatas (*non-convergent stress*). Selain itu, berdasarkan distribusi kontur hasil simulasi, tegangan maksimum tidak hanya muncul pada satu atau dua elemen di lokasi *boundary condition*, tetapi menyebar pada beberapa elemen di sekitar sambungan antara *corrugated bulkhead*, *double girder*, dan *inner bottom* yang merupakan jalur utama transfer beban pada struktur. Pola distribusi tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum yang diperoleh lebih merepresentasikan konsentrasi tegangan akibat perubahan kekakuan dan geometri struktur, bukan singularitas numerik yang disebabkan oleh penerapan kondisi batas. Oleh karena itu, hasil analisis tegangan pada penelitian ini dapat dianggap valid dan layak digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *flat bar intercostal* terhadap peningkatan kinerja struktur *corrugated bulkhead* yang mengalami *misalignment double girder*.