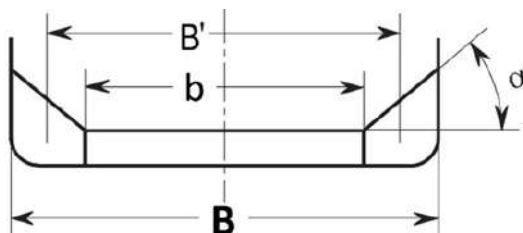


BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Selama beberapa dekade terakhir, industri maritim mengalami perkembangan yang pesat akibat dari meningkatnya permintaan pengiriman barang melalui laut. Salah satunya pada kapal tanker yang umumnya digunakan untuk memuat minyak dan bahan kimia. Muatan tersebut tergolong muatan berbahaya, sehingga berbagai industri maritim terus menerus meningkatkan standar keselamatan kapal khususnya pada kapal tanker. Hal ini dikarenakan banyaknya peristiwa kecelakaan kapal tanker yang menyebabkan pencemaran akibat tumpahnya minyak maupun bahan kimia di laut. Peristiwa tersebut berefek pada terbitnya peraturan-peraturan untuk mencegah peristiwa serupa, salah satunya yakni regulasi internasional MARPOL 73/78 yang menjadikan standar keselamatan kapal tanker dengan menerapkan konstruksi lambung ganda (*double hull*). Konstruksi lambung ganda pada kapal tanker dirancang untuk meminimalisir potensi kebocoran pada saat kapal mengalami kecelakaan ataupun kandas.

Struktur lambung ganda pada kapal tanker terdiri dari komponen pelindung sisi (*double side*) dan bagian bawah kapal (*double bottom*). Pelindung sisi (*double side*) dan bagian bawah kapal (*double bottom*) dihubungkan oleh *hopper tank* yang diilustrasikan pada Gambar 3. Struktur *hopper tank* umumnya memiliki kemiringan sudut, kemiringan sudut ini disebutkan dalam peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), 2024, dimana dalam peraturan BKI sudut *hopper tank* yakni 35° seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.



$$\begin{aligned}
 B' &= \frac{1}{3}(2 \cdot B + b) & \text{for } \alpha \geq 35^\circ \\
 B' &= B & \text{for } \alpha < 35^\circ
 \end{aligned}$$

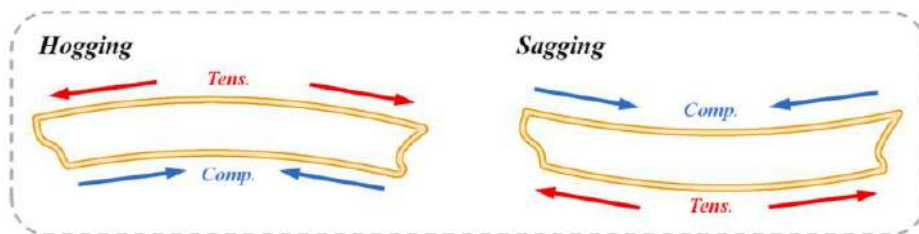
(Sumber: Rules For Hull Volume II Section 8 BKI)

Gambar 1 Spesifikasi sudut *hopper tank*

Kondisi lingkungan dan cuaca dapat berubah-ubah selama kapal beroperasi di lautan. Dalam hal ini, analisis struktur kapal sangat berperan penting untuk memastikan keamanan dalam menghadapi semua kemungkinan kegagalan yang dapat terjadi selama kapal beroperasi. Analisis struktur dirancang untuk dapat menentukan ketahanan dan kekuatan kapal agar dapat menahan beban-beban yang

timbul selama kapal beroperasi di lautan. Hal ini sangat krusial karena kerugian yang terjadi akibat kegagalan struktur saat kapal berlayar tidak hanya berakibat pada keamanan kapal dan keselamatan awak kapal, tetapi dapat berdampak pada pencemaran lingkungan, keseimbangan ekosistem, kesehatan di daerah pesisir dan lain-lain. Beban yang besar dapat menimbulkan deformasi berupa plastik dan elastis, dalam hal ini beban yang dimaksud yakni beban internal yang berasal dari muatan dan berat struktur kapal serta beban eksternal yakni dari gelombang. Dalam kondisi normal struktur akan mengalami deformasi elastis yang artinya struktur dapat kembali pada kondisi awal ketika beban telah dihilangkan, sedangkan pada saat beban melebihi batas elastisitasnya maka akan terjadi deformasi plastik yang mengakibatkan kerusakan struktur secara permanen.

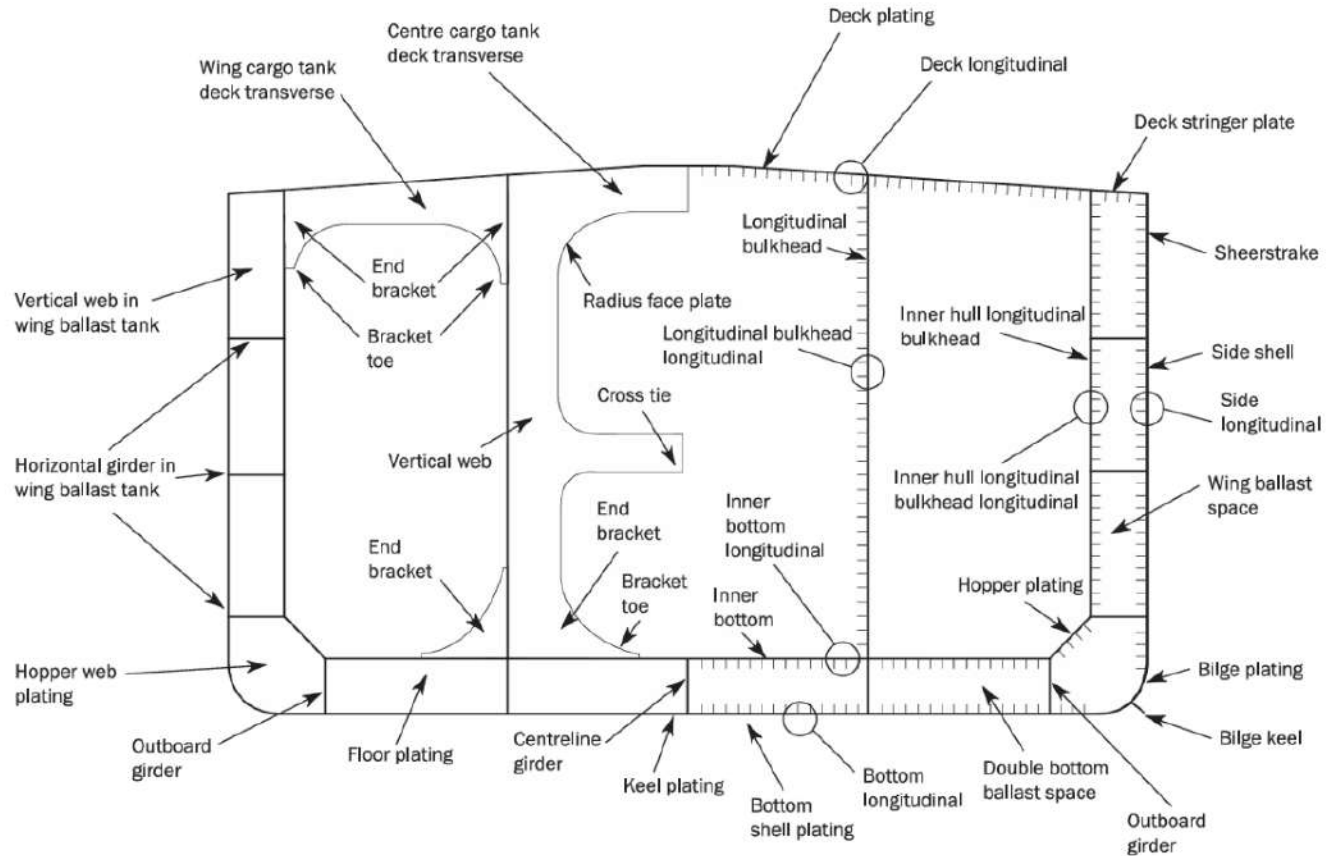
Beban-beban yang bekerja pada saat kapal beroperasi diberbagai kondisi laut yang dinamis sangat mempengaruhi kekuatan struktur kapal, terutama beban eksternal yakni gelombang. Hal tersebut dapat menimbulkan kondisi *hogging* dan *sagging* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Saat girder lambung kapal menekuk ke atas karena gaya apung dan berat muatannya maka terjadi *hogging*, hal ini menyebabkan tegangan tarik di bagian atas kapal dan tegangan tekan ke bawah kapal. Sebaliknya saat girder lambung kapal menekuk ke bawah akibat dari berat kapal terkonsentrasi di bagian tengah kapal, maka tegangan tekan muncul di bagian atas kapal dan tegangan tarik di bagian bawah kapal yang menyebabkan kondisi *sagging*. Kondisi tersebut dapat menimbulkan kegagalan material, keretakan bahkan kerusakan struktur secara permanen jika terjadi secara berulang-ulang (Cui et al., 2024).



(Sumber: Cui et al., 2024)

Gambar 2 Kondisi *hogging* dan *sagging*

Kemampuan kapal dalam menahan momen lentur saat kondisi *hogging* dan *sagging* disebut dengan kekuatan *longitudinal* kapal. Saat momen lentur maksimum, balok-balok di kapal akan menahan momen tersebut untuk mencegah terjadinya kegagalan struktur pada kapal (Quispe et al., 2022). Kondisi pembebanan siklik seperti *hogging* dan *sagging* mempengaruhi momen lentur pada struktur lambung kapal. Kapal dapat mengalami momen lentur bergantian saat berlayar melewati gelombang laut. Hal tersebut dapat menyebabkan kegagalan struktur pada beban yang lebih rendah dari yang diperkirakan saat kondisi pembebanan *monotonic*, ini disebabkan oleh regangan plastik yang terkumpul dan tekuk plastik yang berkembang disekitarnya (Liu and Soares, 2020).



(Sumber: IACS CSR BC & OT, 2024)

Gambar 3 Mid Cargo Hold Transverse Section of Double Hull Tanker

Penggunaan metode *Finite Element Method* (FEM) seringkali ditemukan dalam penelitian kekuatan struktur kapal, FEM digunakan untuk menganalisis perilaku struktural dari berbagai elemen termasuk pada konteks analisis kekuatan dan kegagalan struktur sebagai contoh lambung kapal. Meskipun FEM tergolong konvensional, metode ini tetap menjadi alat penting dalam hal memahami perilaku nonlinear dan defleksi besar dari struktur yang kompleks. Metode ini juga memungkinkan untuk memprediksi respon struktur terhadap kondisi dan berbagai beban serta dapat membantu dalam penilaian kekuatan batas dari elemen-elemen tersebut (Li and Kyun, 2022).

Beberapa penelitian dibidang perkapalan telah melakukan penelitian mengenai kekuatan batas pada struktur *hull girder* kapal, namun belum ada yang membahas pengaruh sudut *hopper tank* terhadap kekuatan batas pada struktur *hull girder* kapal. Beberapa penelitian telah menganalisis kekuatan batas dan keruntuhan progresif pada kapal khususnya pada lambung kapal dengan menggunakan pendekatan analitis seperti metode elemen hingga dan metode smith (Alie and Latumahina, 2019; Cui *et al.*, 2024; Quispe *et al.*, 2022; Liu and Guedes Soares, 2020; Muis Alie, 2018; Jagite *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022; Kuznecovs *et al.*, 2020; Cui *et al.*, 2024). Li *et al.* (2021) mengembangkan pendekatan *probabilistic* dengan menggunakan distribusi probabilitas dari karakteristik kritis *load-shortening curves* (LSC) dari data yang dihasilkan formula empiris dan metode elemen hingga nonlinear dalam memperkirakan kekuatan batas kapal dalam berbagai kondisi pembebanan. Penelitian lainnya menganalisis kekuatan batas kapal yang difokuskan pada struktur *double bottom* dalam berbagai kondisi seperti *accident*, *grounding*, *hogging loads*, *local loads*, *combined loads* dan *fire* (Rio *et al.*, 2019; Rio *et al.*, 2019; Prabowo *et al.*, 2018; Ban, 2024; Tatsumi and Fujikubo, 2020; Tatsumi *et al.*, 2020; Satriatama *et al.*, 2024). Pendekatan Bayesian yang dilakukan oleh Georgiadis and Samuelides. (2023), digunakan untuk mengukur faktor ketidakpastian model pada kekuatan struktur kapal yang berhubungan dengan kapasitas *ultimate hull girder* kapal konteiner. Babazadeh and Khedmati. (2021) menganalisis kekuatan batas dan perilaku struktur lambung kapal dalam berbagai kondisi pembebanan termasuk kompresi, keberadaan cacat diawal, tarikan dan tegangan residual. Beberapa kapal yang memiliki sistem rangka transversal dan berukuran besar sangat rentan terhadap kegagalan struktural menurut Ilić and Momčilović. (2025). Deng *et al.* (2022) menggabungkan metode eksperimen dan simulasi numerik untuk memahami bagaimana struktur dari lambung kapal baik *single-hull* maupun *double-hull* dalam merespon beban ekstrem berulang termasuk keruntuhan, deformasi plastis dan *buckling*.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut sebagian besar mengkaji mengenai kekuatan batas kapal pada berbagai tipe kapal menggunakan metode numerik maupun eksperimen dengan mempertimbangkan berbagai kondisi pembebanan. Namun, penelitian mengenai pengaruh dari *hopper tank* terhadap kekuatan batas kapal masih kurang diperhatikan, meskipun mengingat perannya sebagai penghubung antara *double bottom* dan *double side* kapal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh dari sudut *hopper tank*

terhadap kekuatan batas kapal *Double Hull Tanker* dalam kondisi pembebanan *hogging* dan *sagging*. Studi ini menunjukkan apakah variasi dari sudut *hopper tank* secara signifikan memberikan pengaruh pada kekuatan batas dari struktur *Double Hull Tanker* dan kepatuhannya pada standar klasifikasi. Dalam hal ini pengaruh sudut *hopper tank* terhadap *ultimate strength* kapal menjadi kebaruan dalam penelitian ini.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang sudah dijelaskan sebelumnya, maka rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh dari variasi sudut *hopper tank* yakni 45° dan 35° terhadap *ultimate strength* pada struktur *Double Hull Tanker* T3 dan T4 yang mendapat momen lentur vertikal saat kondisi *hogging* dan *sagging*.

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian dapat terarah maka penulis memberikan beberapa batasan sebagai berikut:

1. Variasi sudut *hopper tank* yakni 45° dan 35° .
2. Beban yang bekerja yakni momen lentur vertikal.
3. Analisa kekuatan menggunakan metode elemen hingga.
4. Pemodelan dilakukan pada satu jarak gading di bagian *midship* baik itu *Double Hull Tanker* T3 maupun T4.

1.4. Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh dari variasi sudut *hopper tank* yakni 45° dan 35° terhadap *ultimate strength* struktur *Double Hull Tanker* T3 dan T4 yang mendapat momen lentur vertikal saat kondisi *hogging* dan *sagging*. Sedangkan manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah:

1. Manfaat Praktis
Memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan dalam proses desain kapal khususnya kapal *Double Hull Tanker* bagi perusahaan-perusahaan.
2. Manfaat Teoritis
Sebagai bahan referensi untuk penelitian selanjutnya khususnya bidang ilmu analisis struktur dan konstruksi kapal.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1. Rencana Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif yakni penelitian yang menggunakan angka mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data serta menampilkan analisa pengaruh dari sudut kemiringan *hopper tank* terhadap *ultimate strenght* struktur *Double Hull Tanker* T3 dan T4 kapal yang mendapat momen lentur vertikal saat kondisi *hogging* dan *sagging*.

2.2. Tempat dan Waktu

Penelitian dilakukan di Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar.

2.3. Bahan dan Alat

Pada penelitian ini digunakan peralatan dan beberapa *software* dalam membantu keberlangsungan penelitian, peralatan dan *software* tersebut adalah sebagai berikut

1. Komputer/Laptop

Penelitian ini menggunakan komputer sebagai alat utama, yang selain membuat laporan juga berfungsi sebagai alat untuk menjalankan program aplikasi yang digunakan untuk menggambar model dan menganalisis data penelitian.

2. *Software* Desain

Software ini digunakan untuk membuat model 2D konstruksi kapal. Model 2D yang telah dibuat nantinya akan diinput ke *Ansys Mechanical APDL*.

3. *Software ANSYS Mechanical APDL*

Software Ansys Mechanical APDL mengadopsi metode elemen hingga (FEM) dan menganalisis data dengan menggunakan metode numerik. Data konstruksi kapal yang dihasilkan dari *software design* berupa model 2D. Kemudian diinput ke *software ANSYS Mechanical APDL* untuk selanjutnya dilakukan pemodelan 3D hingga analisis model.

2.4. Metode Penelitian

Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

2.4.1. Pengumpulan Data

Penelitian ini diawali dengan mengumpulkan data dimensi utama kapal *Doble Hull* Tanker tipe T3 dan T4 yang nantinya akan dianalisis seperti yang diilustrasikan pada Tabel 1. Selain itu, dilakukan pengumpulan literatur dari berbagai sumber seperti buku, artikel ilmiah dan *rules*. Nilai-nilai tersebut digunakan sebagai acuan

dalam membuat geometri awal *hull girder* kapal, khususnya pada pemodelan *hopper tank*.

Tabel 1 Dimensi utama kapal

Item	Ukuran	Unit
Panjang	234	m
Lebar	44	m
Tinggi	21,2	m
Koefisien Blok	0,78	
Jarak Gading	5	m

Selain data dimensi kapal, data spesifikasi material digunakan pada komponen struktur juga menjadi faktor penting dalam analisis kekuatan. Adapun spesifikasi dari material penyusun yang digunakan pada ruang muat kapal *Double Hull Tanker* T3 dan T4 diilustrasikan pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2 Spesifikasi Material

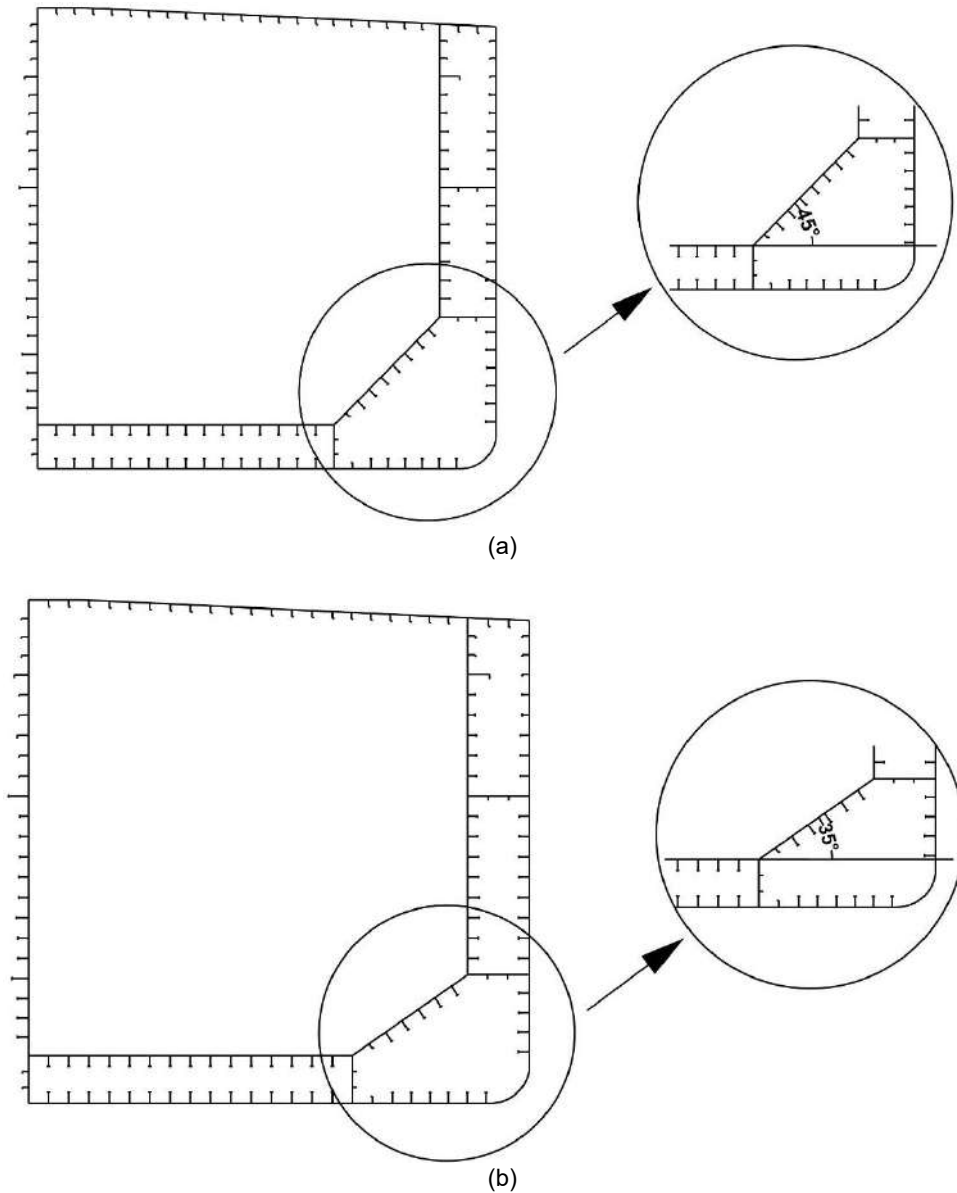
Item	Ukuran	Satuan
<i>Type of material</i>	AH37	
<i>Modulus Young (E)</i>	210000	MPa
<i>Poisson ratio</i>	0,3	
<i>Yield Strength (σ_y)</i>	370	MPa
<i>Tangent Modulus</i>	675	MPa

Material yang digunakan untuk konstruksi kapal *Double Hull Tanker* yakni baja AH37 yang memiliki sifat mekanik yang sesuai dengan struktur kapal karena memiliki kekuatan luluh sebesar 370 MPa dan modulus elastisitas sebesar 210000 MPa, sehingga mampu menahan beban statik maupun dinamis yang terjadi pada lambung kapal. Nilai *poisson ratio* sebesar 0,3 menunjukkan sifat elastisitas material dalam menahan deformasi lateral ketika mengalami tegangan aksial, sedangkan *tangent modulus* sebesar 675 MPa digunakan untuk memperkirakan batas non-linieritas material pada kondisi mendekati tegangan maksimum atau modulus tersebut digunakan untuk mendefinisikan material setelah melewati kuat luluh (daerah plastik). Data-data tersebut selanjutnya akan digunakan dalam analisis numerik menggunakan *ANSYS Mechanical APDL*. Adapun penampang kapal *Double Hull Tanker* T3 dan T4 dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.

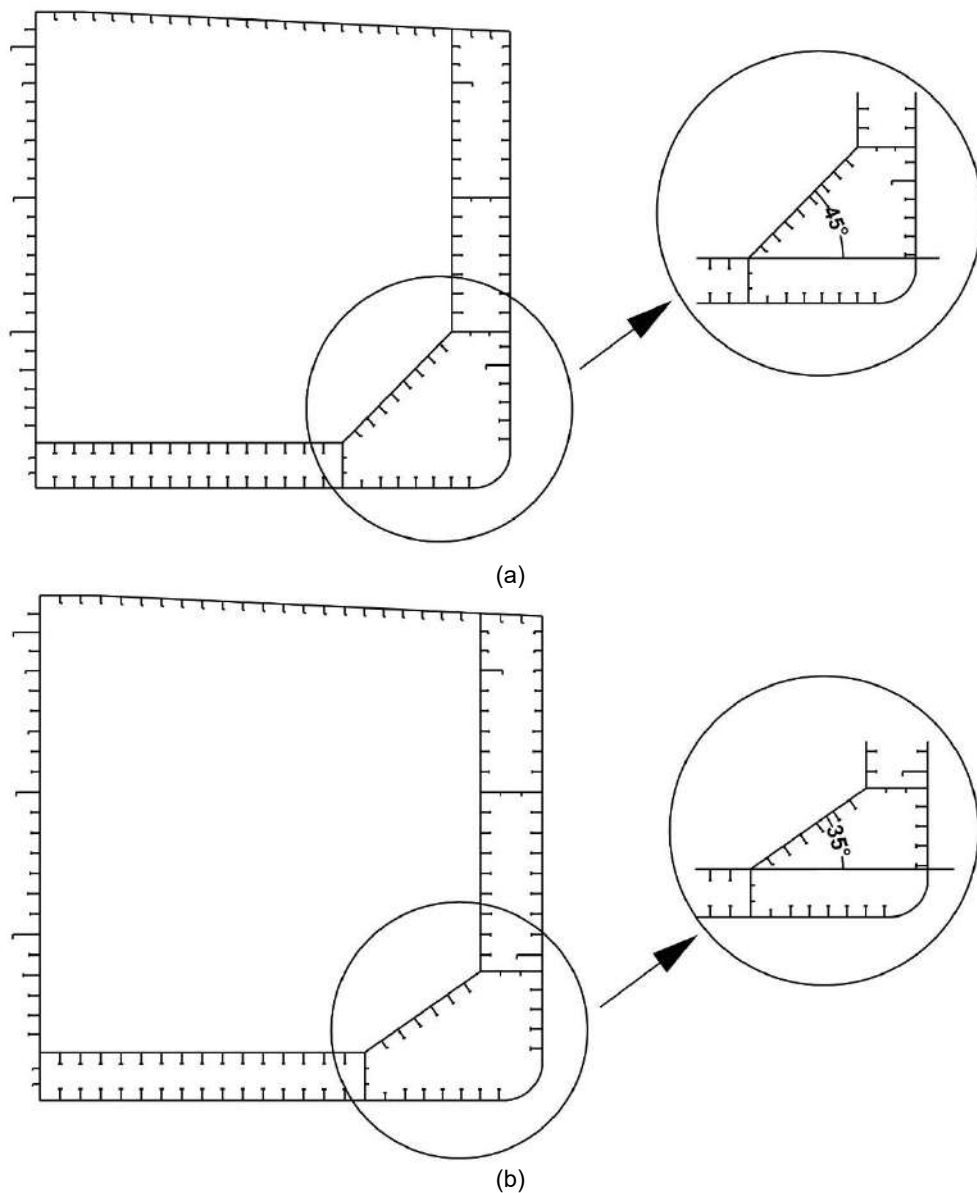
2.4.2. Pemodelan 2D Model

Software desain digunakan dalam pembuatan kedua model yang dianalisis dengan beberapa kondisi yang mengacu pada aturan BKI Volume II, *Section 8 Bottom Structures*, yaitu dengan variasi kemiringan sudut *hopper tank* 35° sesuai dengan aturan BKI, dan 45° sesuai dengan sudut aktual pada model. Adapun detail

model dengan kemiringan sudut 45° dan 35° yang akan dianalisis ditunjukkan pada Gambar 4 untuk kapal *Double Hull Tanker* T3 dan Gambar 5 untuk kapal *Double Hull Tanker* T4.



Gambar 4 Detail sudut *hopper tank* kapal *Double Hull Tanker* T3: (a) 45° , (b) 35°

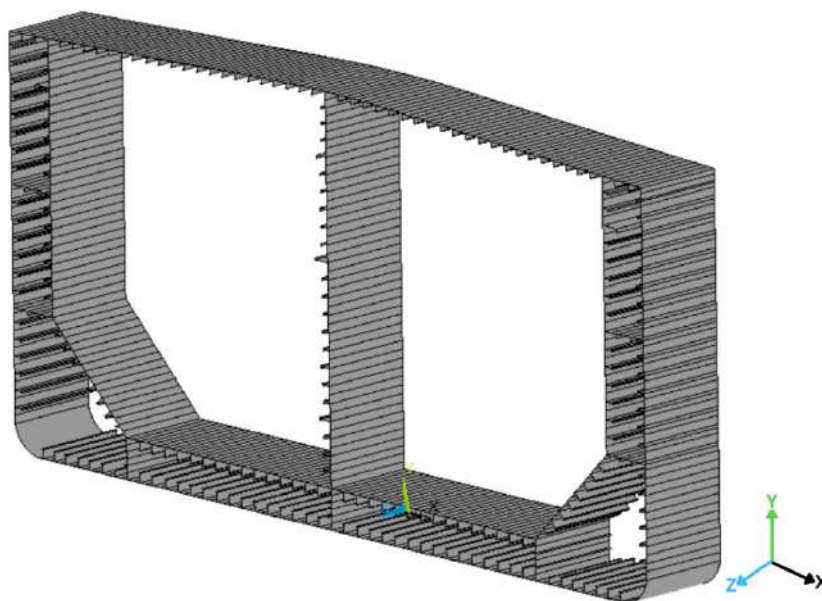


Gambar 5 Detail sudut *hopper tank* kapal *Double Hull Tanker T4*: (a) 45°, (b) 35°

Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5 dapat diketahui bahwa perubahan model kapal *Double Hull Tanker T3* dan *T4* yang di fokuskan pada sudut *hopper tank*, dimana perubahan sudut *hopper tank* dari 45° ke 35° mengurangi dimensi dari *hopper pelat* dan *stiffeners* yang diletakkan pada *hopper pelat*. Dimana, terlihat pada Gambar 4 (b) dan Gambar 5 (b) bahwa 2 *stiffeners* yang awalnya terletak pada *hopper pelat* dipindahkan ke *inner hull longitudinal bulkhead* agar mengurangi potensi terjadinya tekuk lokal pada daerah tersebut.

2.4.3. Pemodelan 3D Model dan Penerapan *Meshing*

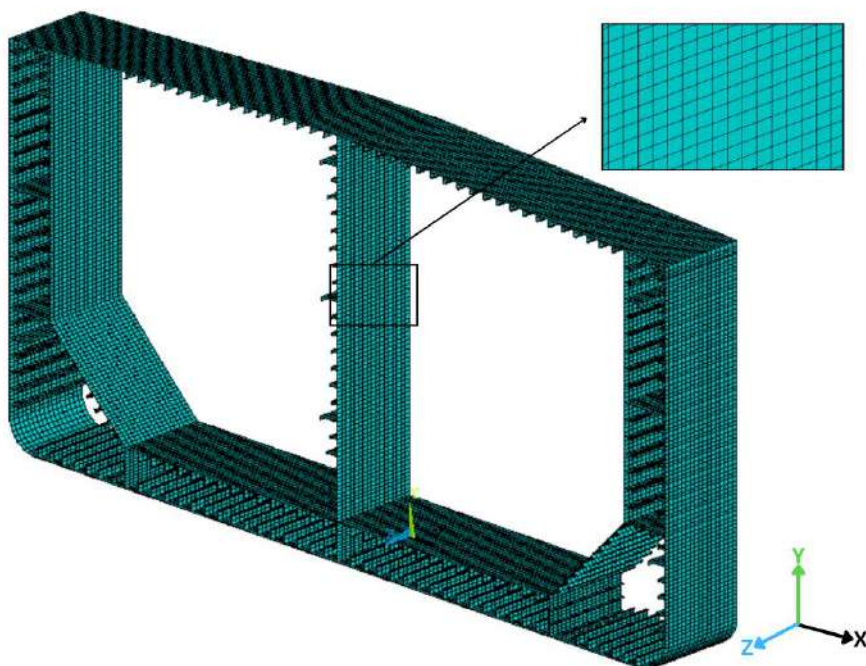
Model yang telah dibuat pada *software* desain dalam bentuk 2D kemudian diinput ke *software ANSYS Mechanical APDL* untuk dilakukan pemodelan 3D. Namun, sebelum dilakukan pemodelan 3D perlu dilakukan pemilihan fitur yang relevan dengan analisis yang akan dilakukan, dimana fitur yang dipilih yakni *structural*. Pemilihan fitur *structural analysis* digunakan karena fokus utama penelitian ini yakni menganalisis kekuatan struktur kapal. Selain itu, dilakukan juga pendefinisian material yang digunakan selama analisis untuk pendefinisian material yang digunakan telah dirangkum dalam Tabel 2, tahapan ini penting agar perilaku material pada proses simulasi dapat mempresentasikan sifat mekanik dari struktur kapal yang menggunakan baja AH37. Setelah dilakukan tahapan-tahapan tersebut maka dilakukan pemodelan 3D model, yang meliputi pembentukan area, pemberian ketebalan dan pengecekan konektifitas antara *keypoint*, garis, maupun area (*join*). Model 3D yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 6. Model 3D yang telah dibuat kemudian di *join* agar memastikan bahwa tidak ada garis dan *keypoint* yang *double* atau bertumpuk serta garis dan *keypoint* tidak terhubung, setiap *keypoint*, garis maupun area harus saling terhubung secara sempurna untuk memastikan model dapat dijalankan dengan baik tanpa menimbulkan error (memastikan tidak terdapat gap dan tumpang tindih atau *overlap*). Tahapan ini merupakan salah satu hal yang penting dalam menggunakan *software ANSYS Mechanical APDL* karena jika model tidak dapat dijoin maka tidak dapat di *running* nantinya.



Gambar 6 3D Model

Model yang telah dibuat dalam bentuk 3D kemudian di-*meshing* dengan ukuran 300 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Ukuran *meshing* sangat

berperan, dimana ukuran *meshing* yang lebih kecil dapat memperlihatkan bentuk kegagalan yang lebih jelas dan akurat. Namun, dalam hal ini perlu mempertimbangkan spesifikasi komputer yang digunakan.



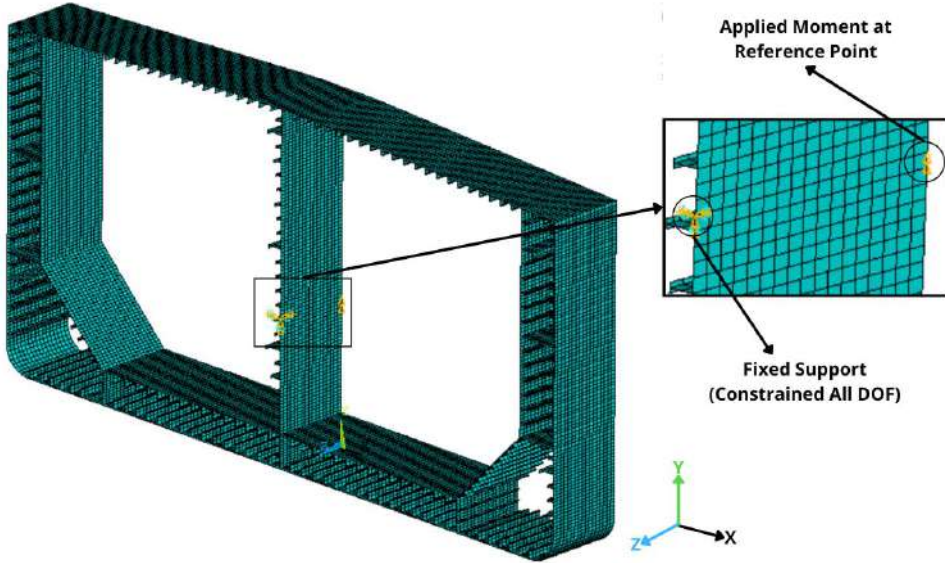
Gambar 7 Penerapan *meshing* pada model

Dalam penelitian ini, tipe elemen yang digunakan yakni SHELL181, elemen ini sangat sesuai digunakan untuk pemodelan struktur pelat dan lambung kapal karena mampu menangkap perilaku tegangan dan regangan secara efisien. Geometri model kemudian dibagi menjadi elemen-elemen yang saling terhubung dengan titik-titik yang disebut nodal, dengan ukuran elemen 300 mm. Setelah proses *meshing* selesai, maka dilakukan analisis konvergensi *meshing*. Pendekatan dengan memecah model yang dianalisis menjadi elemen-elemen dengan ukuran tertentu membuat perhitungan menjadi lebih efisien dan akurat karena setiap bagian dari kapal dapat dianalisis dengan detail sesuai dengan karakteristik material dan pembebanannya.

2.4.4. Kondisi Syarat Batas, Pembebanan dan Pemusatan Beban

Setelah menerapkan *meshing* pada model perlu dilakukan pemberian kondisi batas pada model. Penelitian ini mengidentifikasi kekuatan batas struktur dengan kontrol batas pada program *ANSYS Mechanical APDL*, namun sebelum memberikan kondisi batas perlu diketahui terlebih dahulu letak sumbu netral dari tiap-tiap model. Hal ini dikarenakan sumbu netral tersebut nantinya akan digunakan sebagai letak tumpuan dan pusat pembebanan terhadap struktur atau yang dikenal

sebagai *Multi-Point Constraints* (MPC). Pemberian kondisi batas atau tumpuan pada model dilakukan dengan memberikan tumpuan pada ujung depan struktur, dimana pada bagian depan struktur ini merupakan tempat pemberian beban (momen lentur vertikal) sedangkan pada bagian belakang struktur diikat penuh atau *full constraint* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Pemberian *boundary conditions* pada model

Hal ini dilakukan agar tidak terjadi perpindahan pada struktur baik itu translasi maupun rotasi. Model-model yang telah diberikan tumpuan kemudian diberikan beban, dimana dalam penelitian ini digunakan beban momen lentur vertikal dengan dua kondisi yakni kondisi *hogging* dan *sagging*. Pemberian beban ini dilakukan pada bagian ujung depan struktur dengan momen lentur yang diaplikasikan pada bagian ujung depan struktur yakni nilai dari perhitungan total momen lentur pada kondisi *hogging* dan *sagging* berdasarkan *rules* DNV GL. Pada penelitian ini beban *longitudinal* yang digunakan adalah momen lentur vertikal. Pada saat kapal mendapatkan gelombang momen lentur dibagi menjadi dua yakni momen lentur saat air tenang (M_{sw}) dan momen lentur akibat gelombang (M_{ww}). Adapun besaran momen lentur vertikal pada air tenang (M_{sw}) dapat dihitung berdasarkan Persamaan 1 dan 2 berikut (DNV, 2024):

$$M_{sw-h} = f_{sw} (171C_w L^2 B (C_B + 0,7) 10^{-3} - M_{ww-h}) \quad (\text{Hogging}) \quad (1)$$

$$M_{sw-s} = -0,85 f_{sw} (171C_w L^2 B (C_B + 0,7) 10^{-3} - M_{ww-s}) \quad (\text{Sagging}) \quad (2)$$

Adapun besaran momen lentur vertikal pada kondisi bergelombang (M_{ww}) dapat dihitung berdasarkan Persamaan 3 dan 4 berikut (DNV, 2024):

$$M_{wv-h} = 0,19 \cdot \frac{f_R}{0,85} f_{nl-vh} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad (\text{Hogging}) \quad (3)$$

$$M_{wv-s} = -0,19 \cdot \frac{f_R}{0,85} f_{nl-vs} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad (\text{Sagging}) \quad (4)$$

Dimana:

M_{sw-h} = Momen Lentur Vertikal Saat Air
Tenang Pada Kondisi *Hogging*

M_{sw-s} = Momen Lentur Vertikal Saat Air
Tenang Pada Kondisi *Sagging*

M_{wv-h} = Momen Lentur Vertikal Saat
Bergelombang Pada Kondisi
Hogging

M_{wv-s} = Momen Lentur Vertikal Saat
Bergelombang Pada Kondisi
Sagging

L = Panjang Kapal

B = Lebar Kapal

f_{sw} = Faktor Distribusi (untuk bagian
midship = 1)

C_w = Koefisien Gelombang

$$= 10,75 - \left(\frac{300-L}{100} \right)^{1,5}$$

Untuk $90 \leq L \leq 300 \text{ m}$

$$= 10,75$$

Untuk $300 \leq L \leq 350 \text{ m}$

$$= 10,75 - \left(\frac{L-350}{150} \right)^{1,5}$$

Untuk $350 \leq L \leq 500 \text{ m}$

C_B = Koefisien Blok

f_R = faktor yang mewakili pengaruh dari kondisi operasi kapal Untuk kekuatan 0,85

f_{nl-vh} = Koefisien untuk
mempertimbangkan efek nonlinear
pada kondisi *hogging*, dengan nilai
 $f_{nl-vh} = 1$ untuk kekuatan

f_{nl-vs} = koefisien untuk
mempertimbangkan efek nonlinear
pada kondisi *sagging* $f_{nl-vs} =$
 $0,58 \left(\frac{C_B+0,7}{C_B} \right)$

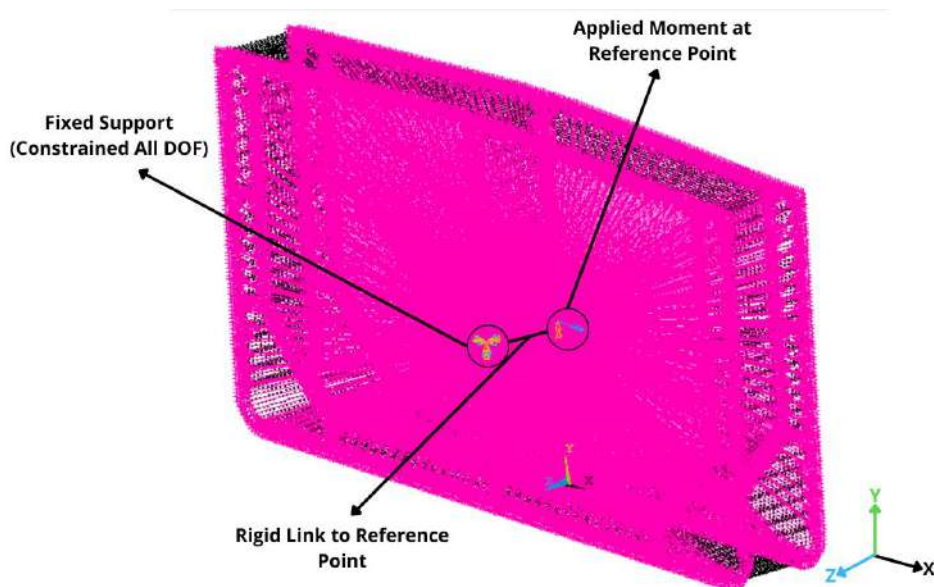
f_p = Koefisien penilaian kekuatan (1
untuk kekuatan kapal)

f_m = Distribusi faktor untuk vertikal
bending moment (untuk bagian
midship =1)

Perpaduan beban dinamis dan statis dalam menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur vertikal dapat dihitung dengan menjumlahkan momen lentur vertikal pada kondisi air tenang dan momen lentur vertikal akibat gelombang, sehingga formula tersebut dapat dilihat pada Persamaan 5 berikut (DNV, 2024):

$$M_T = M_{sw} + M_{wv} \quad (5)$$

Besaran nilai pada bagian depan ujung model dilakukan dalam beberapa tahapan pembebanan yakni dilakukan peningkatan pembebanan pada tiap tahapan hingga *software ANSYS Mechanical APDL* mendapatkan nilai kekuatan batas pada struktur kapal yang dianalisis.



Gambar 9 *Multi-Point-Constraints* (MPC) pada model

Berdasarkan Gambar 9, pada bagian depan model dilakukan *apply moment* untuk memperoleh kekuatan batas struktur. Pemberian momen ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi pembebanan lentur yang diterima struktur pada skenario operasi sebenarnya. Sementara itu, pada bagian belakang model dilakukan penge-
kangan penuh (*full constrain*) sehingga tidak terjadi perpindahan ataupun rotasi pada struktur. Kondisi ini memastikan bahwa respon deformasi dan tegangan yang terjadi pada model merupakan akibat murni dari momen yang diterapkan di bagian depan.

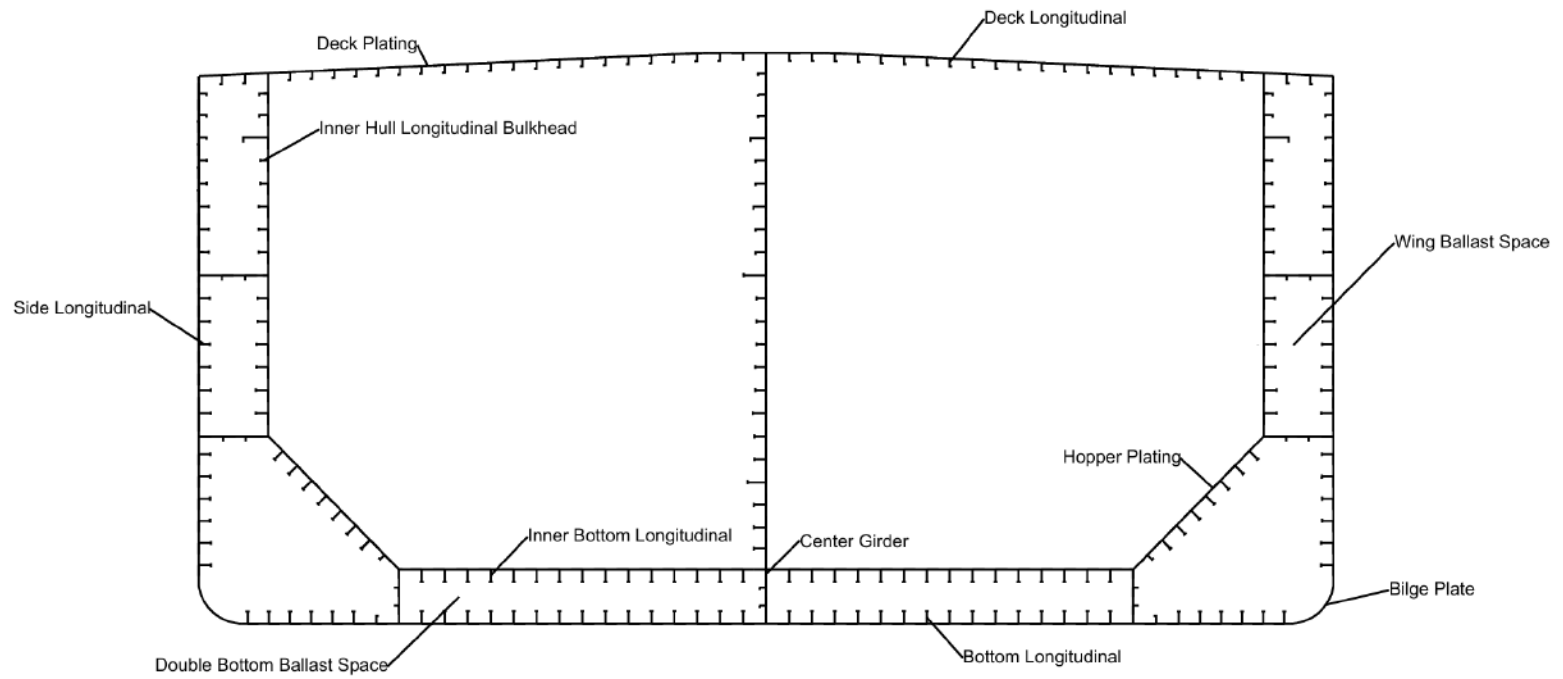
Setelah pembebanan diaplikasikan pada bagian depan model, dilakukan kontrol kelengkungan struktur menggunakan *rigid link* pada kedua ujung model, baik pada bagian depan maupun belakang. Penerapan *rigid link* seperti ditunjukkan pada Gambar 9 bertujuan untuk mendistribusikan beban dan pembatasan gerak secara seragam pada area penge-
kangan, sehingga tidak terjadi konsentrasi beban lokal yang dapat memengaruhi akurasi hasil analisis. Selanjutnya, *rigid link* tersebut

dihubungkan ke titik acuan (*reference point*) yang berada pada sumbu netral model. Titik acuan ini berfungsi sebagai lokasi penerapan momen dan sebagai pusat kendali rotasi global struktur. Dengan menggunakan metode ini, kontrol momen dapat dilakukan secara efektif dan distribusi rotasi pada struktur dapat dimonitor dengan baik. Hal tersebut memastikan bahwa deformasi lentur yang terjadi mengikuti karakteristik struktur yang dianalisis, sehingga hasil simulasi lebih representatif terhadap perilaku fisiknya.

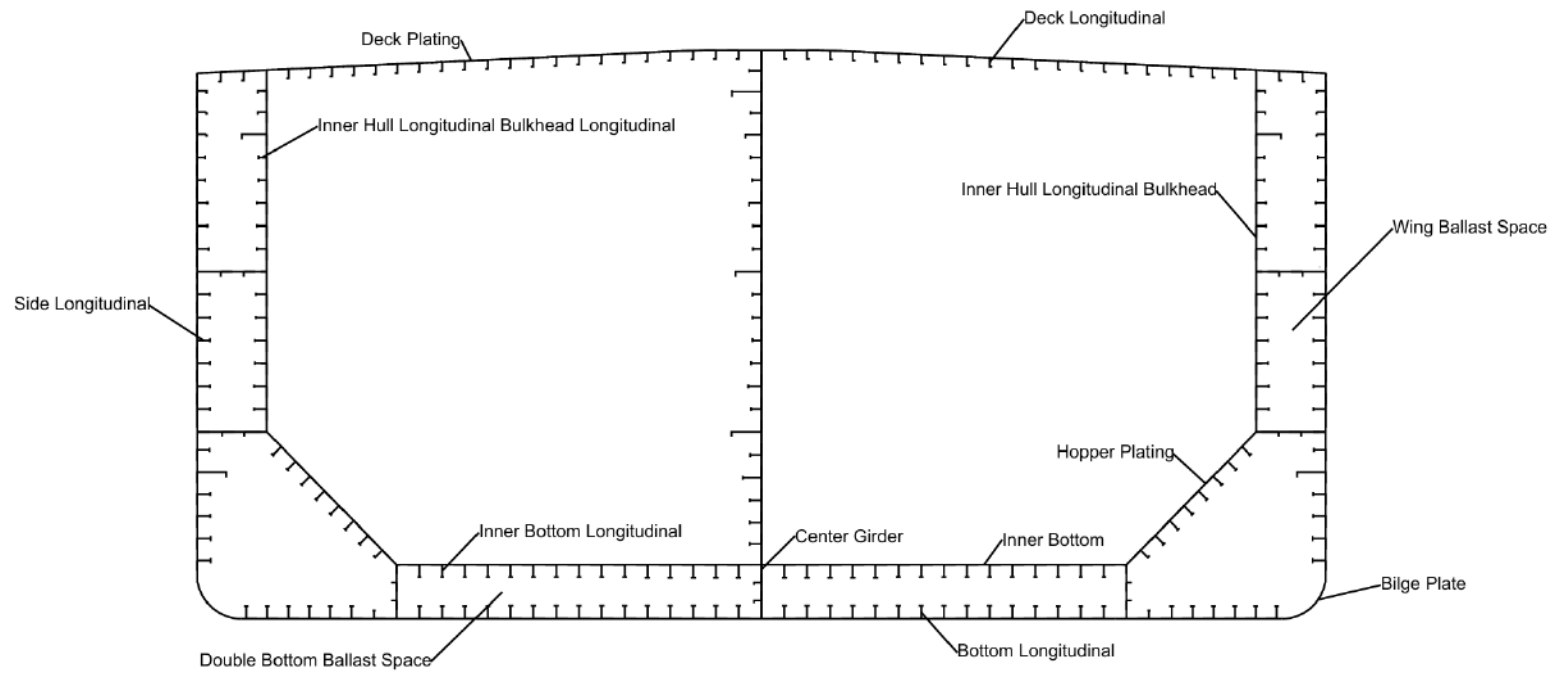
2.4.5. Simulasi Model

Tahapan simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *ANSYS Mechanical APDL* untuk menganalisis respon struktur terhadap pembebanan momen lentur vertikal. Setelah seluruh tahapan pra-pemrosesan selesai, meliputi pembuatan geometri, pendefinisian material, penerapan *meshing*, penerapan kondisi batas, pembebanan dan pemusatan beban. Kemudian, tahap berikutnya adalah tahapan solusi (*solution phase*). Tahapan ini merupakan inti dari proses simulasi karena pada fase ini perangkat lunak *ANSYS Mechanical APDL* melakukan perhitungan numerik berdasarkan metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Dalam metode elemen hingga, struktur kapal yang kompleks direpresentasikan sebagai kumpulan elemen-elemen diskrit yang saling terhubung melalui titik-titik nodal. Setiap elemen memiliki sifat kekakuan dan karakteristik mekanik yang diturunkan dari material dan bentuk geometrinya.

Pada tahap simulasi ini, *ANSYS* melakukan iterasi komputasi untuk menghitung distribusi tegangan, regangan, deformasi, serta respon plastis pada setiap elemen struktur. Analisis dijalankan menggunakan metode *incremental-iterative*, di mana beban momen lentur diaplikasikan secara bertahap untuk menangkap perilaku nonlinier struktur. Setiap langkah beban (*load step*) memungkinkan perangkat lunak untuk mendeteksi perubahan sifat material dari elastis menuju plastis hingga mencapai kondisi *ultimate strength* atau batas keruntuhan struktur.



Gambar 10 Penampang Kapal *Double Hull Tanker T3*



Gambar 11 Penampang Kapal *Double Hull Tanker T4*

2.5. Kerangka Penelitian

Pada kerangka penelitian ini menjelaskan bagaimana proses penelitian dengan rincian materi dan urutan alur penelitian dibuat secara sistematis. Sehingga, dapat menjadi pedoman dalam pemecahan masalah yang akan dihadapi dalam menganalisis data dengan menggunakan *software ANSYS Mechanical APDL*. Berikut alur kerangka pada penelitian ini:

