

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal tanker dirancang untuk mengangkut minyak mentah dari lokasi produksi ke fasilitas pengolahan melalui jalur laut, serta mendistribusikan produk minyak olahan dari fasilitas pengolahan ke pelabuhan distribusi. Dimensi kapal tanker yang digunakan untuk mengangkut minyak mentah umumnya lebih besar dibandingkan kapal yang mengangkut produk minyak olahan; namun, sistem perpipaan pada kapal tanker produk olahan cenderung lebih kompleks (Parunov *et al.*, 2017). Penggunaan kapal tanker berlapis ganda telah menjadi solusi penting dalam industri pelayaran untuk mengurangi risiko tumpahan minyak dan melindungi lingkungan. Hal ini didorong oleh regulasi dan pembatasan ketat terhadap penggunaan kapal tanker berlapis tunggal.

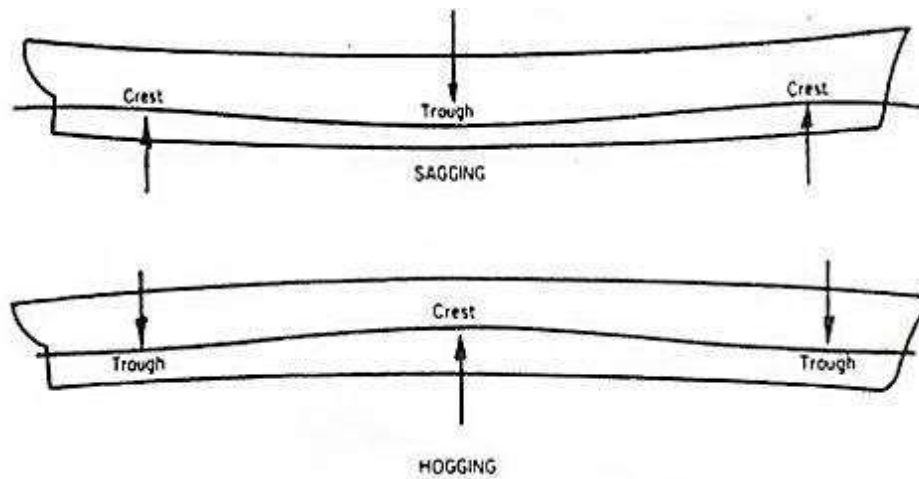
Studi mengenai kerusakan akibat tabrakan kapal menunjukkan bahwa kapal tanker berlapis ganda mampu mencegah pecahnya lambung selama tabrakan, sehingga meminimalkan risiko kebocoran minyak. sehingga meminimalkan risiko kebocoran minyak (Liu, 2017). Selain itu, penyebab utama tabrakan kapal di perairan adalah kesalahan manusia, dengan 70%–80% kecelakaan tabrakan terjadi akibat faktor tersebut (Zaman *et al.*, 2020). Keselamatan pelayaran merupakan aspek penting dalam industri maritim yang sangat bergantung pada keandalan struktur kapal terhadap berbagai jenis beban dan potensi kecelakaan di laut. Salah satu kecelakaan yang sering terjadi dan berpotensi menimbulkan kerusakan serius adalah tabrakan antar kapal (ship collision). Tabrakan dapat menyebabkan deformasi struktural yang signifikan, kebocoran tangki, kehilangan stabilitas, bahkan tenggelamnya kapal apabila energi benturan yang diterima melebihi kapasitas kekuatan struktur lambung.

Ketika terjadi tabrakan, khususnya pada kapal dengan struktur lambung ganda, benturan dapat menimbulkan deformasi signifikan pada lambung kapal. Skenario tabrakan umumnya diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu tabrakan samping dan tabrakan haluan. Tabrakan samping merupakan jenis kecelakaan parah yang terjadi ketika bagian samping kapal, biasanya antara tengah dan buritan, mengalami benturan langsung dari kapal lain atau objek tetap. Jenis ini berbeda dengan tabrakan haluan (Qiu *et al.*, 2025). Tabrakan haluan terjadi saat bagian depan kapal (haluan) menabrak sisi atau bagian lain dari kapal target (Ko *et al.*, 2018). Pada penelitian ini bentuk tabrakan yang banyak dikaji adalah tubrukan pada sisi lambung kapal (side collision), yaitu kondisi ketika kapal lain menabrak bagian sisi (side shell) kapal target. Kapal yang menabrak memiliki desain haluan bulbous bow, yaitu bentuk haluan menonjol di bawah garis air yang berfungsi mengurangi hambatan gelombang dan meningkatkan efisiensi

hidrodinamika kapal. Namun, dalam peristiwa tabrakan, bentuk bulbous bow ini justru menjadi faktor yang memperbesar potensi kerusakan karena ujung menonjolnya bekerja seperti baji (wedge) yang memusatkan energi tumbukan ke area kecil pada lambung kapal yang ditabrak. Bentuk dan sudut benturan pada bulbous bow memengaruhi tingkat kerusakan struktur, khususnya pada kapal berlapis ganda yang digunakan untuk tangki minyak serta pengangkut LNG/LPG (Midhila *et al.*, 2021). Akibat dari konsentrasi energi tersebut, struktur lambung sisi kapal (side shell) mengalami deformasi plastis yang signifikan, terutama pada outer shell plating, stiffener memanjang, dan frame melintang. Jika energi tumbukan besar, kerusakan dapat menjalar hingga ke lapisan inner hull pada kapal tipe *double hull tanker*, yang berpotensi menyebabkan kebocoran cairan muatan atau bahan bakar ke laut. Penurunan kekakuan kapal pasca tabrakan berdampak langsung pada penurunan batas kekuatan struktur, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap kegagalan selanjutnya (Sun & Huang, 2025). Tabrakan dapat menyebabkan deformasi plastik lokal signifikan pada area terdampak, yang mengurangi kekakuan lentur komponen struktural dan melemahkan kemampuan struktur dalam menahan beban global serta konsentrasi tegangan lokal. Penurunan kapasitas struktural ini meningkatkan risiko kegagalan, terutama saat kapal beroperasi dalam kondisi beban berat atau ekstrem (Kuznecovs *et al.*, 2023). Kondisi ini tidak hanya berimplikasi pada kerugian material, tetapi juga menimbulkan risiko pencemaran lingkungan laut dan ancaman keselamatan bagi awak kapal. Oleh karena itu, evaluasi batas kekuatan menjadi sangat penting dalam desain dan penilaian keamanan kapal setelah mengalami tabrakan.

Setiap struktur memiliki batas kekuatan, sehingga ketika beban, baik eksternal seperti gelombang maupun internal seperti muatan kapal dan struktur itu sendiri, diterapkan secara terus-menerus, batas kekuatan struktur akan tercapai (Feng *et al.*, 2020). Batas kekuatan kapal sangat dipengaruhi oleh momen lentur yang disebabkan oleh beban longitudinal statis. Beban ini muncul akibat variasi distribusi berat sepanjang panjang kapal (berat struktur, muatan, dan peralatan) serta gaya apung yang bekerja pada bagian kapal dalam kondisi air tenang (Mubarak, 2019). Ketidakseimbangan antara distribusi berat dan gaya apung ini menghasilkan momen lentur *longitudinal* yang dapat menyebabkan deformasi *hogging* dan *sagging* pada kapal. Dalam kondisi air tenang, fenomena tersebut terutama dipengaruhi oleh penempatan muatan sepanjang lambung kapal. Gelombang panjang dengan puncak di bagian tengah kapal dan lembah di ujung-ujungnya meningkatkan fenomena *hogging* dengan memperkuat gaya apung di bagian tengah, sementara gelombang dengan puncak di ujung-ujung kapal dan lembah di bagian tengah meningkatkan *sagging* (Liu & Guedes Soares, 2020). Dalam teori balok yang diterapkan untuk analisis struktur kapal, kekuatan ultimate lambung kapal dicapai ketika tegangan lentur maksimum pada

bagian yang terkompresi menyentuh kekuatan kompresi *ultimate* material. Ilustrasi kapal saat mengalami kondisi *hogging* dan *sagging* dapat dilihat pada Gambar 1.1



Sumber : (Ilmu Kapal dan Logistik, 2025)

Gambar 1.1. Ilustrasi kapal saat mengalami kondisi *hogging* dan *sagging*

Saat kapal mengalami kondisi *hogging*, bagian tengah kapal melengkung ke atas sehingga di bagian atas (*deck*) menerima tegangan tarik, sementara bagian bawah (*bottom*) mengalami tegangan tekan. Sebaliknya, saat terjadi *sagging*, kapal melengkung ke bawah di bagian tengah, menyebabkan *deck* mengalami tegangan tekan dan *bottom* mengalami tegangan tarik. Kondisi ini menyebabkan deformasi lentur pada lambung kapal, yang dapat memicu tekukan atau *buckling* pada pelat dan stiffener yang ada di struktur *deck* maupun *bottom*, sehingga perlu diperhatikan dalam desain agar struktur kapal tetap kuat dan aman menghadapi beban operasional. Kekuatan lambung merupakan salah satu faktor terpenting dalam desain kapal, khususnya saat terkena gaya tabrakan (Suci *et al.*, 2020). Berbagai metode digunakan untuk menganalisis skenario tabrakan pada bagian depan kapal, meliputi simulasi numerik dengan Metode Elemen Hingga (FEM), pengujian eksperimental menggunakan model berskala, serta pendekatan analitis yang didasarkan pada teori plastik.

Analisis menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM) menunjukkan bahwa tabrakan berkecepatan tinggi yang melibatkan kapal dapat memicu deformasi plastik lokal dan penetrasi struktural, yang secara signifikan mengurangi kapasitas kekuatan struktural, termasuk momen lentur (Park *et al.*, 2023). Penurunan ini disebabkan oleh degradasi kekakuan lentur dan redistribusi tegangan pada komponen yang terdampak. Kerusakan akibat tabrakan mengurangi kekuatan longitudinal struktur, sehingga strategi penguatan lokal menjadi sangat penting dalam desain maupun perbaikan. Pengembangan lanjutan dari Metode Elemen Hingga (FEM) adalah Metode *Non-Linear Finite*

Element Analysis (NLFEA), yang telah menjadi pendekatan utama untuk memodelkan tabrakan kapal dengan akurasi tinggi (Adjal *et al.*, 2025). Tabrakan berkecepatan tinggi menyebabkan deformasi plastik lokal dan penetrasi struktural pada lambung kapal, sehingga mengurangi kekakuan lentur dan kapasitas momen lentur. Oleh karena itu, strategi penguatan struktural pada area rentan, seperti lambung dan penguat, diperlukan untuk memulihkan integritas struktural setelah tabrakan. Metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) memungkinkan analisis rinci distribusi tegangan lentur kritis pada pelat kapal. Metode ini mampu mensimulasikan perilaku struktural dalam kondisi inelastik, termasuk penurunan kekuatan struktural, terutama momen lentur, yang sangat penting untuk evaluasi kapal (Wulandari, 2019). Studi dan pedoman dari organisasi seperti *American Bureau of Shipping* (ABS) merekomendasikan penggunaan NLFEA untuk mengevaluasi kekuatan kapal dalam kondisi tabrakan dan kecelakaan, khususnya pada kapal besar dan kompleks (*American Bureau of Shipping* (ABS), 2021). Aplikasi *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) memberikan wawasan berharga untuk melakukan analisis kompleks, terutama di sektor maritim (Wulandari, 2019).

Banyak penelitian telah dilakukan terkait perhitungan kekuatan longitudinal pada kapal. (Liu *et al.*, 2021), menganalisis penetrasi struktur sisi kapal ganda (*double-hull*) skala kecil, ketika ditekan oleh objek keras (*rigid flat edge indenter*), untuk memahami mekanisme serapan energi dan kerusakan. Metode: Eksperimen quasi-statik, simulasi numerik (*explicit LS-DYNA*), metode analitis. Struktur meliputi *frame*, *stringer*, plat sisi. (Yassine *et al.*, 2025), menganalisis tubrukan kapal dengan mempertimbangkan deformasi baik di haluan (*striking bow*) maupun sisi kapal (*struck side*), termasuk dua jenis haluan yang berbeda: haluan bulbous dari kapal kontainer identik (sama), dan haluan yang lebih kecil dari kapal lain. Metode: Simulasi elemen hingga (*finite element*) non-linear; membandingkan haluan rigid vs deformable; variasi lokasi tumbukan. (ZHOU Jiayou *et al.*, 2023), Mengembangkan metode analitis untuk memprediksi kerusakan pada struktur dek (*deck structure*) ketika sisi kapal (*ship side*) terkena oleh haluan yang berbentuk *wedge* (baji). Metode: Analisis struktur, formulasi kerusakan dek berdasarkan geometri haluan wedge, konfigurasi struktural dek dan sisi; model analitis dilengkapi dengan data geometri dan sifat material. Selain itu, (Suvica *et al.*, 2022), menganalisis SimS studi numerik berbasis FEA yang menganalisis dampak tubrukan haluan kapal (*bow*) terhadap lambung kapal (*side structure*), dengan memvariasikan kecepatan dan sudut tubrukan. Tujuannya adalah menilai tingkat kerusakan struktural (deformasi dan tegangan maksimum) serta penyerapan energi pada lambung kapal akibat tumbukan dari haluan kapal lain.

Berdasarkan uraian tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian yang dituangkan dalam sebuah tesis dengan judul “Analisis Kerusakan Lambung

Ganda pada Kapal *Double-Hull Tanker* akibat Tabrakan dengan Haluan Kapal". Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan lambung ganda yang rusak akibat tabrakan dengan haluan kapal menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA). Metode ini memberikan gambaran rinci mengenai distribusi tegangan, deformasi, dan potensi kerusakan pada struktur kapal akibat tabrakan, yang sangat berguna untuk evaluasi keselamatan dan perancangan kapal yang lebih tahan benturan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang terkait dengan penelitian yang akan dilakukan yaitu :

1. Seberapa besar batas kekuatan struktur lambung kapal *double-hull tanker* ketika mengalami tabrakan dengan kapal yang memiliki desain haluan *bulbous bow*?
2. Bagaimana perubahan bentuk lambung kapal *double-hull tanker* saat mencapai batas kekuatan (*ultimate strength*) akibat tabrakan dengan kapal yang memiliki desain haluan *bulbous bow*?

1.3 Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari penelitian ini yaitu :

1. Menentukan batas kekuatan struktur lambung kapal *double-hull tanker* ketika mengalami tabrakan dengan kapal yang memiliki desain haluan *bulbous bow*.
2. Menganalisis perubahan bentuk tingkat kerusakan struktural pada lambung ganda *double-hull tanker* akibat tabrakan dengan kapal yang memiliki desain haluan *bulbous bow*.

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu :

1. Bagi bidang akademisi, Memperkaya literatur dan referensi ilmiah di bidang teknik perkapalan, khususnya terkait analisis batas kekuatan dan perubahan bentuk lambung kapal saat terjadi tabrakan. Mendukung pengembangan metode simulasi dan pemodelan numerik, seperti *Finite Element Method*, untuk studi kerusakan struktural kapal tanker *double-hull* akibat tabrakan dengan haluan *bulbous bow*.
2. Bagi bidang industry, Memberikan dasar teknis bagi perancang kapal dan perusahaan galangan dalam meningkatkan desain struktur *double-hull* agar memiliki kekuatan dan kemampuan deformasi yang lebih baik saat mengalami tumbukan dengan kapal berhaluan *bulbous bow*.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar, sejak Januari 2024 hingga saat ini, dengan melibatkan rangkaian proses penelitian yang berkelanjutan untuk mendukung pemenuhan tujuan studi.

2.2 Bahan dan Alat

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa peralatan dan perangkat lunak yang berperan penting dalam mendukung kelancaran proses penelitian, yaitu sebagai berikut:

1. Komputer/Laptop

Komputer atau laptop digunakan sebagai alat utama dalam penelitian ini. Selain berfungsi untuk membuat laporan dan dokumentasi, komputer juga digunakan untuk menjalankan program aplikasi yang diperlukan dalam pembuatan model dan analisis data penelitian.

2. *Software AutoCAD*

Software AutoCAD digunakan untuk membuat model konstruksi kapal. Data konstruksi kapal tanker berlapis ganda (*double-hull*) yang digunakan dalam pembuatan model diperoleh melalui studi literatur yang relevan dan terpercaya. Hasil pemodelan ini menjadi dasar untuk tahap analisis selanjutnya.

3. *Software ANSYS Mechanical APDL*

ANSYS Mechanical APDL merupakan perangkat lunak yang mengadopsi metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) untuk melakukan analisis numerik secara eksperimen. Model konstruksi kapal yang dibuat menggunakan *AutoCAD* diimpor ke dalam *ANSYS Mechanical APDL*, kemudian dianalisis secara numerik untuk memperoleh data terkait perilaku struktural kapal akibat beban dan kondisi tabrakan.

2.3 Metode Penelitian

Metodologi penelitian melibatkan beberapa tahap: pengumpulan data, Pemodelan geometri kapal dan spesifikasi material, Penentuan Kondisi Batas dan Pembebanan, Simulasi Analisis Kekuatan Ultimate dengan *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) di perangkat lunak ANSYS dan yang terakhir kesimpulan.

2.3.1 Pengumpulan data

Pada tahap awal penelitian ini, dilakukan pengumpulan data yang relevan sebagai dasar dalam proses analisis struktur kapal. Data yang dikumpulkan mencakup dimensi utama kapal tanker, seperti panjang keseluruhan, lebar, tinggi, sarat air, serta koefisien blok. Dalam hal ini, digunakan dua tipe kapal, yaitu *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4, dengan rincian ukuran utama yang disajikan pada Tabel 2.1. Data tersebut kemudian menjadi acuan dalam tahap berikutnya, yaitu pembuatan model numerik dan analisis kekuatan struktur menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*).

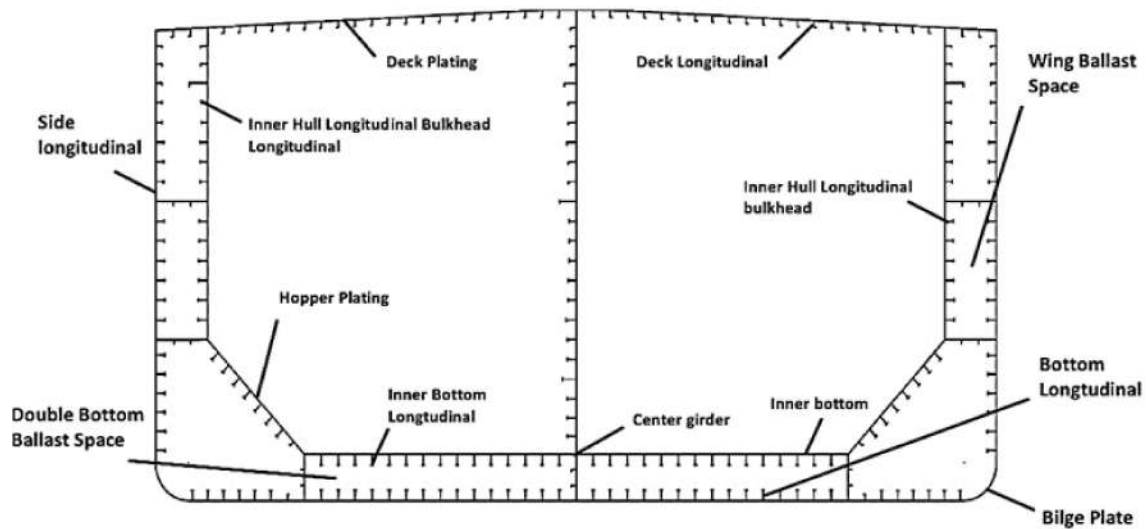
Tabel 2.1 Data kapal *double hull tanker*

Dimensi Utama	Ukuran	Unit
Panjang (L)	234	m
Lebar (B)	44	m
Tinggi (H)	21.2	m
Koefisien Blok (Cb)	0,78	
Jarak antar gading	5	m

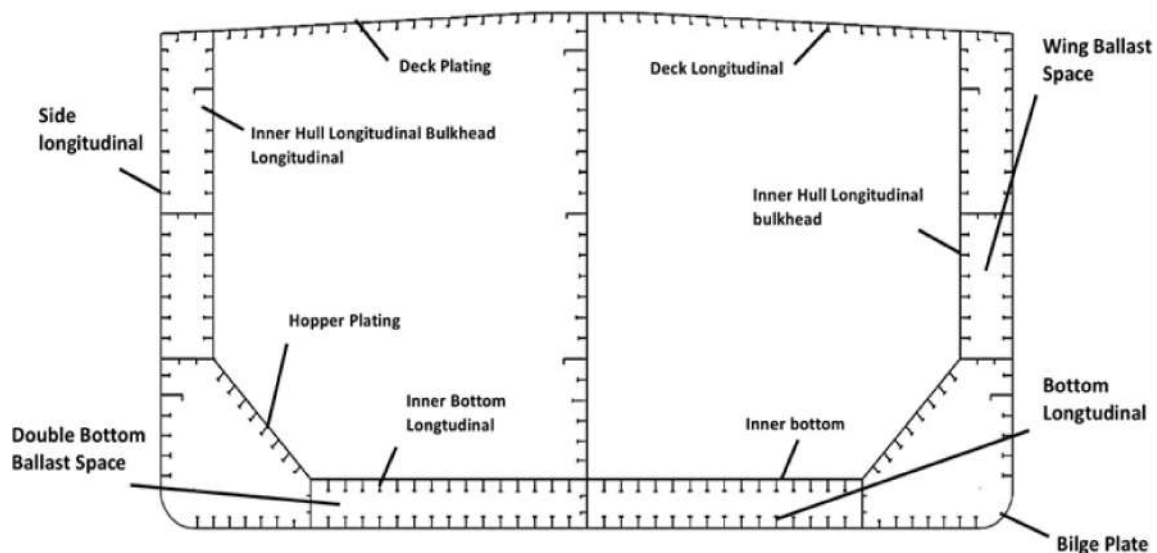
Berdasarkan Tabel 2.1 menunjukkan data dimensi utama kapal *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4 yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini. Kapal memiliki panjang keseluruhan (L) sebesar 234 meter, lebar (B) sebesar 44 meter, dan tinggi (H) sebesar 21,2 meter. Nilai koefisien blok (Cb) kapal adalah 0,78, yang menunjukkan bahwa bentuk lambung kapal termasuk dalam kategori relatif penuh (*full form*), sesuai dengan karakteristik kapal tanker yang dirancang untuk kapasitas muatan besar dengan efisiensi volume optimal. Selain itu, jarak antar gading (*frame spacing*) ditetapkan sebesar 5 meter, yang menggambarkan jarak antara penumpu struktur melintang pada badan kapal. Data dimensi utama ini digunakan sebagai dasar dalam proses pemodelan geometri kapal, analisis kekuatan struktur, dan simulasi tabrakan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*).

Penelitian ini secara khusus menganalisis struktur kapal (*double-hull tanker*) dengan menggunakan dimensi utama dan gambar penampang melintang kapal sebagai dasar pemodelan. Setelah tahap awal pengumpulan data dilakukan dan seluruh data yang diperlukan telah diperoleh, tahap selanjutnya adalah pembuatan gambar penampang kapal serta penentuan konfigurasi penampang struktur. Gambar penampang kapal *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4 dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2. Kedua gambar tersebut menampilkan konfigurasi penampang melintang dari kapal *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4 yang digunakan sebagai model dalam analisis numerik. Perbedaan utama antara kedua model terletak

pada susunan stiffener, yang berpengaruh terhadap kekakuan dan kekuatan struktur ketika menerima beban tabrakan.



Gambar 2.1 Gambar penampang *double-hull tanker T3*



Gambar 2.2 Gambar penampang *double-hull tanker T4*

Dan spesifikasi dan jenis profil stiffener yang digunakan pada struktur kapal, meliputi tipe profil, dimensi, serta penempatannya. Untuk tabel konfigurasi Material stiffener *double-hull tanker T3* dan *double-hull tanker T4* dapat dilihat pada Tabel 2.2 dan Tabel. 2.3. Pada kedua tabel tersebut menjadi dasar dalam proses pemodelan elemen hingga (*Finite Element Analysis*) untuk menganalisis perilaku struktur kapal terhadap beban tabrakan yang akan dilakukan pada tahap berikutnya.

Tabel 2.2. Konfigurasi Material *Stiffener* Kapal *Double-Hull Tanker T3*

Nomor Stiffener	Deskripsi	Tipe
1	L300/12 x 90/17	<i>Angel-Bar</i>
2	L619/13 x 150/19	<i>Angel-Bar</i>
3	L400/11,5 x 100/16	<i>Angel-Bar</i>
4	L489/11 x 150/19	<i>Angel-Bar</i>
5	L400/13 x 100/18	<i>Tee-Bar</i>
6	L872/14 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
7	L367/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
8	L412/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
9	L522/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
10	L452/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
11	L722/14 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
12	L472/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
13	L250/12 x 90/16	<i>Angel-Bar</i>
14	L485/11 x 150/30	<i>Tee-Bar</i>
15	L300/11 x 90/16	<i>Angel-Bar</i>
16	L475/11 x 150/30	<i>Tee-Bar</i>
17	L473/11 x 150/28	<i>Tee-Bar</i>
18	L480/11 x 150/25	<i>Tee-Bar</i>
19	L445/11 x 150/25	<i>Tee-Bar</i>
20	L452/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
21	L474/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
22	L439/11 x 125/16	<i>Tee-Bar</i>
23	L386/11 x 125/16	<i>Angel-Bar</i>
24	L306/11 x 125/16	<i>Angel-Bar</i>
25	L300/11 x 90/16	<i>Angel-Bar</i>
26	L350/12 x 100/17	<i>Angel-Bar</i>
27	L300/11 x 90/16	<i>Angel-Bar</i>
28	L487/11 x 150/32	<i>Tee-Bar</i>
29	L250/12 x 90/16	<i>Angel-Bar</i>
30	L474/11 x 150/19	<i>Tee-Bar</i>
31	L469/11 x 150/19	<i>Tee-Bar</i>
32	L454/11 x 150/19	<i>Tee-Bar</i>
33	L489/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
34	L459/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
35	L429/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
36	L379/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
37	L324/11 x 125/19	<i>Angel-Bar</i>
38	L966/16 x 200/16	<i>Angel-Bar</i>
39	L350/12 x 100/17	<i>Angel-Bar</i>
40	L200/12	<i>Flat-Bar</i>

Tabel 2.3. Konfigurasi Material *Stiffener* Kapal *Double-Hull Tanker T4*

Nomor Stiffener	Deskripsi	Tipe
1	L300/11 x 90/16	<i>Angel-Bar</i>
2	L350/12 x 100/17	<i>Angel-Bar</i>
3	L400/11,5 x 100/16	<i>Angel-Bar</i>
4	L489/11 x 150/19	<i>Angel-Bar</i>
5	L619/13 x 150/19	<i>Angel-Bar</i>
6	L966/16 x 200/16	<i>Angel-Bar</i>
7	L1016/16 x 200/16	<i>Angel-Bar</i>
8	L1116/16 x 200/16	<i>Angel-Bar</i>
9	L1116/16 x 200/16	<i>Angel-Bar</i>
10	L1145/16 x 200/16	<i>Angel-Bar</i>
11	L200/13	<i>Flat-Bar</i>
12	L200/14	<i>Flat-Bar</i>
13	L306/11 x 125/16	<i>Tee-Bar</i>
14	L324/12 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
15	L324/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
16	L344/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
17	L367/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
18	L379/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
19	L379/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
20	L386/11 x 125/16	<i>Tee-Bar</i>
21	L412/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
22	L429/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
23	L431/11 x 125/16	<i>Tee-Bar</i>
24	L431/12 x 125/16	<i>Tee-Bar</i>
25	L452/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
26	L454/11 x 150/19	<i>Tee-Bar</i>
27	L459/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
28	L469/11 x 150/19	<i>Tee-Bar</i>
29	L472/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
30	L472/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>
31	L474/11 x 150/19	<i>Tee-Bar</i>
32	L475/11 x 150/25	<i>Tee-Bar</i>
33	L485/11 x 150/30	<i>Tee-Bar</i>
34	L487/11 x 180/32	<i>Tee-Bar</i>
35	L487/11 x 180/32	<i>Tee-Bar</i>
36	L489/11 x 125/19	<i>Tee-Bar</i>
37	L492/12 x 125/25	<i>Tee-Bar</i>
38	L507/11 x 200/32	<i>Tee-Bar</i>
39	L507/11 x 200/32	<i>Tee-Bar</i>
40	L522/11 x 150/22	<i>Tee-Bar</i>

Berdasarkan Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 diatas kapal *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4 menggunakan kombinasi Angel-Bar, Tee-Bar, dan Flat-Bar. Dimensi bervariasi besar–kecil mengikuti kebutuhan kekuatan di tiap lokasi struktur kapal. Distribusi nomor stiffener menunjukkan penempatan bertahap dari bagian samping, dek, dasar, hingga longitudinal internal.

Selain itu, dikumpulkan pula data karakteristik material yang digunakan dalam konstruksi lambung kapal, meliputi jenis material, kekuatan tarik, modulus elastisitas, serta batas leleh material. Data-data tersebut sangat penting karena akan digunakan dalam proses analisis kekuatan struktur dan simulasi numerik. Sumber data diperoleh melalui studi literatur, referensi teknis yang relevan. Parameter spesifikasi material yang dimasukkan ke dalam model disesuaikan secara rinci agar simulasi mampu menangkap perilaku aktual material terhadap pembebanan dinamis, termasuk perubahan sifat mekanik pada fase elastis, transisi plastis, hingga titik leleh material, spesifikasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Spesifikasi material

Item	Spesifikasi Material	Satuan
Type of material	AH37	
Density	7850	kg/m ³
Modulus Young	210000	MPa
Poisson's Ratio	0,3	
Yeld Strength	370	MPa
Tangent Modulus	625	MPa

Berdasarkan Tabel 2.2 menunjukkan spesifikasi material yang digunakan pada struktur kapal *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4. Material yang digunakan adalah baja jenis AH37, yaitu baja dengan kekuatan tinggi (*High Strength Steel*) yang umum diaplikasikan pada konstruksi kapal. Material ini memiliki densitas sebesar 7850 kg/m³, menunjukkan massa jenis material yang relatif tinggi dan sesuai dengan karakteristik baja struktural. Nilai *Modulus Young* sebesar 210.000 MPa menunjukkan tingkat kekakuan material yang tinggi, sehingga mampu menahan deformasi elastis ketika menerima beban. Nilai *Poisson's Ratio* sebesar 0,3 menggambarkan rasio antara regangan lateral terhadap regangan aksial, yang menunjukkan perilaku isotropik material baja pada kondisi elastis. Selain itu, material AH37 memiliki *Yield Strength* sebesar 370 MPa, yang merupakan batas tegangan maksimum sebelum material mengalami deformasi plastis permanen. Nilai ini menandakan kemampuan material untuk menahan beban tinggi sebelum mengalami kerusakan struktural. Sedangkan *Tangent Modulus* sebesar 625 MPa menunjukkan kekakuan material setelah melewati batas leleh, atau kemampuan material dalam menahan deformasi lanjutan pada kondisi plastis. Kombinasi dari parameter-parameter

tersebut menjadikan baja AH37 sangat sesuai digunakan dalam analisis kekuatan struktur lambung kapal, terutama untuk simulasi numerik tabrakan yang melibatkan deformasi besar dan kondisi pembebanan non-linier.

Pada tahap pengumpulan data ini juga dilakukan perhitungan awal untuk menentukan besaran momen lentur vertikal yang akan digunakan sebagai beban input pada simulasi di ANSYS. Beban ini mewakili beban longitudinal yang bekerja pada struktur kapal akibat pengaruh kombinasi antara berat sendiri kapal, muatan, dan gaya gelombang laut. Pada saat kapal mendapatkan gelombang momen lentur dibagi menjadi dua yakni momen lentur saat air tenang (M_{sw}) dan momen lentur akibat gelombang (M_{wv}). Adapun besaran momen lentur vertikal pada air tenang (M_{sw}) dapat dihitung berdasarkan Persamaan 1 dan 2 berikut (DNV AS, 2024):

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

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

Adapun besaran momen lentur vertikal pada air bergelombang (M_{wv}) dapat dihitung berdasarkan Persamaan 3 dan 4 berikut (DNV AS, 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_{wv-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 (mm)

B = Lebar kapal (mm)

C_b = Koefisien blok (0,78)

C_w = Koefisien gelombang

$$= 10,75 - \left(\frac{300-L}{100} \right)^{1,5} \quad \text{untuk } 90.000 \leq L \leq 300.000 \text{ mm}$$

$$= 10,75 \quad \text{untuk } 300.000 \leq L \leq 350.000 \text{ mm}$$

$$= 10,75 - \left(\frac{L-350}{150} \right)^{1,5} \quad \text{untuk } 350.000 \leq L \leq 500.000 \text{ mm}$$

f_{sw} = Faktor Distribusi

f_R = faktor yang mewakili pengaruh dari kondisi operasi kapal (0,85)

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

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
 f_m = Distribusi faktor untuk vertikal bending moment

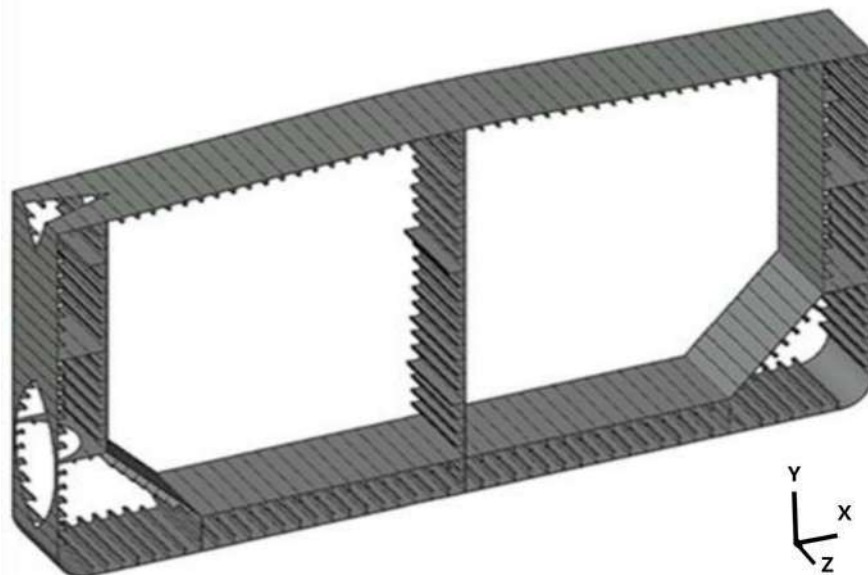
Perpaduan beban dinamis dan statis dalam menganalisis kekuatan kapal terhadap momen lentur vertikal dapat dihitung dengan menjumlahkan momen lentur vertikal pada kondisi air tenang (M_{sw}) dan momen lentur vertikal akibat gelombang (M_{wv}). Dengan demikian, momen lentur total vertikal (M_T) dapat dilihat pada Persamaan 5 berikut (DNV AS, 2024):

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

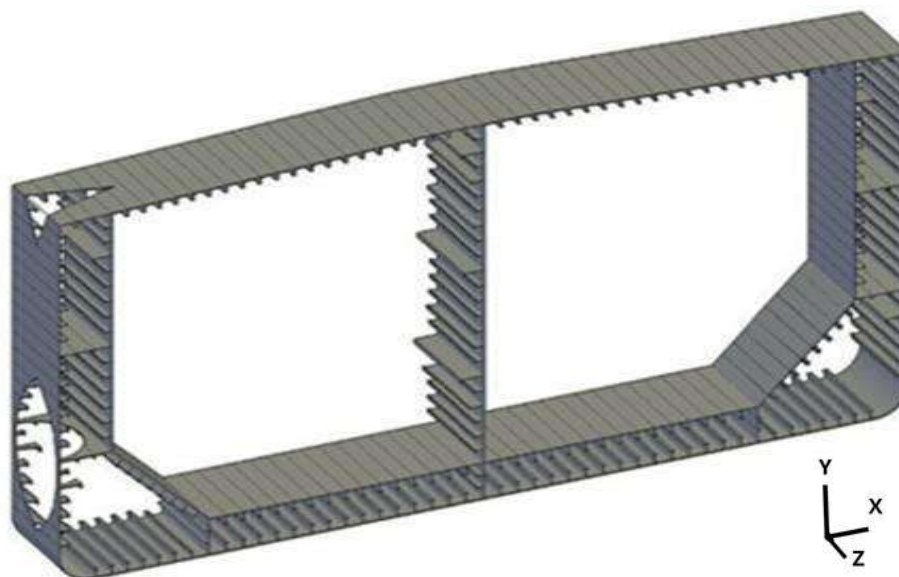
Perhitungan ini penting untuk mendapatkan nilai momen lentur ekstrem yang dialami kapal selama operasi, sehingga analisis kekuatan struktural kapal dapat mencerminkan kondisi nyata termasuk pengaruh beban statis dan dinamis secara simultan.

2.3.2 Permodelan Geometri Kapal dan Spesifikasi Material

Pemodelan ini dibuat berdasarkan data konstruksi kapal yang telah dikumpulkan pada tahap sebelumnya. Pada tahap ini, kapal *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4 dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi (3D) untuk merepresentasikan struktur lambung kapal secara detail. Proses pemodelan tiga dimensi (3D) dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *AutoCAD*, yang memungkinkan pembuatan model geometri kapal secara presisi sesuai dengan dimensi dan konfigurasi struktural yang telah ditentukan. Model tiga dimensi (3D) yang menggambarkan kerusakan pada kedua tipe kapal ditampilkan pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4, yang memperlihatkan secara detail area kerusakan akibat tabrakan.



Gambar 2.3. Model tiga dimensi (3D) kerusakan pada kapal *double-hull tanker* T3.



Gambar 2.4. Model tiga dimensi (3D) kerusakan pada kapal *double-hull tanker* T4.

Berdasarkan Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 memperlihatkan model tiga dimensi (3D) dari struktur kapal *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4 yang telah disiapkan sebelum tahap simulasi tabrakan dilakukan. Pada model tersebut tampak adanya bagian terbuka atau berlubang pada sisi lambung kapal. Bagian ini bukan merupakan hasil dari kerusakan akibat tabrakan, melainkan bukaan yang sengaja dibuat sejak tahap pemodelan di *AutoCAD* untuk tujuan analisis. Jarak deformasi yang disebabkan oleh tabrakan *bulbous bow* adalah 4,90 meters dan 2,50 meters untuk daerah yang terkena tabrakan haluan forcastle deck. Pembuatan lubang pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 bertujuan untuk mewakili area benturan (*impact zone*), yaitu daerah di mana gaya tumbukan dari kapal dengan haluan *bulbous bow* akan diaplikasikan selama proses simulasi di perangkat lunak ANSYS. Dengan adanya area terbuka tersebut, sistem dapat mengidentifikasi secara jelas batas interaksi antara kapal penabrak dan kapal yang ditabrak, sehingga proses perhitungan gaya dan deformasi dapat dilakukan dengan lebih akurat. Selain itu, desain dengan bukaan ini juga mempermudah dalam visualisasi penyebaran tegangan dan deformasi pada struktur di sekitar zona benturan. Pendekatan ini umum digunakan dalam analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis*) untuk memastikan bahwa respon struktur terhadap beban tabrakan dapat direpresentasikan secara realistis dan efisien. Dengan demikian, pemahaman mengenai mekanisme tabrakan antara kapal dengan *bulbous bow* dan struktur lambung kapal yang ditabrak menjadi sangat penting untuk: menganalisis deformasi struktur lambung pasca tabrakan, menentukan batas kekuatan kapal (*ultimate strength*) setelah mengalami benturan dari kapal dengan desain haluan *bulbous bow*.

Model tiga dimensi (3D) yang telah dibuat selanjutnya diimpor ke dalam perangkat lunak *ANSYS* untuk dilakukan proses simulasi numerik dengan menggunakan spesifikasi material yang telah dikumpulkan dan divalidasi pada tahap sebelumnya di Tabel 2.4. Pada tahap ini, elemen *Shell 181* diterapkan sebagai elemen utama dalam pemodelan, mengingat elemen tersebut memiliki kemampuan untuk merepresentasikan respon struktural komponen tipis hingga sedang, seperti lambung kapal, pelat dek, sekat dalam, serta komponen shell lainnya, secara efisien tanpa mengabaikan efek nonlinier material dan geometri. Elemen-elemen tersebut mampu memodelkan struktur pelat tipis dengan deformasi lentur transversal dan geser secara akurat. Pendekatan ini sangat cocok untuk menganalisis pelat kapal yang mengalami beban lentur serta kombinasi lentur dan variasi tekanan (Yoga *et al.*, 2017). Dengan pengaturan ini, hasil analisis diharapkan dapat memberikan representasi yang realistis terhadap respon deformasi dan distribusi tegangan yang terjadi pada struktur lambung kapal ketika menerima gaya tabrakan. Pendekatan ini sejalan dengan metode yang dijelaskan oleh (Muis Alie & Ramadhan, 2020), yang menegaskan efektivitas penggunaan elemen *Shell181* dalam memodelkan perilaku struktural kapal pada kondisi pembebanan kompleks.

Setelah proses penginputan spesifikasi material selesai dilakukan, langkah selanjutnya adalah menggabungkan (*glue*) seluruh komponen model agar terhubung secara menyeluruh sebagai satu kesatuan struktur. Proses *glue* di *ANSYS* adalah tahap untuk menyatukan semua bagian model agar saling terhubung dengan baik sebelum dilakukan analisis. Fungsi dari *glue* adalah untuk menghubungkan bagian-bagian itu secara numerik, supaya *ANSYS* menganggap semuanya satu kesatuan struktur. Jadi, ketika diberi beban atau terjadi tabrakan, gaya dan tegangan bisa menyebar dengan benar dari satu bagian ke bagian lainnya. Kalau proses *glue* tidak dilakukan, maka bagian-bagian model bisa saling terpisah atau tidak menyalurkan gaya dengan benar, sehingga hasil simulasi bisa salah atau bahkan simulasi gagal dijalankan. Dengan kata lain, *glue* ini yang merekatkan setiap komponen dalam model, tanpa mengubah bentuk aslinya, agar sistem bisa menghitung respon struktur kapal dengan akurat dan realistis.

Tahap berikutnya adalah proses pemodelan jaringan (*meshing*), yaitu proses di mana bentuk geometri kapal dipecah menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung pada titik-titik tertentu yang disebut nodal. Proses ini bertujuan agar struktur kapal dapat dihitung secara numerik oleh perangkat lunak *ANSYS*. Dengan mendiskretisasi model menjadi banyak elemen kecil, sistem dapat menganalisis bagaimana gaya, tegangan, dan deformasi menyebar ke seluruh bagian struktur. Pendekatan ini membuat perhitungan menjadi lebih efisien dan akurat, karena setiap bagian kapal seperti pelat lambung, dasar ganda, maupun dinding dalam dapat dianalisis secara detail sesuai dengan

karakteristik material dan kondisi bebannya. Hasil dari proses *meshing* yang baik akan sangat memengaruhi keakuratan hasil simulasi, terutama dalam mendeteksi daerah-daerah yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi atau potensi kerusakan akibat tabrakan.

Pemilihan ukuran dan jenis elemen *mesh* dilakukan dengan mempertimbangkan tingkat kompleksitas geometri serta kebutuhan akurasi hasil analisis. Pada area-area yang dianggap kritis, seperti sambungan struktur dan zona benturan, diterapkan *mesh* dengan ukuran yang lebih halus untuk memperoleh hasil deformasi dan tegangan yang lebih detail (Irsel, 2019). Ukuran *mesh* yang digunakan pada kedua model kapal, yaitu kapal *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4, adalah *mesh size* 300. Pemilihan ukuran ini didasarkan pada pertimbangan keseimbangan antara ketelitian hasil analisis dan efisiensi waktu komputasi. *Mesh* dengan ukuran 300 dianggap cukup halus untuk menangkap distribusi tegangan dan deformasi pada area-area kritis, seperti bagian lambung luar dan zona benturan, tanpa membuat proses komputasi menjadi terlalu berat. Dengan ukuran *mesh* tersebut, hasil simulasi diharapkan mampu memberikan representasi yang akurat terhadap respons struktur kapal saat mengalami beban tabrakan.

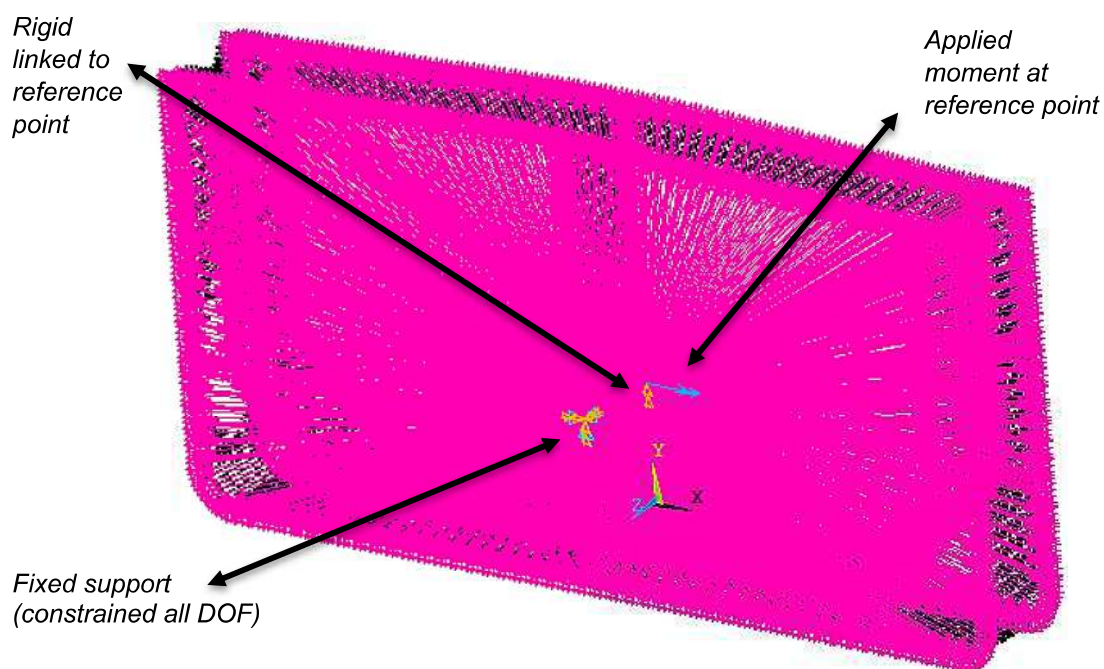
2.3.3 Kondisi Batas dan Pembebanan

Setelah proses *meshing* pada model kapal *double-hull tanker* T3 dan *double-hull tanker* T4 selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah penerapan *Multi-Point Constraint* (MPC) dan kondisi batas (*boundary conditions*). Tahap MPC dilakukan terlebih dahulu untuk mendefinisikan hubungan kinematik antara node-node pada area benturan dengan titik referensi pembebanan. Tujuan penerapan *Multi-Point Constraint* (MPC) adalah agar gaya atau momen yang diberikan pada titik referensi dapat terdistribusi secara merata ke seluruh area benturan, sehingga perilaku deformasi struktur akibat tabrakan dapat dimodelkan secara realistis dalam perangkat lunak ANSYS yang bisa dilihat pada Gambar 2.5. (momen kelengkungan), distribusi tegangan.

Selanjutnya, dilakukan penerapan kondisi batas (*boundary conditions*) guna mendefinisikan batas gerakan dan perilaku struktur kapal selama proses simulasi. Penerapan kondisi batas yang tepat sangat penting karena menentukan bagaimana gaya, tegangan, dan deformasi terdistribusi di seluruh struktur kapal selama proses tabrakan. Dengan demikian, interaksi kapal terhadap beban eksternal dapat disimulasikan secara lebih akurat, sehingga hasil analisis mendekati kondisi sebenarnya di lapangan. Persyaratan kondisi batas adalah semua titik pada ujung model bagian belakang (buritan kapal) diberi kondisi tumpuan tetap penuh (*fixed support*), sehingga tidak dapat bergerak atau berputar ke arah mana pun (Latumahina *et al.*, 2018). Ilustrasi penerapan kondisi batas kapal *double-hull tanker* dengan metode *Non-Linear Finite Element*

Analysis (NLFEA) dapat dilihat pada Gambar 2.5. Titik-titik referensi pada bagian ini tidak menerima beban tambahan model dihubungkan dengan titik referensi pada sumbu netral menggunakan elemen pengikat kaku (*rigid link*).

Sementara itu, bagian ujung depan (haluan) momen lentur juga diaplikasikan sebagai beban input pada ujung depan (haluan) model, tepatnya di titik referensi sepanjang sumbu netral. Dalam studi ini digunakan metode kontrol momen (*moment control method*), yaitu pendekatan di mana momen pembengkokan diberikan secara *incremental* pada lokasi tertentu sepanjang lambung kapal. Ilustrasi penerapan pembebanan pada kapal *double-hull tanker* dengan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Model kondisi batas dan pembebanan pada kapal *double-hull tanker* yang dianalisis menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA).

Metode ini digunakan untuk menentukan kekuatan batas (*ultimate strength*) struktur dan mengevaluasi perilaku deformasi dari fase elastis hingga plastis akibat beban tabrakan pada bagian depan kapal. Konfigurasi ini menjamin bahwa seluruh bagian struktur di ujung depan bergerak secara serentak dan menerima beban momen lentur secara homogen dan terdistribusi merata. Setelah penerapan kondisi tumpuan kaku penuh pada ujung buritan dan sambungan kaku pada ujung haluan, beban momen lentur diaplikasikan secara *incremental* pada ujung haluan untuk menginduksi kondisi pembebanan *hogging* dan *sagging* yang terkontrol (DNV GL AS, 2015).

Pendekatan ini membantu menilai apakah desain kapal sudah cukup kuat untuk menahan beban berat dalam kondisi ekstrem (Muis Alie & Ramadhan, 2020). Pendekatan ini juga digunakan untuk menganalisis distribusi tegangan dan pola deformasi (defleksi) sepanjang badan lambung sebagai respons terhadap momen lentur global. Konfigurasi kondisi batas seperti ini diterapkan untuk mencegah pergerakan bebas yang tidak realistis pada model, serta memastikan bahwa distribusi gaya dan tegangan selama proses simulasi dapat terwakili secara akurat. Dengan demikian, interaksi antara struktur kapal dan beban eksternal dapat dimodelkan dengan lebih realistis, memungkinkan evaluasi terhadap kekuatan memanjang dan perilaku deformasi kapal dilakukan secara lebih tepat (Siagian *et al.*, 2020).

2.3.4 Simulasi Model

Setelah seluruh kondisi batas (*boundary conditions*) dan pembebanan (*load application*) selesai diterapkan, tahap selanjutnya adalah melakukan simulasi atau *running model* di perangkat lunak ANSYS. Tahap ini merupakan inti dari proses *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) karena di sinilah sistem menyelesaikan persamaan numerik nonlinier untuk menentukan respons struktur kapal terhadap beban yang diberikan. 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.

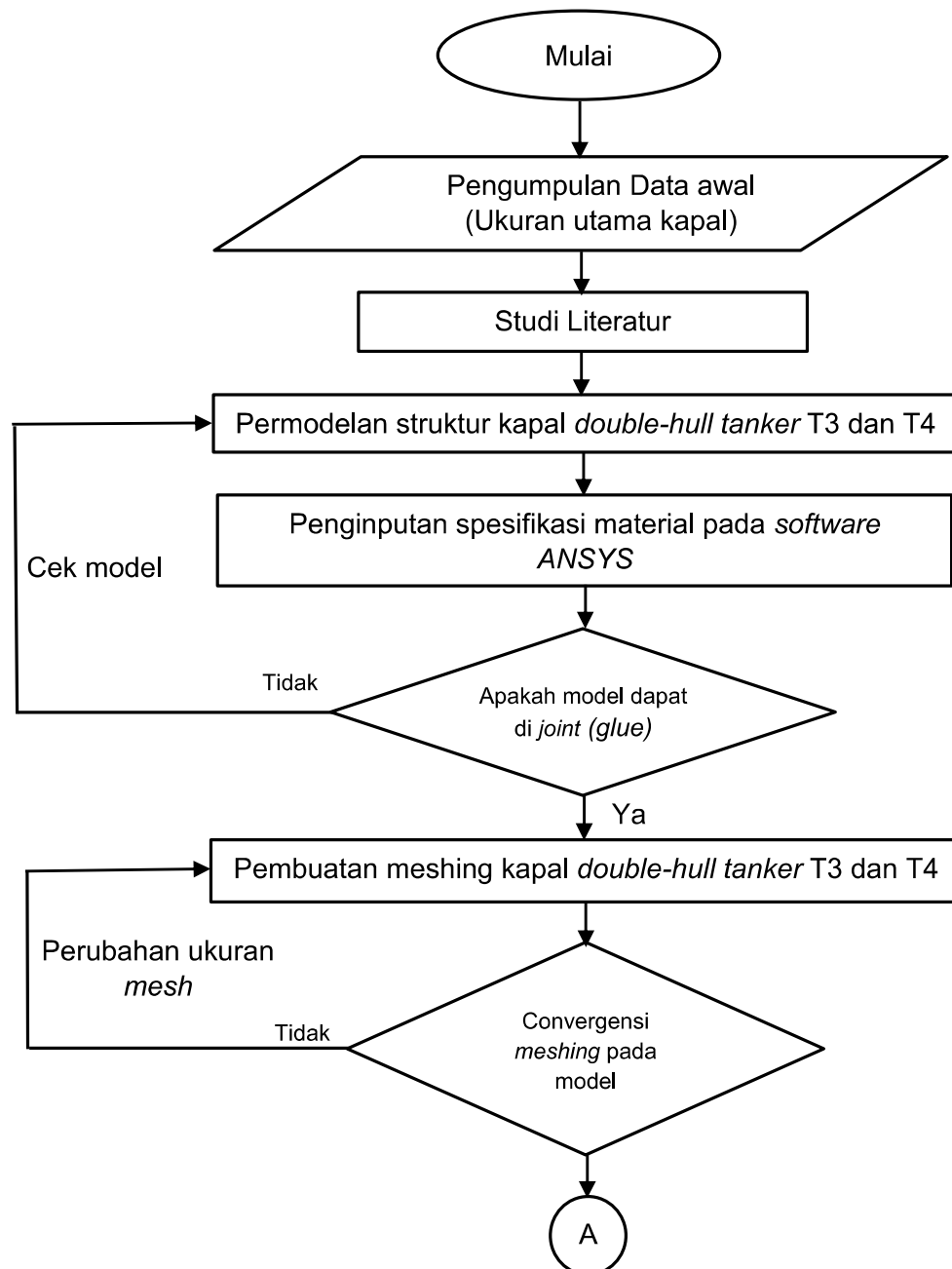
Selama proses *running*, ANSYS juga memonitor konvergensi solusi, yaitu sejauh mana keseimbangan gaya internal dan eksternal pada model dapat dicapai. Apabila konvergensi tercapai di setiap langkah, maka hasil yang diperoleh dianggap stabil dan valid secara numerik. Tahap *running model* ini menjadi langkah kunci untuk memvalidasi sejauh mana desain kapal tanker ganda mampu bertahan terhadap beban lentur global. Data hasil simulasi kemudian dianalisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi titik-titik lemah (*critical zones*) serta mengevaluasi ketahanan struktural kapal dalam kondisi *hogging* dan *sagging* ekstrem. Pemahaman tentang bagaimana kekuatan ultimate kapal berkembang saat menghadapi mekanisme keruntuhan yang terjadi secara bertahap sangat penting (Muis Alie & Latumahina, 2019).

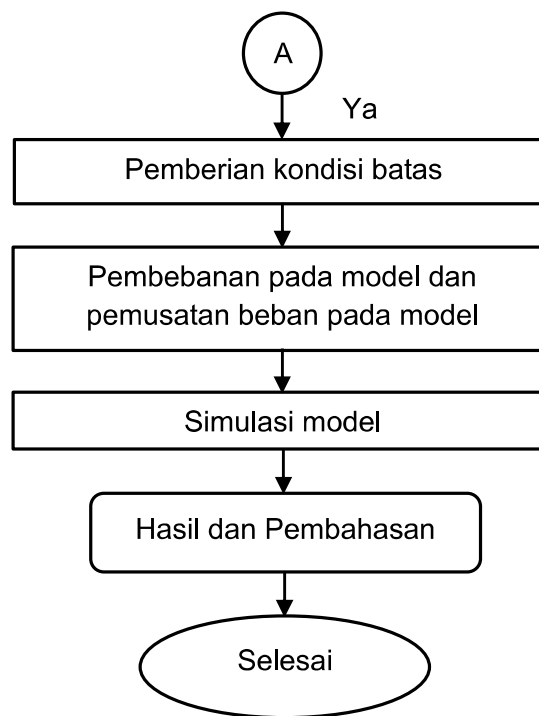
2.3.5 Kesimpulan

Tahap terakhir adalah pengolahan hasil analisis untuk menyusun kesimpulan terkait kekuatan dan perilaku struktural kapal *double-hull tanker* yang memiliki dasar ganda saat mengalami tabrakan bagian depan. Kesimpulan ini menjadi dasar rekomendasi untuk desain dan peningkatan keselamatan kapal. Keseluruhan tahapan penelitian dalam bentuk kerangka pemikiran.

2.4 Kerangka Penelitian

Untuk memudahkan dan mengarahkan proses atau langkah-langkah penyelesaian, dibuat suatu kerangka analisis yang menggambarkan urutan pengerjaan dalam penyelesaian penelitian dan dapat dilihat pada gambar 2.6.





Gambar 2.6 Gambar kerangka penelitian