

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kekuatan memanjang (*longitudinal strength*) merupakan aspek kunci dalam keselamatan struktur kapal *oil tanker* yang beroperasi di bawah beban muatan cair besar dan beban gelombang siklik sepanjang umur layanannya (Hughes & Paik, 2010; Rawson & Tupper, 2001). Pada sistem konstruksi memanjang, sekat yang dominan digunakan pada *tanker* adalah *corrugated bulkhead*. *Corrugated bulkhead* tidak hanya berfungsi sebagai sekat kedap air, tetapi juga berperan dalam menjaga kekakuan dan distribusi tegangan penampang memanjang kapal (Zahir et al., 2022). Menurut (RINA, 2026) bahwa kegagalan lokal akibat ketidaksempurnaan geometris pada elemen sekat dapat menurunkan kekuatan memanjang kapal secara signifikan. Oleh karena itu, analisis perilaku struktural *corrugated bulkhead* dalam konteks kekuatan memanjang kapal tanker menjadi isu yang penting dan relevan.

Double girder pada *midship section* dapat mengalami *misalignment* dalam proses fabrikasi akibat toleransi manufaktur dan kompleksitas sambungan, sehingga menimbulkan diskontinuitas aliran gaya dan konsentrasi tegangan lokal. Untuk meningkatkan kontinuitas struktur, galangan kapal umumnya menambahkan flat bar intercostal sebagai elemen penguat yang dapat meningkatkan kekakuan dan mengurangi konsentrasi tegangan pada area sambungan (Mahzumah Cindy et al., 2025). Namun, pengaruh penambahan *flat bar intercostal* terhadap respons kekuatan memanjang kapal belum banyak dikaji, khususnya pada kapal *oil tanker* 4500 T. Oleh karena itu, keterkaitan antara *misalignment double girder*, penambahan *flat bar intercostal*, dan perubahan distribusi tegangan serta deformasi menjadi fokus utama penelitian ini.

Berbagai hasil riset terkini menunjukkan bahwa kegagalan struktural kapal *tanker* umumnya diawali oleh fenomena lokal seperti *local buckling*, plastisitas progresif, dan konsentrasi tegangan pada area diskontinuitas struktur, yang selanjutnya berkembang menjadi degradasi kekuatan memanjang global. Studi eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa *corrugated bulkhead* memiliki kapasitas ultimit lebih tinggi dibanding *bulkhead* berpenegar konvensional, namun sangat sensitif terhadap kondisi batas, ketidaksempurnaan geometri, serta konfigurasi sambungan (Cui & Wang, 2024). Penelitian lain pada struktur *girder* dan *hull girder* membuktikan bahwa akumulasi deformasi plastis akibat beban lentur siklik dapat menurunkan cadangan kekuatan memanjang secara signifikan, terutama pada struktur dengan diskontinuitas kekakuan (Deng et al., 2022). *IACS* melalui *Common Structural Rules* menekankan pentingnya evaluasi kekuatan memanjang berbasis analisis numerik lanjutan karena pendekatan konvensional sering kali belum mampu menangkap efek *misalignment* dan

interaksi lokal dengan global secara akurat. Tren penelitian terkini juga menunjukkan peningkatan penggunaan *Finite Element Method* (FEM) nonlinier sebagai alat utama untuk menganalisis fenomena tersebut secara realistis dan terukur (Putranto et al., 2022).

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas perilaku *corrugated bulkhead* dan kekuatan *hull girder* dari berbagai sudut pandang. Penelitian eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa *corrugated bulkhead* memiliki mekanisme keruntuhan khas melalui pembentukan engsel plastis pada gelombang corrugation dan mampu memberikan kapasitas ultimit yang lebih besar dibanding *bulkhead* datar dengan berat material yang sama (Cui & Wang, 2024). (Putranto et al., 2022) mengembangkan pendekatan *Equivalent Single Layer* untuk analisis kekuatan ultimit *hull girder* dan membuktikan efisiensi FEM dalam memprediksi distribusi tegangan dan momen lentur global secara akurat. (Deng et al., 2022) menyoroti bahwa kegagalan kekuatan memanjang *hull girder* sangat dipengaruhi oleh akumulasi deformasi plastis dan ketidakaturan struktur akibat beban lentur berulang. kekuatan dan berat konstruksi, namun masih terbatas pada analisis beban. Penelitian nasional menegaskan keunggulan *corrugated bulkhead* dari sisi lateral atau *buckling* aksial tanpa mempertimbangkan efek *misalignment* dan elemen *intercostal* (Ardianus et al., 2017).

Berdasarkan kajian pustaka yang telah dilakukan, masih terdapat *research gap* yang signifikan pada penelitian mengenai *corrugated bulkhead* dalam struktur kapal *tanker*. Penelitian (Zahir et al., 2022) berfokus pada perilaku *buckling* dan kekuatan lokal *transverse corrugated bulkhead* akibat pembebanan, tanpa mengkaji pengaruh modifikasi struktur terhadap distribusi tegangan pada kekuatan memanjang kapal. Penelitian (Mahzumah Cindy et al., 2025) lebih menitikberatkan pada kapasitas geser (*shear capacity*) struktur *double corrugated web girder*, sehingga belum membahas interaksi antara *corrugated bulkhead* dan *double girder* pada konstruksi kapal tanker. Sementara itu, penelitian (Deng et al., 2022) mengevaluasi perilaku keruntuhan dan kekuatan *hull girder* secara global akibat pembebanan lentur siklik, namun mengasumsikan konfigurasi struktur yang ideal tanpa mempertimbangkan adanya *misalignment* pada elemen internal. Dengan demikian, hingga saat ini belum ditemukan penelitian yang secara spesifik menganalisis pengaruh penambahan support pada *corrugated bulkhead* terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan *safety factor* akibat *misalignment* antara *double girder* dan *corrugated bulkhead* di *midship section* kapal *tanker*. Kekosongan penelitian inilah yang menjadi dasar pelaksanaan penelitian ini, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah maupun praktis sebagai alternatif solusi penguatan struktur pada kondisi *misalignment* yang sering dijumpai selama proses fabrikasi dan perbaikan kapal. Selain itu, kajian mengenai efektivitas penambahan *flat bar intercostal* sebagai solusi penguatan lokal yang banyak diterapkan pada proses konstruksi dan perbaikan kapal di galangan masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi

kekosongan tersebut dengan menganalisis pengaruh penambahan *flat bar intercostal* terhadap kekuatan memanjang *corrugated bulkhead* yang mengalami *misalignment double girder* pada *midship section* kapal *oil tanker* menggunakan *Finite Element Method* (FEM). *Novelty* penelitian ini terletak pada evaluasi numerik peran *flat bar intercostal* sebagai elemen korektif struktural dalam mereduksi konsentrasi tegangan dan meningkatkan kinerja kekuatan memanjang kapal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kuantitatif pengaruh penambahan *flat bar intercostal* terhadap *corrugated bulkhead* yang mengalami *misalignment double girder* pada kekuatan memanjang kapal *oil tanker* 4500 T menggunakan *Finite Element Method*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada bagian latar belakang, maka dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *misalignment double girder* terhadap distribusi tegangan dan deformasi pada area *corrugated bulkhead* di *midship section* kapal *oil tanker* 4500 T berdasarkan analisis *Finite Element Method*?
2. Apakah penambahan *flat bar intercostal* mampu meningkatkan kekuatan memanjang kapal yang mengalami *misalignment double girder*, ditinjau dari perubahan nilai tegangan maksimum, deformasi, dan faktor keamanan struktur?
3. Apakah penambahan *flat bar intercostal* dapat mengurangi dampak *misalignment* terhadap kinerja struktur?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah di atas, penelitian ini dilakukan dengan tujuan:

1. Menganalisis pengaruh *misalignment double girder* terhadap distribusi tegangan, deformasi pada *midship section* kapal *oil tanker* 4500 T menggunakan *Finite Element Method*.
2. Mengevaluasi efektivitas penambahan *flat bar intercostal* dalam meningkatkan kekuatan memanjang kapal yang mengalami *misalignment double girder*, ditinjau dari perubahan nilai tegangan maksimum, deformasi struktural, dan *safety factor*.
3. Membandingkan kinerja struktural *corrugated bulkhead* sebelum dan sesudah penambahan *flat bar intercostal* pada kondisi *misalignment double girder*, serta menilai kesesuaiannya terhadap kriteria dan persyaratan kekuatan struktur berdasarkan standar klasifikasi *RINA*.

1.4. Hipotesa Masalah

Misalignment double girder terhadap *corrugated bulkhead* diperkirakan berpengaruh signifikan dalam degradasi kekuatan memanjang kapal yang ditandai oleh kenaikan tegangan maksimum, dan deformasi pada area sambungan di *midship section* kapal *oil tanker* 4500 T. Penambahan *flat bar intercostal* terhadap *corrugated bulkhead* yang mengalami kondisi *misalignment double girder* diperkirakan mampu mereduksi konsentrasi tegangan dan respons deformasi secara signifikan sehingga meningkatkan nilai *safety factor*. Konfigurasi *corrugated bulkhead* yang ditambahkan *flat bar intercostal* pada kondisi *misalignment double girder* diasumsikan memiliki kinerja struktural yang lebih optimal serta mampu memenuhi persyaratan kekuatan memanjang sesuai ketentuan klasifikasi RINA dibandingkan konfigurasi tanpa penambahan penguat.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan sebagai fokus utama dalam penelitian ini:

1. Objek penelitian dibatasi pada struktur *corrugated bulkhead* yang terletak di *midship section* kapal *oil tanker* dengan kapasitas 4500 T yang dibangun di PT. X, karena area ini merupakan zona kritis yang mengalami momen lentur maksimum dan berkontribusi dominan terhadap kekuatan memanjang kapal;
2. Penelitian difokuskan pada pengaruh *misalignment double girder* terhadap kekuatan memanjang kapal pada area *longitudinal corrugated bulkhead*, dengan asumsi arah dan besaran *misalignment* merepresentasikan kondisi yang terjadi dalam proses fabrikasi dan *erection* struktur kapal. Variasi arah dan tingkat *misalignment* lainnya tidak dibahas secara parametris;
3. Penambahan elemen penguat yang dikaji hanya berupa *flat bar intercostal*, tanpa mempertimbangkan jenis penguatan lain seperti *continuous stiffener*, *additional bracket*, atau perubahan geometri *corrugation*;
4. Metode analisis yang digunakan terbatas pada pendekatan numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM), tanpa dilakukan pengujian eksperimental laboratorium atau validasi melalui *full-scale testing*;
5. Pemodelan material struktur diasumsikan bersifat elastis linier dan homogen, sehingga perilaku plastis, efek kelelahan (*fatigue*), dan degradasi material akibat korosi tidak dianalisis dalam penelitian ini;
6. Kondisi pembebanan dianalisis menggunakan *Dynamic Implicit* dengan pembebanan yang diberikan secara bertahap (*quasi-static loading*), sehingga respons struktur dievaluasi berdasarkan distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan. Pengaruh beban impact, slamming, vibrasi, dan respons dinamis akibat gelombang tidak menjadi ruang lingkup penelitian ini.

7. Evaluasi kinerja struktural difokuskan pada parameter tegangan maksimum, deformasi, dan faktor keamanan, sesuai kriteria klasifikasi *RINA*, tanpa melakukan optimasi desain atau analisis biaya;
8. Penelitian ini tidak membahas aspek konstruksi, metode pengelasan, urutan *erection*, maupun analisis ekonomi dan operasional kapal, sehingga hasil penelitian difokuskan murni pada kajian kekuatan struktur secara numerik.

1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat Teoritis:

1. Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan keilmuan dalam bidang analisis kekuatan struktur kapal, khususnya terkait perilaku kekuatan memanjang kapal yang mengalami kondisi non-ideal berupa *misalignment double girder* dengan *corrugated bulkhead*.
2. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai interaksi antara ketidaksempurnaan geometris dan elemen penguat lokal, sehingga memperkaya teori mekanika struktur kapal yang selama ini cenderung berasumsi pada kondisi geometris ideal.
3. Menyediakan referensi akademik terbaru terkait efektivitas penambahan *flat bar intercostal*, yang masih terbatas dibahas dalam literatur, terutama dalam konteks *corrugated bulkhead* pada kapal *tanker* ukuran menengah.
4. Mengembangkan aplikasi metode *Finite Element Method* (FEM) dalam analisis struktur kapal dengan mempertimbangkan kondisi aktual fabrikasi, sehingga dapat menjadi rujukan bagi penelitian lanjutan yang mengkaji struktur kapal dengan tingkat kompleksitas serupa.

Manfaat Praktis:

1. Menjadi acuan teknis bagi desainer dan *engineer* galangan kapal dalam mengevaluasi dampak *misalignment double girder* terhadap kekuatan *corrugated bulkhead* serta dalam menentukan kebutuhan penguatan struktur yang tepat.
2. Memberikan dasar pertimbangan dalam penerapan penambahan *flat bar intercostal* sebagai solusi penguatan, sehingga keputusan modifikasi struktur dapat dilakukan secara berbasis analisis ilmiah, bukan hanya berdasarkan pengalaman empiris.
3. Mendukung upaya peningkatan keselamatan dan keandalan struktur kapal *tanker* khususnya kapal *oil tanker* 4500 T dengan meminimalkan risiko kegagalan struktural akibat konsentrasi tegangan dan deformasi berlebih.
4. Menyediakan referensi teknis bagi *surveyor* dan badan klasifikasi dalam melakukan evaluasi kondisi struktur kapal yang mengalami ketidaksempurnaan geometris.

5. Mendorong penerapan desain dan konstruksi kapal yang lebih adaptif terhadap kondisi aktual di lapangan, sehingga dapat meningkatkan efisiensi perawatan dan memperpanjang umur layanan struktur kapal.

1.7. Luaran Penelitian

- A. Publikasi *paper* ilmiah pada *Makara Journal Technology* (MJT) dengan status *submitted*;
- B. Publikasi Hak Cipta (HAKI) Modul penelitian dengan judul “Prosedur Analisis Kekuatan Struktur Kapal *Tanker* Menggunakan *Software* Berbasis *Finite Element Method* (FEM)” oleh Biro Inovasi Universitas Diponegoro.