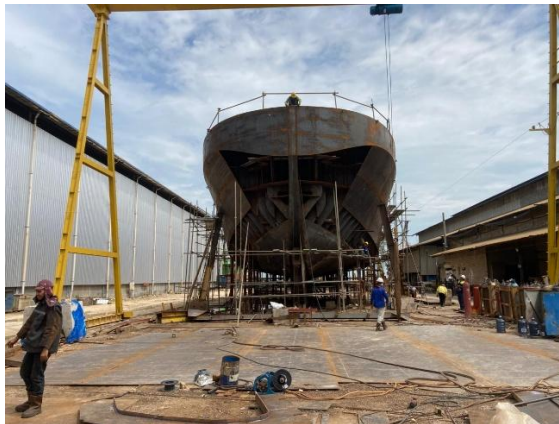


BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Harbour tug

Kapal *tugboat* merupakan armada penunjang yang dirancang khusus untuk memfasilitasi olah gerak kapal lain di berbagai wilayah perairan dengan mengandalkan daya tarik tinggi melalui konfigurasi dua mesin induk, menurut (Wahyudi et al., 2024) umumnya memiliki kapasitas antara 500 hingga 2.500 kW bahkan mencapai 20.000 kW untuk operasional di laut dalam. Secara spesifik, *harbour tug* berperan vital sebagai asisten dalam proses penyandaran (*mooring*) dan lepas sandar (*unmooring*) bagi kapal-kapal berukuran besar di pelabuhan yang memiliki keterbatasan manuver akibat ketiadaan *bow thruster*. Oleh karena itu, besarnya spesifikasi daya mesin pada tugboat menjadi syarat mutlak untuk memastikan kelancaran operasional serta keamanan pergerakan kapal-kapal raksasa tersebut selama berada di area pelabuhan.



Gambar 2.1 Harbour tug

(sumber : Dokumentasi Pribadi)

Kapal *harbour tug* adalah jenis kapal bantu yang dirancang khusus untuk operasi di daerah pelabuhan dan perairan dangkal, serta memiliki peran yang amat penting dalam membantu manuver kapal besar yang ada seperti untuk *docking*, *undocking* dan pengaturan posisi kapal saat berada di pelabuhan atau dermaga. Kapal *harbour tug* memiliki desain kompleks, manuver yang tinggi, dan kapasitas *bollard pull* yang besar, meskipun memiliki ukuran yang relatif kecil jika dibandingkan dengan kapal yang dibantu, sehingga mampu memberikan daya dorongan maupun tarikan yang efektif pada kapal induk dalam ruang yang terbatas (Fikhriet al., 2012). Selain itu, *harbour tug* juga dilengkapi dengan sistem fender yang

kuat serta desain lambung dan fender yang diperkuat untuk menahan kontak berulang dengan struktur besar seperti haluan kapal induk maupun dermaga, suatu karakteristik fungsional yang esensial dalam operasi pelabuhan.

Dalam bentuk lunas yang ada, *harbour tug* sering kali memiliki lunas yang berbeda dibanding kapal laut lepas, terkadang berupa lunas yang lebih tinggi atau kontur lambung khusus untuk meningkatkan respons *bollard pull* dan stabilitas saat melakukan tarikan atau dorongan berat dalam kondisi tenang. Karakteristik ini berimplikasi pada distribusi beban vertikal yang lebih menonjol di bagian lunas, sehingga pengaruhnya terhadap fase peluncuran kapal harus dianalisis secara cermat guna menghindari konsentrasi beban lokal yang terlalu tinggi. Kajian ilmiah yang dilakukan oleh (Wahyudi et al., 2024) menunjukkan bahwa dalam desain dan analisis kapal tunda seperti *harbour tug*, stabilitas, gaya tarik, serta distribusi beban merupakan aspek penting yang memengaruhi performa operasional dan keselamatan kapal, khususnya dalam fase transisi seperti *launching* atau saat operasi kerja berat di pelabuhan.

2.2 Lunas kapal (*keel*)

Lunas atau *keel* merupakan elemen struktur utama kapal yang terletak memanjang pada bagian dasar kapal dan membentang dari bagian haluan hingga buritan. Dalam kajian keteknikan perkapalan, lunas berfungsi sebagai komponen utama penopang kekuatan memanjang struktur kapal, pengikat dan penguat kedua sisi lambung, serta berperan dalam menjaga kestabilan arah pelayaran dan meningkatkan momen pengembalian kapal ketika mengalami kemiringan (Alie et al., 2025). Selain aspek kekuatan struktural, desain keel juga memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja hidrodinamik kapal, khususnya dalam kondisi operasional yang menantang. Geometri dan dimensi keel berperan dalam meningkatkan ketahanan kapal terhadap gerakan berguling, yang menjadi faktor penting dalam menjaga stabilitas saat kapal menghadapi gelombang tinggi maupun arus kuat. Integrasi elemen tambahan seperti *bilge keel* berfungsi sebagai perangkat peredam gerakan berguling dengan meningkatkan koefisien redaman hidrodinamik, sehingga amplitudo olah gerak kapal dapat dikurangi secara efektif. Dengan demikian, pemahaman yang komprehensif terhadap desain dan fungsi keel tidak hanya mendukung optimasi kekuatan struktur kapal, tetapi juga berperan penting dalam meningkatkan keselamatan awak, muatan, serta kinerja kapal dalam berbagai kondisi operasional.

2.3 Proses *undocking (launching)* kapal

Proses *undocking* atau *launching* kapal adalah fase kritis dalam rangkaian produksi kapal yang menandai perpindahan badan kapal dari daratan ke perairan, dan umumnya melibatkan pengaturan distribusi beban dan momen kapal agar transisi tersebut berjalan aman dan terkendali (Abdullah & Sarena, 2024). Peluncuran kapal dapat dilakukan dengan berbagai metode konvensional seperti *slipway* atau *gravitational launching*, maupun dengan alternatif modern seperti *ship launching airbag* yang semakin banyak diterapkan di galangan kapal karena memberikan fleksibilitas lokasi dan efisiensi biaya dibandingkan penggunaan *slipway* tradisional (Hendra Gonawan et al., 2023). Penggunaan *airbag* pada metode peluncuran ini bekerja dengan mengubah gaya gesek tradisional menjadi gaya rolling, sehingga kapal dapat bergerak lebih halus sepanjang permukaan tumpuan dan meminimalkan risiko kerusakan pada struktur kapal dan media peluncur.

Penelitian oleh (Abdullah & Sarena, 2024b) juga menunjukkan bahwa meskipun *airbag* merupakan metode yang efektif, peluncuran kapal menggunakan *airbag* memiliki sejumlah tantangan operasional dan teknis yang harus dianalisis secara matang, termasuk kecenderungan gerakan kapal di berbagai kondisi operasi peluncuran, efek tekanan internal *airbag* terhadap struktur kapal, serta risiko keselamatan yang terkait dengan stabilitas kapal saat memasuki fase kritis peluncuran. Misalnya, analisis risiko peluncuran menggunakan *Functional Resonance Accident Model* menunjukkan bahwa operasi peluncuran kapal dengan *airbag* dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk resistensi gerak, kekurangan stabilitas, dan kemungkinan terjadinya interaksi yang tidak diantisipasi antara manusia, teknologi, dan metode peluncuran itu sendiri (Abdullah & Sarena, 2024).

2.4 Faktor keamanan (*Safety Factor*)

Faktor keamanan merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan suatu material teknik dalam menahan beban luar, baik berupa gaya tekan maupun gaya tarik. Beban maksimum yang menyebabkan material mencapai kondisi kritis hingga mengalami kegagalan disebut sebagai beban ultimit (*ultimate load*). Apabila beban ultimit tersebut dibagi dengan luas penampang, maka akan diperoleh kekuatan ultimit (*ultimate strength*) atau tegangan ultimit (*ultimate stress*) dari material tersebut.

Dalam perancangan elemen struktur, tingkat tegangan yang digunakan sebagai dasar desain dikenal sebagai tegangan izin (*allowable stress*), yang nilainya ditetapkan secara signifikan lebih rendah dibandingkan tegangan ultimit hasil pengujian statis. Penetapan ini dilakukan untuk mengakomodasi berbagai ketidakpastian, antara lain ketidaktepatan dalam estimasi besar beban yang bekerja pada struktur selama masa layan.

Karena hubungan antara gaya, tegangan, dan luas penampang dinyatakan sebagai gaya sama dengan hasil kali tegangan dan luas, maka konsep tegangan izin dapat dikonversi ke dalam bentuk beban atau gaya izin yang dapat ditahan oleh suatu elemen struktur. Dengan demikian, dapat ditentukan perbandingan penting antara kapasitas ultimit dan beban kerja yang diizinkan, yang dikenal sebagai faktor keamanan.

$$FS = \frac{\sigma_{ultimate}}{\sigma_{ijin}}$$

2.5 Rekayasa distribusi beban dan penambahan plat baja sementara pada keel

Pada proses *undocking (launching)* kapal menggunakan *ship launching airbag*, distribusi beban yang tidak merata dapat menyebabkan konsentrasi tegangan berlebih pada titik kontak antara lambung kapal dan *airbag*. Kondisi ini menjadi lebih kritis pada kapal *harbour tug* yang memiliki profil lunas tinggi, karena luas bidang kontak lunas terhadap *airbag* relatif kecil dibandingkan berat kapal, sehingga berpotensi meningkatkan tekanan kontak lokal dan risiko kegagalan *airbag*. Oleh karena itu, diperlukan rekayasa distribusi beban agar gaya tekan dari berat kapal dapat disebarkan secara lebih merata sepanjang garis tumpuan saat proses peluncuran.

Salah satu metode rekayasa distribusi beban yang dapat diterapkan adalah penambahan plat baja sementara pada bagian keel. Plat baja ini dipasang memanjang sepanjang *keel* kapal dengan lebar yang mendekati lebar lambung di area bawah, sehingga berfungsi sebagai *load spreader* untuk memperbesar luas bidang kontak antara struktur kapal dan *airbag*. Prinsip ini sejalan dengan konsep mekanika struktur, di mana peningkatan luas kontak akan menurunkan tegangan kontak (*contact stress*) yang diterima oleh bantalan elastis seperti *airbag* (Gere & Timoshenko, 2019).

2.6 Regangan

Regangan (*strain*) merupakan ukuran deformasi relatif yang dialami oleh material akibat tegangan yang bekerja. Regangan menunjukkan perubahan bentuk atau panjang suatu elemen struktur terhadap dimensi awalnya, dan secara langsung berkaitan dengan perilaku elastis maupun plastis material. Dalam analisis struktur kapal, regangan digunakan untuk mengidentifikasi sejauh mana deformasi yang terjadi masih berada dalam batas elastis yang dapat kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan (Ricardo Hasian Siagian et al., 2015).

Pada sistem *launching* berbasis *airbag*, regangan tidak hanya terjadi pada struktur baja kapal, tetapi juga berkaitan dengan respons deformasi global akibat interaksi antara kapal, plat baja sementara, dan *airbag* sebagai tumpuan elastis. Evaluasi regangan menjadi penting untuk memastikan bahwa deformasi yang terjadi selama proses *undocking* tidak mengganggu integritas struktur lunas maupun kestabilan kapal secara keseluruhan.

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L}$$

Dimana :

ε = Regangan

Δ = Panjang awal

L = Panjang total

2.7 Tegangan

Tegangan (*stress*) merupakan besaran mekanika yang menyatakan intensitas gaya internal yang timbul pada suatu material akibat pembebanan eksternal (Alie & Latumahina, 2019). Dalam struktur kapal, tegangan muncul sebagai respons terhadap gaya berat kapal, gaya reaksi tumpuan, serta tekanan kontak yang terjadi selama kondisi operasi normal maupun kondisi sementara, seperti pada proses peluncuran kapal (*launching*) (Liu & Yu, 2022). Tegangan menjadi parameter utama dalam evaluasi kekuatan struktur karena secara langsung berkaitan dengan batas kemampuan material dalam menahan beban tanpa mengalami kegagalan.

Pada proses *launching* kapal menggunakan *ship launching airbag*, beban kapal tidak didistribusikan secara merata sepanjang dasar lambung

(Hendra Gonawan et al., 2023c). Kondisi ini terutama terjadi pada kapal dengan profil lunas tinggi, di mana bidang kontak antara lunas kapal dan *airbag* relatif sempit. Akibatnya, gaya reaksi *airbag* terfokus pada area tertentu sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan lokal yang tinggi pada struktur lunas dan pelat dasar kapal. Konsentrasi tegangan tersebut berpotensi menyebabkan deformasi lokal, retak, atau bahkan kegagalan struktur apabila melebihi tegangan izin material(Dong et al., 2024). Untuk mengurangi konsentrasi tegangan tersebut, digunakan plat baja sementara (*load spreader*) yang ditempatkan di antara struktur lunas kapal dan *airbag*. Plat baja sementara berfungsi untuk memperbesar luas bidang kontak antara kapal dan *airbag* sehingga gaya reaksi yang diterima struktur kapal dapat terdistribusi lebih merata. Dengan bertambahnya luas kontak, nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur lunas dan pelat dasar kapal diharapkan mengalami penurunan secara signifikan.

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

Dimana :

σ = Tegangan normal (Pa atau Mpa)

ΔF = Gaya Normal yang bekerja (N)

ΔA = Luas penampang atau luas kontak (m²)

2.8 *Finite Element Analysis (FEA)*

Finite Element Analysis (FEA) merupakan metode numerik yang digunakan secara luas dalam bidang rekayasa untuk menganalisis respons struktur terhadap berbagai kondisi pembebanan dan batasan(Hazman et al., 2025). Prinsip dasar FEA adalah mendiskretisasi suatu sistem kontinu yang kompleks menjadi elemen-elemen kecil berhingga (*finite elements*) yang saling terhubung melalui titik simpul (*nodes*). Setiap elemen dirumuskan berdasarkan persamaan keseimbangan mekanika, hubungan konstitutif material, serta kompatibilitas deformasi, sehingga perilaku struktur secara keseluruhan dapat direpresentasikan melalui sistem persamaan aljabar yang dapat diselesaikan secara komputasional(Sarkar, 2024). Pendekatan ini memungkinkan analisis struktur dengan geometri rumit, material

heterogen, dan kondisi kontak yang sulit diselesaikan menggunakan metode analitis konvensional (Kim et al., 2022).

Dalam konteks rekayasa struktur kapal, FEA berperan penting untuk mengevaluasi distribusi tegangan, deformasi, dan gaya reaksi pada komponen struktur akibat beban statis maupun kuasi-statis. Metode ini sangat relevan untuk menganalisis kondisi peluncuran kapal (*launching*), di mana struktur kapal berinteraksi langsung dengan media tumpuan elastis seperti *ship launching airbag*. Interaksi tersebut melibatkan fenomena kontak nonlinier dan distribusi beban yang tidak merata, khususnya pada kapal dengan karakteristik lunas tinggi, sehingga analisis numerik berbasis FEA diperlukan untuk memvisualisasikan dan mengkuantifikasi konsentrasi tegangan serta respons struktur secara lebih akurat (Hendra Gonawan et al., 2023c).

Penerapan FEA pada analisis proses *undocking* memungkinkan pemodelan interaksi antara struktur kapal, plat baja sementara sebagai elemen penyebar beban, dan *airbag* sebagai tumpuan elastis (Yu et al., 2015b). Melalui pemodelan ini, perubahan pola distribusi beban dan tekanan kontak dapat dianalisis dengan membandingkan konfigurasi sistem sebelum dan sesudah penambahan plat baja. Dengan demikian, FEA berfungsi sebagai alat bantu verifikasi dan validasi terhadap perhitungan analitis berbasis standar maupun metode perhitungan elastik *launching*, sekaligus memberikan gambaran visual mengenai efektivitas rekayasa distribusi beban yang diusulkan.

Selain itu, FEA memungkinkan evaluasi parameter keselamatan struktur melalui hasil keluaran seperti deformasi total, tegangan normal pada area kritis. Informasi ini penting untuk memastikan bahwa tegangan yang terjadi selama proses *undocking* masih berada di bawah batas izin material, serta untuk mengidentifikasi potensi risiko kegagalan struktural maupun kerusakan *airbag* akibat tekanan lokal yang berlebihan. Oleh karena itu, penggunaan metode *Finite Element Analysis* dalam penelitian ini menjadi pendekatan yang logis dan ilmiah untuk mendukung analisis teknis peluncuran kapal *harbour tug* berlunas tinggi secara komprehensif dan terukur.

Halaman ini sengaja dikosongkan