

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Landasan Teori

Pada bab ini penulis menjelaskan bagaimana landasan teori yang terkait dan relevan pada optimalisasi *frame upper Car Deck* kapal RoRo menggunakan metode perhitungan *section modulus* terhadap upaya penambahan muatan kapal. Hal ini dilakukan agar penulis dapat mempermudah penelitian yang akan di teliti.

##### 2.1.1 Kapal Ro-ro



Gambar 2.1 Kapal roro

Sumber : <https://gmi-agency.com/wp-content/uploads/2024/11/c39dd7ea3e3.jpeg>

Kapal Roll-on/Roll-off (RoRo) merupakan jenis kapal yang dirancang khusus untuk memfasilitasi transportasi kendaraan darat dan kargo melalui sistem pemuatan dan pembongkaran yang efisien (Ariany et al., 2018). Konsep dasar dari kapal RoRo adalah kemampuan untuk mengangkut kendaraan yang dapat bergerak sendiri di atas geladak kapal, sehingga proses *loading* dan *unloading* menjadi lebih cepat dan efisien dibandingkan dengan metode konvensional (Ika Wulandari et al., 2022). Dalam konteks ini, istilah "*roll-on/roll-off*" menggambarkan cara kendaraan naik dan turun dari kapal melalui ramp atau pintu khusus, yang membuatnya berbeda dari jenis kapal lainnya yang memerlukan penggunaan derek atau alat bantu lainnya untuk memindahkan muatan (Parvasi et al., 2022)

Secara struktural, kapal RoRo dilengkapi dengan komponen utama seperti *bottom plate, deck, bulkhead, longitudinal and transverse stiffeners* yang

menopang beban yang ada di kapal dan gaya dinamis saat kapal beroperasi (Windyandari et al., 2022). Struktur ini harus didesain agar mampu mendistribusikan beban secara merata ke seluruh bagian lambung kapal, termasuk mempertimbangkan kekuatan terhadap lenturan, geser, dan kelelahan akibat siklus muatan berulang (Man et al., 2021). *Ramp* biasanya diletakkan di buritan atau haluan, dan dirancang dengan kemiringan tertentu agar kompatibel dengan kendaraan berukuran besar.

Desain kapal RoRo modern juga memperhatikan fleksibilitas dalam pengaturan ruang muat maka dari itu beberapa kapal RoRo dilengkapi dengan *deck* kendaraan yang dapat disesuaikan tingginya atau diatur dalam konfigurasi bertingkat untuk menampung kendaraan berbagai jenis, dari sedan hingga truk berat (Soupeze, 2021). Untuk menunjang fleksibilitas ini, struktur penopang seperti *transversal frame* dan *longitudinal girder* harus memenuhi persyaratan kekuatan yang ketat sesuai regulasi klasifikasi seperti IMO atau BKI (Soupeze, 2021).

Secara keseluruhan, kapal RoRo adalah kombinasi antara sistem logistik yang efisien dan sistem struktur yang kompleks (Tao et al., 2024). Dalam konteks penelitian ini, kapal RoRo diposisikan sebagai wadah struktural yang dianalisis dari sisi kekuatan dan efisiensinya, khususnya di bagian *upper Car Deck* yang menopang beban kendaraan. Desain ulang elemen struktural seperti *frame* dan *deck* bertujuan untuk meningkatkan kapasitas muatan tanpa mengorbankan kekuatan struktur kapal itu sendiri (Majnarić et al., 2022).

### **2.1.2 Struktur dan Konstruksi Utama Kapal RoRo**

Struktur kapal terdiri atas komponen-komponen utama seperti pelat dasar (*bottom plate*), geladak (*deck*), sekat (*bulkhead*), dan penopang membujur maupun melintang (*longitudinal and transverse stiffeners*) (A. L. Ikhwan & Misbah, 2019). Salah satu struktur penting dalam mendukung kekuatan kapal adalah *frame*, struktur ini berfungsi untuk menahan beban tekan dan lentur akibat muatan serta gaya dari gelombang laut (Suci et al., 2020). Penempatan dan desain struktur ini harus mempertimbangkan prinsip kekuatan dan kekakuan sesuai standar klasifikasi.

### **2.1.2.1 Bottom Plate**

*Bottom plate* kapal merupakan salah satu komponen struktur utama dalam desain dan konstruksi kapal karena komponen ini berfungsi untuk memberikan kestabilan dan kekuatan pada bagian bawah kapal, sehingga kapal dapat mengapung dengan aman, serta melindungi struktur internal kapal dari kerusakan yang disebabkan oleh tekanan dari bawah (misalnya oleh dasar laut) (Wulandari et al., 2021).

Selain berfungsi untuk memberikan kestabilan dan kekuatan *bottom plate* juga berfungsi untuk mendistribusikan beban dari kapal, termasuk beban statis yang berasal dari kapal itu sendiri (berat kapal, struktur kapal) dan beban dinamis yang berasal dari muatan yang diangkut (Jokosisworo & Sebastian, 2012). Pada kapal Ro-Ro, muatan utama berupa kendaraan (mobil, truk, dll.) yang bergerak naik dan turun melalui ramp maka dari itu *bottom plate* harus cukup kuat untuk menahan beban ini tanpa mengalami kerusakan.

### **2.1.2.2 Bulkhead**

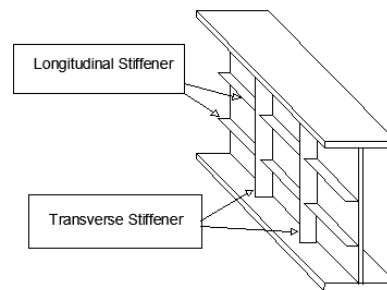
*Bulkhead* pada kapal khususnya kapal RoRo adalah struktur vertikal yang membagi ruang kapal menjadi beberapa kompartemen atau bagian. Biasanya, *bulkhead* terbuat dari bahan yang kuat, seperti baja, dan dipasang secara vertikal di sepanjang lambung kapal (A. Ikhwan et al., 2019). *Bulkhead* berfungsi untuk meningkatkan kekuatan struktural kapal, mengatur pembagian beban, serta memisahkan berbagai area di dalam kapal sesuai dengan fungsinya. Maka dari itu secara umum, *bulkhead* digunakan untuk memastikan kapal memiliki kestabilan yang lebih baik dan dapat bertahan dari tekanan dinamis, serta membantu menjaga keamanan kapal jika terjadi kebocoran atau kebakaran (Manik et al., 2019).

### **2.1.2.3 Stiffener**

*Stiffener* pada kapal, khususnya kapal Ro-Ro (*Roll-on/Roll-off*), adalah elemen struktural yang digunakan untuk memperkuat dan meningkatkan

kekakuan bagian-bagian tertentu dari kapal, seperti lambung dan *deck* (Tuswan et al., 2018).

*Stiffener* umumnya berupa balok atau batang yang dipasang secara membujur (*longitudinal*) atau melintang (*transverse*) pada struktur kapal, dan memiliki fungsi utama untuk menahan beban dan mencegah deformasi pada plat atau dinding kapal yang lebih besar (Alamsyah, Falevi, et al., 2021). Kedua jenis *stiffener* ini saling bekerja bersama untuk memberikan dukungan tambahan terhadap beban yang diterima kapal, serta menjaga kestabilan dan kekuatan struktural kapal selama pelayaran.



Gambar 2.2 *Stiffener*

Sumber: <https://berlianarswendokonstruksikapal1.wordpress.com/2016/04/06/bentuk-bentuk-stiffener/>

#### 2.1.2.4 *Deck*

*Deck* pada kapal Ro-Ro (*Roll-on/Roll-off*) merupakan komponen struktur kapal yang sangat vital, berfungsi sebagai area tempat kendaraan bermotor seperti mobil, truk, bus, atau kendaraan berat lainnya (Putra et al., 2025). *Deck* ini adalah permukaan horizontal pada kapal yang memungkinkan kendaraan untuk naik dan turun dari kapal dengan mudah melalui ramp tanpa alat bantu tambahan, sesuai dengan karakteristik desain kapal Ro-Ro.

Fungsi utama *deck* pada kapal Ro-Ro adalah untuk menampung kendaraan dan menahan beban yang diberikan oleh kendaraan yang diparkir (Kalam, Mulyatno, & Good, 2017). *Deck* harus dapat menahan beban dinamis yang dihasilkan dari kendaraan yang bergerak dan beban statis dari kendaraan yang diparkir (Man et al., 2021b). Selain itu, *deck* pada kapal Ro-Ro juga

berperan dalam mendukung stabilitas kapal selama pelayaran karena stabilitas kapal sangat bergantung pada distribusi beban yang merata antara bagian *deck* dan *frame* (Alamsyah, Zulkarnaen, et al., 2021).

*Deck* pada kapal Ro-Ro umumnya dibagi menjadi beberapa bagian, termasuk *Car Deck*, *upper Car Deck*, dan *weather deck*, tergantung pada desain dan fungsinya

### **2.1.3 Upper Car Deck Kapal RoRo**

*Upper Car Deck* merupakan salah satu bagian struktural utama dari kapal RoRo, yang berfungsi sebagai lantai atas untuk kendaraan atau muatan beroda, dimana struktur ini didesain khusus untuk menahan beban kendaraan dan juga menopang beban dek lain di atasnya (Kalam, Mulyatno, & Good, 2017).

*Upper Car Deck* secara fungsional digunakan untuk menambah kapasitas muat kendaraan di atas deck utama, sekaligus menjadi bagian dari struktur longitudinal kapal yang menahan beban lentur akibat distribusi muatan sepanjang kapal (Chen & van Hemmen, 2022). Dalam desain nya, *upper Car Deck* juga harus mempertimbangkan dimensi vertikal kapal, posisi pusat gravitasi, dan dampaknya terhadap stabilitas kapal secara keseluruhan.

Secara konstruksi, *upper Car Deck* dibentuk dari kombinasi pelat baja (deck plating), balok memanjang (*longitudinal girders*), dan balok penyangga melintang (*transverse frames*). Sistem ini dikenal sebagai *grillage structure*, yaitu susunan balok silang yang bertujuan untuk menyebarkan beban kendaraan ke elemen struktur yang lebih besar seperti girder utama dan sisi lambung kapal (Liu et al., 2024). Kombinasi elemen ini memungkinkan *upper Car Deck* menahan tekanan dari roda kendaraan serta beban global akibat gaya lentur saat kapal berada dalam kondisi oleng (*rolling*) atau melengkung (*hogging/sagging*).

### **2.1.4 Frame Upper Car Deck kapal RoRo**

*Frame* pada *upper Car Deck* kapal Ro-Ro adalah elemen struktural yang terletak pada bagian atas kapal yang digunakan untuk menopang *deck* atau geladak tempat kendaraan diparkir (Tuswan et al., 2018). Komponen ini terdiri dari serangkaian balok dan penopang yang saling terhubung, membentuk jaringan struktural yang kuat untuk menahan beban kendaraan. Ketika kendaraan diparkir

di geladak, berat mereka diterima oleh rantai geladak dan kemudian ditransfer ke *frame*, yang selanjutnya menyalurkan beban tersebut ke lambung kapal, *bulkhead*, dan elemen struktural lainnya (Kim et al., 2025).

Setiap *frame* didesain untuk menahan beban berat kendaraan yang diparkir di atasnya, baik beban statis maupun beban dinamis akibat getaran dan gerakan kapal selama pelayaran. Fungsi utama dari *frame upper Car Deck* adalah untuk memberikan kekuatan tambahan pada *deck* kapal yang menerima beban dinamis. Beban dinamis ini berasal dari pergerakan kendaraan yang dimuat dan turun dari kapal, serta gaya yang timbul akibat kondisi laut yang tidak stabil, seperti ombak dan guncangan.(Eyres & Bruce, 2012). *Frame* yang kuat dan efisien membantu menstabilkan kapal dan mencegah deformasi atau kerusakan pada *deck* yang dapat membahayakan keselamatan kapal dan muatan.

### **2.1.5 Peraturan dan Standar Desain Konstruksi Kapal**

PT. Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) merupakan lembaga klasifikasi nasional yang memiliki peran sangat vital dalam menetapkan dan memelihara standar konstruksi kapal di Indonesia (Apriliani et al., 2020). Sebagai otoritas yang berwenang, BKI memastikan bahwa setiap kapal yang dibangun atau beroperasi di perairan Indonesia memenuhi persyaratan keselamatan dan struktural yang ketat melalui berbagai aturan dan regulasi yang berlaku (Wilastari, 2020). Standar yang dikembangkan oleh BKI mencakup beragam aspek teknis konstruksi kapal, yang meliputi elemen-elemen struktural penting seperti *web frame*. *Web frame* sendiri memiliki peran penting dalam menjaga integritas struktural kapal, memberikan dukungan pada kerangka utama kapal, serta menahan berbagai gaya dan beban yang diterima kapal selama operasional di laut (Palippui, 2022). Seiring dengan perkembangan teknologi desain kapal, standar yang ditetapkan oleh BKI pun terus diperbarui untuk mencerminkan kemajuan dalam arsitektur kapal, teknik fabrikasi, serta untuk memastikan keselarasan dengan persyaratan maritim internasional yang semakin kompleks (Miliniati & Setyawan, 2021).

Dalam hal desain *web frame*, peraturan BKI sangat menekankan pada dimensi dan kekuatan elemen-elemen struktural tersebut. *Web frame* yang

dirancang harus memenuhi spesifikasi yang ketat terkait dengan ukuran, kekuatan, serta ketahanan terhadap beban yang akan diterima kapal selama beroperasi (Munandar et al., 2019). Desain *web frame* sendiri bervariasi tergantung pada sistem rangka kapal yang diterapkan. BKI merekomendasikan penggunaan sistem rangka yang berbeda berdasarkan panjang kapal. Sebagai contoh, untuk kapal dengan panjang antara 90 hingga 100 meter, sistem rangka memanjang umumnya lebih direkomendasikan (Tuswan et al., 2023). Oleh karena itu, dalam merancang atau memodifikasi kerangka struktural kapal, peraturan BKI mengharuskan adanya perhitungan yang cermat terhadap *scantling* yaitu dimensi dari komponen struktural untuk menentukan ukuran profil yang tepat bagi *web frame* dan elemen struktural lainnya yang terkait (Eko Budi Djatmiko & Mas Murtedjo, 2017).

Proses perhitungan *scantling* ini memerlukan perhatian khusus terhadap modulus penampang dan momen inersia setiap elemen konstruksi. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa *web frame* tidak hanya memenuhi standar dimensi yang telah ditetapkan, tetapi juga memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban dan tegangan yang dialami kapal selama operasi. Dengan perhitungan yang tepat, akan mendapatkan ukuran dan karakteristik struktural *web frame* yang sesuai dengan standar yang disyaratkan oleh BKI. Seluruh elemen ini harus mematuhi ketentuan yang berlaku agar kapal dapat mendapatkan sertifikasi dari BKI dan tetap memenuhi persyaratan keselamatan yang diperlukan untuk beroperasi di perairan Indonesia.

Keterkaitan antara peraturan BKI dan desain *web frame* ini menunjukkan betapa pentingnya peran regulasi dalam proses perubahan atau redesain komponen struktural kapal. Dalam hal ini, peraturan BKI berfungsi sebagai panduan utama dalam memastikan bahwa setiap perubahan, baik itu pada desain *web frame* atau elemen struktural lainnya, tidak hanya mengikuti prinsip-prinsip teknik yang berlaku, tetapi juga memenuhi persyaratan keselamatan dan kekuatan yang ditetapkan. Oleh karena itu, setiap modifikasi yang dilakukan pada *web frame* kapal harus tunduk pada ketentuan yang ditetapkan oleh BKI, agar kapal yang dimodifikasi tetap terjamin kualitas dan keselamatannya sesuai standar yang berlaku.

### 2.1.6 Section Modulus dan Aplikasinya pada *Frame Kapal*

*Section modulus* ( $W$ ) merupakan parameter fundamental dalam desain struktur kapal yang menunjukkan kemampuan penampang dalam menahan momen lentur. Menurut (BKI, 2025), *section modulus* dihitung sebagai:

$$W = I/y$$

Dimana:

- $I$  = momen inersia penampang ( $\text{cm}^4$ )
- $y$  = jarak dari titik berat ke serat terluar (cm)

Untuk *frame* kapal, *section modulus* minimum dihitung berdasarkan:

$$W = 0,55 \times e \times l^2 \times P \times n \times k \text{ (cm}^3\text{)}$$

Dimana :

- $W$  = Modulus Penampang
- 0.55 = nilai konstanta
- $e$  = modulus elastisitas
- $l^2$  = panjang web frame
- $P = P_{S3}$  = Beban sisi dibawah garis air
- $n = n_c = \text{number of coss tie coefficient}$
- $k = \text{coefficient material baja}$

Tabel 2.1 *Reduction coefficient*  $n_c$

Number of Cross Tie	$n_c$
0	1,0
1	0,5
3	0,3
$\geq 3$	0,2

Pemilihan profil *frame* harus mempertimbangkan efisiensi struktural, yaitu mencapai *section modulus* yang diperlukan dengan berat minimum.

### 2.2 Kajian Penelitian Terdahulu

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji kekuatan struktural *car deck* kapal ferry Ro-Ro dengan berbagai pendekatan. Analisis kekuatan *car deck* kapal ferry Ro-Ro 500 GT menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan variasi beban statis, dan

menemukan bahwa *car deck* merupakan komponen struktur vital yang berperan menahan muatan kendaraan dan geladak di atasnya (Kalam, Mulyatno, & Rindo, 2017). Sejalan dengan itu, penelitian mengenai respon struktur *car deck* akibat variasi jarak *stiffener* pada kapal ferry Ro-Ro dan membuktikan bahwa perubahan jarak antar *stiffener* berpengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan pada dek, meskipun kajian tersebut belum menyentuh aspek optimalisasi profil *frame* secara menyeluruh (Tri Pangestu & Ika Wulandari, 2021). Kemudian, pengembangan mengenai pendekatan berbasis bahasa pemrograman untuk mengoptimasi dimensi *web frame* dan *sentra* kapal sesuai peraturan BKI dengan sistem konstruksi melintang juga telah dilakukan pada jurnal “Optimasi Web Frame dan Senta Kapal Sesuai Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dengan Bahasa Pemrograman”, namun kajiannya masih bersifat umum pada komponen *web frame* dan *sentra* tanpa menyentuh implikasi terhadap kapasitas muatan *upper car deck* secara spesifik (Miliniati & Setyawan, 2021).

Penelitian lain yang lebih relevan dengan konteks modifikasi struktural menunjukkan bahwa sebagian besar studi berfokus pada identifikasi kerusakan dan evaluasi kondisi *existing*, bukan pada perancangan ulang yang berorientasi peningkatan kapasitas. Pada jurnal “*A Finite Element Analysis of Structural Strength of Ferry Ro-Ro’s Car Deck*” telah dilakukan analisis FEM terhadap kekuatan *car deck* ferry Ro-Ro dan menghasilkan nilai *safety factor* berdasarkan standar BKI, namun kajiannya terbatas pada kondisi eksisting tanpa mengusulkan modifikasi dimensi profil (Pawara et al., 2022a). Pengajuan metode optimasi desain *lightweight* untuk *vehicle deck* kapal Ro-Ro menggunakan *mixed-integer sequence quadratic programming* yang menghasilkan skema struktur optimal, tetapi pendekatannya bersifat umum dan tidak mempertimbangkan implementasi perhitungan *section modulus* berbasis regulasi BKI secara spesifik (LI Ziqi et al., 2024). Analisis pada jurnal “Analisis Kekuatan Konstruksi *Car Deck* Akibat Penambahan Panjang pada Ro-Ro *Passenger Ship*” mengenai kekuatan konstruksi *car deck* akibat penambahan panjang kapal Ro-Ro dengan metode komputasi struktural ditemukan adanya perubahan distribusi tegangan yang signifikan, namun fokus kajiannya adalah penambahan dimensi longitudinal kapal, bukan optimalisasi profil *frame upper car deck* untuk tujuan penambahan kapasitas muatan (Naufal Zaibidi et al., 2021).

Berdasarkan tinjauan terhadap seluruh penelitian terdahulu di atas, teridentifikasi celah penelitian (*research gap*) yang konsisten: mayoritas kajian menggunakan *Finite*

*Element Method* untuk evaluasi kekuatan statis kondisi *existing*, sementara belum ada penelitian yang secara khusus mengintegrasikan optimalisasi dimensi profil *web frame upper car deck* berbasis perhitungan *section modulus* manual sesuai *Rules for Hull* BKI 2025 dengan tujuan peningkatan kapasitas muatan yang terukur dan diimplementasikan secara nyata di lapangan. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengkaji ulang profil *web frame* kondisi *existing* yang teridentifikasi *over-designed*, merancang profil yang lebih optimal, memverifikasinya terhadap persyaratan minimum BKI, dan mengukur implikasinya terhadap peningkatan kapasitas muatan serta kelayakan ekonomi operasional kapal.