

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tongkang (*Deck Cargo Barge*)

Tongkang atau *Barge* adalah jenis kapal dengan lambung datar atau kotak apung besar, digunakan untuk pengangkutan barang dan ditarik dengan kapal tunda atau digunakan untuk menampung pasang surut seperti pada dermaga apung. Tongkang sendiri tidak memiliki sistem penggerak seperti kapal pada umumnya. Pembuatan tongkang juga berbeda karena hanya konstruksi, tanpa sistem seperti kapal pada umumnya. Tongkang jenis ini merupakan alat angkut yang cocok untuk mengangkut beban berat berdimensi besar seperti struktur bangunan lepas pantai dan bentang jembatan. (Rohman, 2018). Gambar kapal tongkang dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Contoh Kapal *Deck Cargo Barge*

(Sumber: vlmaritime)

2.2 Beban pada Kapal

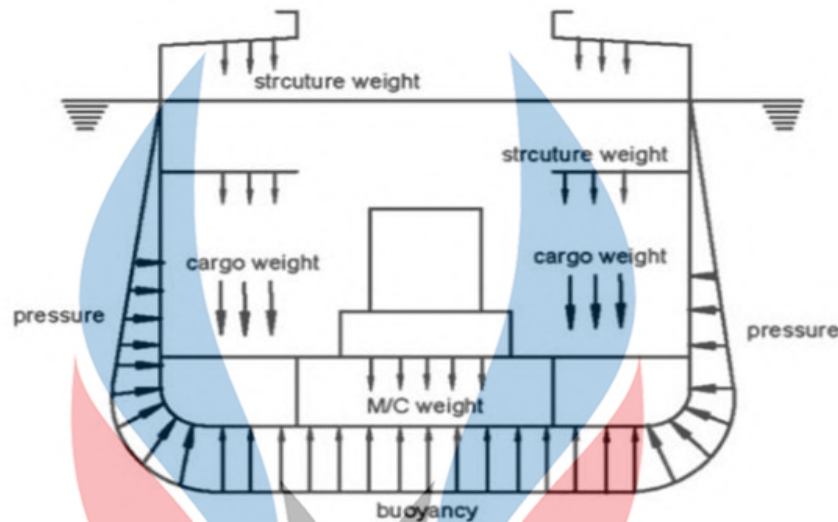
Beban yang bekerja pada kapal diklasifikasikan menjadi empat macam, yaitu: (Rosyid, 2000).

a. Beban Statis

Beban yang berubah hanya apabila berat total kapal berubah akibat bongkar muat, pemakaian bahan bakar, atau perubahan kapal itu sendiri.

- Berat kapal dan seluruh isinya.

- Gaya tekan ke atas (*bouyancy*) saat diam atau bergerak.
- Beban suhu (*thermal*) dalam lambung kapal.
- Beban terpusat akibat *dry docking* dan kandas.



Gambar 2. 2Representasi pembebanan statis pada struktur kapal

(Sumber: Mandal, 2017)

b. Beban Dinamis Berfrekuensi Rendah

Beban yang berubah dalam rentang periode waktu beberapa detik sampai beberapa menit. Dikatakan berfrekuensi rendah karena beban tersebut relatif rendah frekuensinya dibandingkan dengan respon getaran kapal yang dapat menyebabkan terjadinya resonansi.

- Variasi tekanan pada lambung akibat gelombang.
- Variasi tekanan pada lambung akibat gerakan osilatoris kapal.
- Reaksi inersial akibat percepatan massa kapal beserta isinya.

c. Beban Dinamis Berfrekuensi Tinggi

Beban yang berubah dengan frekuensi yang cukup tinggi untuk menimbulkan respon getaran pada kapal. Besarnya beban tersebut relatif kecil namun dampaknya bisa saja cukup signifikan akibat adanya resonansi.

- Beban hidrodinamis akibat propeller.
- Beban akibat permesinan kapal.
- Beban hidroelastis akibat interaksi komponen kapal (misal kemudi) dengan fluida disekeliling kapal.
- Beban akibat gelombang pendek yang memiliki frekuensi sama dengan

- frekuensi natural kapal.

d. Beban Tumbuk

Beban akibat terjadinya *slamming* atau pukulan gelombang dan lambung haluan atau bagian lambung lainnya, termasuk pengaruh siraman air di atas geladak. Beban tumbuk dapat mengakibatkan getaran transient pada lambung, yang disebut sebagai *whipping*.

2.2.1 Beban Longitudinal Kapal

Kondisi Berikut ini merupakan beberapa kriteria persyaratan untuk kekuatan memanjang sebuah kapal menurut IACS. Aturan mengenai perhitungan kekuatan memanjang kapal dapat dilihat pada IACS *Chapter 11 – Longitudinal strength Standard*, Edisi Revisi 2020.

a. Momen Lentur akibat gelombang (M_w)

$$M_w (+) = +0.19C_1C_2L_1^2B.C'_b (kN - m) \quad (2.1)$$

$$M_w (-) = -0.11C_1C_2L_1^2B(C'_b + 0.7) (kN - m) \quad (2.2)$$

Dimana,

C_1 = Seperti yang diberikan oleh rumus berikut:

$$10.75 - (300 - L_1 / 100) 1.5 \text{ for } L_1 \leq 300m \quad (2.3)$$

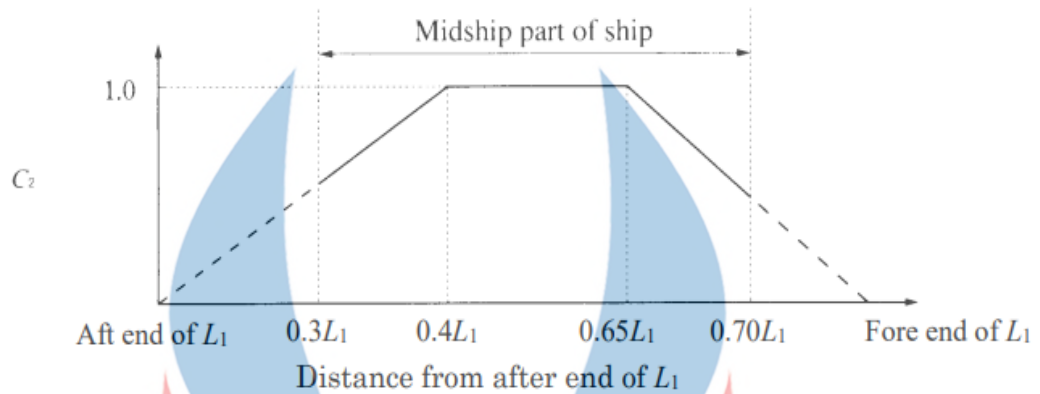
$$10.75 \text{ for } 300m < L_1 \leq 350m \quad (2.4)$$

$$10.75 - (L_1 - 350) / 150) 1.5 \text{ for } 350m < L_1 \quad (2.5)$$

L_1 = Jarak (m) diukur pada garis air pada draft scantling d_s dari sisi depan *Stem* ke pusat *rudder stock*. L_1 harus tidak kurang dari 96% dan tidak perlu melebihi 97% dari panjang ekstrim di garis air pada sarat scantling d_s . Pada kapal tanpa batang kemudi (misalnya kapal yang dilengkapi dengan pendorong azimuth), panjang Aturan L_1 harus diambil sama dengan 97% dari panjang ekstrem di garis air pada sarat d_s yang kecil.

C'_b = Volume perpindahan sesuai dengan sarat scantling d_s dibagi dengan $L_1B_s d_s$. Namun, nilainya harus diambil sebagai 0,6, di mana nilainya kurang dari 0,6.

C_2 = Koefisien yang ditentukan dari panjang pada posisi di mana penampang melintang lambung kapal dipertimbangan, seperti yang diberikan pada Gambar. 2.5



Gambar 2. 3 Kurva koefisien C_2

(Sumber: IACS, 2020)

b. Gaya Geser akibat gelombang (F_w)

$$F_w (+) = +0.3C_1C_3L_1B(C'_b + 0.7) \text{ (kN)} \quad (2.6)$$

$$F_w (-) = -0.3C_1C_4L_1B(C'_b + 0.7) \text{ (kN)} \quad (2.7)$$

Dimana,

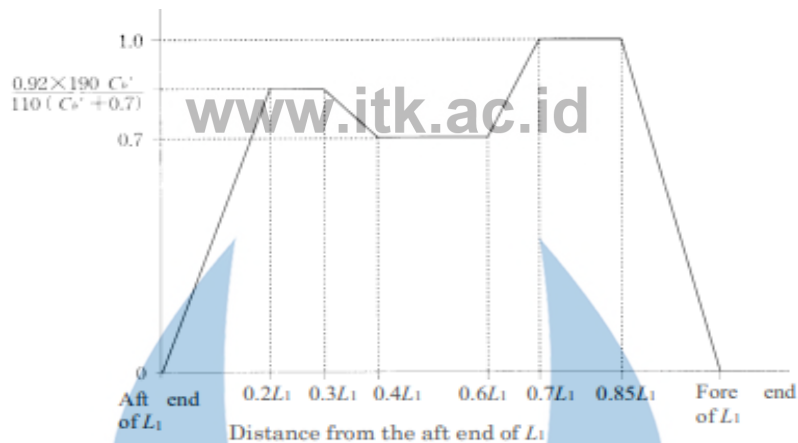
C_1 = Seperti yang diberikan oleh rumus berikut:

$$10.75 - (300 - L_1 / 100) 1.5 \text{ for } L_1 \leq 300\text{m} \quad (2.8)$$

$$10.75 \text{ for } 300\text{m} < L_1 \leq 350\text{m} \quad (2.9)$$

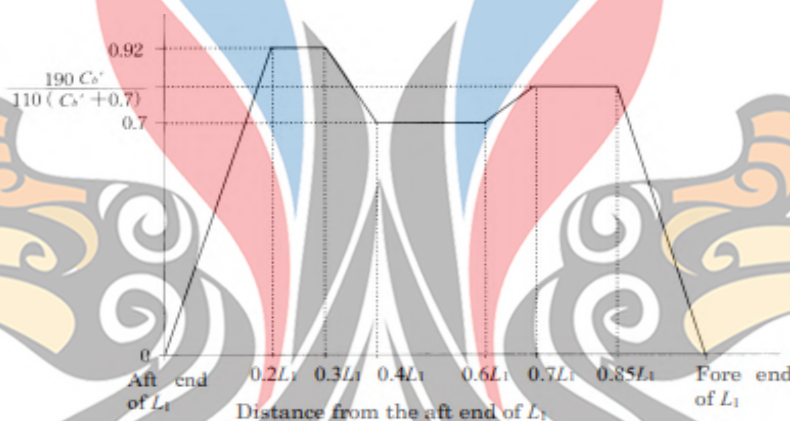
$$10.75 - (L_1 - 350 / 150) 1.5 \text{ for } 350\text{m} < L_1 \quad (2.10)$$

C'_b = Volume perpindahan sesuai dengan sarat scantling d_s dibagi dengan $L_1B_s d_s$. Namun, nilainya harus diambil sebagai 0,6, di mana nilainya kurang dari 0,6.



Gambar 2. 4 Kurva koefisien C_3

(Sumber: IACS, 2020)



Gambar 2. 5 Kurva koefisien C_4

(Sumber: IACS, 2020)

2.3 Konstruksi Kapal

Konstruksi kapal terdiri dari beberapa komponen struktur yang cukup rumit berupa panel-panel pelat berpenegar. Komponen struktural dasar untuk konstruksi kapal adalah panel pelat yang dikakukan, bisa datar atau melengkung. Panel kaku ini dibuat dari pabrik. Seluruh struktur lambung bersama dengan superstruktur pada dasarnya merupakan rakitan panel-pelat yang kaku ini. Pengakukan selalu dilakukan dalam arah ortogonal, yaitu akan ada pengaku baik dalam arah memanjang maupun melintang. Pengaku longitudinal dan gelagar adalah yang membentang sepanjang kapal dan pengaku melintang, rangka dan balok tegak lurus terhadap panjang, yaitu sepanjang arah melintang. Sistem pengaku ini disebut sebagai sistem rangka. Baik itu penguat memanjang atau penguat melintang. Namun dalam suatu struktur kapal dapat terjadi kombinasi keduanya, misalnya

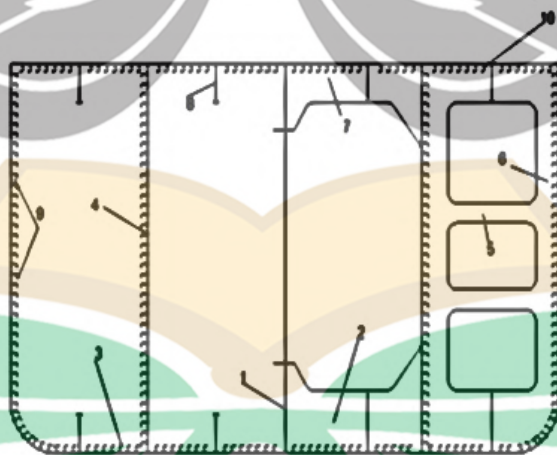
geladak dan double bottom dikakukan dengan sistem rangka memanjang sedangkan cangkang samping dikaku secara melintang, yaitu dengan sistem rangka melintang (Mandal, 2017).

Pada dasarnya badan kapal terdiri dari komponen - komponen konstruksi yang letaknya arah melintang dan memanjang. Dalam penyusunan komponen - komponen tersebut menjadi konstruksi badan kapal secara keseluruhan dikenal beberapa cara yang sering dipakai dalam praktek, antara lain (Prakoso, 2015):

1. Sistem konstruksi melintang
2. Sistem konstruksi memanjang
3. Sistem konstruksi kombinasi

2.3.1 Konstruksi Memanjang

Sistem rangka konstruksi memanjang ialah konstruksi dimana padanya bekerja beban yang diterima oleh rangka konstruksi dan diuraikan pada hubungan – hubungan kaku melintang kapal dengan pertolongan balok memanjang. Dalam hal konstruksi, walaupun ada balok – balok melintang, tetapi bila balok tersebut merupakan kekakuan yang kecil dalam hubungan konstruksi tidak menahan (memegang) balok – balok memanjang, maka system konstruksi tetap disebut system konstruksi memanjang (Prakoso, 2015).

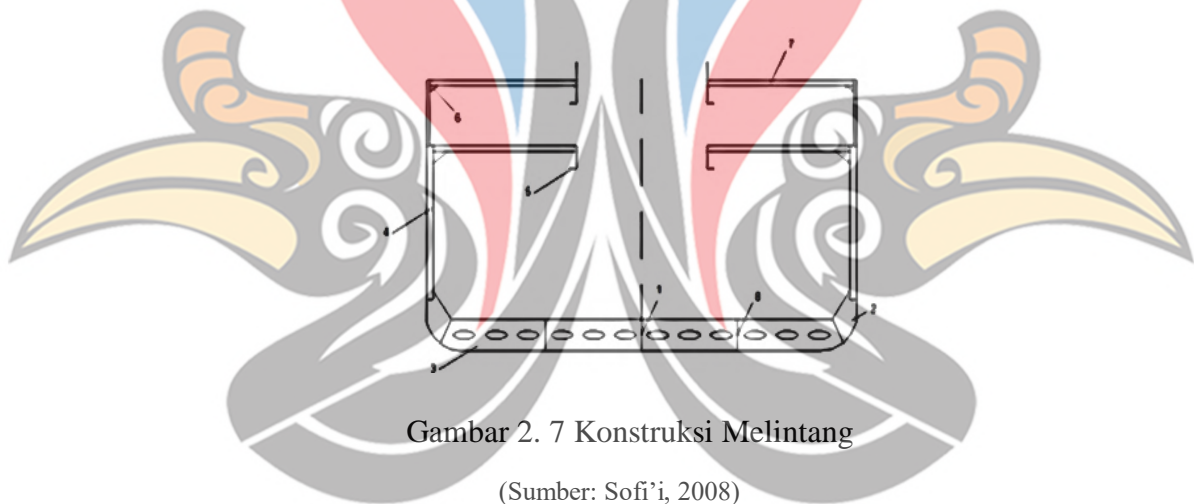


Gambar 2. 6 Konstruksi Memanjang

(Sumber: Sofi'i, 2008)

2.3.2 Konstruksi Melintang

Dalam sistem ini gading-gading (*frame*) dipasang vertikal (mengikuti bentuk *body plan*) dengan jarak antara (*spacing*), ke arah memanjang kapal, satu sama lain yang rapat (sekitar antara 500 mm – 1000 mm, tergantung panjang kapal). Pada geladak, baik geladak kekuatan maupun geladak-geladak lainnya, dipasang balok-balok geladak (*deck beam*) dengan jarak antara yang sama seperti jarak antara gading-gading. Ujung masing-masing balok geladak ditumpu oleh gading-gading yang terletak pada vertikal yang sama. Pada alas dipasang wrang-wrang dengan jarak yang sama pula dengan jarak antara gading-gading sedemikian rupa, sehingga masing-masing wrang, gading-gading dan balok geladak membentuk sebuah rangkaian yang saling berhubungan dan terletak pada satu bidang vertikal sesuai penampang melintang kapal pada tempat yang bersangkutan. Jadi, sepanjang kapal berdiri rangkaian-rangkaian (*frame ring*) ini dengan jarak antara yang rapat sebagaimana disebutkan di atas. (Sofi'i, 2008).



Gambar 2. 7 Konstruksi Melintang

(Sumber: Sofi'i, 2008)

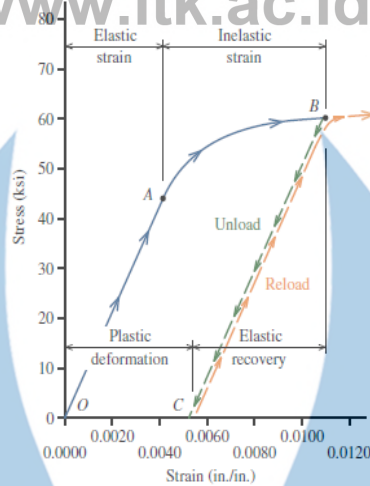
2.4 Elastostika

Elastostatika adalah studi tentang elastisitas linier di bawah kondisi keseimbangan, di mana semua gaya pada benda elastis berjumlah nol, dan perpindahan bukan fungsi waktu. Teori elastisitas adalah contoh dari pendekatan umum untuk masalah fisika, yaitu untuk linierisasi mereka. Linearisasi dapat diterima bila mengalami tegangan dan regangan. Namun, ketika dideformasi oleh gaya yang cukup kuat, media elastis dapat menjadi stabil secara netral terhadap perpindahan kecil, yang kemudian dapat tumbuh hingga amplitudo besar. Elastostatik membahas tiga bagian yang terdiri dari:

1. Tegangan (*Stress*)
2. Regangan (*Strain*)

3. Deformasi

www.itk.ac.id



Gambar 2. 8 Kurva Tegangan-Regangan

(Sumber: Philpot, 2017)

2.4.1 Tegangan

Logam diuji untuk memastikan bahwa kekuatan, keuletan, dan ketangguhannya sesuai dengan fungsi yang harus dilakukan. Dalam membandingkan kekuatan berbagai logam, tegangan dan regangan sering dirujuk dan perlu didefinisikan. Tegangan adalah ukuran kemampuan suatu bahan untuk menyalurkan beban, dan intensitas tegangan dalam bahan, yang merupakan beban per satuan luas, sering dinyatakan. Beban per satuan luas hanya diperoleh dengan membagi beban yang diberikan dengan luas penampang material, misalnya jika beban tarik sebesar P kg diterapkan pada batang yang memiliki luas penampang A mm², maka tegangan tarik di bahan batang adalah $P/A = \text{kg/mm}^2$ (Eyres, 2007).

Apabila batang ini ditarik dengan gaya P , maka tegangannya adalah tegangan tarik (*tensile stress*); apabila gayanya mempunyai arah sebaliknya, sehingga menyebabkan batang tersebut mengalami tekan, maka terjadi tegangan tekan (*compressive stress*). Karena tegangan ini mempunyai arah yang tegak lurus permukaan potongan, maka tegangan ini disebut tegangan normal (*normal stress*). Jadi, tegangan normal dapat berupa tarik atau tekan (Gere,2000):

www.itk.ac.id

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

(2.11)

Dimana:

σ = tegangan (N/mm²)

F = gaya yang bekerja atau beban (N)

A = luas penampang (mm²)

www.itk.ac.id

Persamaan $\sigma = P/A$ hanya berlaku jika tegangan terbagi rata di seluruh penampang batang. Kondisi ini terjadi jika gaya aksial P bekerja melalui pusat berat penampang, sebagaimana ditunjukkan di bagian lain dari subbab ini. Apabila beban P tidak bekerja di pusat berat, maka lentur batang akan terjadi, dan analisis yang lebih rumit dibutuhkan. (Gere, 2000)

2.4.2 Regangan

Regangan total didefinisikan sebagai deformasi total yang dialami benda ketika dikenai beban yang diberikan. Regangan adalah deformasi per satuan panjang atau satuan volume, misalnya jika beban tarik P diterapkan pada batang dengan panjang asli l menghasilkan perpanjangan, atau perpanjangan, batang sebesar dl, maka regangan tarik yang berbanding dasar dari batang yang dikenai perpanjangan per satuan panjang, yaitu (Eyres, 2007):

$$\frac{\text{Extension}}{\text{Original length}} \text{ or } \frac{dl}{l} \quad (2.12)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.13)$$

Dimana:

ϵ = regangan

ΔL = pertambahan panjang (mm)

L = Panjang mula-mula (mm)

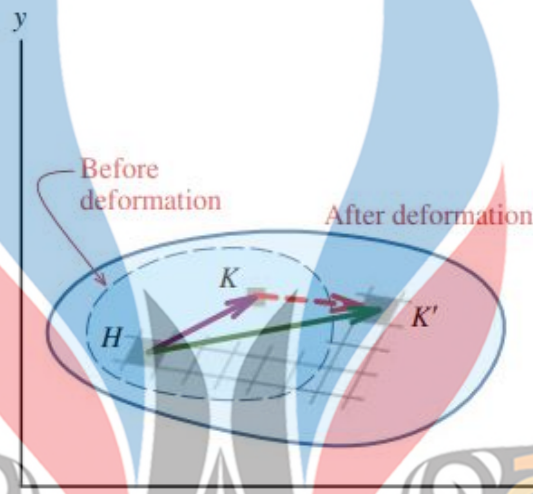
Jika suatu objek mengalami tarik, maka regangannya disebut regangan tarik, yang menunjukkan perpanjangan bahan. Jika suatu objek tersebut mengalami tekan, maka regangannya adalah regangan tekan dan batang tersebut memendek. Regangan tarik biasanya bertanda positif dan regangan tekan bertanda negatif. Regangan ϵ disebut regangan normal karena regangan ini berkaitan dengan tegangan normal (Gere,2000).

2.4.3 Deformasi

Ketika perpindahan disebabkan oleh beban yang diterapkan atau perubahan suhu, titik-titik individu dari tubuh bergerak relatif satu sama lain. Perubahan dalam dimensi apa pun yang terkait dengan perpindahan yang disebabkan oleh beban atau suhu ini

www.itk.ac.id

dikenal sebagai deformasi. Gambar 2.8 menunjukkan suatu objek sebelum dan sesudah deformasi. Untuk penyederhanaan, deformasi yang ditunjukkan pada gambar sedemikian rupa sehingga titik H tidak berubah lokasi; namun, titik K pada benda yang tidak terdeformasi bergerak ke lokasi K' setelah deformasi. Karena deformasi, vektor posisi antara H dan K' jauh lebih panjang daripada vektor HK pada benda yang tidak terdeformasi (Philpot, 2017).



Gambar 2. 9 Deformasi pada suatu objek

(Sumber: Philphot, 2017)

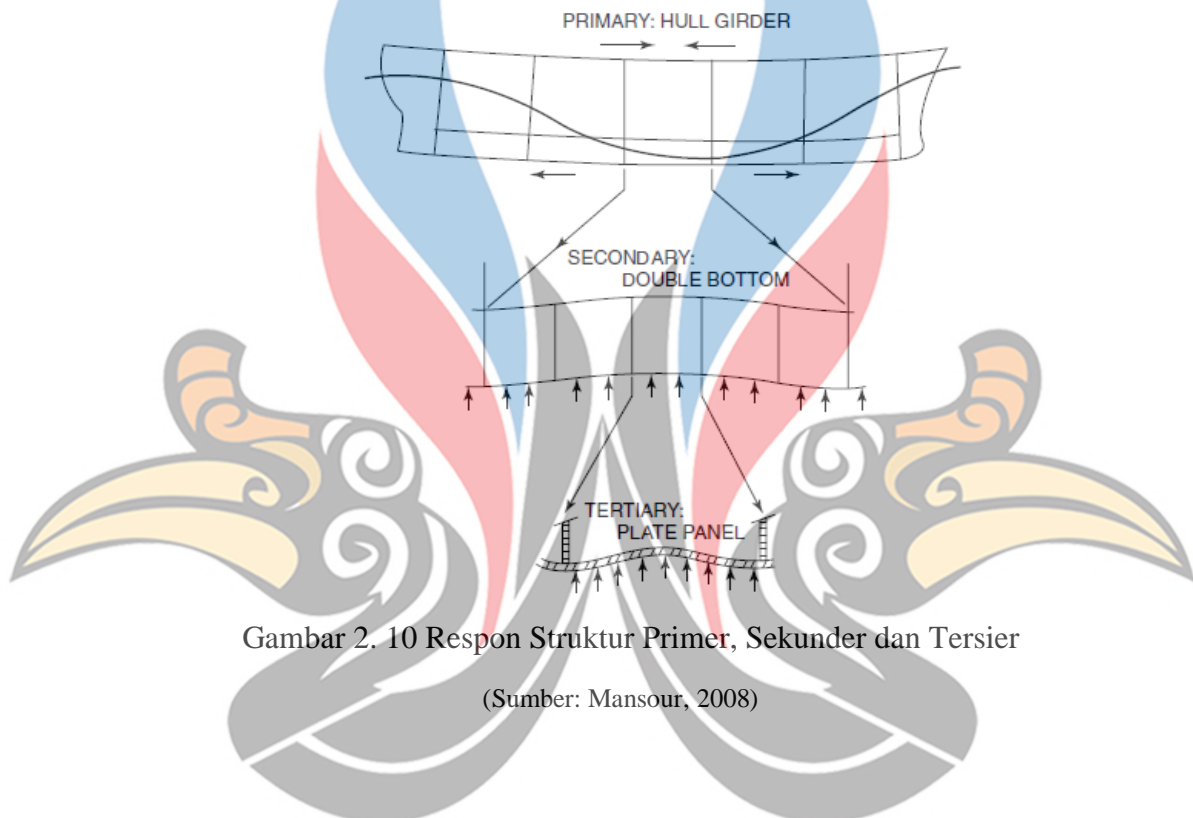
2.5 Respon Struktur Kapal

Susunan geometris dan tegangan atau defleksi yang dihasilkan pola respons struktur kapal yang khas sedemikian rupa sehingga biasanya mudah untuk membagi struktur dan respons terkait menjadi tiga komponen, yang diberi label primer, sekunder, dan tersier. Ini diilustrasikan pada Gambar. 2 dan dijelaskan sebagai berikut: bahan berperilaku elastis jika berubah bentuk pada tingkat yang seragam dalam menanggapi setiap diterapkan dan kembali ke bentuk aslinya ketika gaya tersebut dihilangkan (Mansour,2008):

1. Respon utama: respons seluruh lambung kapal ketika menekuk dan memutar sebagai balok, di bawah distribusi longitudinal eksternal vertikal, lateral, dan beban puntiran.
2. Respon sekunder terdiri dari tegangan dan defleksi dari satu panel dari pelat yang dikakukan (misalnya, panel dari struktur bawah yang terdapat di antara dua sekat melintang yang berdekatan). Pembebanan panel normal terhadap bidangnya, dan

batas panel sekunder biasanya dibentuk oleh panel sekunder lainnya (kulit samping dan sekat). Beban tepi batas adalah juga hadir karena lentur utama lambung.

3. Respon tersier: menggambarkan defleksi di luar bidang dan tegangan terkait dari panel pelapisan individu. Pembebanan adalah normal pada panel, dan batas-batasnya dibentuk oleh pengaku panel sekunder yang merupakan bagiannya. Beban tepi batas juga ada sebagai akibat dari tekukan primer lambung kapal.



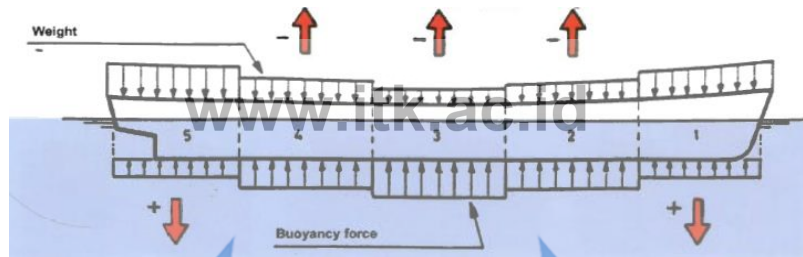
Gambar 2. 10 Respon Struktur Primer, Sekunder dan Tersier

(Sumber: Mansour, 2008)

2.6 Kekuatan Longitudinal Kapal

Ketika sebuah kapal berada di air yang tenang, gaya ke atas total atau gaya apung (*bouacy*) akan sama dengan berat total kapal. secara lokal keseimbangan ini tidak akan terwujud karena kapal bukanlah benda homogen yang berbentuk persegi panjang. Perbedaan lokal antara tekanan ke atas dan berat lokal menimbulkan gaya geser yang menyebabkan tegangan longitudinal. Gaya *longitudinal* terjadi karena (Dokkum, 2003):

- a. Berat di kapal tidak sama pada bagian depan dan belakang kapal
- b. Tekanan ke atas yang berbeda karena bentuk lambung yang tecelup air.



Gambar 2. 11 Perbedaan gaya tekan ke atas dan berat kapal

(Sumber: Dokkum, 2003)

Dalam Sebuah kapal diidealisasikan seperti sebuah balok saat mengalami respon primer dimana lambung kapal tersebut dapat dianggap sebagai sebuah box-shape girder yang kemudian disebut sebagai hull girder (SNAME, 2003, p. 18/21). Beban yang bekerja pada hull girder terdiri dari komponen beban statis dan dinamis. Berikut merupakan beban-beban yang diasumsikan bekerja pada hull girder.

- a. Momen Lengkung (M)
- b. Gaya Geser (Q)
- c. Beban Puntir
- d. Beban Lokal

Sedangkan untuk momen lengkung terdiri dari 3 komponen:

- c. Momen Lengkung pada air tenang (M_{sw})
- d. Momen Lengkung akibat gelombang (M_w)
- e. Momen Lengkung pada air tenang (*Slamming*)

Sedangkan untuk gaya geser terdiri dari 2 komponen:

- a. Gaya Geser pada air tenang (F_{sw})
- b. Gaya Geser akibat gelombang (F_w)

Faktanya kapal yang berlayar pada laut yang bergelombang, pada setiap wilayah laut tertentu memiliki karakteristik gelombang yang berbeda-beda. Pada saat sebuah kapal bertemu dengan gelombang, gaya tekan ke atas yang bekerja pada kapal menjadi tidak merata. Kondisi tersebut mengakibatkan sistem pembebanan pada kapal berubah, sehingga besarnya gaya geser dan momen lengkung kapal akibat gelombang juga berubah. Pada Kondisi momen lengkung yang terjadi akibat gelombang (M_{ww}) dua kondisi Hogging dan Sagging sebagai berikut:

a. Kondisi *Hogging*

Kondisi dimana puncak gelombang berada pada kedua ujung kapal. Hal tersebut mengakibatkan gaya tekan ke atas pada daerah sekitar midship berkurang dan pada bagian ujung-ujungnya bertambah, sehingga kapal mengalami tekukan kebawah, dimana bagian bawah (*bottom*) kapal mengalami tarik dan bagian atas (*deck*) mengalami tekan seperti pada gambar 2.11.

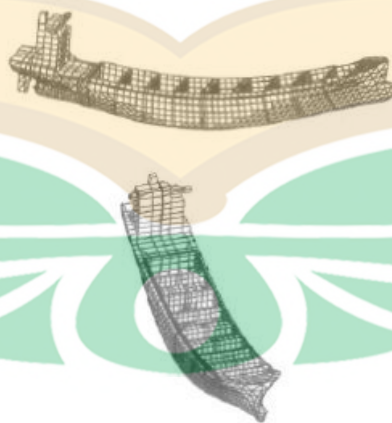


Gambar 2. 12 Kondisi *Hogging*

(Sumber: Dokkum, 2003)

b. Kondisi *Sagging*

Kondisi dimana puncak gelombang berada daerah *midship* kapal. Hal tersebut mengakibatkan gaya tekan ke atas pada daerah sekitar midship bertambah dan pada bagian ujung-ujungnya berkurang, sehingga kapal mengalami tekukan keatas, dimana bagian bawah (*bottom*) kapal mengalami tekan dan bagian atas (*deck*) kapal mengalami Tarik seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2. 13 Kondisi *Sagging*

(Sumber: Dokkum, 2003)

2.7 Faktor Keamanan Kapal

Safety factor adalah faktor yang menunjukkan tingkat kemampuan suatu bahan teknik menerima beban dari luar, yaitu beban tekan maupun tarik. Gaya yang diperlukan agar terjadi tingkat optimal bahan di dalam menahan beban dari luar sampai akhirnya menjadi pecah disebut dengan beban ultimat (*ultimate load*). Dengan membagi beban ultimat ini dengan luas penampang, kita akan memperoleh kekuatan ultimat (*ultimate strength*) atau tegangan ultimat (*ultimate stress*) dari suatu bahan. Untuk desain bagian struktur tingkat tegangan disebut tegangan ijin (*allowable stress*) dibuat lebih rendah dari pada kekuatan ultimat yang diperoleh dari pengujian “statis”. Hal ini penting untuk berbagai pertimbangan. Besar gaya yang dapat bekerja pada bangunan yang dirancang jarang diketahui secara pasti (Rosid, 2017).

Jika kegagalan struktural harus dihindari, maka beban yang dapat dipikul suatu struktur harus lebih besar daripada beban yang akan dialaminya pada masa pakai. Kemampuan suatu struktur untuk menahan beban disebut kekuatan, jadi kriteria terdahulu dapat ditulis ulang sebagai berikut. Kekuatan aktual suatu struktur harus melebihi kekuatan yang dibutuhkan. Rasio kekuatan aktual terhadap kekuatan yang dibutuhkan disebut faktor keamanan (Gere,2000):

$$FS = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{working\ stress}} \quad (2.14)$$

σ_{yield} = tegangan luluh material (N/mm²),

$\sigma_{working\ stress}$ = tegangan maksimum yang bekerja pada struktur (N/mm²)

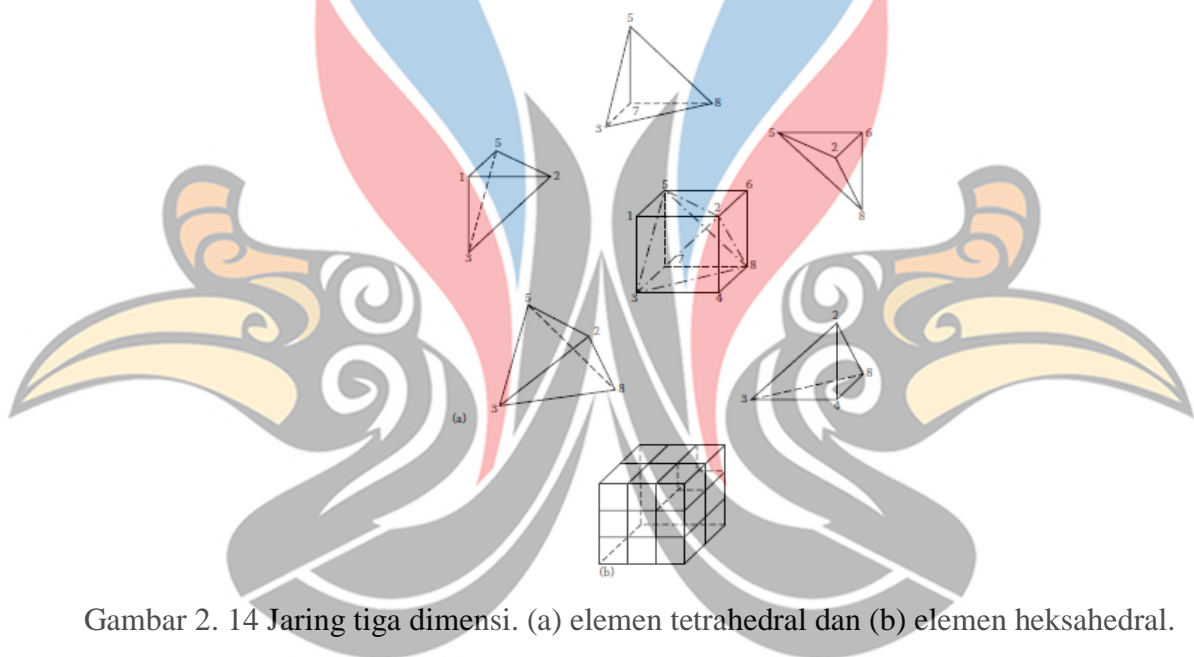
FS = *safety factor* (FS>1)

Tentu saja, faktor keamanan harus lebih besar daripada 1,0 jika kegagalan ingin dihindari. Bergantung pada situasinya, digunakan faktor keamanan dengan harga sedikit di atas 1,0 hingga 1 0. (Gere,2000).

2.8 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode elemen hingga adalah teknik numerik yang memberikan solusi perkiraan untuk persamaan diferensial yang memodelkan masalah yang timbul dalam fisika dan teknik. Seperti skema diferensi hingga yang lebih umum digunakan, metode elemen hingga mengurangi masalah yang didefinisikan dalam ruang geometris (atau domain), untuk menemukan solusi dalam sejumlah titik yang terbatas dengan membagi domain menjadi wilayah yang lebih kecil (*mesh*). Dalam metode *finite difference* di masa lalu (Heinrich,2017).

Dalam domain 1-D, diskritisasi ke dalam larik elemen tidak sulit untuk dipahami ukuran elemen kecil umumnya diperlukan di mana variabel berubah dengan cepat. Di wilayah 2-D, pembuatan mesh yang dapat diterima menjadi lebih merepotkan; beberapa mata jaring mungkin perlu dibuat sebelum mata jaring yang sesuai dibuat yang memberikan hasil yang wajar. Jenis elemen 3-D yang paling umum adalah variasi dari elemen 2-D, yaitu *tetrahedron* dan *hexahedron*, atau bata, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Elemen linier dibatasi pada sisi lurus (bidang); elemen kuadrat dan orde tinggi dapat memiliki permukaan melengkung. Jaring 3-D sederhana yang terbuat dari elemen *tetrahedral* ditunjukkan pada Gambar 2.13a; *mesh* yang terdiri dari elemen persegi panjang (bata) ditunjukkan pada Gambar 2.13b (Heinrich,2017).



Gambar 2. 14 Jaring tiga dimensi. (a) elemen tetrahedral dan (b) elemen heksahedral.

(Sumber: Heinrich, 2017)

Konsep keadaan tegangan dan regangan dua dimensi dan hubungan tegangan/regangan untuk tegangan bidang dan regangan bidang diperlukan untuk memahami sepenuhnya pengembangan dan penerapannya matriks kekakuan untuk elemen tegangan bidang/regangan bidang. Oleh karena itu, tegangan independen ada dan diwakili oleh matriks kolom vector tegangan (Logan, 2017):

$$\{\sigma\} = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

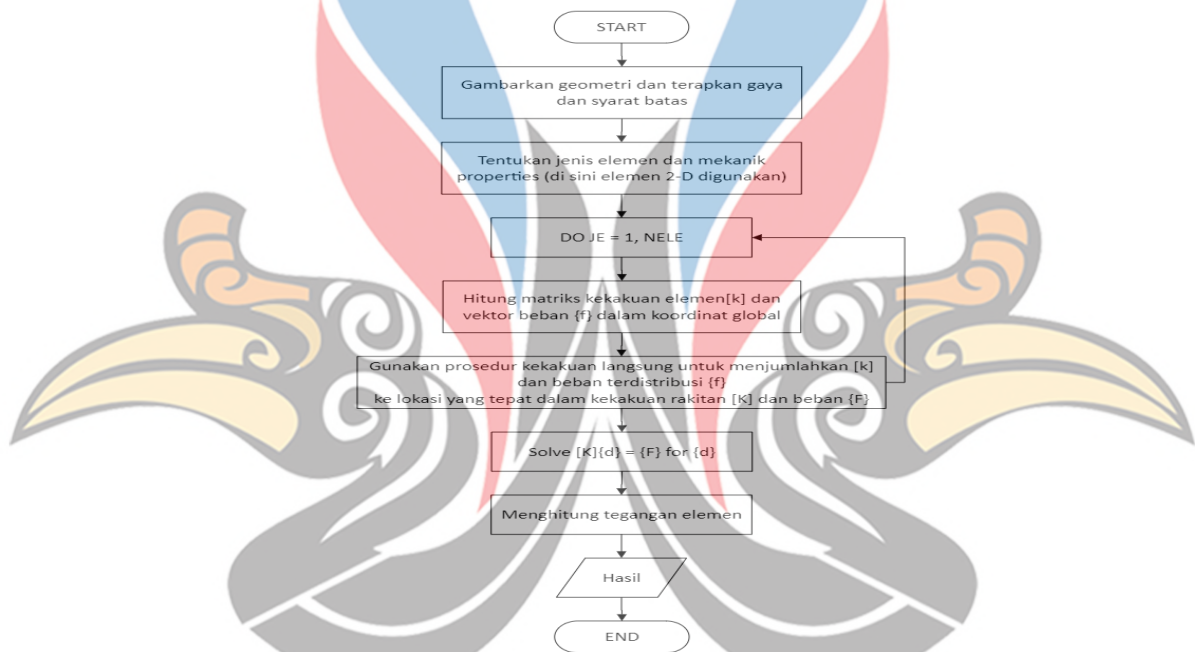
Regangan dinyatakan oleh perpindahan simpul elemen, gaya simpul juga dapat dinyatakan dengan perpindahan simpul. Dari definisi umum regangan normal dan geser dan penggunaannya, diwakili oleh matriks vector regangan (Logan,2017):

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \gamma_{xy}\} \quad (2.16)$$

Di sini (x_i, y_i) , (x_j, y_j) , dan (x_m, y_m) masing-masing adalah koordinat simpul yang diketahui dari simpul i , j , dan m . Matriks Displasemen nodal diberikan oleh (Logan, 2017):

$$\{d\} = \left(\frac{d_i}{d_j d_m} \right) = (u_i \ v_i \ u_j \ v_j \ u_m \ v_m) \quad (2.17)$$

Pada Gambar 2.13, kami menyajikan diagram alir dari proses elemen hingga yang umum digunakan untuk analisis masalah tegangan bidang dan regangan bidang berdasarkan teori (Logan, 2017).



Gambar 2. 15 Diagram Alir Elemen Hingga

(Sumber: Logan, 2017)

Dalam prosedur penggunaan metode elemen hingga diperoleh matriks dan persamaan kekakuan struktur global dengan menggunakan metode kekakuan langsung sebagai berikut:

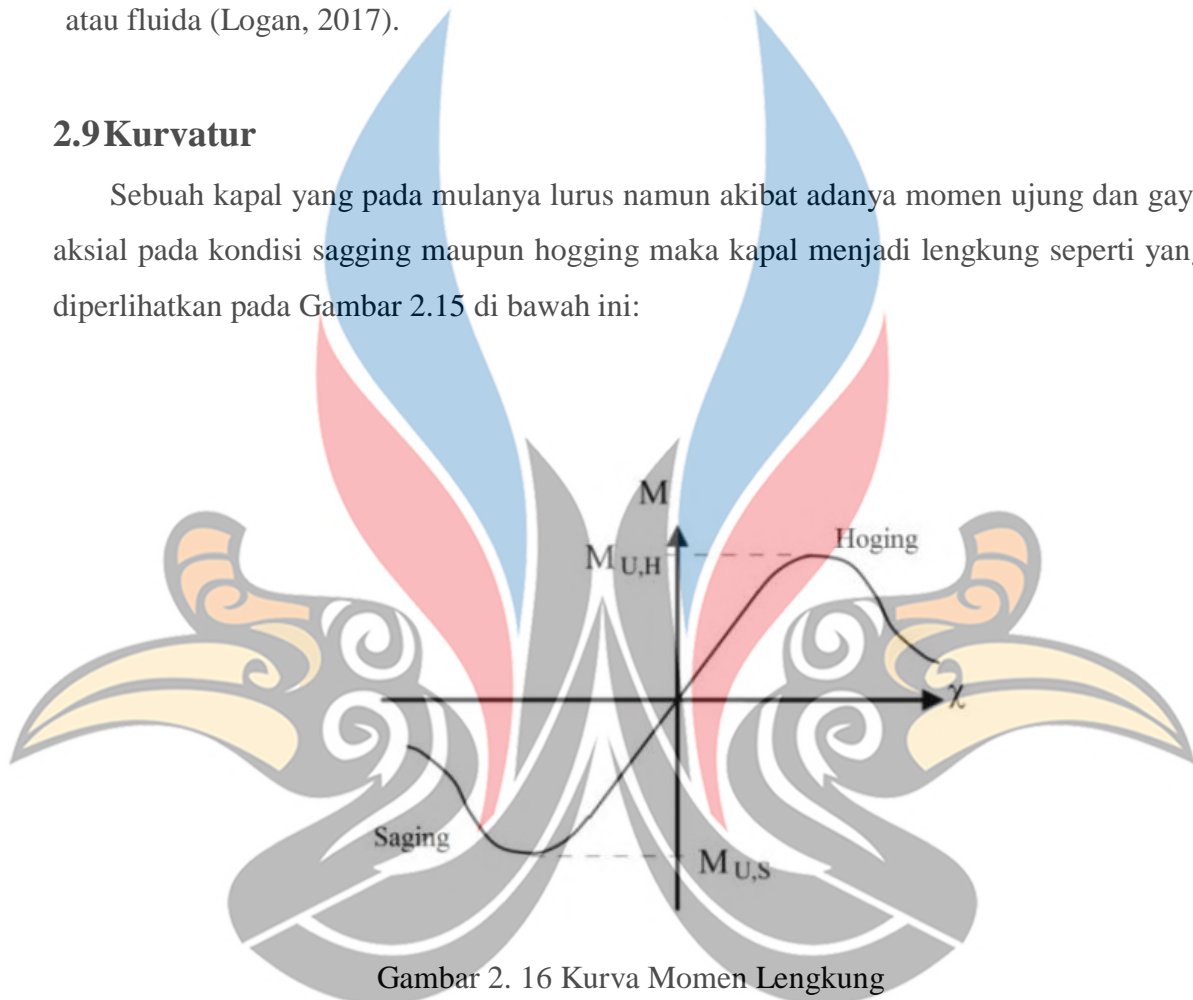
$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (2.18)$$

dimana, dalam Persamaan. (2.18), semua matriks $[K]$ kekakuan elemen didefinisikan dalam sistem koordinat $x - y$ global, $\{d\}$ adalah matriks perpindahan (*Displacement*) struktur total.

Secara singkat, solusi untuk masalah struktural biasanya mengacu pada penentuan perpindahan pada setiap simpul dan tegangan di dalam setiap elemen yang membentuk struktur yang menerima beban yang diterapkan. Dalam masalah nonstruktural, nodal yang mungkin tidak diketahui, misalnya, suhu atau tekanan fluida karena fluks termal atau fluida (Logan, 2017).

2.9 Kurvatur

Sebuah kapal yang pada mulanya lurus namun akibat adanya momen ujung dan gaya aksial pada kondisi saging maupun hogging maka kapal menjadi lengkung seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.15 di bawah ini:



Gambar 2. 16 Kurva Momen Lengkung

(Sumber: IACS, 2015)

Pada gambar 2.15 berdasarkan pada pendekatan iterasi inkremental yang disederhanakan, bila kapasitasnya didefinisikan sebagai puncak dari hasil kurva momen lengkung ($M-\chi$) pada kondisi hogging (positif) dan saging (negatif), yaitu χ adalah kurva lengkung memanjang lambung [$1/m$]. Kapasitas momen lentur ultimit dari penampang melintang gelagar lambung, dalam hogging dan kondisi kendur, didefinisikan sebagai nilai maksimum kurva momen lentur M terhadap kelengkungan χ dari penampang melintang yang dipertimbangkan ($M_{U,H}$ untuk kondisi *hogging* dan $M_{U,S}$ untuk kondisi *saging*). Kelengkungan χ positif untuk kondisi hogging dan negatif untuk kondisi kendur.

Tabel 2.1. Daftar Penelitian Terdahulu

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
1.	<p>“<i>Longitudinal strength analysis of ship hulls of composite materials under sagging moments</i>”, Nia-Zhong Chen dan C. Guedes Soares, 2005.</p>	<p>Permasalahan: Untuk mengetahui kegagalan material dan kerusakan akhir dari struktur geladak dan memperhitungkan kekuatan <i>longitudinal</i> dengan lambung berbahan komposit pada saat terjadi penekukan (<i>Buckling</i>).</p> <p>Metode: Metode yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pemodelan lambung kapal, analisis kekuatan memanjang menggunakan aplikasi berbasis finite <i>element method</i> dan analisis elemen hingga nonlinier</p> <p>Hasil: Tegangan dan Regangan maksimum yang didapatkan pada adalah sebagai berikut:</p> <ol style="list-style-type: none"> Kelenturan <i>Stiffener</i> dikeluarkan sebesar 1.655×10^{10} N/m² pada <i>Hull Girder</i> Regangan tekuk dan kegagalan regangan material <i>stiffener</i> yang dikeluarkan sebesar 0.00648 dan 0.0105 pada Geladak Kelengkungan penampang pada tekukan dan kegagalan material yang dikeluarkan sebesar 0.00209 dan 0.00338 pada Deck Kekuatan penekukan dan kekuatan material pada kondisi <i>sagging</i> yang dikeluarkan sebesar 3.46×10^7 N/m² dan 5.6×10^7 N/m² Kekuatan batas kerusakan longitudinal lambung kapal di bawah <i>sagging</i> batas momen sebesar 6.12×10^{12} Nm. Untuk kondisi <i>Hogging</i> tegangan tidak melebihi tegangan izin, sedangkan untuk kondisi <i>Hogging</i> tegangan tidak melebihi tegangan izin.
2.	<p>“<i>Construction strength</i></p>	<p>Permasalahan: untuk mengetahui pentingnya beban</p>

<p><i>analysis of landing craft tank conversion to passenger ship using finite element method”</i>, Mohammad Nurul Misbah, Dony Setyawan dan Wisnu Murti Dananjaya, 2018.</p>	<p>internal berupa kargo dan suprastruktur terhadap seluruh kondisi beban dan analisis kekuatan longitudinal perhitungan ulang kekuatan longitudinal karena kondisi beban yang berbeda dengan jenis kapal sebelumnya.</p> <p>Metode: Metode yang digunakan pada penelitian ini ialah pemodelan lambung kapal, analisis kekuatan memanjang menggunakan aplikasi berbasis <i>finite element method</i>.</p> <p>Hasil: Tegangan maksimum dan variasi Korosi Pelat yang didapatkan pada adalah sebagai berikut:</p> <ol style="list-style-type: none"> Tegangan maksimum pada semua 4(empat) kondisi beban terjadi pada badan tengah paralel masing-masing dengan nilai 72.393 MPa, 74.792 MPa, 129,29 MPa, dan 132,40 MPa. Berkurangnya ketebalan pelat sekitar -1 mm menjadi -2 mm dari tebal awal juga menyebabkan nilai kekuatan longitudinal semakin menurun. Analisis tersebut dapat dijadikan acuan apabila seluruh bagian kapal mengalami korosi akibat penuaan dan kondisi kapal selama berlayar. Penambahan ketebalan pelat sekitar +1 mm sampai + 2 mm dari pelat awal juga menyebabkan nilai kekuatan longitudinal meningkat. Ketika seluruh bagian kapal telah terkorosi ke titik kondisi kritis akibat penuaan, analisis tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk jadwal perawatan dan perbaikan pelat. dan kondisi kapal selama berlayar. Nilai tegangan pada variasi ketebalan pelat -2 mm dari pelat awal pada saat kondisi beban kosong masih dapat diterima walaupun nilainya lebih tinggi dari tegangan ijin yaitu 90.079 MPa untuk
--	---

		<p>gelombang hogging, karena nilai tegangan tersebut masih dibawah kekuatan luluh material yaitu 235MPa.</p> <p>e. Nilai tegangan pada variasi ketebalan pelat -2 mm dari pelat awal pada saat kondisi beban penuh masih diterima meskipun nilainya lebih tinggi dari tegangan izin yaitu 155,50 MPa untuk gelombang sagging, karena nilai tegangan masih di bawah material kekuatan luluh yaitu 235 MPa.</p>
3.	<p>‘ANALISA KEKUATAN STRUKTUR TANK DECK PADA KAPAL (LST) LANDING SHIP TANK KRI. TELUK BINTUNI 7000 DWT MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA’. Fasya Nurayoga, Imam Pujo Mulyatno, Berlian Arswendo.2016</p>	<p>Permasalahan: untuk membuktikan tank deck pada kapal LST KRI Teluk Bintuni telah memenuhi tegangan ijin dariclass yang digunakannya, yaitu <i>Lloyd’s Register</i> dan analisa penyebaran tegangan yang terjadi akibat beban muatan, struktur bangunan atas dan pengaruh gelombang air laut. ditinjau dari angka factor keamanan (<i>margin of safety</i>) Kondisi tegangan von mises pada konstruksi ring pada geladak tank</p> <p>Metode: Metode yang digunakan pada penelitian ini ialah pemodelan lambung kapal dan analisis kekuatan memanjang menggunakan software finite element (Msc NASTRAN-PATRAN).</p> <p>Hasil: tegangan pada tanki <i>deck</i> kapal LST KRI.Teluk Bintuni dalam beberapa variasi kondisi dengan analisa menggunakan program numerik MSC NASTAN –Patran adalah sebagai berikut:</p> <p>a. <i>Loading Condition 1</i> tegangan <i>ring construction deck</i> yang tanpa muatan pada saat air tenang 65 N/mm², saat sagging 174 N/mm dan hogging 158,2 N/mm²</p>

		<p>b. <i>Loading Condition 2</i> tegangan <i>ring construction deck</i> yang berisi 12 unit <i>Tank Leopard</i> dan 2 unit Panzer 2A VBL pada saat air tenang 96,6 N/mm² saat sagging 170 N/mm, saat hogging 142 N/mm²</p> <p>c. <i>Loading Condition 1</i> tegangan konstruksi deck yang tanpa muatan pada saat air tenang 41,8 N/mm², saat sagging 54,6 N/mm, saat hogging 48,1 N/mm²</p> <p>d. <i>Loading Condition 2</i> tegangan konstruksi <i>deck</i> yang tanpa muatan pada saat air tenang 63,3 N/mm², saat sagging 53,0 N/mm, saat hogging 54,6 N/mm²</p> <p>e. Tegangan von Mises terbesar pada keseluruhan ringkonstruksi terjadi pada <i>Loading Condition 1</i>, yaitu 174 N/mm².</p> <p>f. Tegangan maksimal tersebut masih berada dibawah tegangan ijin sebesar 175 N/mm², oleh karna itu dapat dikatakan struktur konstruksi tank deck kapal LST KRI.Teluk Bintuni berada pada kondisi aman.</p>
4.	<p>“ANALISIS KEKUATAN MEMANJANG AKIBAT PERUBAHAN PANJANG KAPAL FERRY Ro-Ro 687 GT”, Alamsyah, Amalia Ika Wulandari dan Ayuna Noor Aini, 2021.</p>	<p>Permasalahan: Seberapa besar tegangan regangan maksimum yang dapat diterima kapal pada kondisi hogging dan sagging dengan penambahan panjang untuk kapal Ferry Ro-Ro.</p> <p>Metode: Metode yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pemodelan <i>midship section</i>, analisis kekuatan memanjang menggunakan aplikasi berbasis <i>finite element method</i>, non-linier <i>finite element method</i> (NLFEA).</p> <p>Hasil: Tegangan dan Regangan maksimum yang didapatkan pada adalah sebagai berikut:</p> <p>a. Tegangan pada kondisi hogging yang dikeluarkan sebesar 60.95 N/mm² pada Deck</p>

		<p>b. Tegangan pada kondisi hogging yang dikeluarkan sebesar 68.71 N/mm² pada Bottom</p> <p>c. Tegangan pada kondisi sagging yang dikeluarkan sebesar 43.81 N/mm² pada Deck</p> <p>d. Tegangan pada kondisi sagging yang dikeluarkan sebesar -47.34 N/mm² pada Bottom</p> <p>e. Pada kondisi hogging momen ultime sebesar 1.49×10^{12} Nmm dengan momen total 0.16×10^{12} Nmm lebih besar dari batas kekuatan lentur vertical, yaitu 1.21</p> <p>f. Pada kondisi sagging momen ultime sebesar -1.42×10^{12} Nmm dengan momen total -0.15×10^{12} Nmm lebih besar dari batas kekuatan lentur vertical, yaitu 1.1</p> <p>e. Untuk kondisi Hogging tegangan tidak melebihi tegangan izin, sedangkan untuk kondisi Hogging tegangan tidak melebihi tegangan izin.</p>
5.	<p>“ANALISIS PENGARUH JARAK GADING TERHADAP KEKUATAN MEMANJANG KAPAL FERRY RO-RO 5000 GT”</p> <p>Amalia Ika Wulandari, Alamsyah, Nova Aprilia Dewi, 2020</p>	<p>Permasalahan: Bagaimana pengaruh jarak gading terhadap kekuatan memanjang kapal dan mengetahui jarak gading optimal untuk kapal ferry ro-ro dengan panjang 100 meter.</p> <p>Metode: Metode yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pemodelan midship section, analisis kekuatan memanjang menggunakan aplikasi ANSYS berbasis non-linier finite element method (NLFEA).</p> <p>Hasil: Tegangan maksimum yang didapatkan pada setiap variasi jarak gading adalah sebagai berikut:</p> <p>a. Tegangan pada kondisi hogging yang dikeluarkan sebesar 133.718 N/mm² dan pada kondisi sagging sebesar 57.5591 N/mm² pada jarak gading 700 mm</p> <p>b. Tegangan pada kondisi hogging yang</p>

		<p>dikeluarkan sebesar 1334.787 N/mm² dan pada kondisi sagging sebesar 59.6341 N/mm² pada jarak gading 800 mm</p> <p>c. Tegangan pada kondisi hogging yang dikeluarkan sebesar 141.175 N/mm² dan pada kondisi sagging sebesar 136.2 N/mm² pada jarak gading 900 mm</p> <p>d. Tegangan pada kondisi hogging yang dikeluarkan sebesar 151.379 N/mm² dan pada kondisi sagging sebesar 227.505 N/mm² pada jarak gading 1000 mm</p> <p>d. Tegangan pada kondisi hogging yang dikeluarkan sebesar 133.718 N/mm² pada Deck</p> <p>e. Tegangan pada kondisi hogging yang dikeluarkan sebesar 103.335 N/mm² pada Bottom</p> <p>f. Tegangan pada kondisi sagging yang dikeluarkan sebesar -75.1233 N/mm² pada Deck</p> <p>g. Tegangan pada kondisi sagging yang dikeluarkan sebesar 57.5591 N/mm² pada Bottom</p> <p>i. Pada kondisi hogging momen total 1.81×10^{12} Nmm lebih rendah dari batas momen lentur vertical, yaitu 1.88×10^{12} Nmm</p> <p>j. Pada kondisi sagging momen total 2.15×10^{12} Nmm lebih rendah dari batas momen lentur vertical, yaitu -1.33×10^{12} Nmm</p> <p>e. Untuk kondisi Hogging tegangan tidak melebihi tegangan izin dan kondisi Sagging tegangan tidak melebihi tegangan izin.</p>