

## BAB I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kapal merupakan salah satu sarana transportasi yang banyak digunakan untuk mengangkut penumpang dan barang dari satu tempat ke tempat lain. Kapal dan struktur lepas pantai berbentuk kapal rentan terhadap berbagai kecelakaan yang mungkin terjadi selama operasi, seperti kandas, tabrakan, kebakaran, ledakan, benturan dengan es, dan masih banyak lagi (Li & Kim, 2022). Kejadian-kejadian yang tidak disengaja ini menimbulkan bahaya yang signifikan pada kapal, mempengaruhi integritas strukturalnya dan membahayakan awak kapal (Li et al., 2019). Mungkin juga ada implikasi negatif terhadap sistem ekologi lingkungan laut, seperti yang disebabkan oleh tumpahnya kargo polutan dari lambung kapal yang rusak. Oleh karena itu, respon yang cepat dan darurat diperlukan untuk operasi penyelamatan dan evakuasi (Li, 2020). Dari beberapa keadaan darurat tersebut, peristiwa kandasnya kapal telah menjadi topik penelitian selama beberapa dekade. Kandasnya kapal sering kali dapat menyebabkan kerusakan yang mengakibatkan tumpahan minyak atau banjirnya kapal dan kemudian terbalik.

*Grounding* atau kandas adalah fenomena rumit yang melibatkan banyak faktor acak, seperti topologi dasar laut, sudut kemiringan kapal, tingkat pasang surut, dan kondisi gelombang, serta parameter yang sebagian besar bersifat deterministik, seperti draft, kecepatan, kondisi muatan, dan kerangka kapal. Ketika sebuah kapal kandas dan berhenti total, penting untuk menentukan kerusakan lambung bawah, topologi dasar laut, dan evolusi gaya penetrasi dan kontak selama kejadian. Penentuan ini tidak dapat dilakukan dengan mudah karena pemeriksaan lambung bawah kapal tidak dapat diselesaikan sebelum kapal dipindahkan ke galangan kapal. Secara umum, dua kategori yang berbeda dari kandas kapal dapat diidentifikasi berdasarkan respon kapal dan komponen struktur lambung yang terlibat seperti "*Stranding*" yang didominasi oleh aksi vertikal dasar laut di bagian bawah setelah kapal berhenti total dan "*Powered Grounding*" yang didominasi oleh aksi horizontal saat kapal kandas dengan kecepatan maju. Jika kapal kandas di atas batu karang yang memiliki profil tinggi, pelat bawah dapat robek dalam proses yang disebut sebagai "*raking*". Jika tidak ada robekan pada pelat bawah, kejadian tersebut disebut sebagai proses "*sliding*" (Nguyen et al., 2011).

Salah satu aspek teknis yang mempengaruhi tingkat keamanan kapal disaat beroperasi baik pada kondisi laut tenang maupun kondisi laut bergelombang adalah kekuatan dari struktur konstruksi kapal tersebut. Struktur kapal dapat menahan berbagai beban-beban, antara lain beban internal yang disebabkan oleh pembebanan yang ada di kapal dan beban eksternal seperti beban gelombang laut dan angin, serta posisi dari kapal tersebut terhadap beban gelombang laut dan beban angin yang datang/terjadi. Tanker adalah kategori kapal yang didesain dengan lambung dek tunggal termaksud penyusunan tanki-tanki secara integral maupun independent, khususnya untuk angkutan cargo curah dalam bentuk cairan (Winarto et al., 2017). Salah satu jenis kapal tanker *single hull* adalah kapal *Very Large Crude Carrier (VLCC)*.

Dalam kasus yang paling ekstrim dimana retakan dibiarkan tanpa inspeksi atau perbaikan dapat menyebabkan kebocoran minyak atau cairan berbahaya ke laut yang berakibat terjadinya masalah lingkungan. Masalah lingkungan akibat kebocoran atau

tumpahan minyak ini juga berpotensi menimbulkan kerugian terhadap ekologi ekonomi sumber daya perikanan. Pada kasus kecelakaan *oil tanker Exxon Valdez* tahun 1989 di *Prince William Sound*, Alaska, Amerika Serikat (AS) menunjukkan tidak efektifnya Undang-Undang Polusi Minyak Tahun 1990 (OPA 90) berstandar internasional mengenai pencegahan polusi lingkungan yang disebabkan oleh kapal. Untuk itu, diberlakukan persyaratan penggunaan lambung ganda (*double hull*) pada tanker baru dan tanker lama. Karena itu, *International Maritime Organization* (IMO) mengambil tindakan dan menetapkan standar lambung ganda pada tahun 1992 dalam *International Convention for the Prevention of the Pollution from Ships (MARPOL)* (Fadillah & Fauzan Zakki, 2020). Meskipun demikian, kapal VLCC tipe *single hull* masih digunakan hingga sekarang dikarenakan besarnya ruang muat yang ada, sehingga jumlah muatan (minyak) yang diangkut lebih besar dibandingkan tanker *double hull*. Berdasarkan data *World Ships on Order by Main Vessel Type* 2006, hingga saat ini jumlah tanker merupakan jumlah jenis kapal terbanyak yang dibangun dan dikirim yaitu dengan jumlah 2.240 unit. Sedangkan menurut Direktur Perkapalan dan Kepelabuhan Kementerian Perhubungan Indonesia, saat ini jumlah tanker di Indonesia sebanyak 120 unit dan dari jumlah tersebut sekitar 70% masih menggunakan *single hull* (Kharis & W.P, 2014).

Ada beberapa pendekatan untuk melakukan analisis kekuatan lambung kapal setelah terjadi kerusakan. *Finite Element Method* atau metode elemen hingga dapat menjadi metode yang ampuh untuk melakukan analisis kerusakan ini. Banyak peneliti telah melakukan penelitian tentang perhitungan kekuatan *longitudinal* residu atau kekuatan *longitudinal* kapal dalam kondisi *intact* atau rusak dengan menggunakan analisis *FEM nonlinear* (Vu Van et al., 2018).

Berdasarkan uraian sebelumnya, maka fokus utama penelitian ini adalah “Pengaruh Kerusakan *Grounding* Simetris pada Variasi Sekat *Very Large Crude Carrier* (VLCC) Terhadap Kekuatan Membujur Kapal”.

## 1.2 Teori

### 1.2.1 Sejarah Kapal Tanker

Selama abad ini industri minyak bumi telah bangkit dari yang relatif kecil menjadi salah satu industri dimana ekonomi di seluruh dunia sangat berpengaruh akan kebutuhan minyak bumi. Pada berbagai kedalaman di daratan maupun perairan, banyak akumulasi dari hidrokarbon yang telah lama terbentuk dari dekomposisi hewan dan tumbuhan. Hidrokarbon adalah senyawa hidrogen dan karbon yang mempunyai suhu dan tekanan normal, dapat berupa gas, cair, atau padat tergantung dari kompleksitas molekulnya (Leffmann, 1920).

Kapal tanker adalah kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak atau produk turunannya, seperti minyak mentah, minyak yang telah diolah, bahan kimia, minyak nabati, minyak sawit, methanol, gas alam cair, dan sebagainya. Tanker adalah konsep yang relatif baru, berasal dari akhir abad ke-19. Sebelumnya, teknologi sama sekali tidak mendukung pengangkutan curah cair. Pasar juga tidak siap untuk menghadapi penjualan kargo dalam jumlah besar, oleh karena itu sebagian besar kapal mengangkut berbagai produk yang berbeda dalam ruang yang berbeda pula untuk diperdagangkan.

Pada Desember 1966, dalam kurun waktu tiga minggu, tiga VLCC yang masih baru mengalami ledakan. Tiga kasus ini terjadi ketika proses pembersihan tangki kargo yang kosong. Seluruh awak kapal bertugas meninggal dunia. Ada banyak kebakaran yang terjadi di masa lalu, yang terakhir *Seven Skies* yang menewaskan empat awak kapal. Akan tetapi tiga kasus ini terjadi dalam waktu yang singkat, dua diantaranya VLCC milik *Shell* (Devanney, 1970). Periode antara tahun 1950 dan 1973 merupakan masa pertumbuhan ekonomi dunia, pertumbuhan ini memungkinkan galangan kapal di Jepang dan Eropa menghasilkan ukuran kapal tanker yang besar, sehingga pada akhir 1960-an dan awal 1970-an, kapal VLCC (*Very Large Crude Carrier*) dan ULLC (*Ultra Large Crude Carrier*) menjadi kenyataan. Selama periode ini, ekonomi transportasi minyak sangat mendukung penggunaan kapal tanker yang jauh lebih besar daripada kapal pengangkut seperempat atau setengah juta DWT minyak mentah.

Tanker adalah kategori kapal yang didesain dengan lambung deck tunggal termasuk penyusunan tanki-tanki secara integral maupun independent, khususnya untuk angkutan kargo curah dalam bentuk cairan. Tipe-tipe tanker antara lain tanker minyak, tanker kimia, tanker gas cair, dan tanker-tanker lainnya seperti tanker aspal dan tanker cairan (Winarto et al., 2017).

### 1.2.2 Jenis Kapal Tanker

Kapal tanker adalah kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak atau produk turunannya. Seperti dijelaskan oleh Annex II Marpol 73/78, apabila kapal mengangkut muatan atau bagian dari muatan minyak secara curah. Kapal Tanker terdiri atas tiga jenis yaitu *crude carrier*, *product Tanker* dan yang lebih khusus seperti *chemical Tanker*, *gas carrier* dan *asphalt / bitumen carrier*. Sampai tahun 2016, terdapat 7.065 buah *Oil Tanker* di dunia.

#### 1) Kapal *Crude Carrier*

*Crude Carrier* adalah kapal tanker pengangkut minyak mentah atau *crude oil* yang ditunjukkan pada Gambar 1. Kargo jenis ini umumnya homogen. Perbedaan spesifikasi mentah tidak berpengaruh karena pada akhirnya akan diolah di tahap berikutnya. Ukuran *crude carrier* mulai dari 50.000 MT DWT hingga sekitar 500.000 MT DWT



Gambar 1 Kapal *Crude Carrier* Oil Tanker  
(<https://dimensipelaut.blogspot.com/2018/10/>)

## 2) *Product Tanker*

*Oil product tanker* merupakan jenis kapal tanker yang mengangkut hasil pengolahan minyak mentah di kilang pengolahan dimana bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 *Product Tanker*  
(<https://www.karyapelaut.com/2020/12/>)

*Product Tanker* terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan ukuran dan muatannya (*clean* atau *dirty product*). *Clean Product Tanker* dapat mengangkut sebagian *dirty product* (kecuali jenis minyak yang paling berat), sedangkan *Dirty Product Tanker* tidak dapat memuat *clean product*. Tangki pada *Clean Product Tanker* dilapisi bahan khusus (*coating*) untuk mencegah korosi dan harus selalu dibersihkan terlebih dahulu sebelum pemuatan. *Clean Product Tanker* memiliki sistem pemisah sehingga dapat memuat cargo yang berbeda tanpa resiko bercampur. Tangki pada *Dirty Product Tanker* tidak dilapisi bahan khusus dan tidak memiliki sistem pemisahan, kapal *product tanker* dapat terlihat pada Gambar 2.

## 3) *Chemical Tanker*

Kapal Tanker kimia adalah kapal kargo yang dibangun atau disesuaikan dan digunakan untuk mengangkut bahan kimia cair dalam bentuk curah. Kapal Tanker kimia diharuskan mematuhi berbagai aspek keselamatan yang diuraikan dalam Bagian B dari SOLAS Bab VIII dan *International Bulk Chemical Code* (IBC Code). Kargo kimia curah cair termasuk jenis muatan yang berbahaya, sebagian besar mudah terbakar dan/atau beracun. IBC Code membagi kapal Tanker kimia dalam tiga jenis berdasarkan kapabilitasnya mengangkut bahan kimia, yaitu ST1, ST2, dan ST3. *Chemical Tanker* disebut juga *parcel Tanker*, terlihat pada Gambar 3.

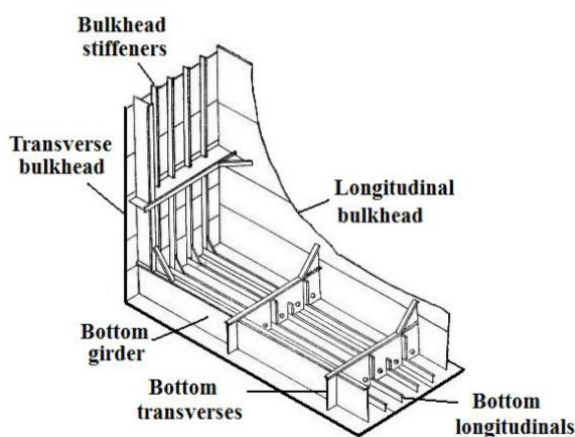


Gambar 3 *Chemical Tanker*

(<https://jurnalmaritim.com/mengenal-oil-tanker-dan-chemical-tanker/>)

### 1.2.3 Konstruksi *Single Hull Tanker*

*Single-hull tanker* memiliki satu lambung dan membawa minyak langsung di dalam struktur lambung. Beberapa kapal tanker SH membawa minyak dan air pemberat ke dalam tangki yang sama, sementara beberapa kapal tanker SH memiliki tangki pemberat terpisah di dalam lambung (yaitu minyak dibawa langsung ke dalam lambung kapal, tapi tangki pemberat terpisah dari muatan). Akibat hanya satu lapisan, kapal tanker *single hull* menimbulkan ancaman lebih besar terhadap lingkungan laut selama kecelakaan apapun. Adapun contoh *single hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 4 sebagai berikut



Gambar 4 *Single Hull Tanker*

(Shama, 2013)

Sejak tenggelamnya tanker (*single hull*) ERIKA dilepas pantai Perancis (Desember 1999) yang menyebabkan polusi (*oil spill*) perairan sekitarnya, maka banyak terjadi perubahan dalam peraturan klasifikasi, statutori, dan perdagangan yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas pengoperasian kapal tanker.

### 1.2.4 Beban-Beban Pada Konstruksi Kapal

Aspek penting dari desain kapal adalah kekuatan kapal. Ini merupakan kemampuan struktur kapal untuk menahan beban yang diberikan pada kapal itu sendiri. Sekat longitudinal sangat penting untuk memperkuat kekuatan membujur lambung kapal di bawah momen lentur kapal. Sekat longitudinal juga membagi kapal menjadi beberapa bagian (Muis Alie & Mustafa, 2020). Pembuatan kapal harus menggunakan bahan material yang tepat agar kinerja kapal bagus dan aman dalam berlayar. Pemilihan bahan material ini mempunyai banyak pengaruh teknis dalam suatu kapal. Salah satunya ialah segi kekuatan kapal jika diberi beban (Choirudin et al., 2015). Adapun beban-beban yang bekerja pada kapal:

#### 1) Beban Luar Sisi Kapal (*Load on The Ship's Side*)

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019).

Beban luar sisi kapal dibagi atas dua beban, yaitu:

Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air ( $P_{S1}$ ) yang dapat dilihat pada Persamaan 1

$$P_{S1} = 10(T - z) + P_0 \cdot Cf_2 \left( 1 + \frac{z}{T} \right) a \quad (1)$$

Beban luar sisi kapal di atas garis muat air ( $P_{S2}$ ) yang dapat ditinjau pada Persamaan 2

$$P_{S2} = P_0 \cdot Cf_2 \quad (2)$$

Dimana:

|          |                                                                      |
|----------|----------------------------------------------------------------------|
| $P_0$    | = Basic external dynamic load (N/mm <sup>2</sup> )                   |
| $P_{S1}$ | = Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (N/mm <sup>2</sup> ) |
| $P_{S2}$ | = Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (N/mm <sup>2</sup> )  |
| $T$      | = Sarat kapal (m)                                                    |
| $z$      | = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)             |
| $H$      | = Tinggi Kapal (m)                                                   |
| $Cf$     | = Faktor distribusi                                                  |

#### 2) Beban Luar Alas Kapal (*External Load on The Ship's Bottom*)

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Persamaan 3 ialah persamaan beban luar alas kapal

$$P_B = 10T + P_0 \cdot Cf \quad (3)$$

Dimana:

|       |                                                    |
|-------|----------------------------------------------------|
| $P_B$ | = Beban luar alas kapal (N/mm <sup>2</sup> )       |
| $P_0$ | = Basic external dynamic load (N/mm <sup>2</sup> ) |
| $T$   | = Sarat kapal (m)                                  |
| $Cf$  | = Faktor distribusi                                |

### 3) Beban Geladak Cuaca (*Load on Weather Decks*)

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak di belakang 0.15 dari garis tegak Haluan (FP) (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 4

$$P_D = \frac{20.T}{(10+z-t)H} \cdot C_D \quad (4)$$

Dimana:

- $P_D$  = Beban Geladak Cuaca (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_0$  = Basic external dynamic load (N/mm<sup>2</sup>)
- $T$  = Sarat Kapal (m)
- $z$  = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)
- $H$  = Tinggi Kapal (m)
- $C_D$  = Koefisien Drag

### 4) Beban Geladak Muatan Kapal

Beban geladak muatan merupakan beban yang ditimbulkan karena adanya muatan pada geladak (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Beban geladak muatan ini dapat dihitung dengan Persamaan 5.

$$P_L = P_C (1 + a_v) \quad (5)$$

Dimana:

- $P_L$  = Beban Geladak Muatan (kN/m<sup>2</sup>)
- $P_C$  = Beban statik kapal (kN/m<sup>2</sup>)
- $a_v$  = Faktor distribusi
- $T$  = Sarat kapal (m)

### 5) Beban Alas Dalam Kapal

Beban alas dalam kapal merupakan beban yang terjadi karena adanya tekanan beban dari dalam kapal (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Beban alas dalam kapal ini dapat dihitung dengan Persamaan 6.

$$P_i = 9,81 \left( \frac{G}{V} \right) h (1 + a_v) \quad (6)$$

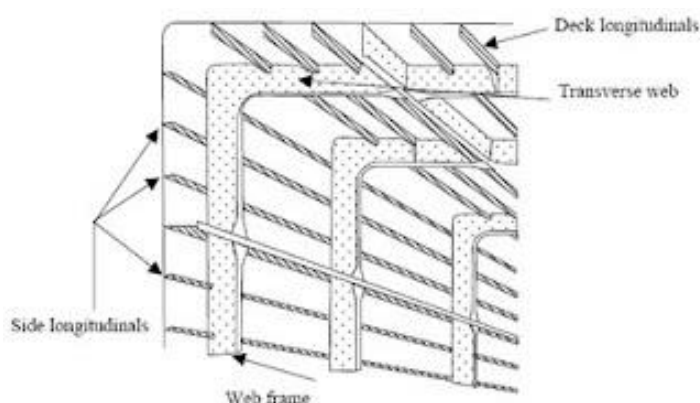
Dimana:

- $P_i$  = Beban alas dalam kapal (kN/m<sup>2</sup>)
- $G$  = Massa kapal (ton)
- $V$  = Volume kapal (m<sup>3</sup>)
- $a_v$  = Faktor distribusi

## 1.2.5 Sistem Konstruksi Memanjang Kapal

Sistem konstruksi membujur adalah sistem konstruksi yang mempunyai penguatan longitudinal dari balok-balok atau penegar. Beban yang diterima konstruksi membujur diteruskan pada hubungan-hubungan kaku melintang (*transverse bulkheads*) melalui balok-balok membujur. Balok-balok melintang tetap diperlukan namun fungsi utama

bukan sebagai penahan balok-balok membujur. Fungsi dari komponen konstruksi membujur adalah untuk mengatasi tegangan lengkung membujur (*longitudinal bending stress*) akibat *sagging* dan *hogging*. Tipikal panjang gelombang di samudera adalah 300 ft. Kapal yang memiliki panjang lebih dari 300 ft (90 meter) cenderung memiliki komponen konstruksi membujur lebih banyak dibandingkan dengan komponen melintang. Jarak antar pembujur (longitudinals) lebih rapat, Jarak antar gading (*frames*) atau pelintang (*transverses*) lebih lebar. Dalam sistem ini *main frame* tidak dipasang vertikal, tetapi dipasang membujur pada sisi kapal dengan jarak antara, diukur ke arah vertikal, sekitar 700 mm-1000 mm. gading-gading ini (pada sisi) dinamakan pembujur sisi (*side longitudinal*). Pada setiap jarak tertentu (sekitar 3-5 meter) dipasang *web frame*, sebagaimana *web frame* pada sistem melintang, yang disebut pelintang sisi (*side transverse*). Pada alas dan alas dalam juga dipasang pembujur-pembujur seperti pembujur-pembujur sisi tersebut di atas dengan jarak antara yang sama pula seperti jarak antara pembujur-pembujur sisi.



Gambar 5 Konstruksi Membujur pada Lambung dan Geladak Kapal (Wijaya, 2017).

Kebaikan sistem konstruksi membujur yaitu dengan adanya balok-balok pembujur yang menerus, akan memperbesar modulus penampang melintang. Balok-balok pembujur pada pelat dasar memberikan kekakuan pada konstruksi tersebut. Kekurangan sistem konstruksi membujur yaitu kesulitan dalam pembangunan. Kontruksi membujur pada lambung dan geladak kapal dapat dilihat pada Gambar 5.

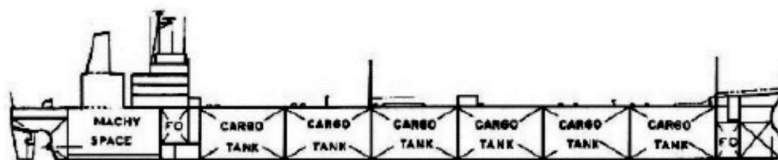
#### 1.2.6 Desain Struktur VLCC

Setelah pencemaran lingkungan laut yang parah disebabkan oleh kecelakaan landasan *Exxon Valdes*, the *Marine Environmental Protection Committee of the International Maritime Organization* (IMO) mengatur peraturan baru untuk memperkuat struktur kapal tanker. Menurut peraturan tersebut, sebuah kewajiban untuk membuat kapal tanker dengan lambung ganda. Jadi, tidak ada kapal tanker lambung tunggal yang akan dibangun kedepannya. Namun, kapal tanker lambung tunggal akan tetap ada untuk sementara waktu meskipun mereka akan memudar (Yao & Fujikubo, 2016).

Ruang akomodasi dan permesinan selalu berada di belakang, sesuai dengan

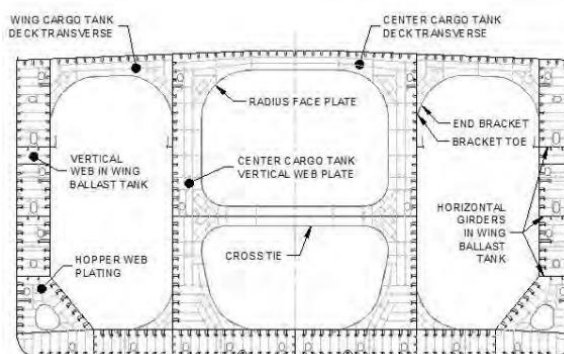


Gambar 6. Kargo terpasang dengan pompa muatan yang dipasang pada satu atau lebih kamar pompa balik di ujung atau di tengah bagian tanki muatan. Panjang kargo tanker yang membawa minyak dibagi-bagi menjadi tank oleh sekat transversal. Bagian kapal ini juga dibagi oleh sekat longitudinal.



Gambar 6 Konstruksi *single hull tanker*  
(Shama, 2013)

Susunan struktural dari *web frame* kapal *Very Large Crude Carrier* ditunjukkan pada Gambar 7. Pelat horizontal (*Girder* atau *Stringer Horizontal*) disusun di *wing tanks* dan *walkways* diatur dibagian atas ruang kargo untuk memungkinkan pemeriksaan semua struktur. Struktur *sloping hopper* dibagian bawah tanki berfungsi untuk memberikan kekuatan dan kekakuan pada antarmuka *double bottom* atau *wing tank*. Bagian pelat bawah dalam kapal harus bersih untuk memungkinkan drainase. *Web frames* biasanya sebesar 3.5 m sampai 5 meter tergantung dari ukuran kapal itu sendiri (Parkway, 2012).



Gambar 7 Struktur *Web-frame* kapal VLCC  
(Parkway, 2012)

Kapal tanker *single hull* memiliki satu lambung dan secara langsung mengangkut minyak di dalam struktur lambung kapal. Beberapa tanker *single hull* mengangkut minyak dan air *ballast* dalam tanki yang sama; terdapat juga *single hull* tanker yang memiliki tanki *ballast* yang terpisah dengan lambung kapal (minyak dibawa langsung ke dalam lambung kapal dan tanki *ballast* terpisah dari muatan). Sehingga jika terjadi kebocoran atau tumpahan minyak, hanya satu lambung yang akan diterobos (Ocean Society, 2011).

### 1.2.7 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation*). Pada awalnya, metode elemen hingga dikembangkan untuk memecahkan masalah dibidang mekanika benda padat (*solid mechanic*), tetapi kini metode ini sudah merambah hampir ke semua masalah seperti mekanika fluida, perpindahan panas, elektromagnetik, getaran, serta analisis modal (Isworo & Ansyah, 2018).

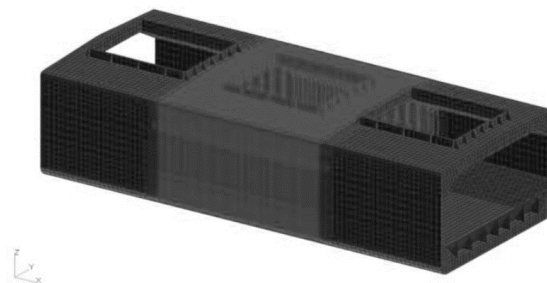
Dalam totalitasnya, metode elemen hingga sangat luas dan kuat; mencakup banyak fitur khusus dan teknik, serta memiliki banyak variasi aplikasi baik struktural maupun nonstruktural. Aplikasi struktural tidak hanya mencakup analisis defleksi kecil dua atau tiga dimensi, namun juga stabilitas struktural (*buckling*) dan struktural dinamis.

Metode elemen hingga diimplementasikan oleh (Hughes & Paik, 2010). Namun, disebutkan diberberapa sumber bahwa metode elemen hingga telah jauh ada sebelumnya. Konsep dasar metode elemen hingga sama seperti dalam analisis kerangka matriks yaitu bahwa struktur dapat direpresentasikan sebagai kumpulan elemen struktural individu yang saling berhubungan pada sejumlah node (Hughes & Paik, 2010).

Bila suatu kontinu dibagi-bagi menjadi beberapa bagian yang lebih kecil (subregion) maka bagian-bagian kecil ini disebut dengan elemen hingga. Elemen hingga merupakan pendekatan bagian-bagian dengan menggunakan polinomial yang mana masing-masing terdefinisi pada daerah (elemen) yang kecil dan dinyatakan dalam harga-harga titik simpul dari fungsi tersebut (Sujiatanti & Setyawan, 2017).

Muis Alie (Muis Alie et al., 2016) memodelkan elemen hingga *single hull* tanker ukuran Panamax dengan struktur satu sisi pada Gambar 8. Model ini mencakup tiga ruang kargo dan dua sekat melintang dalam arah membujur. Kerusakan diasumsikan berada di tengah.

Metode Elemen Hingga berkembang pesat dalam analisis struktur mulai dari yang sederhana sampai yang lebih kompleks. Analisis kekuatan kapal dengan Metode Elemen Hingga memberi kontribusi yang sangat besar karena dapat memberi informasi yang lebih detail perihal perilaku struktur kapal sebelum dan sesudah mengalami pembebanan.



Gambar 8 Three-cargo-hold single bulk carrier (Muis Alie et al., 2016).

Metode Elemen Hingga menggunakan formulasi integral untuk membentuk sebuah sistem dari persamaan aljabar. Lebih lanjut, sebuah pendekatan fungsi menerus diasumsikan untuk menggambarkan solusi untuk setiap elemen. Solusi lengkap ini kemudian di turunkan untuk menghubungkan atau membentuk solusi individu, kemudian di teruskan untuk menghasilkan kontinuitas dengan syarat inkremental. Adapun langkah-langkah dasar dalam metode elemen hingga yakni fase *preprocessing*, fase solusi, dan fase *postprocessing*.

Pada fase *preprocessing*, dibuat terlebih dahulu dan diskritasi domain solusi ke dalam elemen hingga. Sebuah fungsi bentuk diasumsikan untuk mempresentasikan perilaku fisik dari sebuah elemen. Pada fase ini, matriks kekakuan global dibentuk kemudian kondisi syarat batas, kondisi awal, dan pembebanan diterapkan.

Pada fase solusi, sebuah persamaan aljabar linear atau nonlinear secara simultan diselesaikan untuk memperoleh hasil nodal titik.

Pada fase *postprocessing*, diperoleh informasi penting lainnya. Nilai-nilai tegangan utama ataupun nilai lainnya lebih ditekankan.

### 1.2.8 Hubungan Tegangan dan Regangan

Sebuah gaya dan momen yang bekerja pada sebuah titik potongan penampang menghasilkan distribusi yang bekerja pada penampang tersebut. Secara umum, tegangan terbagi dalam dua macam yaitu tegangan normal dan tegangan geser.

Tegangan normal adalah intensitas gaya normal per unit luasan dan dinyatakan dalam unit gaya per unit luasan, misalnya  $\frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$  atau  $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ .

Apabila gaya-gaya dikenakan pada ujung-ujung batang sedemikian hingga batang dalam kondisi tertarik, maka terjadi suatu tegangan tarik pada ujung batang. Jika batang dalam kondisi tertekan maka terjadi tegangan tekan. Gaya aksi dari gaya yang bekerja adalah melalui pusat setiap bagian penampang melintang batang.

Regangan ialah Ketika sebuah gaya yang bekerja pada sebuah benda, gaya tersebut cenderung mengubah bentuk dan ukuran dari benda tersebut. Akan tetapi, perubahan yang terjadi tidak pada volume benda tersebut. Pada gaya tarik, benda akan memanjang dan luas penampang akan mengecil sedangkan pada gaya tekan, benda akan memendek dan penampang akan membesar sehingga total volume benda tersebut akan tetap sama.

Perhitungan regangan dapat dituliskan pada persamaan 7

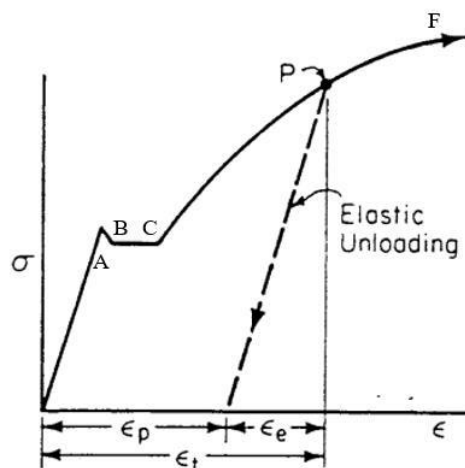
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

Perpanjangan per unit panjang biasa disebut regangan normal ( $\epsilon$ ), dapat diperoleh dengan membagi total pertambahan panjang  $\Delta L$  dan  $L$  regangan tidak berdimensi.

Seperti yang terlihat pada Gambar 9, atas elastis (*elastic limit*) bahan tercapai di titik B. Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan, sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Bahan secara tiba-tiba mulur pada titik C yang disebut titik luluh (*yield point*), tetapi bahan segera memperlihatkan lagi kemampuan menahan kenaikan tegangan, tetapi pemanjangan sekarang naik dengan laju yang lebih cepat dari tegangan sampai mencapai titik F yaitu tegangan maksimum batas kekuatan bahan.

Tegangan ini disebut dengan tegangan batas (*ultimate stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. Di luar titik F, pemanjangan akan berlanjut, tetapi secara perlahan tegangan berkurang, sampai akhirnya batang patah.

Hubungan tegangan dan regangan dapat dipisahkan menjadi komponen plastik dan komponen elastis dimana bentuk kurvanya ada pada Gambar 9. Regangan linear elastis ialah bagian dari regangan yang diperoleh kembali saat dibongkar. Regangan plastik (*nonlinear*) merupakan bagian regangan yang tidak dapat kembali lagi pada bentuk semula (Bannantine, 1990).



Gambar 9 Hubungan Tegangan dan Regangan  
(Bannantine, 1990)

Perbandingan antara tegangan dan regangan benda disebut modulus elastisitas atau *Modulus Young* yang secara matematis dirumuskan pada Persamaan 8 dan Persamaan 9

$$E = \frac{F.L}{A.\Delta L} \quad (8)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (9)$$

Dimana:

- E = Modulus Young (N/mm<sup>2</sup>)
- F = gaya (N)
- L = panjang mula-mula (mm)
- $\Delta L$  = pertambahan panjang atau pendek (mm)
- A = luas penampang (mm<sup>2</sup>)

Nilai modulus Young hanya bergantung pada jenis benda (komposisi benda), tidak bergantung pada ukuran atau bentuk benda.

### 1.2.9 Deformasi Material

Deformasi material merupakan perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah material karena sebuah gaya kerja yang diterapkan padanya. Dalam hal ini deformasi material yang dimaksud timbul akibat gaya kerja berupa kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan lipatan atau memutar (torsion).

Ketika deformasi terjadi gaya internal antar-molekul muncul melawan beban atau gaya kerja yang diberikan, jika gaya yang diberikan tidak melebihi kekuatan internal antar-molekul material maka memungkinkan material tersebut dapat mencapai keadaan setimbang baru dan kembali ke kondisi semula ketika beban atau gaya kerja yang diberikan dihapuskan. Sebaliknya jika beban atau gaya kerja yang diberikan melebihi kemampuan gaya internal antar-molekul material maka dapat menyebabkan deformasi permanen dari material (kegagalan struktur). Adapun deformasi yang timbul pada material dapat dihitung dengan Persamaan 10 berikut:

$$\delta l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (10)$$

Dimana:

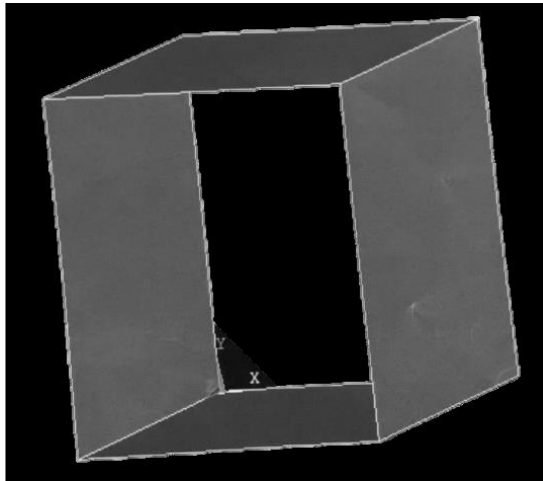
- $\sigma$  = Tegangan yang timbul pada material (N/mm<sup>2</sup>)
- $\varepsilon$  = Regangan yang timbul pada material
- $P$  = Beban atau gaya yang bekerja pada material (N/mm<sup>2</sup>)
- $A$  = Luas penampang material (mm<sup>2</sup>)
- $E$  = Modulus elastisitas material (N/mm<sup>2</sup>)
- $l$  = Panjang material (mm)
- $\delta l$  = Deformasi material (mm)

#### 1.2.10 Multiple Point Constrained (MPC)

Sebagai contoh sebuah *box girder* berukuran 5000 x 5000 x 5000 mm dengan material pelat  $t = 10$  mm diketahui material propertis dengan Modulus

Elastis = 200000 N/mm<sup>2</sup>, Poisson Ratio = 0,3 dan densitas =  $7,8 \times 10^{-5}$  N/mm<sup>2</sup> adapun bentuk *box girder* dapat dilihat seperti gambar yang telah didesain di ANSYS.

Gambar 10 menunjukkan bahwa *box girder* tidak memiliki penampang tengah yang dapat dijadikan sebagai contoh sederhana apabila penampang kapal tidak memiliki elemen di tengah penampang. Dalam kondisi batas (*boundary condition*) penentuan letak netral axis sangat berpengaruh terhadap proses running di ANSYS sementara diketahui bahwa *netral axis* merupakan titik pusat massa bekerja pada sebuah struktur. Apabila letak netral axis struktur tersebut berada pada posisi di tengah, hal tersebut membuat tumpuan yang akan diberikan pada sumbu *netral axis* tidak diketahui, oleh karena itu *software ANSYS* dapat membuat titik/node bayangan yang dapat digunakan sebagai letak tumpuan/*multiple point constrained* (MPC) (Muis Alie et al., 2021).



Gambar 10 Box Girder Tanpa Elemen di Tengah Batang

#### 1.2.11 Perhitungan Kekuatan Batas

Diakui dengan baik bahwa pendekatan berbasis limit state adalah metodologi yang jauh lebih baik untuk desain struktural dan untuk perhitungan kekuatan. Sebuah hal yang tidak mungkin untuk menentukan keamanan struktural tanpa diketahui kekuatan batasnya.

Kekuatan batas didefinisikan sebagai suatu kondisi dimana komponen struktural tertentu atau seluruh sistem struktural gagal untuk melakukan fungsi yang telah ditentukan. Ada empat jenis kekuatan batas, yaitu *serviceability limit states* (SLS), *ultimate limit states* (ULS), *fatigue limit states* (FLS), dan *accidental limit states* (ALS).

Kemampuan untuk memprediksi secara akurat kekuatan *ultimate hull girder* ketika mengalami pembengkokan longitudinal adalah salah satu aspek yang penting dari desain struktur kapal. Kekuatan batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total (Hughes & Paik, 2010).

Untuk memvalidasi *finite element method* sebagai alat yang cocok untuk menghitung *ultimate strength* dari struktur dan juga karakteristiknya, serangkaian metode elemen hingga nonlinier dilakukan dengan berbagai variasi parameter.

Kekuatan batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total (Hughes & Paik, 2010).

Perhitungan kekuatan batas kapal tanker harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria persamaan 11 (DNV GL, 2011).

$$M_t = \frac{M_u}{Y_R} \quad (11)$$

Dimana  $M_t$  adalah momen lentur-batas total vertikal dan  $y_R$  adalah faktor keamanan untuk kekuatan batas-lentur vertikal

Berdasarkan teori balok, tegangan lentur pada penampang yang mengalami momen lentur dapat dihitung dengan Persamaan 12

$$\sigma = \frac{M.Z}{I} \quad (12)$$

Dimana  $M$  adalah momen lentur,  $I$  adalah momen inersia, dan  $z$  adalah jarak dari sumbu netral dari penampang balok ke lokasi tegangan lentur pada arah tinggi dari balok.

Tegangan lentur maksimum dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 13

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{S} \quad (13)$$

Dimana  $S$  adalah modulus penampang. Persamaan penampang pada kapal dibagi menjadi dua yang bisa dilihat pada Persamaan 14 dan Persamaan 15

$$S_d = \frac{1}{Z_d}, \text{ untuk bagian } \textit{deck} \quad (14)$$

$$S_b = \frac{1}{Z_b}, \text{ untuk bagian } \textit{bottom} \quad (15)$$

Dimana  $S_d$  dan  $S_b$  merupakan potongan penampang vertikal pada bagian *deck* dan *bottom* kapal,  $Z_d$  dan  $Z_b$  adalah jarak dari sumbu netral dari potongan penampang kapal ke *deck* atau *bottom*.

Pada teori balok, lambung kapal akan mengalami kekuatan-batas Ketika tegangan lentur maksimum pada bagian yang tertekan mencapai kekuatan tegangan lentur maksimum pada bagian yang tertekan mencapai kekuatan tekan batas, yaitu untuk *deck* pada saat *sagging* dan untuk *bottom* pada saat *hogging*. Kekuatan-batas akibat momen lentur untuk kapal dapat dihitung dengan Persamaan 16 dan Persamaan 17 di bawah ini

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud}, \text{ untuk bagian } \textit{deck} \quad (16)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub}, \text{ untuk bagian } \textit{bottom} \quad (17)$$

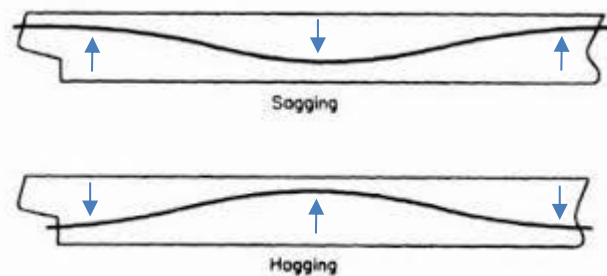
Dimana  $M_{US}$  dan  $M_{UH}$  adalah kekuatan-batas momen lentur untuk *sagging* dan *hogging* dan  $\sigma_{ud}$  dan  $\sigma_{ub}$  adalah tegangan tekan batas untuk *deck* dan *bottom* kapal.

Untuk kapal pada kondisi bergelombang, momen lentur dipisahkan menjadi dua istilah dan dapat dilihat pada Persamaan 18

$$M = M_{sw} + M_w \quad (18)$$

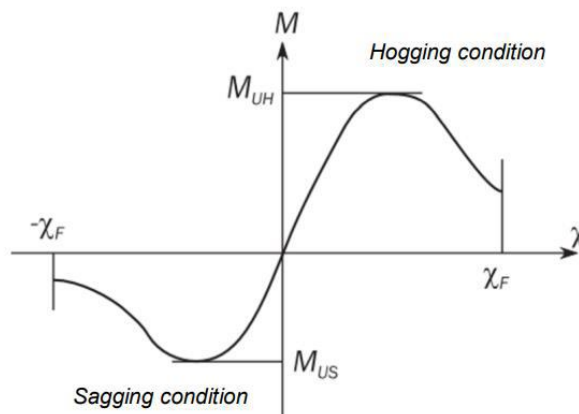
Dimana  $M_{sw}$  dan  $M_w$  menunjukkan momen lentur air tenang dan momen lentur akibat gelombang (Yao & Fujikubo, 2016).

Gambar 11 mengilustrasikan kapal pada gelombang sama dengan panjangnya. Gambar 11 juga menunjukkan kondisi dimana gelombang berongga berada di tengah kapal. Hal ini menghasilkan distribusi gaya apung di dekat ujung kapal dan dengan demikian kapal mengalami kondisi *sagging*. Pada kondisi *sagging*, *deck* pada kapal mengalami tekan sedangkan bagian bawahnya mengalami tarik (*tension*). Gambar 11 juga menunjukkan puncak gelombang berada di tengah kapal. Hal ini menunjukkan gaya apung lebih besar pada bagian tengah kapal dibandingkan di ujung kapal sehingga menghasilkan kondisi *hogging*, *hogging* berarti kapal melengkung pada bagian tengah.



Gambar 11 Momen Lentur Gelombang pada Gelombang Regular (Shama, 2013).

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 12. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.



Gambar 12 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan (Biro Klasifikasi Indonesia, 2017)

Perhitungan kekuatan-batas struktur dengan metode NLFEA perlu memperhatikan hal-hal seperti tipe metode NLFEA, *algoritma iterative solution*, metode arc-length, proses peningkatan beban, pembebanan dan kondisi syarat batas, ketidaksempurnaan geometrik, spesifikasi material, meshing, dan elemen material. Kekuatan-batas momen lentur kapal pada kondisi intact dan kondisi kerusakan dapat dianalisa dengan menggunakan tipe analisa statis, analisa quasi-statis, dan analisa dinamis. Analisa statis dan analisa quasi statis banyak digunakan oleh para peneliti untuk menghitung kekuatan-batas struktur kapal.

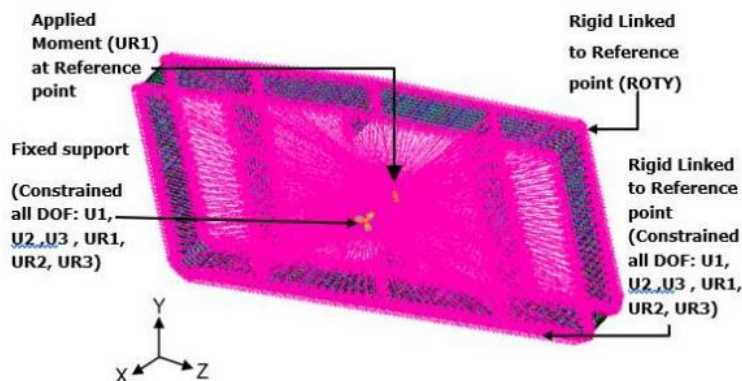
*Algoritma iterative solution* yang dapat digunakan pada metode NLFEA adalah *algoritma Newton-Raphson*, *algoritma quasi Newton-Raphson*, dan algoritma resiko. Algoritma N-R dan quasi N-R dapat digunakan pada analisa statis dan analisa dinamis



implisit. Algoritma resiko hanya dapat digunakan pada analisa statis. Analisa dinamis eksplisit tidak menggunakan *algoritma iterative solution*.

Metode *arc-length* cocok untuk solusi kesetimbangan statis non-linear. Metode ini menggunakan metode *Crisfield* untuk mencegah fluktuasi ukuran langkah selama iterasi ekuilibrium. Diasumsikan bahwa semua besaran beban dapat dikontrol oleh parameter skalar tunggal (*total load factor*).

Pembebanan yang diaplikasikan pada metode NLFEA menggunakan proses peningkatan pembebanan. Dua jenis kontrol beban yang digunakan untuk mendapatkan nilai kekuatan-batas momen lentur kapal tanker yaitu kontrol kelengkungan dan kontrol momen. Kontrol kelengkungan dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada kedua ujung model elemen hingga. *Rigid link* dihubungkan ke titik acuan pada sumbu netral. Peningkatan nilai kelengkungan diperoleh dengan menggunakan kecepatan akselerasi dan damping factor. Kedua ujung pada titik acuan diberikan beban momen. Kontrol momen dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada salah satu ujung model elemen hingga dan ujung lainnya di *full constrain*. Ujung model menggunakan *rigid link*, diberikan momen lentur, reaksi pada ujung model yang di constrain akan mencapai titik batas kekuatan dari struktur.



Gambar 13 Kondisi batas untuk control kelengkungan  
(Muis Alie et al., 2019)

Pembebanan dan kondisi syarat batas yang diaplikasikan pada model elemen hingga sangat tergantung pada jenis proses peningkatan beban yang digunakan. Kontrol kelengkungan menggunakan kondisi syarat batas dimana kedua ujung model diberikan *rigid link* dengan pembebanan. Kondisi syarat batas untuk kontrol kelengkungan dapat dilihat pada gambar 13.

Selama fabrikasi struktur kapal (*cutting, rolling, bending, welding*) terjadi ketidaksempurnaan geometri dan tegangan sisa yang dapat memengaruhi kekuatan batas struktur. Metode NLFEA dapat mengatasi ketidaksempurnaan geometrik tersebut.

Kurva tegangan tegangan dari material yang digunakan pada model elemen hingga harus tersedia. Kurva tegangan regangan sangat menentukan nilai kekuatan-batas dari struktur kapal.

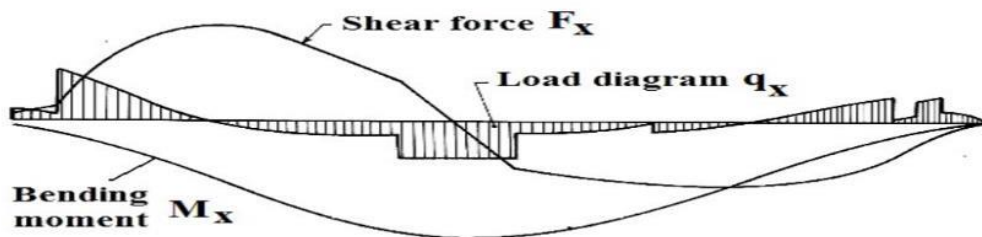
Ukuran dan kualitas meshing sangat penting untuk membandingkan hasil perhitungan antara metode NLFEA dan metode linear FEA. Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar sebaiknya di meshing dengan ukuran yang lebih kecil untuk dapat memperlihatkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin kecil nilai meshing maka perangkat komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi yang tinggi.

SHELL 181 adalah elemen material yang tepat untuk menganalisis struktur shell yang tipis hingga sedang. SHELL 181 sangat cocok untuk linear, rotasi besar, dan/atau aplikasi nonlinear strain besar. Perubahan ketealan shell dicatat pada nonlinear analisis. Terdapat efek beban kekakuan dari tekanan terdistribusi.

SHELL 181 dapat digunakan untuk aplikasi berlapis untuk pemodelan shell komposit atau konstruksi berlapis. Akurasi dalam pemodelan shell komposit diatur oleh teori shear-deformation orde pertama (biasanya disebut sebagai teori shell Mindlin-Reissner).

#### 1.2.12 Pembebanan *Hogging* dan *Sagging*

Momen lentur dan gaya geser pada kondisi air tenang berasal dari gaya apung dan distribusi berat sepanjang panjang kapal seperti pada Gambar 14 (Shama, 2013).



Gambar 14 Distribusi Beban, Gaya Geser, dan Momen Lentur pada Kapal (Shama, 2013).

Berat dan gaya apung diasumsikan sebagai  $w_x$  dan  $b_x$ , maka distribusi beban ditunjukkan pada Persamaan 19 berikut

$$q_x = b_x - w_x \quad (19)$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal ditunjukkan pada Persamaan 20 dan Persamaan 21 berikut

$$F_x = \int_0^x (b_x - w_x) dx \quad (20)$$

$$M_x = \int_0^x F_x dx \quad (21)$$

(DNV GL, 2017), memberikan formula besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang ( $M_{sw}$ ) untuk panjang kapal lebih dari 90 m, sebagai berikut:

Untuk kondisi *sagging*, ditunjukkan pada Persamaan 22.

$$M_{sw} = -0,05168K_M CL^2 B (C_b + 0,7) \text{ kNm}, \quad (22)$$

Untuk kondisi *hogging*, ditunjukkan pada Persamaan 23.

$$M_{sw} = +0,01K_M CL^2 B (11,97 + 1,9C_b) \text{ kNm}, \quad (23)$$

Dimana,

KM = Faktor distribusi seperti pada Gambar 15

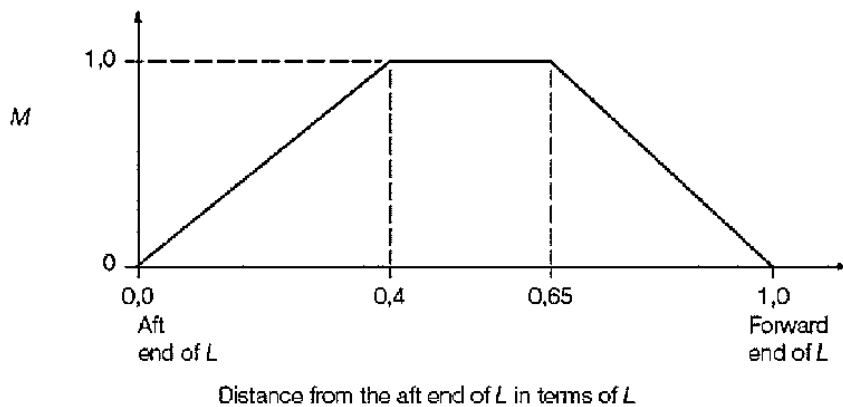
L, B = lebar dan panjang kapal dalam satuan meter

Cb = koefisien blok, tidak boleh kurang dari 0,6

C =  $10,75 - [(300 - L)/100]1,5$ , untuk  $90 < L < 300$  m

= 10,75, untuk  $300 < L < 350$  m

=  $10,75 - [(L - 350)/150]1,5$ , untuk  $350 < L < 500$  m



Gambar 15 Faktor Distribusi KM

(DNV GL, 2017)

Beban dinamis longitudinal diakibatkan oleh gelombang. Ketika kapal berada pada puncak gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *hogging*. Ketika kapal berada di lembah gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *sagging*.

(DNV GL, 2017), mengeluarkan rumus untuk memperkirakan besaran momen lentur-batas vertikal akibat gelombang (MW) untuk panjang kapal lebih dari 90 m, sebagai berikut:

Untuk kondisi *sagging*, ditunjukkan pada Persamaan 24

$$M_{sw} = -0,05168K_M CL^2 B (C_b + 0,7) \text{ kNm}, \quad (24)$$

Untuk kondisi *hogging*, ditunjukkan pada Persamaan 25

$$M_{sw} = +0,01K_M CL^2 B (11,97 + 1,9C_b) \text{ kNm}, \quad (25)$$

Dimana, C dan KM seperti pada Persamaan 22 dan Persamaan 23.

Kombinasi beban statis dan dinamis (Mt) untuk menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur-batas vertikal dihitung dengan penjumlahan momen lentur-batas

vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang (DNV GL, 2017a). Ditunjukkan pada Persamaan 26.

$$M_t = M_{SW} + 1,2M_W \quad (26)$$

### 1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana kekuatan membujur kapal VLCC (*Very Large Crude Carrier*) *single hull* setelah terjadinya *grounding* yang terletak di tengah dengan pertimbangan sekat yang terletak di tengah kapal dan sekat yang terletak di sisi kiri dan kanan kapal dengan jarak simetris.

### 1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian dapat terarah sesuai dengan kerangka yang direncanakan, maka penelitian dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut:

1. Kerusakan kandas pada kapal VLCC dipertimbangkan terletak di tengah/simetris.
2. Kerusakan dianggap searah membujur.
3. Kapal dianalisa dalam 3 kondisi yaitu kondisi utuh, kondisi kerusakan tipe 1 dengan pertimbangan menggunakan 1 sekat membujur yang terletak di tengah kapal, kondisi kerusakan tipe 2 dengan pertimbangan menggunakan 2 sekat yang terletak di kiri dan kanan dengan jarak simetris.

### 1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan membujur kapal VLCC (*Very Large Crude Carrier*) *single hull* setelah terjadinya *grounding* yang terletak di tengah dengan pertimbangan sekat yang terletak di tengah kapal dan sekat yang terletak di sisi kiri dan kanan kapal dengan jarak simetris.

### 1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian Pengaruh Kerusakan *Grounding* Simetris pada Variasi Sekat *Very Large Crude Carrier* (VLCC) Terhadap Kekuatan Membujur Kapal dengan pertimbangan variasi letak dan jumlah sekat yang dianalisis menggunakan metode elemen hingga ini adalah:

1. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya mengetahui analisis struktur baja.
2. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kepada perusahaan-perusahaan.
3. Sebagai informasi dalam hal menentukan kebijakan dalam hal regulasi/peraturan pada galangan kapal untuk membuat perencanaan struktur kapal VLCC.

## 1.7 Sistematika Penulisan

Untuk mendapatkan alur penulisan yang jelas dan sistematis sekaligus memungkinkan pembaca dapat menginterpretasikan hasil tulisan secara tepat, maka tugas akhir ini disusun menjadi beberapa bagian, yaitu:

### BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang permasalahan atau alasan yang mendasari penulis dalam melakukan penelitian mengenai Pengaruh Kerusakan *Grounding* Simetris pada Variasi Sekat *Very Large Crude Carrier* (VLCC) Terhadap Kekuatan Membujur Kapal dengan pertimbangan variasi letak dan jumlah sekat yang dianalisis menggunakan metode elemen hingga. Selain itu berisi juga mengenai perumusan masalah yang dianalisis, batasan masalah penelitian yang tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini karena keterbatasan alat bantu dan membatasi agar penelitian lebih spesifik juga dalam bab ini terdapat tujuan dari penelitian dan manfaat penelitian yang dapat diambil dari penelitian ini serta sistematika penulisan skripsi.

### BAB II Metode Penelitian

Bab ini berisi jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, objek penelitian yaitu penampang tengah (*midship* section) pada kapal VLCC, jenis dan sumber data dimana penelitian ini bersifat kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta penampilan dari hasilnya dengan melakukan investigasi untuk mendapatkan hasil perbandingan dari kekuatan membujur kapal VLCC antara tipe kerusakan 1 yang menggunakan 1 sekat membujur yang terletak di tengah kapal, dan tipe kerusakan 2 yang menggunakan 2 sekat yang terletak di kiri dan kanan dengan jarak simetris setelah terjadi kandas (*grounding*) yang terletak di tengah kapal yang dianalisis menggunakan Metode Elemen Hingga.

### BAB III Hasil Penelitian

Bab ini berisi objek penelitian, hasil perhitungan dan hasil simulasi dari perbandingan kekuatan membujur kapal VLCC dalam 3 kondisi yang berbeda pada saat mengalami kondisi *hogging* dan *sagging* yang dianalisis menggunakan Metode Elemen Hingga menggunakan *software* ANSYS yang menampilkan nilai tegangan kerjanya.

### BAB IV Pembahasan

Bab ini berisi pembahasan berupa hasil investigasi kekuatan batas menggunakan *software* ANSYS berupa nilai momen yang bekerja pada kondisi *hogging* dan *sagging*, dan perbandingan kekuatan batas kapal VLCC menggunakan Metode Elemen Hingga.

### BAB V Penutup

Bab ini merupakan penutup dari keseluruhan dari isi penelitian yang mencakup kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan masalah yang dibahas pada bab-bab sebelumnya.

## BAB II. METODE PENELITIAN

### 2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta menampilkan hasil dari studi kasus mengenai pengaruh kandas (*grounding*) yang terletak di tengah kapal terhadap kekuatan membujur kapal VLCC dengan pertimbangan variasi letak dan jumlah sekat yang dianalisis menggunakan Metode Elemen Hingga.

### 2.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di *Ocean Structure Analysis Research Laboratory* (OSAREL) Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa dengan waktu penelitian dilaksanakan dari bulan September 2024 sampai dengan bulan November 2024.

### 2.3 Penyajian Data

Data pada penelitian ini menggunakan data kapal VLCC, dengan ukuran utama seperti pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1

Dimensi Utama Kapal VLCC

| Parameter                    | Nilai | Unit |
|------------------------------|-------|------|
| Panjang Kapal (L) (estimasi) | 230   | m    |
| Lebar Kapal (B)              | 42    | m    |
| Tinggi Kapal (H)             | 20,3  | m    |

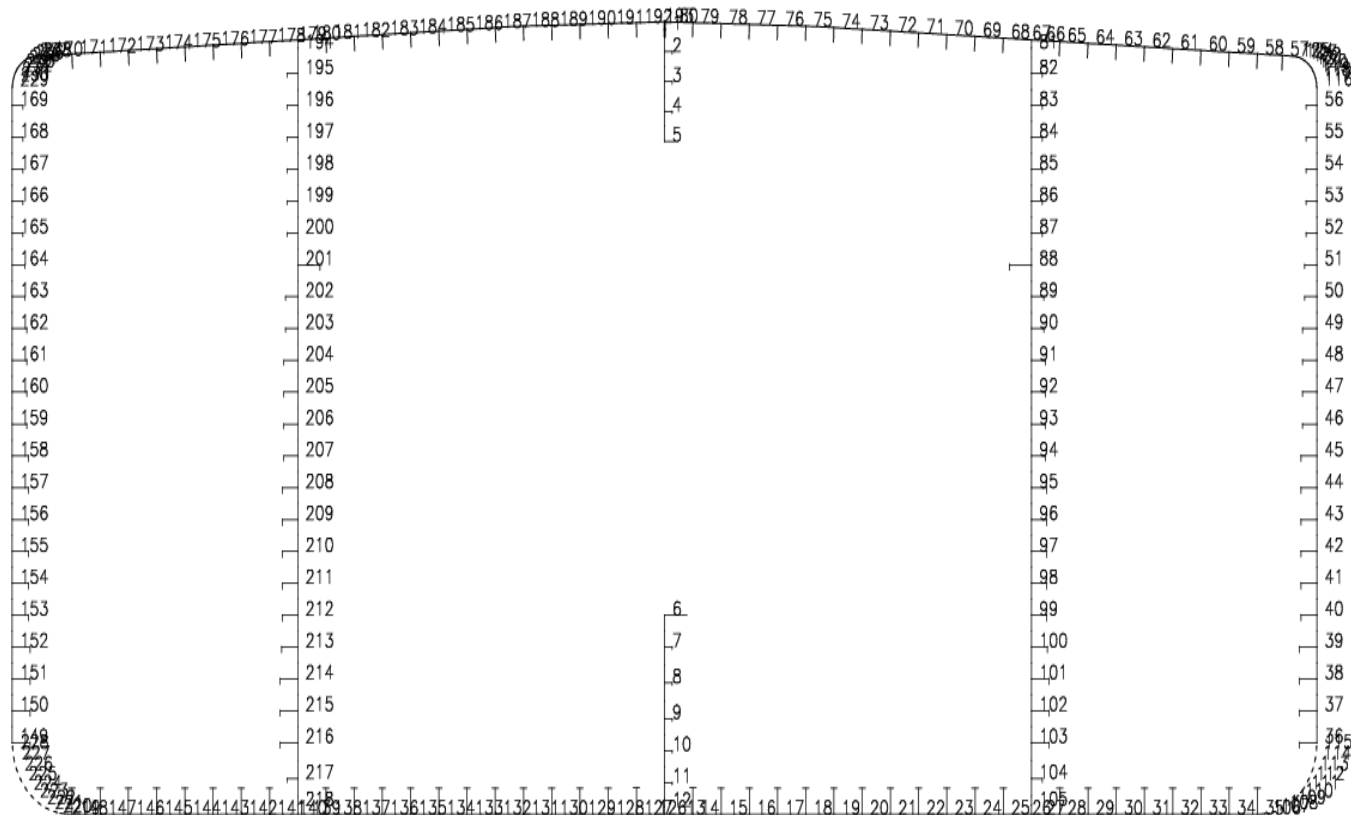
Adapun properti material yang digunakan pada model penelitian ini seperti pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2

Properti Material

| Parameter               | Nilai                | Unit              |
|-------------------------|----------------------|-------------------|
| <i>Type of material</i> | AH36                 |                   |
| <i>Elastic Modulus</i>  | 210000               | N/mm <sup>2</sup> |
| <i>Density</i>          | $7,7 \times 10^{-5}$ | N/mm <sup>3</sup> |
| <i>Yield Strength</i>   | 355                  | N/mm <sup>2</sup> |
| <i>Rasio Poisson</i>    | 0,33                 |                   |

Adapun konfigurasi *stiffener* penampang dan spesifikasi material kapal tanker VLCC seperti pada Gambar 16 dan Tabel 3 sebagai berikut:



Gambar 16 Konfigurasi penampang *midship* VLCC

Tabel 3  
Konfigurasi Material *Stiffener* kapal VLCC

| <b>Nomor<br/><i>Stiffener</i></b> | <b>Tinggi<br/>Badan<br/>(mm)</b> | <b>Tebal<br/>Badan<br/>(mm)</b> | <b>Lebar<br/>Sayap<br/>(mm)</b> | <b>Tebal<br/>Sayap<br/>(mm)</b> | <b>Bentuk<br/><i>Stiffener</i></b> |
|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                                 | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 2                                 | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 3                                 | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 4                                 | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 5                                 | 700                              | 19                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 6                                 | 700                              | 30                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 7                                 | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 8                                 | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 9                                 | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 10                                | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 11                                | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 12                                | 250                              | 12                              | 67                              | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 13                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 14                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 15                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 16                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 17                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 18                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 19                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 20                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 21                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 22                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 23                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 24                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 25                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 26                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 27                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 28                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 29                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 30                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Angel</i>                       |
| 31                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 32                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 33                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 34                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |
| 35                                | 675                              | 13                              | 200                             | 25                              | <i>Tee-Bar</i>                     |



Lanjutan Tabel 3

Konfigurasi Material *Stiffener* kapal VLCC

| <b>Nomor<br/><i>Stiffener</i></b> | <b>Tinggi<br/>Badan<br/>(mm)</b> | <b>Tebal<br/>Badan<br/>(mm)</b> | <b>Lebar<br/>Sayap<br/>(mm)</b> | <b>Tebal<br/>Sayap<br/>(mm)</b> | <b>Bentuk<br/><i>Stiffener</i></b> |
|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 36                                | 572                              | 12                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 37                                | 572                              | 12                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 38                                | 572                              | 12                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 39                                | 572                              | 12                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 40                                | 522                              | 11                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 41                                | 522                              | 11                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 42                                | 518                              | 11.5                            | 150                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 43                                | 518                              | 11.5                            | 150                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 44                                | 518                              | 11.5                            | 150                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 45                                | 518                              | 11.5                            | 150                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 46                                | 468                              | 11.5                            | 125                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 47                                | 468                              | 11.5                            | 125                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 48                                | 468                              | 11.5                            | 125                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 49                                | 468                              | 11.5                            | 125                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 50                                | 400                              | 12                              | 100                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 51                                | 400                              | 12                              | 100                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 52                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 53                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 54                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 55                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 56                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 57                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 58                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 59                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 60                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 61                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 62                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 63                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 64                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 65                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 66                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 67                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 68                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 69                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 70                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |

Lanjutan Tabel 3

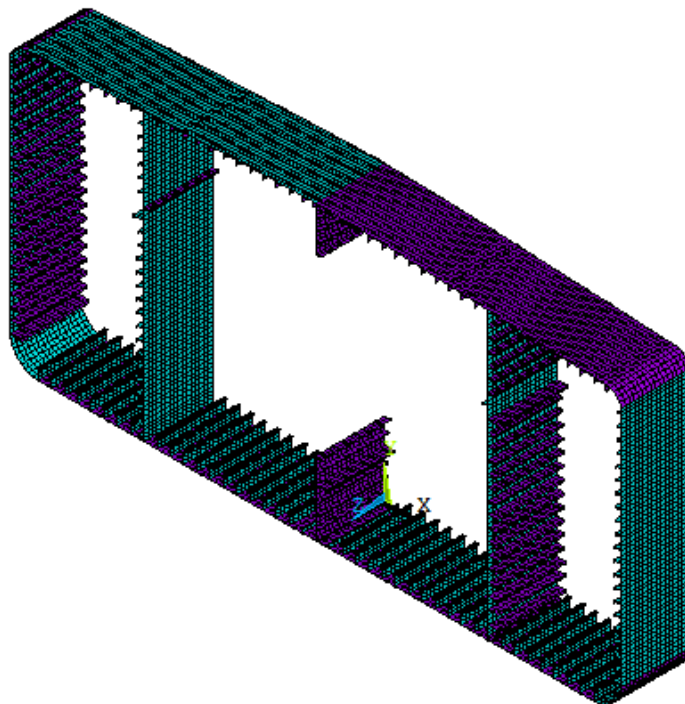
Konfigurasi Material *Stiffener* kapal VLCC

| <b>Nomor<br/><i>Stiffener</i></b> | <b>Tinggi<br/>Badan<br/>(mm)</b> | <b>Tebal<br/>Badan<br/>(mm)</b> | <b>Lebar<br/>Sayap<br/>(mm)</b> | <b>Tebal<br/>Sayap<br/>(mm)</b> | <b>Bentuk<br/><i>Stiffener</i></b> |
|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 71                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 72                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 73                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 74                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 75                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 76                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 77                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 78                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 79                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 80                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 81                                | 350                              | 28                              | 0                               | 0                               | <i>Flat-Bar</i>                    |
| 82                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 83                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 84                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 85                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 86                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 87                                | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |
| 88                                | 716                              | 12.5                            | 150                             | 16                              | <i>Angel</i>                       |
| 89                                | 400                              | 12                              | 100                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 90                                | 400                              | 12                              | 100                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 91                                | 450                              | 11.5                            | 125                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 92                                | 450                              | 11.5                            | 125                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 93                                | 450                              | 11.5                            | 125                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 94                                | 450                              | 11.5                            | 125                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 95                                | 500                              | 11.5                            | 150                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 96                                | 500                              | 11.5                            | 150                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 97                                | 500                              | 11.5                            | 150                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 98                                | 500                              | 11.5                            | 150                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 99                                | 500                              | 11.5                            | 150                             | 18                              | <i>Angel</i>                       |
| 100                               | 522                              | 11                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 101                               | 572                              | 12                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 102                               | 572                              | 12                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 103                               | 572                              | 12                              | 150                             | 22                              | <i>Angel</i>                       |
| 104                               | 350                              | 12                              | 100                             | 17                              | <i>Angel</i>                       |

## 2.4 Analisa Data

Dalam analisis data ada beberapa tahap yang akan dilakukan dengan tahap awal adalah pengumpulan data awal berupa ukuran utama kapal. Selanjutnya dilakukan studi literatur terkait dengan kerusakan kapal VLCC akibat kandas (*grounding*), perhitungan momen total arah membujur adalah jumlahan dari momen lentur vertikal pada kondisi air tenang ditambah dengan momen lentur saat bergelombang dengan perangkat lunak ANSYS yang mengimplementasikan metode *NLFEA*.

Tahapan selanjutnya, kapal VLCC dimodelkan dalam bentuk 3 dimensi menggunakan ANSYS. Pemodelan menggunakan elemen *shell* 181 dengan konfigurasi dan spesifikasi material tiap elemen. Model-model tersebut kemudian di-*meshing* dengan ukuran 500 mm. Adapun contoh gambar *meshing* dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17 *Meshing*

Penelitian ini menggunakan proses kontrol momen untuk mengetahui nilai kekuatan-batas struktur baik sebelum dan setelah mengalami kerusakan. Kondisi batas pada penelitian ini adalah seluruh titik ujung model bagian *aft* di *full constrain*. Tidak ada pembebanan pada titik acuan *aft*. Ujung model bagian *fwd* pada titik acuan sumbu netral, diberikan momen lentur kemudian semua titik pada ujung *fwd* di *rigid linkfull constrain* ke titik acuan sumbu netral.

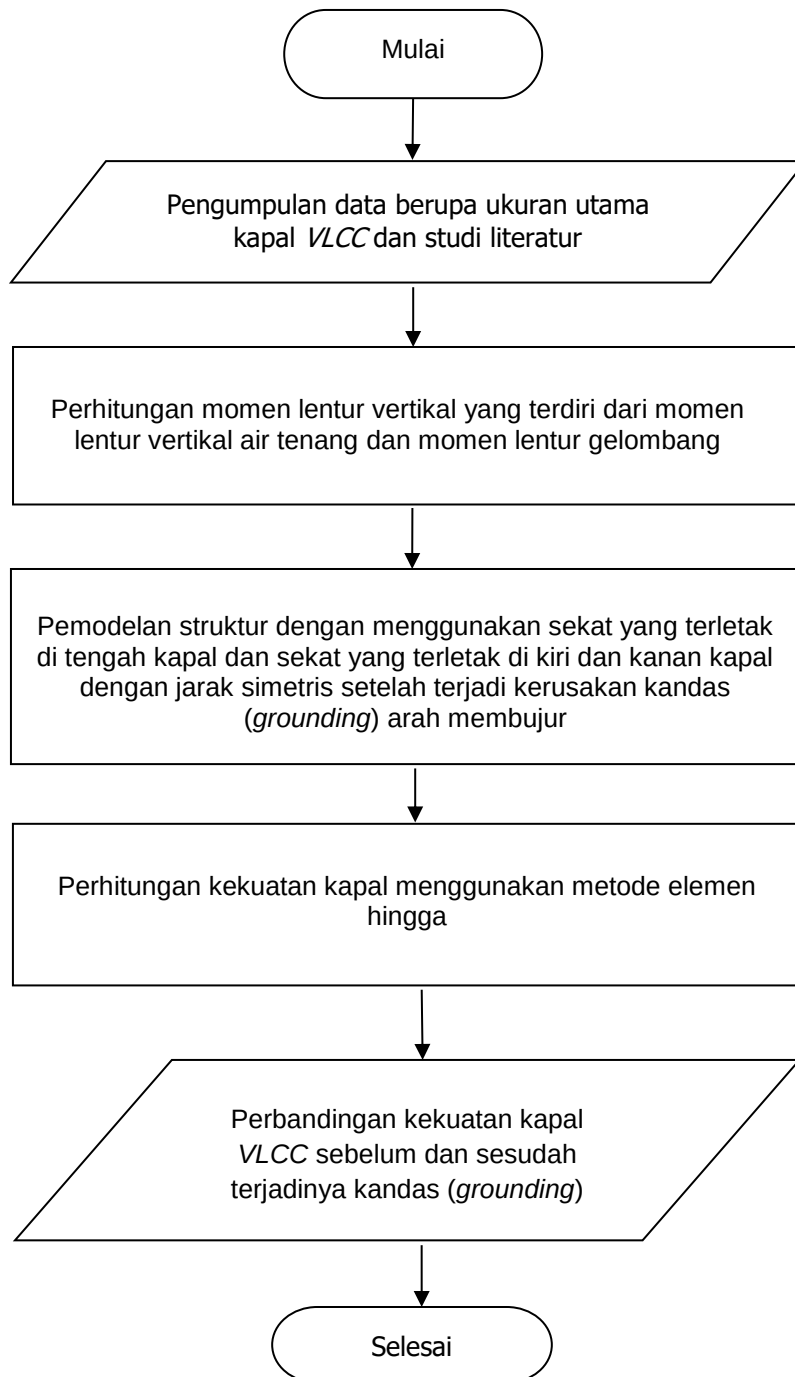
## 2.5 Kerangka Alur Pemikiran

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam menganalisis data pada penelitian ini adalah:

1. Tahap Pertama  
Kegiatan penelitian dilakukan dengan pengambilan data dari berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, buku, atau artikel-artikel ilmiah yang berhubungan dengan tema penelitian. Data diperoleh di Laboratorium ataupun dari sumber-sumber lainnya.
2. Tahapan Kedua  
Setelah mengadakan studi atau pemahaman terhadap data yang dikumpulkan, dilanjutkan dengan pengolahan data berupa:
  - a. Mengidentifikasi data-data yang digunakan pada struktur kapal VLCC seperti dimensi kapal
  - b. Mengidentifikasi beban-beban yang bekerja pada struktur kapal VLCC.
  - c. Pemodelan bentuk kerusakan kandas (*grounding*) arah membujur yang terletak pada tengah kapal dengan menggunakan metode elemen hingga
  - d. Mengidentifikasi gaya-gaya yang bekerja pada kapal VLCC yang mengakibatkan kapal tersebut mencapai kekuatan batasnya
3. Tahapan Ketiga  
Menghitung kekuatan batas dengan metode elemen hingga yang menghasilkan kekuatan kapal setelah terjadi kandas (*grounding*).
4. Hasil Penelitian  
Pada hasil penelitian dengan menggunakan metode elemen hingga, selanjutnya dilakukan plotting dengan menghubungkan momen curvature pada kondisi sebelum dan sesudah kandas (*grounding*). Ketika pengecekan analisis selesai dan analisis model dinyatakan berhasil maka tahapan selanjutnya adalah memaparkan hasil analisis yang telah didapatkan.
5. Kesimpulan  
Kesimpulan mengenai hasil perhitungan kekuatan kapal VLCC setelah terjadi kandas (*grounding*) akan didapatkan.

## 2.6 Diagram Alir

Alur penelitian atau diagram alir dalam penelitian pengaruh kerusakan kandas (*grounding*) yang terletak di tengah terhadap kekuatan membujur kapal *very large crude carrier* (VLCC) dapat dilihat pada Gambar 18



Gambar 18 Diagram Alir