

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berkembangnya industri pelayaran global, jumlah kapal yang berlayar di laut meningkat secara signifikan dan kecepatan kapal juga meningkat, hal tersebut mengakibatkan probabilitas tubrukan kapal dan *grounding* juga ikut meningkat. Seiring dengan perkembangan berbagai teknologi navigasi, sistem navigasi kapal juga telah mengalami banyak peningkatan, meskipun demikian risiko tubrukan kapal dan *grounding* masih tetap tinggi (Wang et al., 2020). Kapal dan struktur lepas pantai yang berbentuk kapal rentan terhadap berbagai kecelakaan yang mungkin terjadi selama proses operasi, seperti kandas, tubrukan, kebakaran, ledakan, benturan es, dan masih banyak lainnya. Peristiwa yang tidak disengaja ini menimbulkan bahaya yang signifikan terhadap kapal, mempengaruhi integritas strukturalnya dan membahayakan awak kapal. Terdapat pula dampak negatif terhadap sistem ekologi lingkungan laut, misalnya akibat tumpahnya muatan polutan dari lambung kapal yang rusak (Li & Kim, 2022). Tabrakan pada sisi kapal dan *grounding* dapat mengakibatkan kerusakan struktural yang parah (Liu et al., 2021).

Kandas atau *grounding* merupakan salah satu jenis kecelakaan lain pada kapal yang dapat menyebabkan keruntuhan pasca-kecelakaan pada gelagar lambung kapal (Zhu et al., 2024). Konsep baru untuk penilaian keselamatan struktur kapal yang rusak akibat *grounding*, yang dapat diterapkan pada jenis kecelakaan lain termasuk tubrukan, diusulkan oleh (Paik et al., 2012). Prosedur yang diusulkan didasarkan pada deskripsi kerusakan menggunakan *grounding damage index* dan perhitungan pengurangan *ultimate strenght* dengan persamaan desain nonlinier yang hanya bergantung pada GDI. Konsep ini diperluas lebih lanjut oleh (Kim et al., 2014), dengan mempertimbangkan efek pemborosan korosi yang bergantung pada waktu (Parunov et al., 2017).

Banyak peneliti sebelumnya telah mengerjakan uji *grounding* untuk mendapatkan wawasan tentang mekanisme kerusakan struktur dasar kapal pada kasus *grounding* untuk memvalidasi hasil *Finite Element Method* (FEM) dan metode prediksi kerusakan analitis yang disederhanakan. (Lu & Calladine, 1990) melakukan serangkaian uji pemotongan pelat untuk mensimulasikan mekanisme penyerapan energi dari struktur pelat dasar kapal selama pengujian *grounding*. (Rodd, 1996) melaporkan empat pengujian model *grounding* berskala 1:5 yang dilakukan oleh US *Naval Surface Warfare Center* (NSWC) untuk struktur *double-hull* yang berbeda. Data pengujian tersebut terperinci dan banyak digunakan untuk memverifikasi keakuratan simulasi numerik dan hasil perhitungan teoretis (Zhu et al., 2024). (Liu et al., 2021) telah melakukan analisis kelaikan tubrukan struktural kapal *double-hull* dalam kondisi tubrukan dan *grounding*. Kecelakaan kandas atau *grounding* menarik perhatian publik dan menyoroti pentingnya membuat analisis yang dapat diandalkan tentang kekuatan lambung kapal yang rusak untuk meningkatkan keselamatan pelayaran (Parunov et al., 2017).

Meskipun sudah banyak para ahli yang membahas penelitian seputar kerusakan struktur kapal akibat *grounding*, namun penulis akan menegaskan sisi perbedaan dari variabel penelitian ini dengan penelitian sebelumnya. Pertama, perbedaan dari variabel letak kerusakan *grounding* yang asimetris pada struktur *single-hull tanker*. Bahwa belum ada yang meneliti lebih dalam terkait variabel tersebut. Kedua, konfigurasi jumlah sekat membujur pada kapal VLCC yang penulis pilih pun berbeda dengan penelitian sebelumnya.

Berdasarkan uraian di atas, maka fokus utama penelitian ini adalah “Pengaruh Kerusakan *Grounding* yang Terletak Asimetris Terhadap Kekuatan Membujur Kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC)”.

1.2 Teori

1.2.1 Kapal Tanker

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. Seperti dijelaskan oleh Annex II Marpol 73/78, apabila kapal mengangkut muatan atau bagian dari muatan minyak secara curah. Menurut G.S. 5 Marton Fifth Edition (Tanker Operation Fourth Edition, 2007:19) kapal tanker dibagi menjadi 3 yaitu *Oil Tanker*, *Chemical Tanker*, dan *Liquified Natural Gas Tanker* (LNG). 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 (Hayler & Keever, 2003). 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.

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 (Solly, 2019).

Tanker merupakan 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).

Lambung kapal adalah struktur panel kaku yang sangat rumit terdiri dari komponen struktur seperti *deck*, *bottom*, *side* cangkang, sekat, rangka melintang dan memanjang. Meskipun analisis FE *nonlinier* diterima secara luas sebagai alat yang andal untuk penyelidikan perilaku *struktural nonlinier*, aplikasi untuk analisis keruntuhan progresif lambung kapal girder masih sangat terbatas karena banyaknya permintaan pada sumber daya komputer dan tenaga kerja. Terlepas dari kesulitan-kesulitan ini, analisis FE *nonlinier* diyakini sebagai satu-satunya yang tersedia dan alat yang cocok untuk menilai kekuatan gelagar lambung utama dengan kerusakan akibat momen lentur longitudinal (Muis-Alie, 2016). *Crude Carrier* adalah kapal tanker pengangkut minyak mentah atau crude oil yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kapal *Crude Oil Carriers*
Sumber: <https://depositphoto.com>, 2024

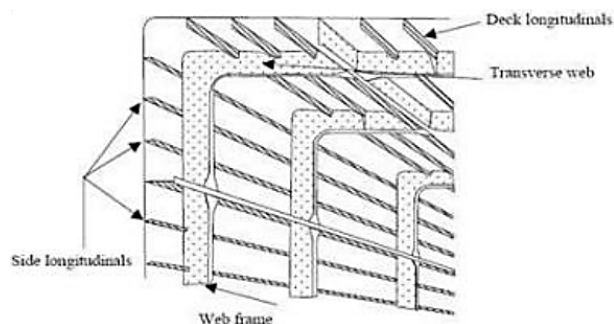
1.2.2 Sistem Konstruksi Kapal

Sistem konstruksi kapal merupakan suatu kesatuan yang terdiri dari komponen atau elemen penyusun struktur kapal yang dihubungkan bersama atau dirangkai satu sama lain sehingga membentuk satu konstruksi tertentu yang kemudian akan dihubungkan atau disatukan menjadi satu struktur kapal. Untuk sistem konstruksi kapal dapat dibagi menjadi:

1. Sistem Konstruksi Membujur (*Longitudinal Framing System*)

Dalam sistem ini gading-gading utama tidak dipasang vertikal, tetapi dipasang membujur pada sisi kapal dengan jarak antara, diukur ke arah vertikal, sekitar 700 mm-1.000 mm. gading-gading ini (pada sisi) dinamakan pembujur sisi (*side longitudinal*). Pada setiap jarak tertentu (sekitar 3-5 m) dipasang gading-gading besar, sebagaimana gading-gading besar 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, ini dinamakan pembujur-pembujur alas (*bottom*

longitudinal) dan, pada alas dalam, pembujur alas dalam (*inner bottom longitudinal*). Pada alas juga dipasang wrang-wrang, dan dihubungkan pada pelintang-pelintang sisi. Penumpu tengah dan penumpu samping sama halnya seperti pada sistem melintang. Pada geladak juga dipasang pembujur-pembujur seperti halnya pembujur-pembujur yang lain tersebut di atas. Pembujur-pembujur ini dinamakan pembujur geladak (*deck longitudinal*). Balok-balok geladak dengan bilah yang besar dipasang pada setiap pelintang sisi dan disebut pelintang geladak (*deck transverse*).



Gambar 2. 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 2.

2. Sistem 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. Elemen-elemen yang dipasang membujur dalam sistem melintang yaitu:

- a. Pada alas: *Centre girder* dan *Side girder*
- b. Pada sisi: *Side Stringer*
- c. Pada geladak: *Deck girder* atau *carling*

3. Sistem Konstruksi Kombinasi

Sistem kombinasi ini diartikan bahwa sistem melintang dan sistem membujur dipakai bersama-sama dalam badan kapal. Dalam sistem ini geladak dan alas dibuat menurut sistem membujur sedangkan sisinya menurut sistem melintang. Jadi, sisi-sisinya diperkuat dengan gading-gading melintang dengan jarak antara yang rapat seperti halnya dalam sistem melintang, sedangkan alas dan geladaknya diperkuat dengan pembujur-pembujur. Dengan demikian maka dalam mengikuti peraturan klasifikasi (*rules*) sisi-sisi kapal tunduk pada ketentuan yang berlaku untuk sistem melintang, sedangkan alas dan geladaknya mengikuti ketentuan yang berlaku untuk sistem membujur, untuk hal-hal yang memang diperlukan secara terpisah.

1.2.3 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 et al., 2021). Untuk setiap kasus beban, beban yang diterapkan yang digunakan untuk analisis struktur kapal harus mencakup bagian statis dan dinamis dari setiap komponen beban. 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). Beban-beban pada konstruksi kapal dapat dikelompokkan sesuai dengan karakteristik beban-beban yang bekerja pada konstruksi kapal tersebut. Adapun beban-beban yang bekerja pada kapal:

1. 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 1 seperti berikut:

$$P_D = P_0 \frac{20T}{(10 + z - T)H} C_D \quad (1)$$

Dengan P_O terdiri dari P_{O1} untuk arah gelombang searah atau berlawanan arah kapal dan P_{O2} untuk arah gelombang melintang arah kapal yang dapat dihitung seperti pada Persamaan 2 dan Persamaan 3 berikut ini.

$$P_{O1} = 2,1 \times (C_B + 0,7) \times C_D \times C_L \times f \quad (2)$$

$$P_{O2} = 2,6 \times (C_B + 0,7) \times C_D \times C_L \quad (3)$$

Dimana:

- P_D = Beban Geladak Cuaca (N/mm^2)
- P_0 = *Basic external dynamic load* (N/mm^2)
- T = Sarat Kapal (m)
- z = Jarak tengah antara pusat beban engan garis bawah (m)
- H = Tinggi Gelombang (m)
- C_D = Koefisien Drag
- f = Faktor Probabilitas
- C_L = Koefisien Panjang
- $$= \sqrt{\frac{L}{90}} \text{ untuk } L < 90 \text{ m}$$
- $$= 1,0 \text{ untuk } L \geq 90 \text{ m}$$
- z = Jarak tenga antara pusat beban dengan garis bawah (m)

2. 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 4 dan beban luar sisi kapal di atas garis muat air (P_{S2}) yang dapat ditinjau pada Persamaan 5.

$$P_{S1} = 10 (T - z) + P_0 C_F \left(1 + \frac{z}{T} \right) \quad (4)$$

$$P_{S2} = P_0 C_F \frac{20}{10 + z - T} \quad (5)$$

Dimana:

- P_D = Beban geladak cuaca (N/mm^2)
- P_0 = *Basic external dynamic load* (N/mm^2)
- P_{S1} = Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (N/mm^2)
- P_{S2} = Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (N/mm^2)
- T = Sarat kapal (m)

- z = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)
 H = Tinggi gelombang (m)
 C_F = Faktor distribusi

3. 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 6 ialah persamaan beban luar alas kapal.

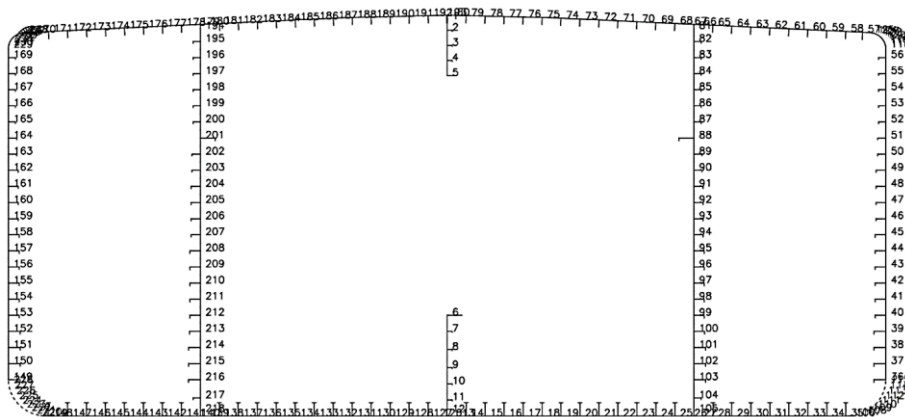
$$P_B = 10T + P_0 C_F \quad (6)$$

Dimana:

- P_B = Beban luar alas kapal (N/mm²)
 P_0 = Basic external dynamic load (N/mm²)
 T = Sarat kapal (m)
 C_F = Faktor distribusi

1.2.4 Konstruksi Kapal *Single Hull Tanker*

Tanker lambung tunggal (*single hull tanker*), merupakan jenis tanker yang hanya memiliki satu lambung seperti pada Gambar 3. dan minyak yang dibawa disimpan dalam struktur lambung tersebut.



Gambar 3. *Cross section of single hull tanker (T1)* (Muis-Alie et al., 2012)

Beberapa kapal *single hull tanker* membawa minyak dan air pemberat ke dalam tangki yang sama dan beberapa kapal *single hull tanker* 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.

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.

IMO melalui peraturan MARPOL 73/78-Annex 1, Regulation 13G, Amandemen 2001 membagi kapal tanker minyak dalam 3 kategori, yaitu kategori 1, 2, dan 3. Dengan rincian sebagai berikut:

1. *Oil Tanker* kategori 1
 - a. Kapal tanker 20.000 DWT atau lebih yang memuat *crude oil*, *fuel oil*, *heavy diesel oil*, atau *lubricating oil*.
 - b. Kapal tanker 30.000 DWT atau lebih yang memuat jenis minyak selain yang disebutkan diatas. (Tanker pra-MARPOL, yaitu tanker *single hull* yang tidak mempunyai *ballast tanks* terpisah pada *protective locations*).
2. *Oil Tanker* kategori 2
 - a. Kapal tanker 20.000 DWT atau lebih, *single hull*, yang memuat *crude oil*, *fuel oil*, *heavy diesel oil*, or *lubricating oil*.
 - b. Tanker MARPOL 30.000 DWT atau lebih, *single hull*, yang memuat jenis minyak selain yang disebut diatas, yang dilengkapi *ballast tanks* terpisah pada *protective locations*.
3. *Oil Tanker* kategori 3
 Tanker 5.000 DWT atau lebih, *single hull* yang ukurannya dibawah tanker kategori 1 dan 2 diatas.

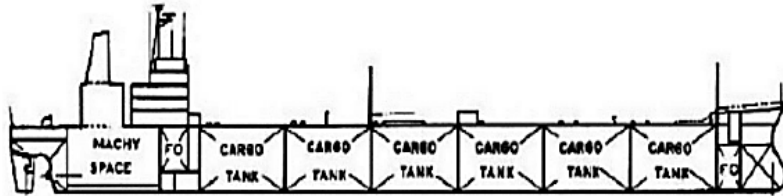
Selanjutnya ditentukan bahwa tanker dengan kategori 1, 2, dan 3 diatas harus memenuhi regulation 13 F, yang menyebutkan tentang adanya *wing tanks* dan *double bottom tanks*, atau "*double hull*" dalam batas-batas yang ditentukan menurut kategori diatas dan tanggal penyerahan kapal. Apabila persyaratan tersebut tidak dipenuhi maka tanker akan mengalami "*phase-out*" (diberhentikan).

1.2.5 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)

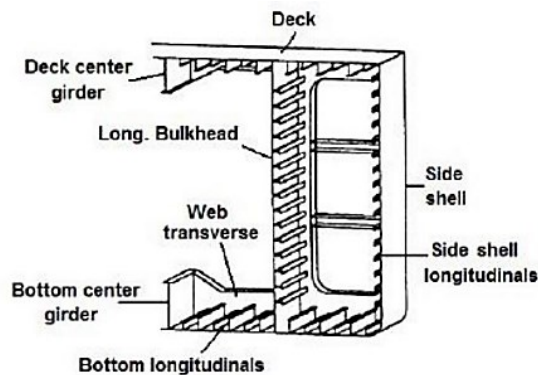
Ruang akomodasi dan permesinan selalu berada di belakang, sesuai dengan Gambar 4. Kargo terpasang dengan pompa muatan yang dipasang pada satu atau lebih kamar pompa balik di ujung atau di tengah bagian tanki

muatan. Panjang kargo tanker yang membawa minyak dibagikan menjadi tank oleh sekat transversal. Bagian kapal ini juga dibagi oleh sekat *longitudinal*.

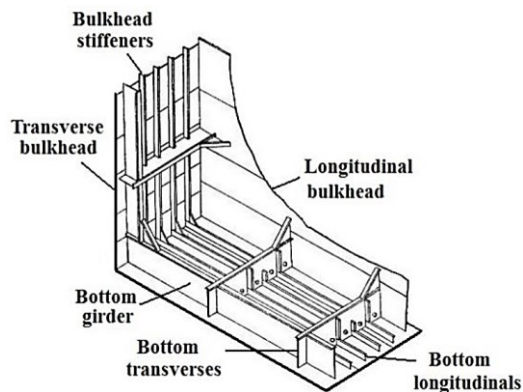


Gambar 4. Konstruksi *single hull tanker* (Shama, 2013)

Pada Gambar 5 tidak ada *double bottom* yang terpasang pada *cargo-carrying* dari kapal tanker konvensional. Struktural utama pada bagian bawah dan sekat melintang pada *single hull oil tanker* ditunjukkan pada Gambar 6.

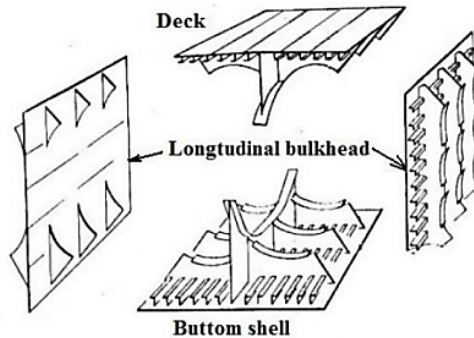


Gambar 5. Struktur utama kapal *single hull tanker* (Shama, 2013)

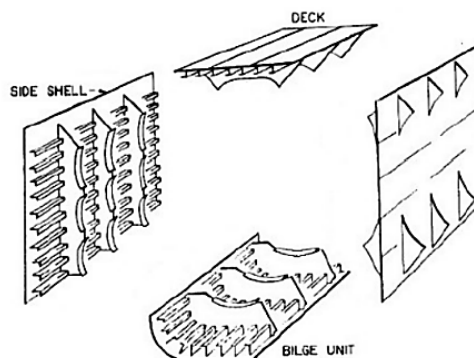


Gambar 6. Struktur utama *bottom* dan sekat melintang pada kapal *single hull tanker* (Shama, 2013)

Struktur utama pada bagian tengah kapal tanker pada *single hull oil tanker* ditunjukkan pada Gambar 7 dan untuk sayap kapal ditunjukkan pada Gambar 8 (Shama, 2013).



Gambar 7. Struktur anggota pada bagian tengah tanker dari *single hull tanker* (Shama, 2013)



Gambar 8. Struktur utama pada kapal *single hull tanker* (Shama, 2013)

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 di terobos (Oceans, 2011). 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 et al., 2021). 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)

1.2.6 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 didefinisikan sebagai tahapan terhadap gaya-gaya luar. Ini diukur dalam bentuk gaya per satuan luas. Dalam praktek tegangan sering diberikan dua pengertian: (1) gaya per satuan luas, (2) tegangan total gaya adalah gaya total pada suatu bidang. Tegangan yang bekerja pada struktur kapal umumnya disebabkan oleh beban aksial dan beban lentur. Akibat dari beban-beban tersebut menghasilkan tegangan aksial dan tegangan lentur yang menyebabkan kelelahan pada struktur kapal. Tegangan normal adalah intensitas gaya normal per unit luasan dan dinyatakan dalam unit gaya per unit luasan, misalnya lb/in² atau N/m². 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 aksidari gaya yang bekerja adalah melalui pusat setiap bagian penampang melintang batang.

Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula. 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.

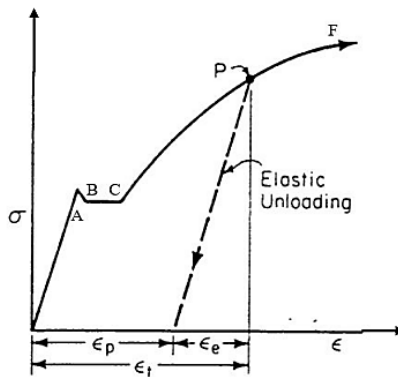
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

Perpanjangan per unit panjang bisa disebut regangan normal (ϵ), dapat diperoleh dengan membagi total pertambahan panjang ΔL dan L regangan tidak berdimensi (Robial, 2016).

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 et al., 1990).



Gambar 9. Hubungan tegangan dan regangan (Bannantine et al., 1990)

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

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

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

Dimana:

- E = Modulus Young (N/mm²)
- F = Gaya (N)
- L = Panjang mula-mula (mm)
- ΔL = Pertambahan panjang atau pendek (mm)
- A = Luas penampang (mm²)

Seperti yang terlihat pada Gambar 9, batas elastis (*elastic limit*) bahan tercapai.

1. Daerah Linear (*Elastic Limit*)
Bila sebuah bahan diberi beban sampai pada titik A, kemudian bebannya dihilangkan, maka bahan tersebut akan kembali ke kondisi semula (tepatnya hampir kembali ke kondisi semula) yaitu regangan “nol” pada titik O. Tetapi bila beban ditarik sampai melewati titik A, hukum Hooke tidak lagi berlaku dan terdapat perubahan permanen dari bahan tersebut.
2. Titik Luluh (*Batas Proporsional*)
Titik dimana suatu bahan apabila diberi suatu bahan memasuki fase peralihan deformasi elastis ke plastis. Yaitu titik sampai di mana penerapan hukum Hook masih bisa ditolerir. Dalam praktek, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis.
3. Deformasi Plastis (*Plastic Deformation*)
Yaitu perubahan bentuk yang tidak kembali ke keadaan semula, bila bahan di tarik sampai melewati batas proporsional. *Ultimate Tensile Strenght* (UTS) merupakan besar tegangan maksimum yang didapatkan dalam uji tarik.
4. Titik Putus
Merupakan besar tegangan di mana bahan yang diuji putus atau patah. Regangan merupakan ukuran mengenai seberapa jauh batang tersebut berubah bentuk. Tegangan diberikan pada material dari arah luar, sedangkan regangan adalah tanggapan material terhadap tegangan. Pada daerah elastis, besarnya tegangan berbanding lurus dengan regangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan benda tersebut disebut modulus elastisitas atau *modulus young*. Pengukuran *modulus young* dapat dilakukan dengan menggunakan gelombang akustik, karena kecepatan jalannya bergantung pada *modulus young*.

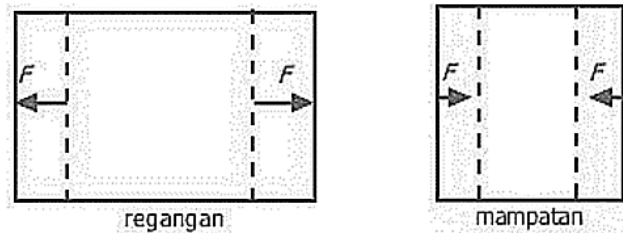
Nilai *modulus Young* hanya bergantung pada jenis benda (komposisi benda), tidak bergantung pada ukuran atau bentuk benda. Hubungan tegangan dan regangan yang terjadi pada analisis struktur dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Tegangan Normal
Pengetahuan dan pengertian tentang bahan dan perilakunya jika mendapat gaya atau beban sangat dibutuhkan di bidang teknik bangunan. Jika suatu batang prismatik, dengan luas penampang seragam di sepanjang batangnya menerima beban atau gaya searah dengan panjang batang, maka gaya tersebut akan menimbulkan tegangan atau tekanan pada penampang batang. Tegangan atau tekanan merupakan besaran gaya per satuan luas tampang. Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan bentuk dan ukuran benda bergantung pada arah dan letak gaya luar yang diberikan. Tegangan menunjukkan kekuatan gaya yang menyebabkan perubahan bentuk benda. Secara matematis dituliskan pada Persamaan 10 dan Gambar 10.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10)$$

Dimana:

Σ = Tegangan (N/mm²)
 F = Gaya (N)
 A = Luas penampang (mm²)



Gambar 10. Tegangan normal

Sumber: <https://dharmarar.blogspot.com/2018/02/tegangan-normal>

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm². Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser.

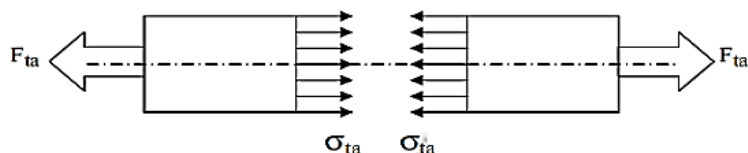
2. Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

Tegangan tarik yaitu tegangan yang timbul akibat gaya tarik. Apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang, dan akibatnya batang ini cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang. Secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 11 dan dapat dilihat pada Gambar 11.

$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (11)$$

Dimana:

σ_{tr} = tegangan tarik (N/mm²)
 F_{tr} = gaya tarik (N)
 A = Luas penampang (mm²)



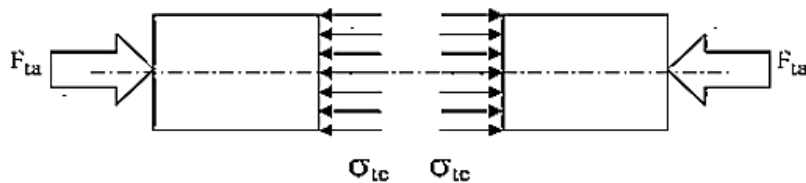
Gambar 11. Tegangan tarik

Sumber: <https://www.tneutron.net/industri/tegangan-tarik-dan-tekan/>

Tegangan tarik (σ_{tr}) terjadi akibat bekerjanya gaya tarik (F_{tr}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio antara perpanjangan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tarik ϵ_{tr} .

3. Tegangan Tekan (*Compressive Stress*)

Jika batang gaya dikenakan pada ujung-ujung batang dalam arah menuju ke batang, sehingga batang dalam kondisi tertekan, maka terjadi tegangan tekan, batang, tegangan tekan (σ_{te}) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan (F_{ta}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan. Perbandingan antara perpendekan (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan σ_{te} secara matematik dapat dilihat pada Gambar 12 dan selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 12:



Gambar 12. Tegangan tekan

Sumber: <https://www.tneutron.net/industri/tegangan-tarik-dan-tekan/>

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (12)$$

4. Tegangan Geser (*Shear*)

Jika gaya normal/tangensial merupakan gaya sejajar arah memanjang batang, gaya geser merupakan gaya yang berarah tegak lurus dengan panjang batang. Besaran tegangan geser dinyatakan dengan simbol (τ) dalam satuan (N/mm^2). Tegangan geser terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser di distribusikan pada sebuah luas penampang melintang yang paralel (tangensial) dengan gaya geser tersebut. Tegangan geser (τ) timbul akibat kerja dari dua gaya geser (F_v) yang saling berlawanan arah (aksi-reaksi) terhadap suatu bidang geser, pada satuan luas bidang penampang tahanan elemen struktur (A). Sehingga bidang penampang tersebut mengalami regangan geser searah bekerjanya gaya. Jika besaran gaya geser (S) dikerjakan pada batang akan menimbulkan tegangan geser (τ). Tegangan geser (τ), yaitu tegangan yang timbul akibat gaya geser atau gaya lintang. Ciri dari gaya geser atau gaya lintang

adalah melintang batang atau tegak lurus batang. Tegangan geser dapat dilihat pada Persamaan 13:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (13)$$

Dimana:

- τ = Tegangan geser (N/mm²)
- P = Gaya geser atau gaya lintang (N)
- A = Luas penampang (mm²)

5. Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

Tegangan lentur memiliki nilai terbesar di atas dan di bawah balok. Tegangan lentur tersebut bekerja secara tegak lurus terhadap penampang melintang dan berada dalam arah longitudinal dari balok. Gaya yang bekerja pada jarak tertentu (L) dari tumpuan benda dengan arah kerja tegak lurus sumbu benda. Sehingga mengakibatkan benda melentur/melengkung disepanjang sumbunya.

6. Tegangan Luluh (*Crushing/Bearing Stress*)

Tegangan luluh merupakan tegangan yang timbul akibat terkonsentrasi/terpusatnya gaya tekan pada suatu daerah kontak yang sangat kecil, diantara suatu elemen struktur yang sedang bekerja sama dalam meneruskan tegangan. Tegangan jenis ini umumnya terjadi pada elemen/komponen struktur yang berfungsi sebagai penyambung.

7. Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut bersumber pada American Institute of Steel Construction (AISC, 2014) dan American Petroleum Institute Recommended Practice 2A (API RP-2A, 1989). Untuk jenis struktur dan jenis pembebanan yang tidak dibahas dalam spesifikasi ini, maka harus dilakukan analisa rasional dengan faktor keamanan yang digunakan pada spesifikasi ini. Apabila tegangan yang terjadi diakibatkan oleh gaya lateral dan gaya vertikal akibat kondisi lingkungan, maka tegangan izin dasar di atas dapat dinaikkan dengan sepertiganya.

1.2.7 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 (torsi).

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 14 berikut:

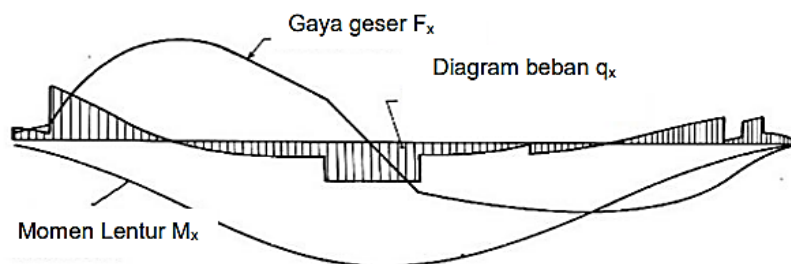
$$\delta l = \epsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (14)$$

Dimana:

- σ = Tegangan yang timbul pada material (N/mm²)
- ϵ = Regangan yang timbul pada material
- P = Beban atau gaya yang bekerja pada material (N/mm²)
- A = Luas penampang material (mm²)
- E = Modulus elastisitas material (N/mm²)
- l = Panjang material (mm)
- δ = Deformasi material (mm)

1.2.8 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 13. (Shama, 2013).



Gambar 13. 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 adalah:

$$q_x = b_x - w_x \quad (15)$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal adalah:

$$F_x = \int_0^x (b_x - w_x) dx \quad (16)$$

$$M_x = \int_0^x F_x dx \quad (17)$$

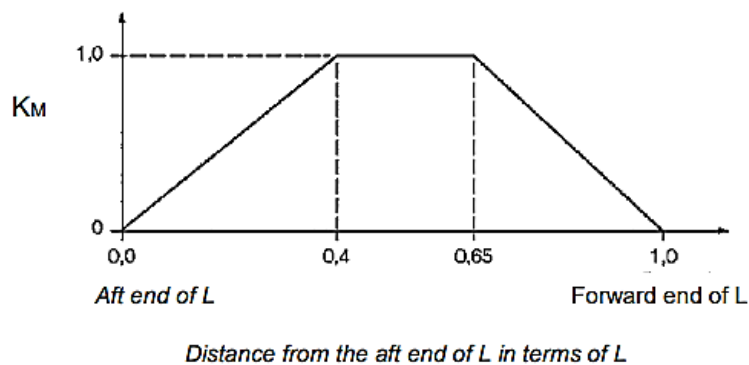
DNV GL., 2017a, memberikan formula besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang (M_{SW}) untuk panjang kapal lebih dari 90 m, sebagai berikut:

$$M_{SW} = -0,05168 K_M CL^2 B (C_b + 0,7) \text{ kNm}, \text{ kondisi } \textit{hogging} \quad (18)$$

$$M_{SW} = +0,01 K_M CL^2 B (11,97 - 1,9 C_b) \text{ kNm}, \text{ kondisi } \textit{sagging} \quad (19)$$

Dimana:

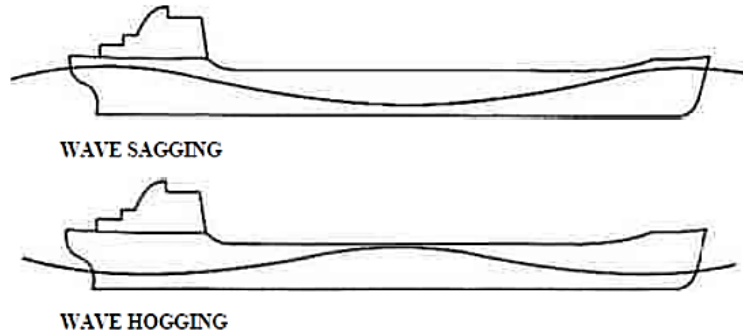
- K_M = Faktor distribusi seperti pada Gambar 14
- L, B = Lebar dan panjang kapal dalam satuan meter
- C_b = Koefisien blok, tidak boleh kurang dari 0,6
- C = $10,75 - [(300 - L)/100] 1,5$ untuk $90 < L < 300$ m
- = 10,75 untuk $300 < L < 350$ m
- = $10,75 - [(L - 350)/150] 1,5$ untuk $350 < L < 500$ m



Gambar 14. Faktor distribusi K_M (DNV GL., 2017a)

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*. Adapun

kondisi kapal akan mengalami *hogging* ataupun *sagging* dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Momen lentur vertikal akibat gelombang (Bachman, 1991)

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

$$M_W = -0,11K_M CL^2 B(C_b + 0,7) \text{ kNm}, \text{ kondisi } \textit{hogging} \quad (20)$$

$$M_W = +0,19K_M CL^2 BC_b \text{ kNm}, \text{ kondisi } \textit{sagging} \quad (21)$$

dimana, C dan K_M seperti pada Persamaan 18 dan 19.

Kombinasi beban statis dan dinamis (M_t) 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., 2017b).

$$M_t = M_{SW} + 1,2M_W \quad (22)$$

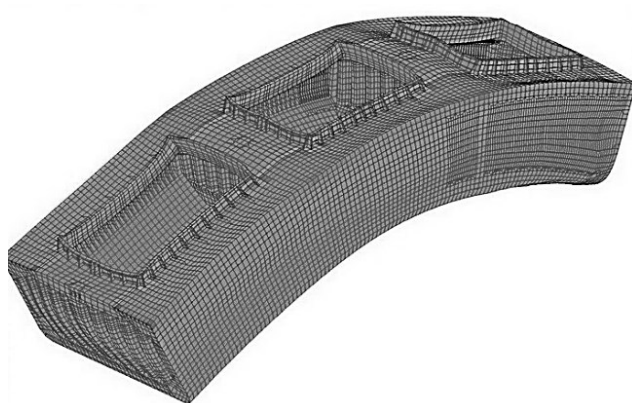
1.2.9 Finite Element Method (FEM)

Finite element method atau 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 (Isword, 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.

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, 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).



Gambar 16. *Three cargo hold single bulk carrier*
Sumber: <https://www.researchgate.net/>, 2020

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

Metode elemen hingga diimplementasikan oleh Turner, Clough, Martin, dan Topp (1956). Namun, disebutkan di beberapa sumber bahwa metode elemen hingga telah jauh ada sebelumnya.

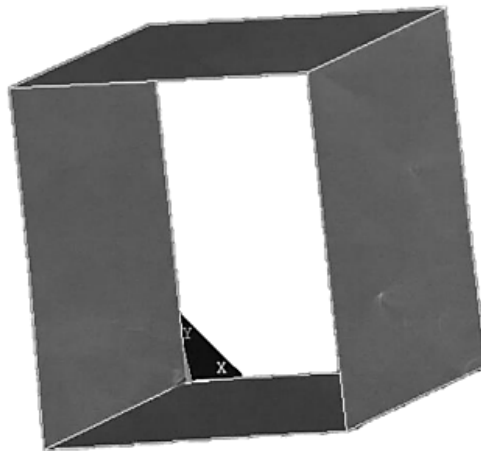
Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan matematis dari suatu gejala *physis* yang diantaranya adalah tegangan, regangan, kekuatan, dan analisa getaran. Metode elemen hingga inilah yang dapat membandingkan antara perhitungan dengan menggunakan *software catia* dan dengan menggunakan perhitungan secara manual. Dalam hal ini metode elemen hingga yang akan dipergunakan adalah metode elemen hingga 2D (bidang) yaitu elemen segitiga dengan 3 node. Metode elemen hingga 2D dalam hal ini elemen bidang segitiga dengan 3 node didasarkan untuk keperluan analisa suatu continuum yang berupa luasan. Permasalahan yang dapat dipecahkan oleh elemen bidang segitiga ini

menyangkut matrik kekakuan elemen, *plain strain* dan *plain stress* serta *vector- vector* gaya yang bekerja pada elemen dari produk tongkat lansia tersebut. Secara terperinci hal-hal yang disebut akan ditinjau dalam system koordinat lokal dan system koordinat global (Mulyadi, 2011).

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/mm², *Poison Ratio* = 0,3 dan densitas = $7,8 \times 10^{-5}$ N/mm² adapun bentuk box girder dapat dilihat seperti gambar yang telah didesain di ANSYS.

Gambar 17 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 17. *Box Girder* tanpa elemen di tengah batang (Muis-Alie et al., 2021)

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.

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 (Isworo, 2018). Perhitungan kekuatan batas kapal tanker harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria Persamaan 23. (Veritas, 2009).

$$M_t = \frac{M_u}{\gamma_R} \quad (23)$$

Dimana M_t adalah momen lentur-batas total vertikal dan γ_R adalah faktor keamanan untuk kekuatan batas-lentur vertikal (1.20 untuk kondisi *hogging* 1.21 untuk kondisi *sagging*).

Berdasarkan teori balok, tegangan lentur pada penampang yang mengalami momen lentur dapat dihitung dengan Persamaan 24.

$$\sigma = \frac{M \times z}{I} \quad (24)$$

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 25.

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{S} \quad (25)$$

Dimana S adalah modulus penampang. Persamaan penampang pada kapal dibagi menjadi dua yang bisa dilihat pada Persamaan 26 dan Persamaan 27.

$$S_d = \frac{1}{Z_d} \quad (26)$$

$$S_b = \frac{1}{Z_b} \quad (27)$$

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 28 dan Persamaan 29.

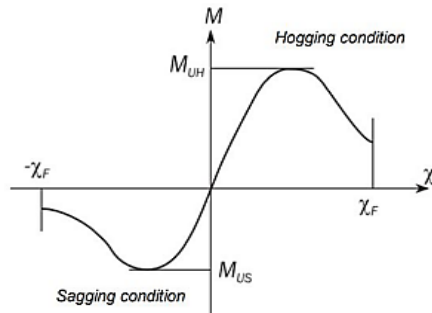
$$M_{US} = S_d \sigma_{ud}, \text{ untuk } \textit{deck} \quad (28)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub}, \text{ untuk } \textit{bottom} \quad (29)$$

Dimana M_{US} dan M_{UH} adalah kekuatan-batas momen lentur untuk *sagging* dan *hogging* dan σ_{ud} dan σ_{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 30. Dimana M_{SW} dan M_W menunjukkan momen lentur air tenang dan momen lentur akibat gelombang (Yao & Fujikubo, 2016).

$$M = M_{SW} + M_W \quad (30)$$

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 18. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.



Gambar 18. Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan (BKI, 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.

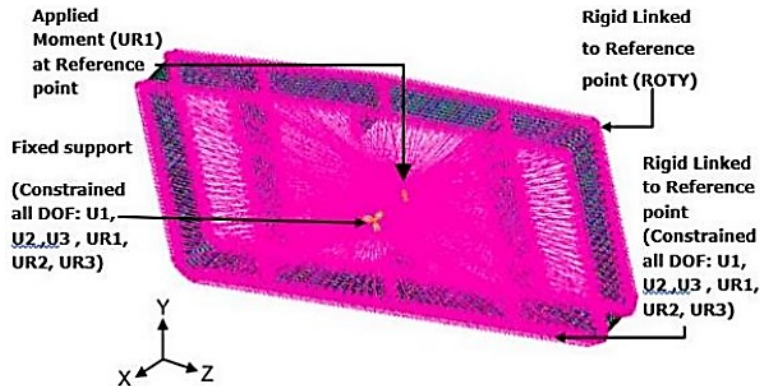
Kekuatan-batas momen lentur kapal pada kondisi *intact* dan kondisi kerusakan dapat dianalisa dengan menggunakan tipe analisa statis, analisa quasi-statis, dan analisa dinamis. Analisa statis dan analisa quasi statis banyak digunakan oleh para peneliti untuk menghitung kekuatan-batas struktur kapal.

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 *nonlinear*. 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 19. Kondisi batas untuk kontrol kelengkungan (Rizkiani 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 19.

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. Metode NLFEA adalah salah satu metode elemen hingga yang digunakan dan direkomendasikan oleh biro klasifikasi untuk menghitung kekuatan struktur kapal, disamping metode lainnya seperti teori balok, metode *presumed stress distribution*, *ISUM* dan *ISFEM*.

Kurva tegangan regangan 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 ketebalan *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*).

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh kerusakan akibat kandas (*grounding*) yang terletak asimetris terhadap kekuatan membujur struktur kapal VLCC pada kondisi *hogging* dan *sagging*.
2. Bagaimana perbandingan nilai momen lentur-batas vertikal pada kapal VLCC antara kondisi *intact* dengan kondisi kerusakan: *Grounding Damage* Variasi 1 dan kondisi kerusakan: *Grounding Damage* Variasi 2 pada saat *hogging* dan *sagging*.
3. Berapa persentase selisih momen lentur-batas vertikal antara kapal VLCC kondisi *intact* dan kapal VLCC dengan kerusakan *grounding* pada saat *hogging* dan *sagging* untuk variasi 1 dan variasi 2.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Beban yang bekerja yaitu momen lentur vertikal membujur yang bekerja pada kapal.
2. Kerusakan *grounding* dengan dimensi tertentu pada lambung kapal *single-hull tanker Very Large Crude Carrier* (VLCC).
3. Tidak meneliti kekuatan melintang kapal.

1.5 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis pengaruh kerusakan akibat kandas (*grounding*) yang terletak asimetris terhadap kekuatan membujur struktur kapal VLCC pada kondisi *hogging* dan *sagging*.
2. Membandingkan nilai momen lentur-batas vertikal pada kapal VLCC antara kondisi *intact* dengan kondisi kerusakan: *Grounding Damage* Variasi 1 dan kondisi kerusakan: *Grounding Damage* Variasi 2 pada saat *hogging* dan *sagging*.
3. Menentukan persentase selisih momen lentur-batas vertikal antara kapal VLCC kondisi *intact* dengan kapal VLCC dengan kerusakan *grounding* pada saat *hogging* dan *sagging* untuk variasi 1 dan variasi 2.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian pengaruh kerusakan *Grounding* yang terletak asimetris terhadap kekuatan membujur kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) 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. Bagi peneliti, memberikan pengetahuan cara menganalisis pengaruh kerusakan *grounding* yang terletak asimetris terhadap kekuatan membujur kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) dan sebagai tugas akhir sarjana Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

1.7 Sistematika Penulisan

Untuk mendapatkan alur penulisan yang jelas dan sistematis, maka tugas akhir ini disusun menjadi beberapa bagian, yaitu:

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang permasalahan atau alasan yang mendasari penulis dalam melakukan penelitian mengenai pengaruh kerusakan *grounding* yang terletak asimetris terhadap kekuatan membujur kapal VLCC. Selain itu berisi juga mengenai studi literatur berupa teori-teori dasar mengenai gambaran umum kapal tanker dan mengenai konstruksi kapal tanker.

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 kekuatan membujur antara kapal VLCC yang memiliki pada kondisi pertama dan kedua sebelum dan setelah kerusakan kandas atau *grounding* dengan menggunakan *Finite Element Method* (FEM).

BAB III Hasil

Bab ini berisi pembahasan tentang investigasi kekuatan membujur pada kapal VLCC setelah mengalami *grounding*, mulai dari dimensi kerusakan kapal yang digunakan dan gambar penampang kapal VLCC yang diteliti

BAB IV Pembahasan

Bab ini berisi pembahasan tentang investigasi kekuatan batas menggunakan software ANSYS berupa nilai momen yang bekerja pada kondisi *hogging* dan *sagging*, nilai tegangan kerja pada penampang kapal dan perbandingan kekuatan batas kapal VLCC menggunakan metode elemen hingga.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab ini merupakan penutup dari keseluruhan isi penelitian yang mencakup kesimpulan dari hasil pembahasan.

BAB II. METODOLOGI 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 kekuatan membujur kapal terhadap kerusakan akibat *grounding* yang terletak asimetris pada kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) dengan 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 bulan Maret 2024 sampai dengan bulan Agustus 2024.

2.3 Penyajian Data

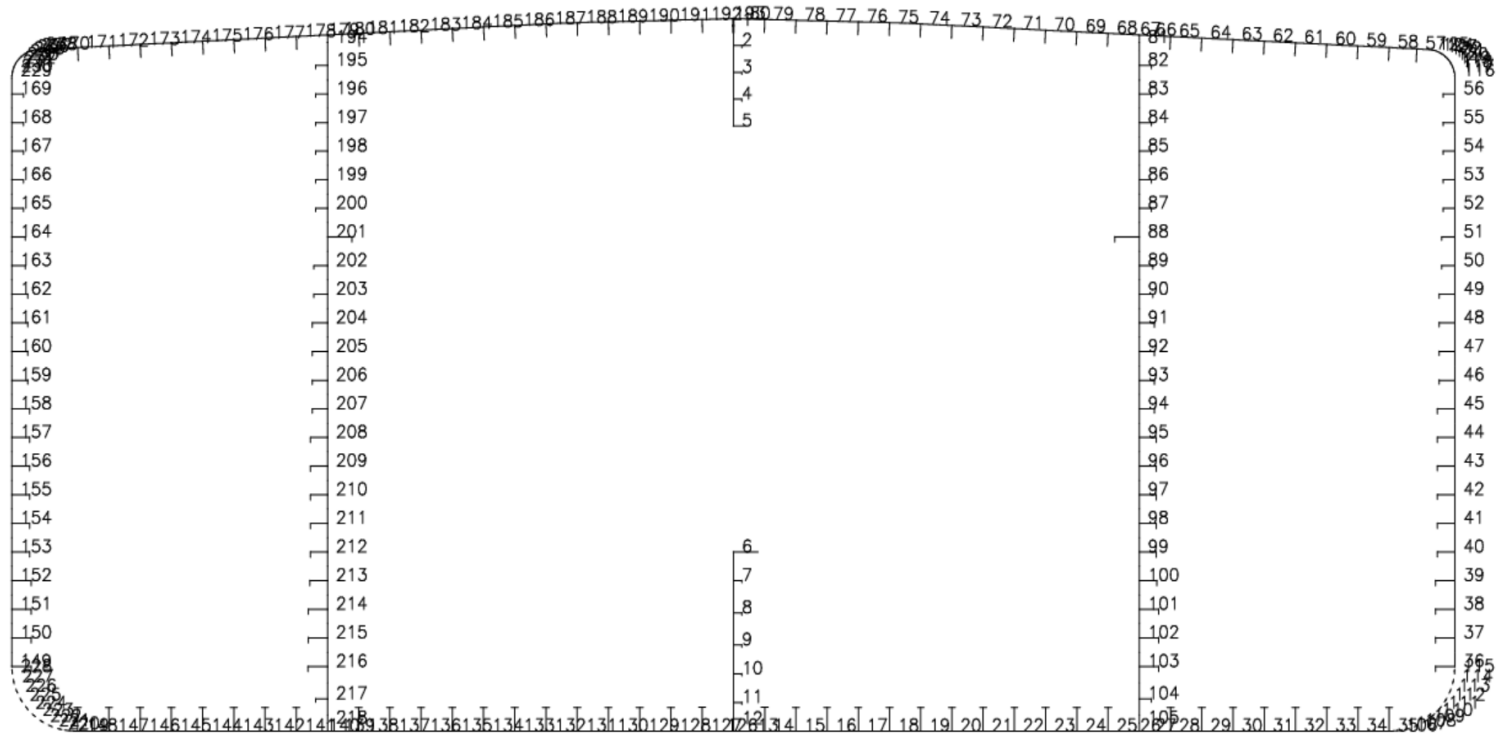
Penelitian ini menggunakan kapal VLCC dengan ukuran utama dan material properties yang ditunju (Muis-Alie et al., 2012) sebagai berikut:

- Lebar Kapal, B : 42 m
- Tinggi Kapal, H : 20,3 m

Tabel 1. Material properties

Jenis Material	AH36
Densitas (kg/m^3)	7850
Modulus Young (N/mm^2)	210000
Rasio Poisson	0,3
Tegangan Luluh (N/mm^2)	290
Modulus Tan (N/mm^2)	625

Konfigurasi stiffener penampang dan konfigurasi material kapal tanker VLCC seperti pada Gambar 20 dan Tabel 2 sebagai berikut:



Gambar 20. Konfigurasi penampang *midship* kapal VLCC
 sumber : (Muis-Alie et al., 2012)

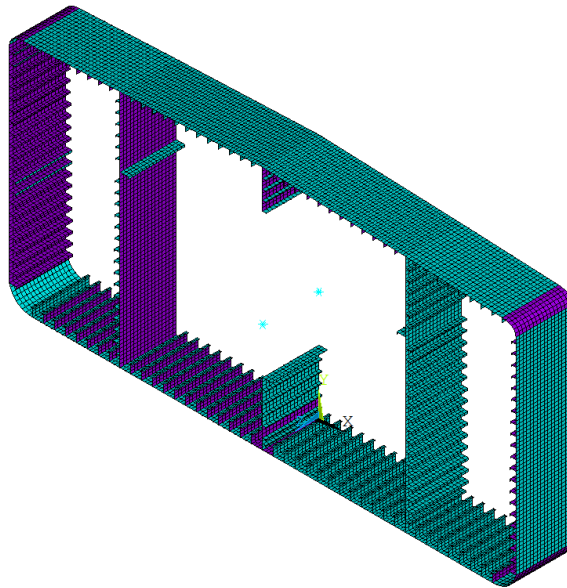
Tabel 2. Konfigurasi material stiffener kapal VLCC

No. Stiffener	No. Element	Description	Type
1	2	L250/12 × 67/18	<i>Angle</i>
2	5	L300/19	<i>Flat-Bar</i>
3	6	L700/30	<i>Flat-Bar</i>
4	13	L675/13 × 200/25	<i>Tee-Bar</i>
5	36	L572/12 × 150/22	<i>Angle</i>
6	40	L522/11 × 150/22	<i>Angle</i>
7	42	L518/11.5 × 150/18	<i>Angle</i>
8	46	L468/11.5 × 125/18	<i>Angle</i>
9	50	L400/12 × 100/18	<i>Angle</i>
10	52	L350/12 × 100/17	<i>Angle</i>
11	58	L350/28	<i>Flat-Bar</i>
12	82	L350/12 × 100/17	<i>Angle</i>
13	88	L716/12.5 × 150/16	<i>Angle</i>
14	89	L400/12 × 100/18	<i>Angle</i>
15	91	L450/11.5 × 125/18	<i>Angle</i>
16	95	L500/11.5 × 150/18	<i>Angle</i>
17	100	L522/11 × 150/22	<i>Angle</i>
18	101	L572/12 × 150/22	<i>Angle</i>
19	104	L350/12 × 100/17	<i>Angle</i>

2.4 Analisa Data

Dalam analisis data ada beberapa tahapan 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 lentur-batas vertikal yang dihitung dengan penjumlahan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang dimana perhitungan dilakukan 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 300 mm. Adapun contoh gambar meshing dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21. *Meshing*

Penelitian ini menggunakan proses control 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

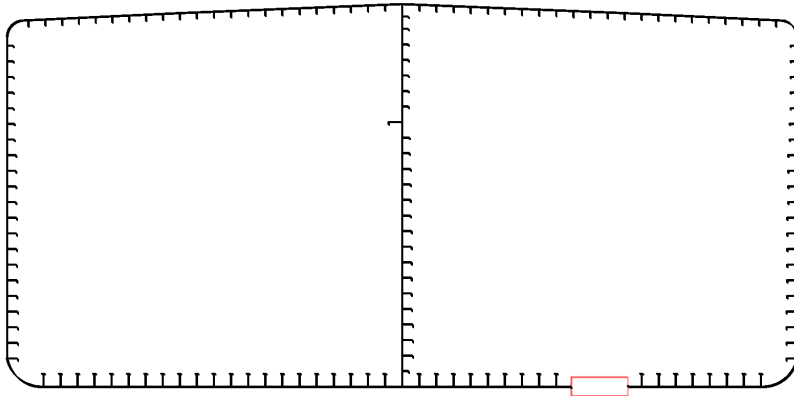
Kegiatan penelitian dilakukan dengan studi literatur dari berbagai sumber seperti artikel-artikel ilmiah pada jurnal dan proceeding serta buku yang berhubungan dengan tema penelitian. Data diperoleh di Laboratorium ataupun dari sumber-sumber lainnya

2. Tahapan Kedua

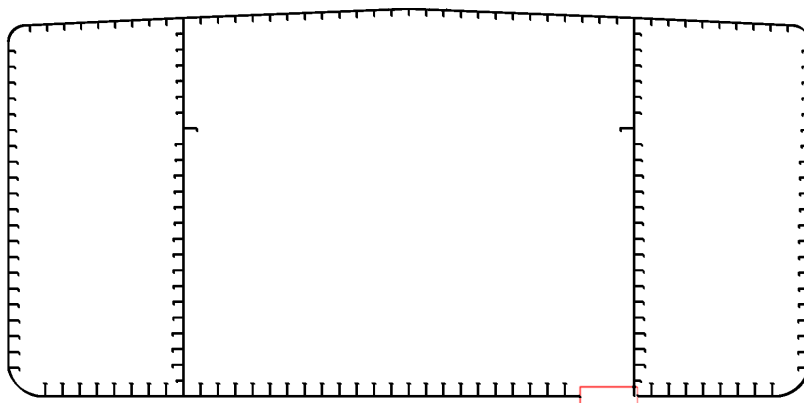
Setelah mengadakan studi atau pemahaman terhadap data yang dikumpulkan, dilanjutkan dengan pengolahan data berupa:

- 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 arah membujur pada salah satu sisi lambung kapal VLCC yang terletak asimetris dengan menggunakan metode elemen hingga. Konfigurasi penampang *midship* kapal VLCC dengan satu sekat

longitudinal di tengah lambung kapal (Variasi 1) dengan kerusakan *grounding* asimetris arah membujur dapat dilihat pada Gambar 22 dan Konfigurasi penampang *midship* kapal VLCC dengan dua sekat longitudinal yang terletak secara simetris (Variasi 2) dengan kerusakan *grounding* asimetris arah membujur dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 22. *Grounding Damage Variasi 1*



Gambar 23. *Grounding Damage Variasi 2*

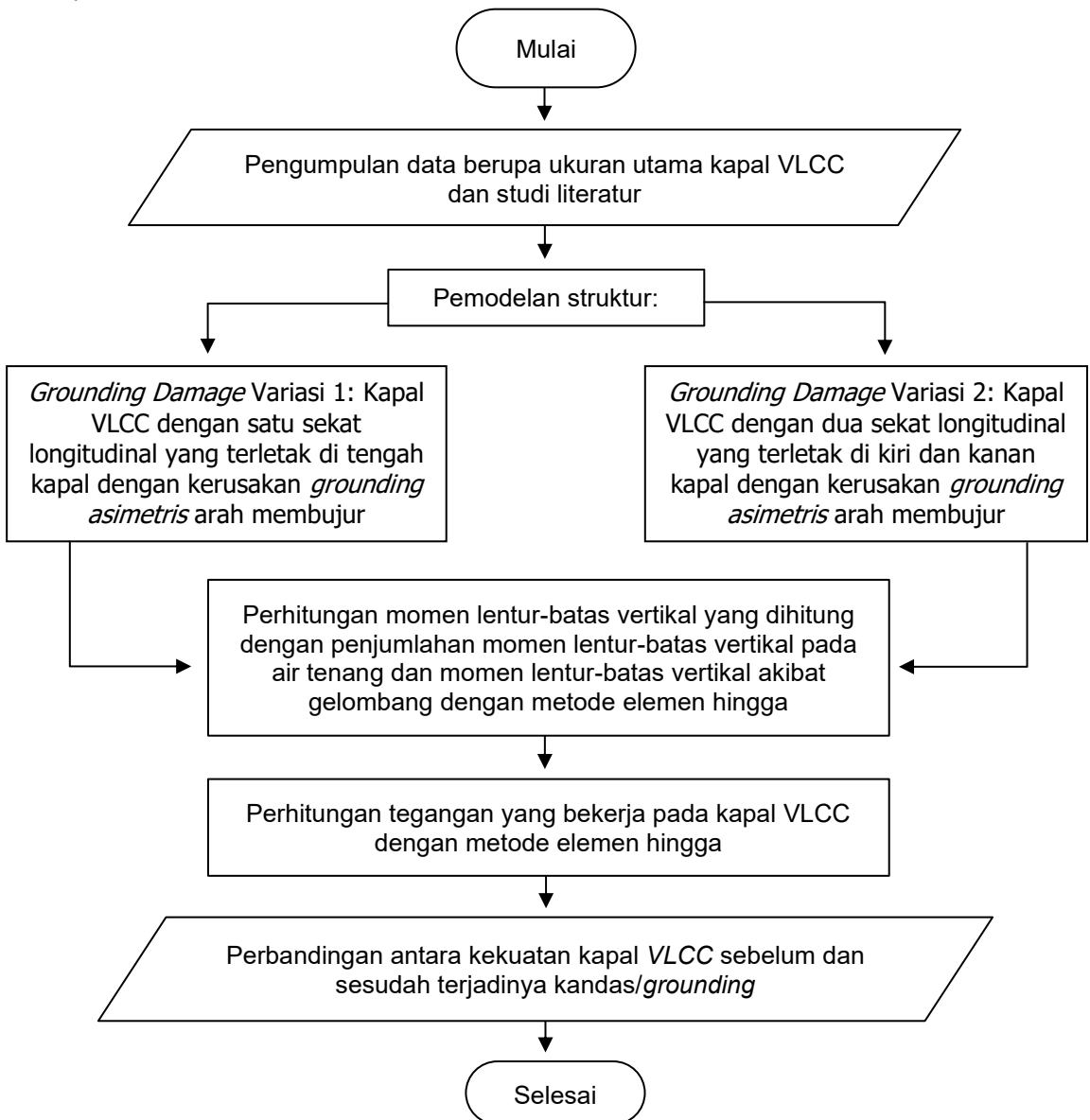
- d. Mengidentifikasi gaya-gaya yang bekerja pada kapal VLCC yang mengakibatkan kapal tersebut mencapai kekuatan batasnya
3. Tahapan Ketiga
Menghitung kekuatan batas dengan metode elemen hingga yang menghasilkan kekuatan kapal setelah kandas/*grounding*
4. Hasil Penelitian
Pada hasil penelitian dengan 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 membujur kapal VLCC setelah terjadi kandas/*grounding* akan didapatkan

2.6 Diagram Alir

Alur penelitian atau diagram alir dalam penelitian “Pengaruh Kerusakan *Grounding* yang Terletak Asimetris Terhadap Kekuatan Membujur Kapal VLCC” dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24. Diagram Alir