

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) menerbitkan *Review of Maritime Transport* (RMT) menyatakan bahwa kapal *tanker* merupakan jenis kapal terbanyak dengan presentasi 29,2% di dunia (UNCTAD, 2018). Salah satu jenis kapal *tanker* adalah *Very Large Crude Carrier* (VLCC) merupakan kapal pengangkut minyak mentah berkapasitas 300.000 ton DWT (Djoh, 2021). VLCC memiliki konstruksi tipe *single hull* sehingga memiliki ruang muat yang besar dibandingkan *tanker double hull* (Koesdaryanta, 2022). Akan tetapi, hal tersebut memiliki kekurangan dari kekuatan konstruksi kapal VLCC.

Hal ini tentu sangat berbahaya apabila VLCC mengalami kandas (*grounding*) baik yang disebabkan oleh kesalahan navigasi, kesalahan manusia maupun karena kondisi lingkungan (Nunki, 2020). Beberapa kasus kapal yang mengalami *grounding* terjadi pada kapal *Motor Tanker Succes Altair XLII* kandas di Sungai Musi menyebabkan lambung kapal bocor sehingga terjadi tumpahan minyak yang mencemari Sungai Musi beserta ekosistem disekitarnya (Muhammad, 2019). Di tahun berikutnya, kapal *Motor Tanker Menggala P.34* kandas di perairan Terminal BBM (TBBM) Pertamina Dobo mengakibatkan operasi di TBBM Pertamina terhambat (Putra, 2020) dan pada tahun yang sama kapal *Motor Vessel Wakashio* menabrak koral di Mauritius mengakibatkan tumpahan minyak yang sangat besar di laut dan pantai Mauritius (Hakim et al, 2021). Dampak yang ditimbulkan dari kandasnya kapal pengangkut minyak sangatlah besar yang akan berdampak terhadap aspek kesehatan, ekonomi dan kelestarian ekosistem laut. Dari aspek kesehatan dan kelestarian biota laut, tumpahan minyak akan menyebabkan air laut terkontaminasi yang akan membahayakan biota laut dan akan membahayakan manusia yang mengkonsumsinya. Disisi lain dari aspek ekonomi, tumpahan minyak tersebut harus dibersihkan yang membutuhkan biaya yang sangat besar. Tumpahan minyak memberikan dampak jangka panjang yang akan membahayakan manusia dan biota laut (Alfa, 2019).

Untuk mencegah kasus *grounding*, terdapat regulasi internasional seperti *International Safety Management Code* (ISM) Code bab IX menyatakan bahwa keselamatan pelayaran setidaknya harus memenuhi 2 kriteria yaitu layak laut dan layak layar. Keselamatan pelayaran secara internasional tercantum dalam *Safety of life at Sea* (SOLAS) 1974 Pasal IX yaitu *International Safety Management* (ISM) Code yang diperbaiki dengan Amandemen 1978 berlaku bagi semua kapal yang melakukan pelayaran antara pelabuhan-pelabuhan di dunia (Rahman et al, 2017). Selain itu, terdapat pula regulasi nasional pada Undang-Undang No.17 Tahun 2008 tentang Pelayaran yang mengatur lalu lintas lewat laut, pengangkutan barang atau orang melalui laut, kegiatan kenavigasian dan perkapalan termasuk aspek keselamatan serta penegakan hukumnya (Utomo, 2017).

Walaupun telah ada regulasi untuk mencegah kasus *grounding* tetapi masih terdapat kasus kapal pengangkut minyak kandas yang masih sering terjadi. Hal ini dibuktikan dari data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral kasus tumpahan

minyak pada tahun 2018 tercatat 53.055,57 barel, berlanjut di tahun 2019 terdapat 9.110,20 barel dan pada tahun 2020 terdapat 138,03 barel tumpahan minyak (Statistik Minyak dan Gas Bumi, 2021). Mengingat bahwa kasus kecelakaan kapal yang paling sering terjadi disebabkan oleh *grounding* sebanyak 244 kasus (Permana dan Setyawan, 2019). Sejalan dengan hal tersebut, jumlah kapal VLCC yang menggunakan *single hull* mencapai 70% di Indonesia.

Berdasarkan kasus tersebut, terdapat riset-riset yang pernah dilakukan membahas mengenai analisis kekuatan sisa struktur kapal *bulk carrier* dan kapal *tanker* yang mengalami kerusakan akibat tubrukan menggunakan metode Smith (Muis Alie, 2012), analisa pengaruh kerusakan asimetris pada *bulk carrier* tipe panama menggunakan analisa elemen hingga DYTRAN (Muis Alie, 2016), analisis kekuatan *girder hull* kapal pada kerusakan *grounding* (Muis Alie, 2018), kekuatan batas struktur kapal *tanker* yang mengalami kerusakan akibat kandas dan tubrukan (Latumahina, 2017), analisis kekuatan konstruksi alas kapal akibat *grounding* (Permana dan Setyawan, 2019). Selain itu terdapat pula penelitian mengenai simulasi kerusakan tubrukan pada kapal VLCC terhadap kekuatan membujur (Setia, 2022).

Namun dari beberapa penelitian yang telah disebutkan belum terdapat penelitian mengenai variasi desain sekat kapal VLCC menggunakan *single hull* ketika mengalami *grounding* khususnya pada bagian bilga kapal. Oleh karena itu, penelitian ini berjudul “Studi Komparatif Variasi Desain Sekat Kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) terhadap Kekuatan Membujur pada Kasus *Grounding* di Bilga”. Maka penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi kapal yang lebih maju melalui desain variasi sekat yang optimal terhadap kasus *grounding* di bilga tetapi juga meningkatkan aspek keselamatan dan efisiensi operasional kapal VLCC secara keseluruhan.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian “Studi Komparatif Variasi Desain Sekat Kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) terhadap Kekuatan Membujur pada Kasus *Grounding* di Bilga” sebagai berikut:

1. Bagaimana desain variasi sekat kapal VLCC?
2. Bagaimana pengaruh variasi sekat kapal VLCC pada kasus *grounding* di bilga?
3. Apa pengaruh *grounding* di bilga terhadap kekuatan membujur VLCC?

1.3 Batasan Masalah

Untuk memastikan penelitian dapat terarah sesuai dengan kerangka yang direncanakan, maka penelitian dibatasi dengan beberapa hal berikut:

1. Ada 3 variasi sekat yang dianalisa yaitu variasi sekat utuh, variasi 1 sekat, dan variasi 2 sekat.
2. *Grounding* sepanjang 2 meter dianggap searah yaitu membujur.
3. Analisa numerik dengan metode NLFEM (*Non-linear Finite Element Method*) menggunakan *software* elemen hingga.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah :

1. Untuk mengetahui desain variasi sekat kapal VLCC.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi sekat kapal VLCC pada kasus *grounding* di bilga.
3. Untuk mengetahui pengaruh *grounding* di bilga terhadap kekuatan membujur VLCC.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian “Studi Komparatif Variasi Desain Sekat Kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) terhadap Kekuatan Membujur pada Kasus *Grounding* di Bilga” adalah:

1. Bagi akademis, penelitian ini akan memberikan kontribusi dalam bidang teknik kelautan dan struktur kapal dengan memperluas pemahaman tentang pengaruh variasi desain sekat terhadap kekuatan membujur kapal VLCC dalam kondisi *grounding*. Penelitian ini dapat menjadi landasan bagi penelitian lebih lanjut dan pengembangan metode perencanaan yang lebih efektif dalam industri maritim.
2. Bagi industri, penelitian ini memberikan kontribusi dalam memilih desain sekat yang optimal untuk kapal VLCC, sekaligus meningkatkan keselamatan pelayaran dengan mengurangi resiko kerusakan akibat *grounding* sehingga dapat mengurangi biaya terkait perbaikan dan perawatan kapal.
3. Bagi pemerintah, penelitian ini dapat menjadi dasar untuk pengembangan kebijakan dan regulasi yang lebih efektif dalam aspek keselamatan pelayaran dan perlindungan lingkungan laut.

1.6 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan digunakan sebagai gambaran alur penulisan untuk memudahkan pembaca memahami isi dari penelitian ini yang mengacu pada pedoman “Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Hasanuddin 2023” sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang permasalahan yang mendasari penulis melakukan penelitian mengenai “Studi Komparatif Variasi Desain Sekat Kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) terhadap Kekuatan Membujur pada Kasus *Grounding* di Bilga” menggunakan NLFEM (*Non-linear Finite Element Method*), rumusan masalah yang dianalisis, batasan masalah penelitian agar penelitian lebih spesifik dan dalam bab ini terdapat tujuan dari penelitian dan manfaat penelitian yang dapat diambil dari penelitian ini serta sistematika penulisan proposal skripsi. Selain itu, bab ini juga berisi mengenai teori yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB II : METODE PENELITIAN

Bab ini berisi jenis penelitian, waktu dan tempat penelitian, variabel penelitian, penyajian data kapal VLCC, diagram alir penelitian dan tahapan penelitian yang dilakukan.

BAB III : HASIL

Bab ini berisi mengenai analisa kekuatan membujur kapal VLCC pada variasi 1 sekat dan variasi 2 sekat setelah mengalami *grounding* di bilga dengan metode NLFEM (*Non-linear Finite Element Method*) menggunakan *software* elemen hingga. Hasil analisis tersebut kemudian di komparasi dengan variasi sekat utuh.

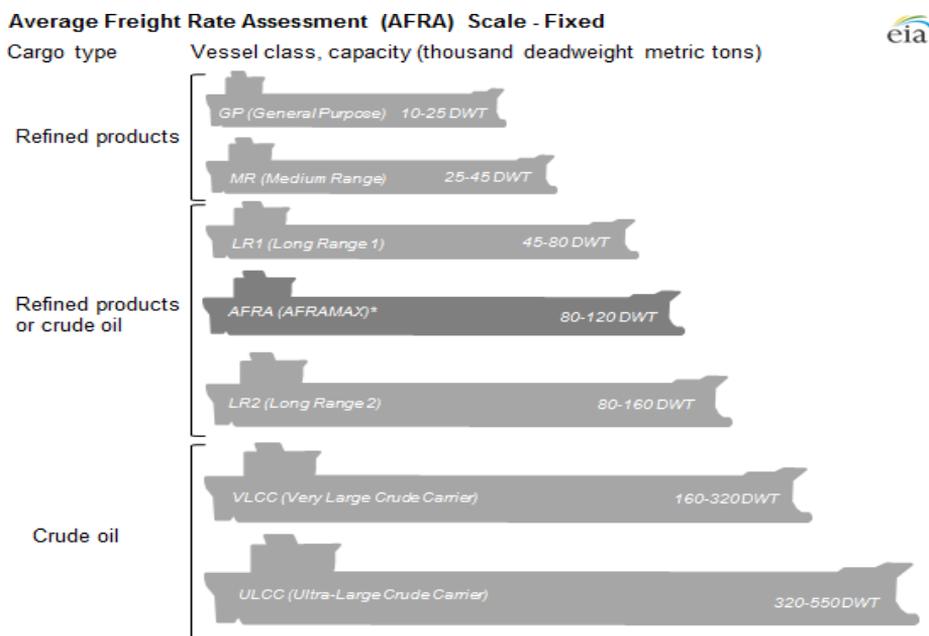
BAB IV : PENUTUP

Bab ini berisi rangkuman hasil penelitian yang telah dilakukan menjadi sebuah kesimpulan dan saran yang ditujukan kepada penelitian selanjutnya.

1.7 Teori

1. Kapal VLCC

Berdasarkan jenis muatannya kapal VLCC termasuk dalam jenis *crude carrier* dengan kapasitas muat dari 160.000 sampai dengan 300.000 ton DWT yang mengangkut minyak mentah yang umumnya homogen (Jurnal Maritim, 2017).

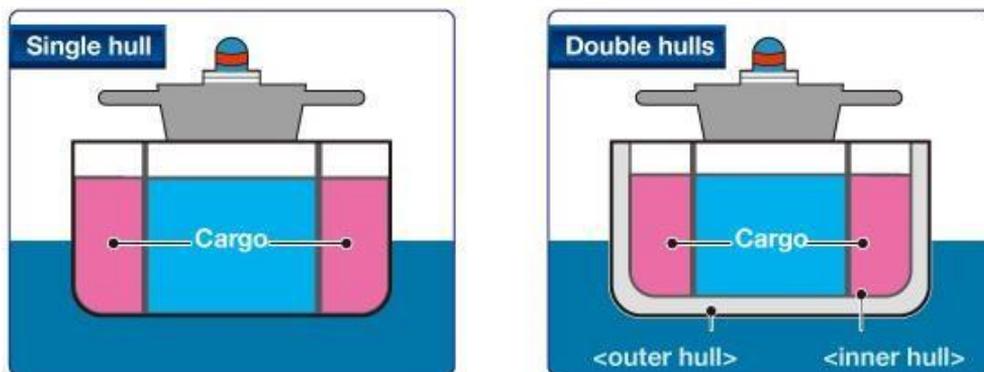


Gambar 1. Ukuran kapal tanker

Sumber: *Bunker Ports News Worldwide*, 2024

2. Single Hull

Konstruksi lambung kapal *tanker* terbagi menjadi 2 yaitu lambung tunggal (*single hull*) dan lambung ganda (*double hull*) (Iqrani, 2023). Dalam penelitian ini menggunakan *tanker* konstruksi *single hull* yang membawa minyak langsung dalam lambung. Kapal *tanker single hull* memiliki tingkat kecelakaan yang lebih besar dari *double hull* karena hanya memiliki satu lapis lambung.



Gambar 2. Perbedaan kapal *single-hull tanker* dan *double-hull tanker*

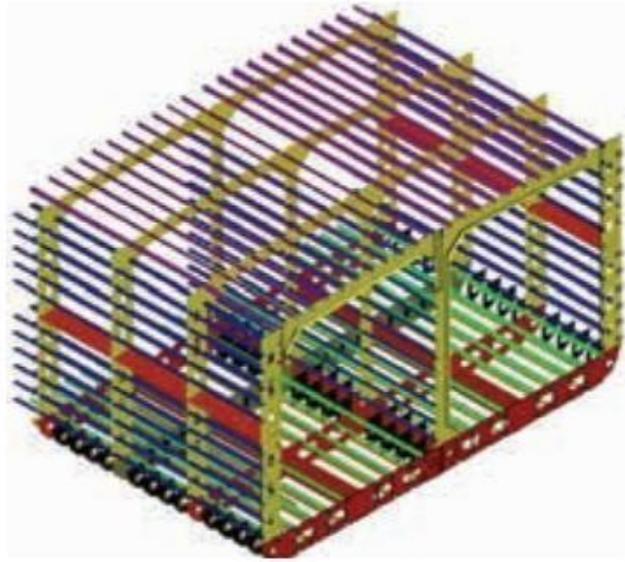
Sumber: *Marine and Maritime Technology*, 2021

3. Konstruksi Membujur

Konstruksi kapal dibedakan menjadi tiga yaitu konstruksi melintang (*transverse framing system*), konstruksi membujur (*longitudinal framing system*) dan sistem konstruksi kombinasi (*combination framing system*). Dalam hal ini digunakan konstruksi melintang merupakan konstruksi dengan penguat longitudinal dari balok-balok atau penegar. Konstruksi membujur berfungsi untuk mencegah tegangan lengkung membujur (*longitudinal bending stress*) yang disebabkan oleh kondisi *sagging* dan *hogging* (Wijaya, 2017).

Untuk jarak pembujur (*longitudinal*) lebih rapat sedangkan jarak antar gading (*frame*) ataupun pelintang (*transverses*) lebih lebar. Pada gading besar (*main frame*) dipasang membujur pada sisi kapal dengan jarak antara sekitar 700 mm-1.000 mm yang diukur ke arah vertikal. Gading-gading pada sisi disebut pembujur sisi (*side longitudinal*) sementara gading kecil pada sistem melintang disebut pelintang sisi (*side transverse*) dengan jarak 3-5 meter. Pada bagian alas terdapat juga pembujur-pembujur alas (*bottom longitudinal*) dan pada alas dalam dinamakan pembujur alas dalam (*inner bottom longitudinal*). Wrang-wrang pada sistem membujur juga dinamakan pelintang alas (*bottom transverse*) (Wijaya, 2017).

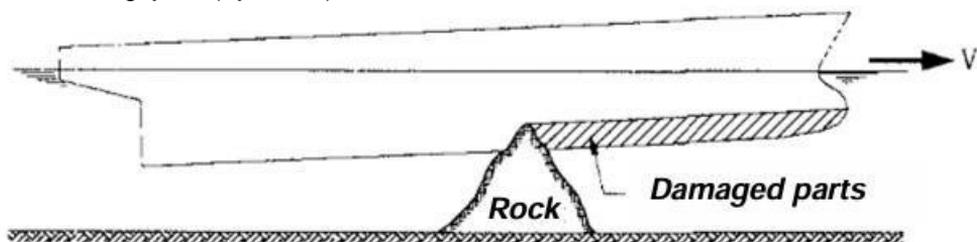
Pada geladak juga terdapat pembujur geladak (*deck longitudinal*) maupun pelintang geladak (*deck transverse*). Maka dalam konstruksi membujur terdapat banyak elemen-elemen yang terpasang membujur dibandingkan melintang. Berikut adalah konstruksi membujur (Wijaya, 2017).



Gambar 3. Kontruksi membujur
Sumber: Wijaya, 2017

4. *Grounding*

Grounding adalah keadaan lunas kapal bertabrakan dengan dasar laut sehingga menyebabkan kapal tersangkut di dasar laut. Jenis-jenis *grounding* terbagi 2 yaitu *beached* adalah *grounding* yang dilakukan dengan sengaja karena kapal mengalami kebocoran dan *stranded* adalah *grounding* yang terjadi karena ketidaksengajaan (Aji, 2023).



Gambar 4. Ilustrasi *grounding*
Sumber: Paik et al., 1998

Kerusakan struktur bawah kapal diasumsikan pada posisi yang tidak menguntungkan pada *freeboard* di mana saja antara $0,5L$ dari F.P (*fore perpendicular*) dan $0,2L$ dari A.P (*after perpendicular*) (ABS, 1995). Konstruksi yang mengalami kerusakan akibat *grounding* harus dianggap rusak dan dikeluarkan total atau sebagian dari perhitungan modulus penampang kapal (DNV GL, 2016).

Parameter kerusakan *grounding* diasumsikan dengan tingkat kerusakan, h sebesar $1/20$ dari lebar kapal atau 2 m dan besaran lebar kerusakan seperti pada **Tabel 1.** (DNV GL, 2016).

Tabel 1. Parameter kerusakan akibat *grounding*

	Koefisien	Dimensi Kerusakan	
		Single Side/ Bottom	Double Side/ Bottom
<i>Grounding in</i>	Lebar, b/B	0,75	0,55
<i>ship bottom</i>	Panjang, l/L	0,50	0,30

Sumber: DNV GL, 2016

5. Beban

Pembebanan pada konstruksi kapal terbagi menjadi 2 beban statis dan beban dinamis. Penelitian ini berfokus pada pembebanan statis yaitu beban yang tetap seperti beban konstruksi kapal (Iqrani, 2023). Adapun beban-beban konstruksi kapal sebagai berikut :

1. Beban Geladak Cuaca

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak di belakang 0,15 dari garis tegak garis tegak haluan (FP) (BKI, 2019). Untuk beban geladak cuaca dapat dihitung dengan **Persamaan 1.**

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

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 dengan garis bawah (m)

H : Tinggi kapal (m)

C_D : Koefisien drag

2. Beban Luar Sisi Kapal

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang terjadi karena gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal (BKI, 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 2.**

$$P_{s1} = 10(T - z) + P_0 \cdot C_F \left(1 + \frac{z}{T}\right) a \quad (2)$$

Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (P_{s2}) yang dapat ditinjau pada **Persamaan 3.**

$$P_{S2} = P_0 \cdot C_F \quad (3)$$

Dimana :

- P_0 : *Basic external dynamic load* (N/mm²)
- P_{S1} : Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (N/mm²)
- P_{S2} : Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (N/mm²)
- T : Sarat kapal (m)
- z : Jarak tengah antara pusat beban lengan garis bawah (m)
- a : Jarak antar *stiffener* (m)
- H : Tinggi kapal (m)
- C_f : Faktor distribusi

3. Beban Alas Kapal

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi karena tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal (BKI, 2019). **Persamaan 4** ialah persamaan beban luar alas kapal.

$$P_B = 10 \cdot T + P_0 \cdot C_F \quad (4)$$

Dimana :

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

6. Tegangan

Tegangan yang bekerja pada struktur kapal biasanya disebabkan oleh beban aksial dan beban lentur sehingga menghasilkan tegangan aksial dan tegangan lentur yang menyebabkan kelelahan pada struktur kapal.

1. Tegangan Normal

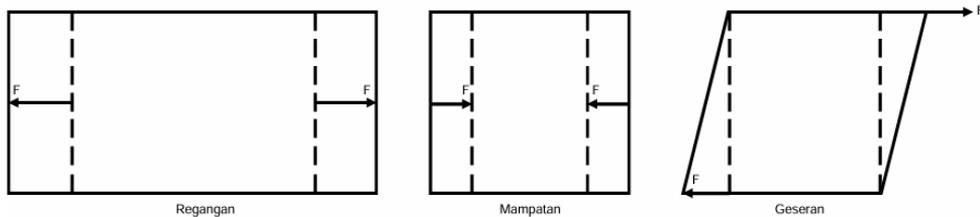
Jika suatu batang prismatik dengan luas penampang seragam di sepanjang batang menerima beban atau gaya searah dengan panjang batang maka gaya tersebut akan menimbulkan tegangan atau tekanan pada penampang batang. Tegangan merupakan besaran gaya per satuan luas penampang. Tegangan (*stress*) didefinisikan 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 5**.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Dimana :

- σ : Tegangan (N/mm²)
- F : Gaya (N)
- A : Luas penampang (mm²)

Satuan Internasional (SI) untuk tegangan adalah pascal (P_a), dengan konversi 1 P_a sama dengan 1 N/mm^2 . Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Tegangan Regangan

2. Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

Tegangan tarik yaitu tegangan yang timbul akibat gaya tarik. Apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang mengakibatkan batang cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbunya. 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_{ta}) secara matematik dapat ditulis dengan **Persamaan 6** dan dapat dilihat pada **Gambar 6**.

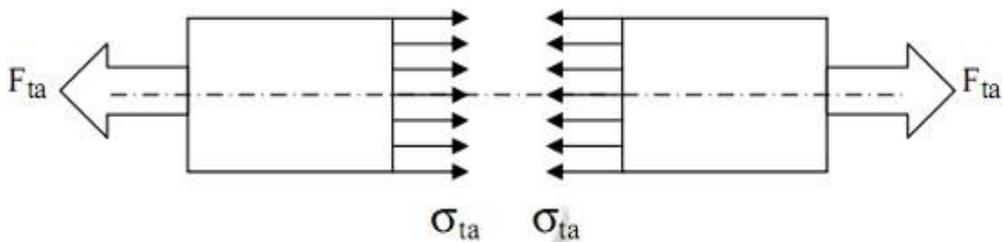
$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (6)$$

Dimana :

σ_{tr} : Tegangan tarik (N/mm^2)

F_{tr} : Gaya tarik (N)

A : Luas penampang (mm^2)



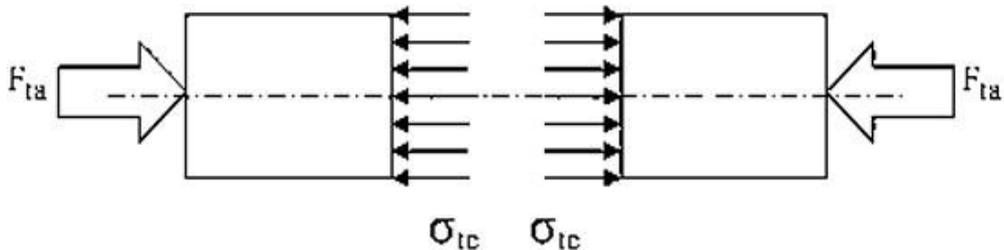
Gambar 6. Tegangan Tarik

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 perpindahan.

Rasio antara perpindahan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan (ϵ_{ta}) secara matematik dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Tegangan Tekan

Selanjutnya dapat dinyatakan dengan **Persamaan 7** :

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (7)$$

Dimana :

σ_{te} : Tegangan tekan (N/mm²)

F_{ta} : Gaya tekan (N)

A : Luas penampang (mm²)

4. Tegangan Geser (*Shear*)

Jika gaya normal merupakan gaya sejajar arah memanjang batang, gaya geser merupakan gaya yang tegak lurus dengan panjang batang. Besaran tegangan geser dinyatakan dengan simbol (τ) dalam satuan (N/mm²). Tegangan geser terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser didistribusikan pada sebuah luas penampang melintang yang paralel (*tangensial*) dengan gaya geser tersebut.

Tegangan geser (τ) yang 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) bekerja 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. Secara matematik dapat ditulis dengan **Persamaan 8**:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (8)$$

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 pada atas dan 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 melengkung di sepanjang sumbunya.

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

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

7. Tegangan Izin

Tegangan izin tergantung material jenis yang digunakan diatur dalam AISC (*American Petroleum Institute Recommended Practice 2A*, 1989) dan API (*Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tanker*, 2014). 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. Ukuran struktur yang dihitung dengan kriteria tegangan izin tambah tidak boleh lebih kecil dari yang dihitung dengan tegangan izin (tanpa kenaikan sepertiganya) apabila beban yang bekerja adalah gabungan bobot mati dan hidup.

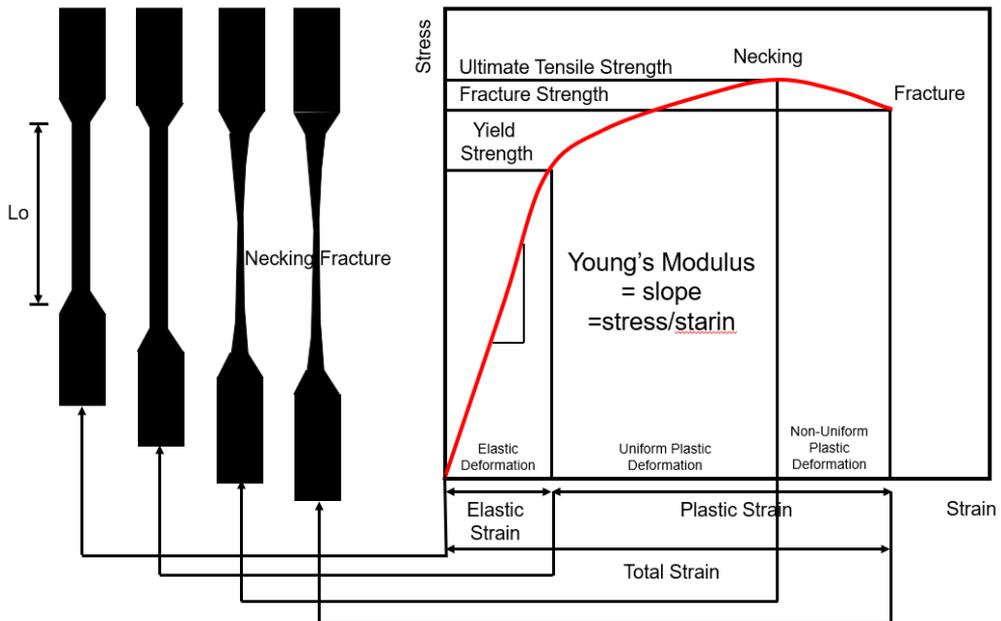
7. Regangan

Sesuai dengan bunyi hukum *Hooke* bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangannya. Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada **Persamaan 9**.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (9)$$

Dimana :

- ε : Regangan
- ΔL : Pertambahan panjang (m)
- A : Panjang mula-mula (m)



Gambar 8. Hubungan antara Tegangan dan Regangan

Sumber: Solusi *Engineering*, 2024

Seperti yang terlihat pada **Gambar 8**, menggambarkan perilaku material selama uji tarik. Pada awalnya, material mengalami deformasi elastis yang ditunjukkan oleh hubungan linier antara tegangan dan regangan, dengan kemiringan garis yang merepresentasikan modulus *Young* (E), yaitu perbandingan tegangan terhadap regangan elastis. Setelah mencapai batas leleh (*yield strength*), material mulai mengalami deformasi plastis di mana regangan meningkat tanpa peningkatan tegangan yang signifikan. Puncak kurva menunjukkan kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), setelah itu terjadi penurunan tegangan (*necking*) hingga akhirnya material mengalami fraktur.

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 deformasi plastis yaitu titik sampai di mana penerapan hukum *Hooke* masih bisa ditolerir. Dalam praktek, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis.

3. Deformasi plastis (*Plastic Deformation*)

Deformasi plastik terjadi jika perubahan bentuk yang tidak kembali ke keadaan semula, bila bahan di tarik sampai melewati batas proporsional. *Ultimate Tensile Strength* (UTS) merupakan besar tegangan maksimum yang didapatkan dalam uji tarik.

4. Titik Putus

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*. Secara matematis dirumuskan pada **Persamaan 10** dan **Persamaan 11**:

$$E = \frac{F \cdot L}{A \cdot \Delta L} \quad (10)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (11)$$

Dimana :

- E : Modulus Young (N/mm²)
- F : Pertambahan panjang (m)
- A : Luas Penampang (mm²)
- L : Panjang mula-mula (m)
- ΔL : Pertambahan panjang/pendek (mm)

Nilai *Modulus Young* hanya bergantung pada jenis benda (komposisi benda), tidak bergantung pada ukuran atau bentuk benda. Nilai *Modulus Young* beberapa jenis bahan dapat kalian lihat pada **Tabel 2** untuk E adalah pascal (Pa) atau N/mm².

Tabel 2. Modulus Young pada Material

Material	Modulus Young (N/mm ²)
Aluminium	70 x 10 ⁹
Baja	200 x 10 ⁹
Beton	20 x 10 ⁹

8. Deformasi

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, memutar (torsis). 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 12** berikut:

$$\delta = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (12)$$

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)
- δl : Deformasi material (mm)

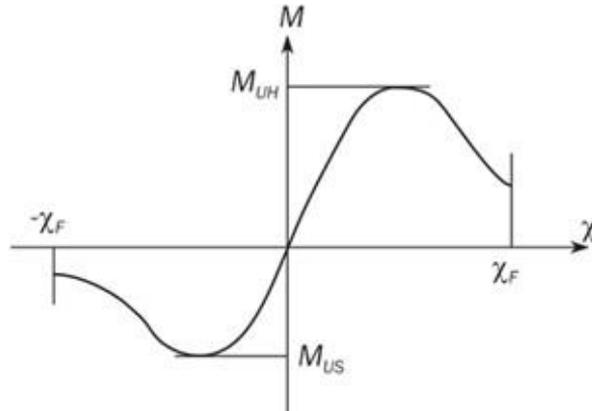
9. Kondisi Batas (*Ultimate Strength*)

Kekuatan batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total (Huges & Paik, 2010). Perhitungan kekuatan-batas kapal berdasarkan keakuratan dan kompleksitas hingga saat ini terdiri dari 5 metode yaitu teori balok, metode *Presumed Stress Distribution*, metode Smith dan *Idealized Structural Unit Method* (ISUM), *Intelligent Supersize Finite Element Method* (FEM), dan NLFEM (*Non-linear Finite Element Method*).

Kekuatan-batas kapal *tanker* (M_U) harus dihitung dengan metode NLFEM atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria seperti **Persamaan 13** dibawah ini (DNV GL, 2017b).

$$M_t \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (13)$$

dimana M_t adalah momen lentur-batas total vertikal dan γ_R adalah faktor keamanan untuk kekuatan-batas lentur vertikal (1,1 untuk kondisi *sagging* dan 1,21 untuk kondisi *hogging*).



Gambar 9. Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan
Sumber: DNV GL, 2017b

Hubungan antara kekuatan batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada **Gambar 9**. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.

Berdasarkan teori balok, tegangan lentur (σ) pada penampang balok yang mengalami momen lentur dapat dihitung pada **Persamaan 14**:

$$\sigma = \frac{M \times z}{I} \quad (14)$$

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 (σ_{max}) dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 15** sebagai berikut :

$$\sigma_{maks} = \frac{M}{S} \quad (15)$$

dimana S adalah modulus penampang

Modulus penampang (S) seperti pada **Persamaan 16** dan **Persamaan 17**, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut:

$$S_d = \frac{I}{z_d} \quad (deck) \quad (16)$$

$$S_b = \frac{I}{z_b} \quad (bottom) \quad (17)$$

dimana S_d dan S_b adalah 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 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 18** dan **Persamaan 19** sebagai berikut:

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud} \text{ (deck)} \quad (18)$$

$$M_{UH} = S_d \sigma_{ud} \text{ (bottom)} \quad (19)$$

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.

10. Metode NLFEA

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. Penelitian ini akan menggunakan metode NLFEA untuk menghitung kekuatan membujur kapal VLCC pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat *grounding*. Perhitungan kekuatan batas struktur dengan metode NLFEA perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

1. Tipe Metode NLFEA

Kekuatan batas momen lentur kapal pada kondisi utuh dan rusak dapat dianalisa dengan menggunakan 3 tipe metode NLFEA yaitu analisa statis, analisa quasi statis, dan analisa dinamis. Untuk analisa statis dan analisa quasi statis banyak digunakan oleh para peneliti untuk menghitung kekuatan batas struktur kapal.

2. Algoritma *Iterative Solution*

Tiga jenis 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*.

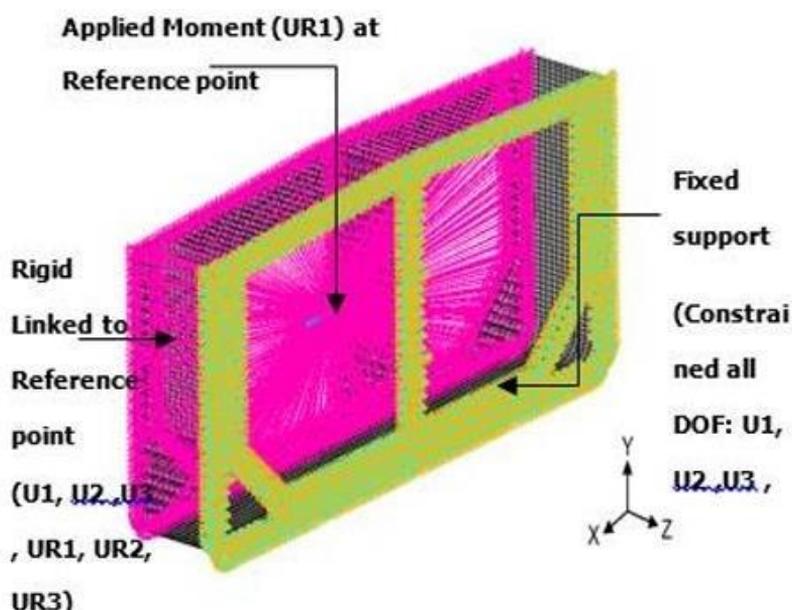
3. Proses Peningkatan Beban

Pembebanan yang diaplikasikan pada metode NLFEA menggunakan proses peningkatan pembebanan. Dua jenis kontrol beban yang digunakan untuk mendapatkan nilai kekuatan batas momen lentur kapal VLCC 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 faktor. Kedua ujung pada titik acuan diberikan beban momen. Kontrol momen dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada salah satu ujung model elemen hingga dan ujung yang

lainnya di *full constrain*. Ujung model yang menggunakan *rigid link*, diberikan momen lentur. Reaksi pada ujung model yang di *constrain* akan mencapai titik batas kekuatan dari struktur.

4. Pembebanan dan Kondisi Syarat Batas

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 seperti pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Kondisi syarat batas untuk kontrol kelengkungan
Sumber: Iqrani, 2023

5. Ketidaksempurnaan Geometrik

Selama fabrikasi struktur kapal (pemotongan, *rolling*, pembentukan, pengelasan dan perlakuan panas) terjadi ketidaksempurnaan geometri dan tegangan sisa yang dapat mempengaruhi kekuatan batas struktur. Metode NLFEA dapat mengkondisikan ketidaksempurnaan geometrik tersebut.

6. Spesifikasi Material

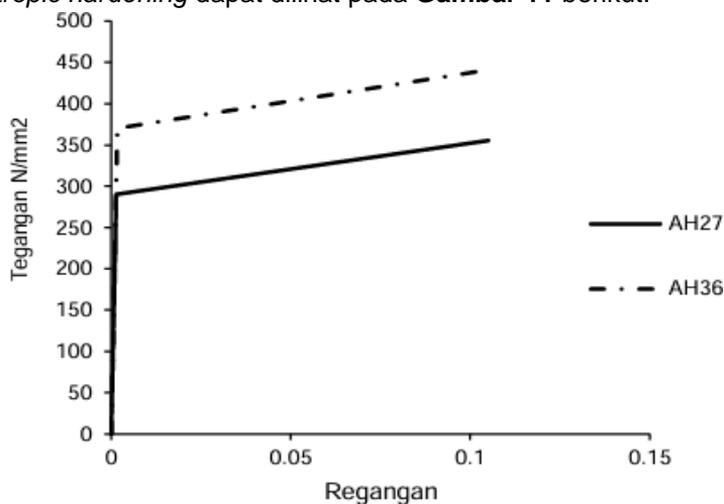
Kurva tegangan regangan dari material yang digunakan pada model elemen hingga harus tersedia. Kurva tegangan regangan sangat menentukan nilai kekuatan-batas dari struktur kapal. Penelitian ini menggunakan spesifikasi material pada **Tabel 3**, serta kurva tegangan regangan seperti pada **Gambar 11**.

Tabel 3. Spesifikasi material

Spesifikasi Material	Jenis Material	
	AH27	AH36
<i>Density</i> (kg/m ³)	7850	7850
<i>Modulus Young</i> (N/mm ²)	210000	210000
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3	0,3
<i>Yield Strength</i>	290	370
<i>Tangent Modulus</i>	625	675

Sumber : *Ship Structure Committee*, 2015

Berdasarkan tabel di atas Material AH27 dan AH36 merupakan material khusus untuk *marine*. Modulus elastisitas sebesar 210.000 N/mm², rasio *poisson* 0,3 dan tegangan luluh AH27 sebesar 290 N/mm², AH36 sebesar 370 N/mm² serta *tangent modulus* AH27 sebesar 625 N/mm² dan AH36 sebesar 675 N/mm². Model material *bilinear isotropic hardening* dapat dilihat pada **Gambar 11** berikut.

**Gambar 11.** Model Material Bilinear *Isotropic Hardening*

Sumber: *Ship Structure Committee*, 2015

7. Meshing

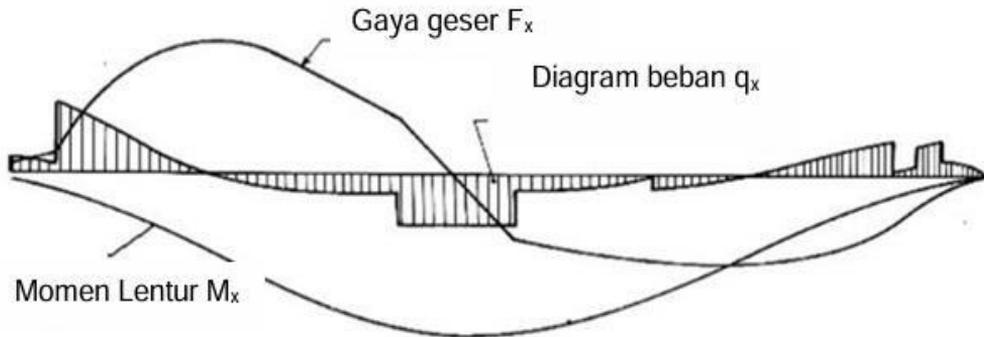
Ukuran dan kualitas *meshing* sangat penting untuk membandingkan hasil perhitungan antara metode NLFEA dan metode linear FEA. Sebelum melakukan analisa dengan metode NLFEA dalam skala besar perlu untuk melakukan studi *mesh convergence*. Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar 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. Dalam penelitian ini, ukuran *meshing* yang digunakan sebesar 500 mm dengan bentuk *quadmapped*.

8. Tipe Elemen

Semua pelat yang digunakan pada penelitian ini menggunakan tipe Shell 181 (*quadrilateral elements*).

11. 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 12** (Shama, 2013).



Gambar 12. Distribusi Beban, Gaya Geser, dan Momen Lentur pada Kapal
Sumber: Shama, 2013

Berat dan gaya apung diasumsikan sebagai w_x dan b_x , maka distribusi beban pada **Persamaan 20** adalah

$$q_x = b_x - w_x \quad (20)$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal pada **Persamaan 21** dan **Persamaan 22** adalah

$$F_x = \int_0^x (b_x - w_x) dx \quad (21)$$

$$M_x = \int_0^x F_x dx \quad (22)$$

DNV GL (2017a), memberikan formula besaran momen lentur batas vertikal pada kondisi air tenang (M_{SW}) untuk panjang kapal lebih dari 90 m pada **Persamaan 23** dan **Persamaan 24** sebagai berikut:

$$M_{SW} = -0,05168 \cdot K_M \cdot C_1^2 \cdot B(C_b + 0,7) \text{ kNm (kondisi sagging)} \quad (23)$$

$$M_{SW} = 0,01 \cdot K_M \cdot C_1^2 \cdot B(11,97 - 1,9 \cdot C_b) \text{ kNm (kondisi hogging)} \quad (24)$$

Dimana :

K_M : Faktor distribusi

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

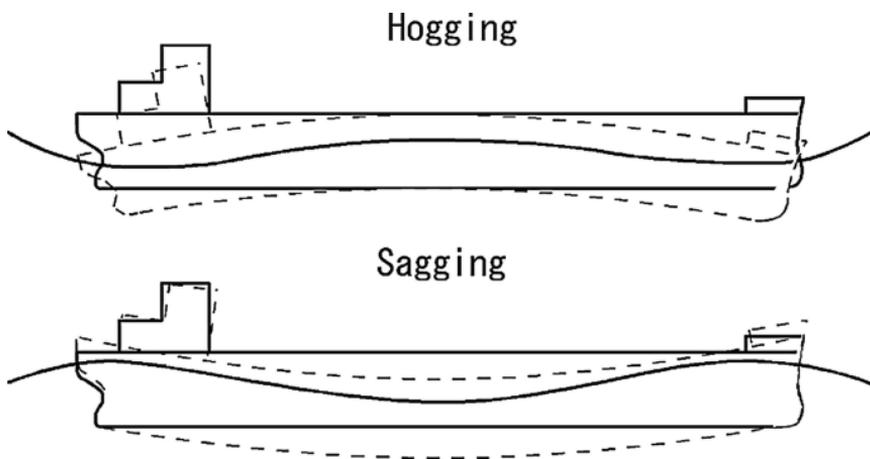
: 10,75

untuk $300 < L < 350$ m

: $10,75 - [(L - 350)/150]1,5$

untuk $350 < L < 500$ m

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 13** di bawah ini.



Gambar 13. Momen Lentur Vertikal Akibat Gelombang

Sumber: Wang, XZ., Xu, EH., 2019

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:

$$M_W = -0,11 \cdot K_M \cdot C_1^2 \cdot B(C_b + 0,7) \text{ kNm} \quad (\text{kondisi sagging}) \quad (25)$$

$$M_W = 0,19 \cdot K_M \cdot C_1^2 \cdot B \text{ kNm} \quad (\text{kondisi hogging}) \quad (26)$$

dimana, C dan K_M seperti pada **Persamaan 25** dan **Persamaan 26**.

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 pada **Persamaan 27** (DNV GL, 2017b).

$$M_t = M_{sW} + M_W \quad (27)$$

Simulasi numerik variasi sekat utuh	■			
Simulasi numerik variasi 1 sekat <i>grounding</i> di bilga		■		
Simulasi numerik variasi 2 sekat <i>grounding</i> di bilga			■	
Perhitungan kekuatan membujur variasi sekat utuh, variasi 1 sekat dan variasi 2 sekat				■
Komparasi kekuatan membujur variasi 1 sekat dan variasi 2 sekat terhadap variasi sekat utuh				■
Penulisan skripsi				■

2.3 Variabel Penelitian

Pada umumnya terdapat 3 variabel yaitu variabel bebas (*independent variabel*) adalah variabel yang akan mempengaruhi variabel lain, variabel terikat (*dependent variabel*) merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas dan variabel terkontrol yaitu variabel yang diatur oleh peneliti sehingga memberikan pengaruh netral (Soesilo, 2019). Adapun dalam penelitian ini yang termasuk variabel bebas adalah Variasi sekat utuh, variasi 1 sekat dan variasi 2 sekat, sementara variabel terikat merupakan *grounding* di bilga dan variabel terkontrol yaitu *Very Large Crude Carrier (VLCC) Single Hull Tanker*.

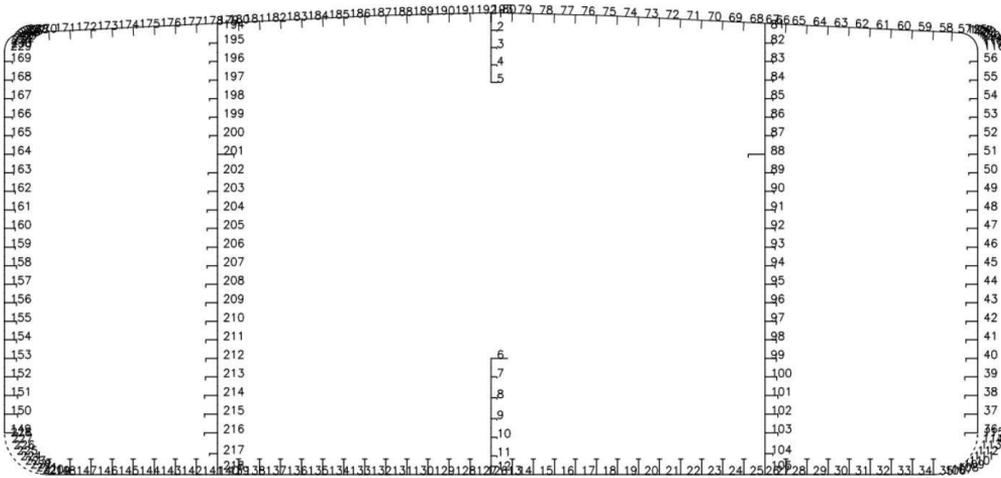
2.4 Data Penelitian

Pada penelitian ini kapal yang digunakan adalah *Very Large Crude Carrier (VLCC) Single Hull Tanker* dengan dimensi dan property kapal pada **Tabel 5** sebagai berikut:

Tabel 5. Dimensi dan Properti Kapal VLCC

Parameter Kapal	Dimensi	Satuan
Panjang (L)	230	m
Lebar (B)	42	m
Tinggi (H)	20,3	m
<i>Elastic modulus</i>	210000	N/mm ²
<i>Density</i>	$7,7 \times 10^{-5}$	N/mm ³
<i>Yield strength</i>	355	N/mm ²
<i>Rasio Poisson</i>	0,33	
<i>Type of material</i>	AH36	

Berikut adalah konfigurasi penampang *midship* VLCC *Single Hull Tanker* Variasi sekat utuh pada **Gambar 15** dan spesifikasi material kapal VLCC *Single Hull Tanker* di **Tabel 6** dibawah ini :



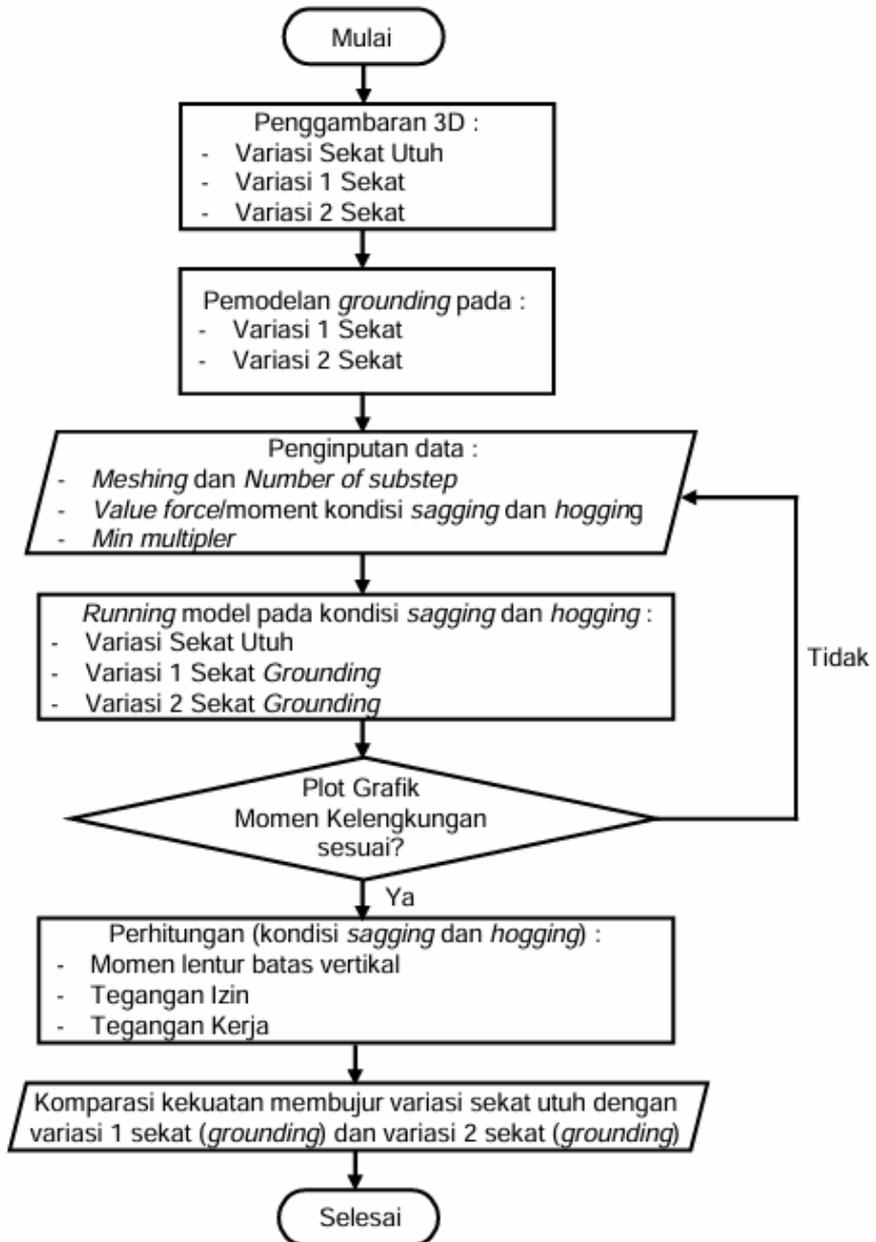
Gambar 15. Konfigurasi Penampang *Midship* VLCC *Single Hull Tanker*

Tabel 6. Konfigurasi Material *Stiffener* Kapal VLCC

<i>Stiffener Number</i>	<i>Element Number</i>	<i>Description</i>	<i>Type</i>
1	2	L250/12 x 67/18	<i>Angle</i>
2	5	L300/19	<i>Flat-Bar</i>
3	6	L700/30	<i>Flat-Bar</i>
4	7	L250/12 x 67/18	<i>Angle</i>
5	13	L675/13 x 200/25	<i>Tee-Bar</i>
6	36	L572/12 x 150/22	<i>Angle</i>
7	40	L522/11 x 150/22	<i>Angle</i>
8	42	L518/11.5 x 150/18	<i>Angle</i>
9	46	L468/11.5 x 125/18	<i>Angle</i>
10	50	L400/12 x 100/18	<i>Angle</i>
11	52	L350/12 x 100/17	<i>Angle</i>
12	58	L350/28	<i>Flat-Bar</i>
13	82	L350/12 x 100/17	<i>Angle</i>
14	88	L716/12.5 x 150/16	<i>Angle</i>
15	89	L400/12 x 100/18	<i>Angle</i>
16	91	L450/11.5 x 125/18	<i>Angle</i>
17	95	L500/11.5 x 150/18	<i>Angle</i>
18	100	L522/11 x 150/22	<i>Angle</i>
19	101	L572/12 x 150/22	<i>Angle</i>
20	104	L350/12 x 100/17	<i>Angle</i>

2.5 Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian “Studi komparatif variasi desain sekat kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) terhadap kekuatan membujur pada kasus *grounding* di bilga” disajikan pada **Gambar 16** sebagai berikut :



Gambar 16. Diagram Alir Penelitian

2.6 Tahapan Penelitian

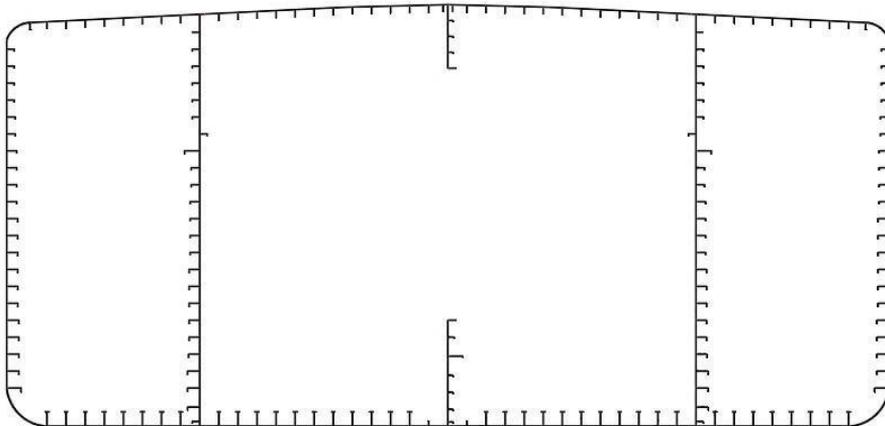
Adapun penelitian Studi Komparatif Variasi Desain Sekat Kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) terhadap Kekuatan Membujur pada Kasus *Grounding* di Bilga dilakukan dalam beberapa tahapan seperti berikut :

1. Pengumpulan Data

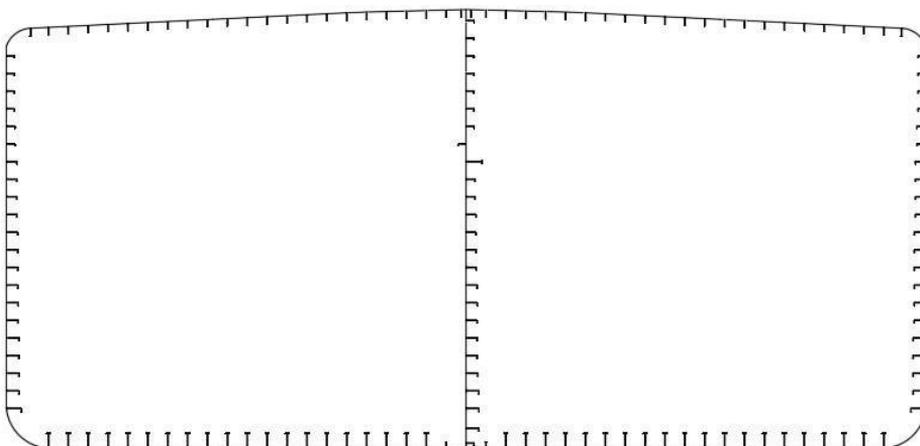
Data yang digunakan menggunakan data sekunder yang bersumber dari Laboratorium OSAREL berupa data dimensi kapal VLCC dan konstruksi *midship* variasi sekat utuh.

2. Pemodelan Variasi Sekat

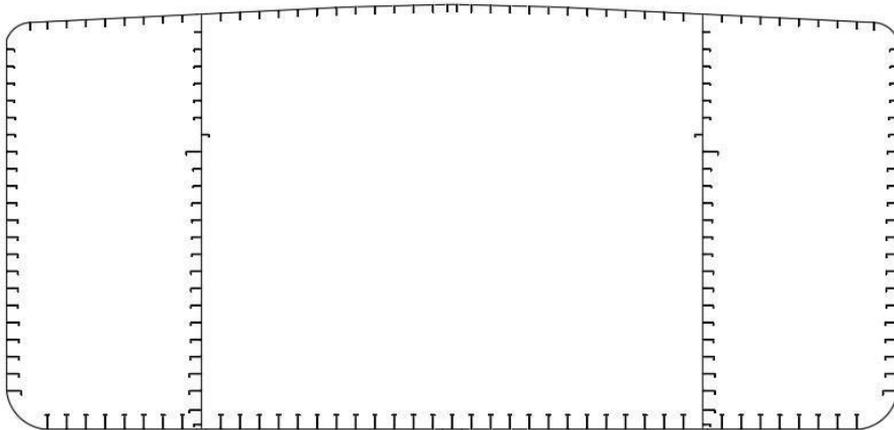
Variasi sekat yang digunakan ada 3 variasi yaitu variasi sekat utuh pada **Gambar 17**, variasi 1 sekat pada **Gambar 18** dan variasi 2 sekat pada **Gambar 19**. Penggambaran menggunakan pada *software* Teknik 3D.



Gambar 17. Variasi Sekat Utuh



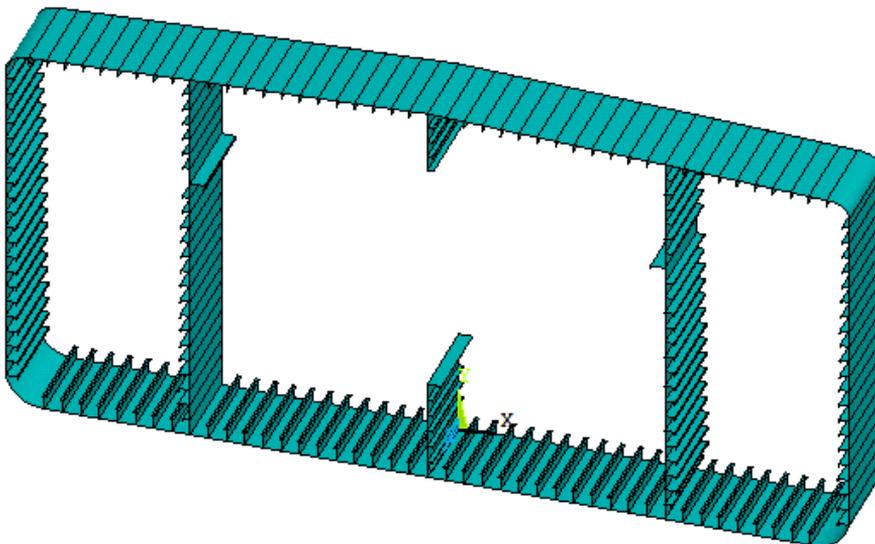
Gambar 18. Variasi 1 Sekat



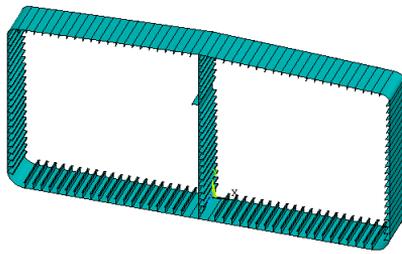
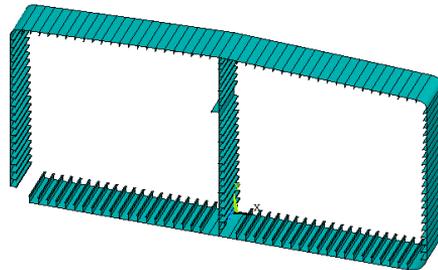
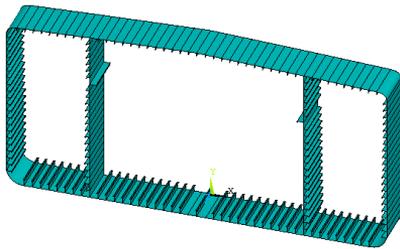
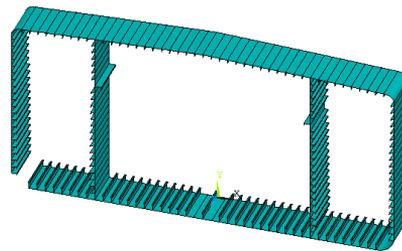
Gambar 19. Variasi 2 Sekat

3. Pemodelan *Grounding* di Bilga

Pemodelan kerusakan akibat *grounding* pada bagian bilga menggunakan *software* elemen hingga yaitu ANSYS *Student* 2024 R2. Seluruh elemen pelat dan *stiffener* yang masuk dalam dimensi kerusakan akibat *grounding* dihilangkan. Untuk variasi sekat utuh pada **Gambar 20**, variasi 1 sekat pada **Gambar 21** dan variasi 2 sekat pada **Gambar 22** dibawah ini.



Gambar 20. Variasi Sekat Utuh

(a) Variasi 1 Sekat tanpa *Grounding*(b) Variasi 1 Sekat dengan *Grounding***Gambar 21.** Variasi 1 Sekat(a) Variasi 2 Sekat tanpa *Grounding*(b) Variasi 2 Sekat dengan *Grounding***Gambar 22.** Variasi 2 Sekat

4. Simulasi Numerik

Pemodelan bentuk kerusakan arah membujur pada bilga kapal menggunakan metode NLFEA.

5. Perhitungan Kekuatan Batas

Setelah dilakukan simulasi di *software ANSYS Student 2024 R2*, langkah selanjutnya melakukan perhitungan kekuatan membujur variasi 1 sekat dan variasi 2 sekat yang akan dikomparasi terhadap kekuatan membujur variasi sekat utuh.