

**SKRIPSI**

**ANALISA KEKUATAN MELINTANG *CHEMICAL TANKER***

Disusun dan diajukan oleh:

**GABRIELLA LISUGAU**

**D081 19 1013**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KELAUTAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2023**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

**ANALISA KEKUATAN MELINTANG *CHEMICAL TANKER***

Disusun dan diajukan oleh

**GABRIELLA LISUGAU**  
**D081191013**

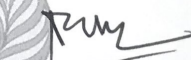
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana pada Program Studi Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal ..... dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

(d.d)  
Menyetujui,


Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

  
**Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph. D.**  
**NIP. 19760606 200501 1003**

  
**I. Juswan, MT.**  
**NIP. 19621231 198903 1031**

Ketua Program Studi,

  
**Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT**  
**NIP. 19750605 200212 1003**



## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Gabriella Lisugau

NIM : D081191013

Program Studi : Teknik Kelautan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul "Analisis Kekuatan Melintang Chemical Tanker" Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu, semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, Juli 2023

Yang Menyatakan  
Tanda tangan



Gabriella Lisugau

## ABSTRAK

**Gabriella Lisugau.** *Analisa Kekuatan Melintang Chemical tanker* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie dan Juswan**)

*Chemical tanker* memiliki tantangan yang lebih besar dalam proses pelayarannya, ini disebabkan *chemical tanker* mengangkut muatan kimia yang cenderung mudah terbakar dan beracun sehingga dibutuhkan struktur yang kokoh dan kuat untuk mengurangi terjadinya kecelakaan akibat kekuatan batas yang diizinkan dari kapal tersebut. Berdasarkan hal tersebut maka diperlukan analisa kekuatan melintang *chemical tanker*. Pada penelitian ini masuk dalam penelitian kuantitatif sampel penelitian diambil di PT. PAL Surabaya dengan *main dimension Length Between Perpendicular* 162 m, *Breadth* 27.4 m, dan *Depth* 13 m. Proses pengumpulan data dilakukan dengan mengambil data dari berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, buku, literatur, web resmi, serta industri yang berkaitan dengan tema penelitian ini. Data yang telah dikumpulkan ini akan menjadi acuan dalam pembuatan model serta olah data yang telah dikumpulkan dan selanjutnya data struktur tersebut dimasukkan ke perangkat lunak *ANSYS Mechanical APDL 18.1* untuk diolah. Dari Analisis data dilakukan dengan menerapkan metode *Non Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) pada aplikasi *ANSYS* didapatkan hasil pada saat kondisi *sagging* dan *hogging* dimana untuk nilai kekuatan batas *chemical tanker* ketika mengalami *sagging* mencapai  $-4.94 \times 10^8$  Nmm dan untuk nilai tegangan yang dihasilkan sebesar -257 sedangkan pada saat kondisi *hogging* nilai kekuatan batas *chemical tanker* mencapai  $3.52 \times 10^8$  dimana untuk nilai tegangan yang bekerja sebesar -192. Hasil tegangan yang didapat pada kondisi batas telah melewati tegangan izin sehingga struktur tersebut mengalami *buckling*.

Kata Kunci: *Chemical tanker*, Kekuatan Melintang, NLFEA, *Ultimate strength*

## ABSTRACT

**Gabriella Lisugau.** *Transverse Strength Analysis of Chemical tankers* (supervised by **Muhammad Zubair, Muis Alie and Juswan**)

*Chemical tankers have greater challenges in the shipping process, this is because chemical tankers transport chemical cargo that tends to be flammable and toxic so that a sturdy and strong structure is needed to reduce the occurrence of accidents due to the allowable force limit of the ship. Based on this, it is necessary to analyze the transverse strength of chemical tankers. In this study, it was included in quantitative research, research samples were taken at PT. PAL Surabaya with main dimension Length Between Perpendicular 162 m, Breadth 27.4 m, and Depth 13 m. The data collection process is carried out by taking data from various sources such as scientific journals, books, literature, official websites, and industries related to this research theme. The data that has been collected will be a reference in making models and processing the data that has been collected and then processing the structure data is entered into the ANSYS Mechanical APDL 18.1 software. Data analysis is carried out by applying the Non Line Finite Element Analysis (NLFEA) method in the ANSYS application so that results are obtained in sagging and hogging conditions where obtained. In the structure of the chemical tanker ship experiences limit conditions where the value of the chemical tanker limit strength when sagging reaches Nmm where the resulting stress value is -257 while during Hogging conditions the chemical  $-4.94 \times 10^8$  tanker limit strength value reaches  $3.52 \times 10^8$  where for the working voltage value of -192. The stress obtained at the limit condition has exceeded the clearance voltage so that the structure is buckling.*

**Keywords:** Chemical tanker, Transverse Strength, NLFEA, Ultimate strength

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN .....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR .....	vii
DAFTAR TABEL .....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....	ix
DAFTAR LAMPIRAN .....	x
KATA PENGANTAR .....	xi
BAB I.PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.5 Batasan masalah .....	3
BAB II.TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Kapal Tanker.....	5
2.2 Sistem Konstruksi Kapal .....	8
2.3 Sistem konstruksi melintang .....	8
2.4 Sistem Konstruksi Memanjang .....	9
2.5 Sistem Konstruksi kombinasi.....	9
2.6 <i>Singel Hull tanker</i> .....	10
2.7 <i>Double hull tanker</i> .....	10
2.8 Kekuatan Struktur kapal .....	13
2.9 Beban Melintang .....	14
2.10 Beban Lokal .....	15
2.11 Momen Lentur Batas Vertikal .....	16
2.12 Beban yang bekerja pada konstruksi kapal .....	16
2.13 Beban luar alas kapal .....	17
2.14 Beban luar sisi kapal.....	18
2.15 Beban Geladak Cuaca.....	18
2.16 Momen Lentur-Batas pada Air Tenang .....	19
2.17 Regangan.....	19
2.18 Daerah Linear (elastic limit) .....	21
2.19 Titik Luluh (batas proporsional) .....	21
2.20 Deformasi plastis ( <i>plastic deformation</i> ) .....	21
2.21 Titik Putus .....	21
2.22 Tegangan yang bekerja .....	22
2.23 Tegangan normal.....	22
2.24 Tegangan Izin dasar .....	23
2.25 Tegangan tekan .....	24
2.26 Tegangan Tarik.....	25
2.27 Tegangan lentur.....	25
2.28 Tegangan luluh .....	26
2.29 Tegangan geser.....	26
2.30 Kekuatan batas ( <i>ultimate strength</i> ).....	26
2.31 Metode matriks kekakuan .....	27
2.32 Deformasi Material.....	29

2.33 Multiple Point Constrained (MPC) .....	29
2.34 Metode Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA) .....	30
BAB III. METODE PENELITIAN .....	34
3.1 Jenis Penelitian .....	34
3.2 Lokasi Penelitian .....	34
3.2 Penyajian Data .....	34
3.3 Metode Pengambilan Data .....	37
3.4 Alur Penelitian .....	37
3.5 Diagram Alir .....	37
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....	39
4.1 Pemodelan Struktur Kapal .....	39
4.2 Perhitungan momen lentur batas .....	40
4.3 Tegangan izin .....	40
4.4 Tegangan kerja <i>chemical tanker</i> pada kondisi <i>sagging</i> .....	40
4.5 Kekuatan batas momen <i>chemical tanker</i> pada kondisi <i>sagging</i> .....	42
4.6 Tegangan kerja <i>chemical tanker</i> pada kondisi <i>Hogging</i> .....	45
4.7 Kekuatan Batas Momen <i>chemical tanker</i> pada kondisi <i>Hogging</i> .....	46
4.8 Pembahasan .....	49
BAB V. PENUTUP .....	52
5.1 Kesimpulan .....	52
5.2 Saran .....	52
DAFTAR PUSTAKA .....	53
LAMPIRAN .....	55

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kapal Oil Tanker .....	6
Gambar 2. 2 <i>Chemical Tanker</i> .....	7
Gambar 2. 3 LNG Tanker .....	7
Gambar 2. 4 <i>Singel hull tanker</i> .....	10
Gambar 2. 5 <i>hull tanker</i> .....	11
Gambar 2. 6 Struktur utama batang <i>chemical tanker</i> .....	12
Gambar 2. 7 Perubahan momen lentur pada tongkang persegi panjang kondisi air tenang .....	14
Gambar 2. 8 momen lentur gelombang pada gelombang reguler .....	14
Gambar 2. 9 Deformasi karena beban melintang .....	15
Gambar 2. 10 Hubungan antara tegangan dan regangan .....	20
Gambar 2. 11 Tegangan-Regangan.....	23
Gambar 2.12 Tegangan Tekan.....	24
Gambar 2.13Tegangan Tarik.....	25
Gambar 2. 14 Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan.....	27
Gambar 2. 15 <i>Box Centre girder</i> tanpa elemen di tengah batang .....	30
Gambar 2. 16 Model material <i>bilinear isotropic hardening</i> .....	33
Gambar 3. 1 midship section chemical tanker .....	35
Gambar 3. 2 Diagram Alir .....	38
Gambar 4. 1 <i>Mesh</i> model <i>midship</i> kapal <i>chemical tanker</i> .....	39
Gambar 4. 2 kondisi batas kapal <i>chemical tanker</i> .....	39
Gambar 4. 3 Perilaku dan distribusi tegangan pada kondisi <i>sagging</i> .....	41
Gambar 4. 4 Grafik momen pada kondisi <i>sagging</i> .....	42
Gambar 4. 5 Deformasi struktur pada kekuatan batas dengan kondisi <i>sagging</i> . 43	43
Gambar 4. 6 Deformasi struktur pada kondisi <i>collapse</i> .....	44
Gambar 4. 7 Perilaku dan distribusi tegangan pada kondisi <i>hogging</i> .....	45
Gambar 4. 8 Grafik momen pada kondisi <i>hogging</i> .....	46
Gambar 4. 9 Deformasi tegangan ultimate pada kondisi <i>hogging</i> .....	47
Gambar 4. 10 Deformasi struktur pada kondisi <i>collapse</i> .....	39
Gambar 4. 11 Grafik momen kelengkungan chemical tanker.....	50



**DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 <i>Modulus Young</i> pada Material.....	22
Tabel 2.2 Spesifikasi material.....	32
Tabel 3.1 konfigurasi <i>stiffener chemical tanker</i> .....	36
Tabel 4.1 Nilai momen lentur batas <i>chemical tanker</i> .....	40
Tabel 4.2 Nilai tegangan izin .....	40
Tabel 4.3 Rekapitulasi tegangan kerja arah z <i>chemical tanker</i> pada kondisi <i>sagging</i> .....	41
Tabel 4.4 Rekapitulasi tegangan ultimate yang bekerja pada kondisi <i>sagging</i> ..	43
Tabel 4.5 Rekapitulasi tegangan yang bekerja pada kondisi <i>collapse</i> .....	44
Tabel 4.6 Rekapitulasi tegangan kerja arah z <i>chemical tanker</i> pada kondisi <i>hogging</i> .....	45
Tabel 4.7 Rekapitulasi tegangan ultimate yang bekerja pada kondisi <i>hogging</i> ..	48

## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
A	Luas Penampang	mm <sup>2</sup>
a	Jarak antar <i>stiffener</i>	m
B	Lebar kapal	m
C <sub>b</sub>	Koefisien blok kapal	
C <sub>D</sub>	Koefisien distribusi	
D	Tinggi kapal	m
E	Modulus elastisitas	N/mm <sup>2</sup>
F	Gaya	N
H	Tinggi Kapal	mm
I	Momen inersia penampang	mm <sup>4</sup>
L	Panjang kapal	m
M	Momen lentur	Nmm
M <sub>US</sub>	Kekuatan batas momen lentur <i>sagging</i>	Nmm
M <sub>UH</sub>	Kekuatan batas momen lentur <i>Hogging</i>	Nmm
M <sub>t</sub>	momen lentur- batas total	Nmm
P	Gaya geser atau gaya lintang	N
P <sub>B</sub>	Beban luar alas kapal	N/mm <sup>2</sup>
P <sub>C</sub>	Beban statik kapal	N/mm <sup>2</sup>
P <sub>D</sub>	Beban geladak cuaca	N/mm <sup>2</sup>
P <sub>i</sub>	Beban alas dalam kapal	N/mm <sup>2</sup>
P <sub>S1</sub>	Beban luar sisi kapal di bawah garis air muat	N/mm <sup>2</sup>
P <sub>S2</sub>	Beban luar sisi kapal di atas garis air muat	N/mm <sup>2</sup>
T	Sarat kapal	m
z	Jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur	m
ε	Regangan	
σ	Tegangan lentur	N/mm <sup>2</sup>
σ <sub>tr</sub>	Tegangan tarik	N/mm <sup>2</sup>
σ <sub>te</sub>	Tegangan tekan	N/mm <sup>2</sup>
τ	Tegangan geser	N/mm <sup>2</sup>



**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1 Konfigurasi <i>Stifener Chemical tanker</i> .....	55
--	----

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, Yesus Kristus. atas segala karunianya dan berkatNya yang begitu luar biasa sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini serta hanya atas kehendakNya lah penulis dapat mengatasi segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi yang berjudul:

"ANALISA KEKUATAN MELINTANG *CHEMICAL TANKER*"

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Julmin Andi Tati** dan Ibu **Yenni Tulli** merupakan dukungan yang selalu menguatkan penulis untuk setiap tahapan penelitian dan penulisan skripsi ini hingga dapat terselesaikan. Dan juga dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih pada pihak-pihak lainnya yang telah membantu terselesaikannya penelitian dan penulisan skripsi ini, terutama kepada:

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D** selaku kepala labo OSAREL dan dosen pembimbing I yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan yang begitu berharga bagi penulis mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
2. Bapak **Ir. Juswan, ST. MT.** selaku dosen pembimbing II yang di tengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.** selaku Penasehat Akademik (PA) yang telah banyak membantu dan memberikan pelajaran serta motivasi untuk terus menjadi pribadi yang lebih kuat selama penulis menjadi mahasiswa Teknik Kelautan.
4. **Seluruh dosen pengajar Departemen Teknik Kelautan** Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmunya
5. **Seluruh staff tata usaha Departemen Teknik Kelautan** Universitas Hasanuddin atas bantuannya selama penulis menjalankan studi hingga menyelesaikan skripsi ini.
6. Kakak terkasih **Thesa Susanti S.fram** dan **Ivan Andi Paliwan**. Serta Keluarga besar penulis di Aspol Tello Baru Makassar, Yang telah

membersamai selama penulis hidup dari kecil sampai sekarang ini. Tak terhingga cinta kasih penulis tujukan lewat kata atas segala motivasi dan berkat yang telah diberikan dan dibagikan untuk penulis serta telah menyangi dan melindungi penulis dalam segala situasi kehidupan.

7. Kakanda senior yang telah membimbing dan memberi pemahaman selama proses pengerjaan skripsi ini.
8. Teman-Teman Labo **OSAREL 2019 Bintang, Rati, Rani, Riska, Puput** yang telah Bersama berjuang dan menjadi rekan yang sangat supportive
9. **Teknik Kelautan Angkatan 2019**, atas segala dukungannya yang sama-sama berjuang untuk menyelesaikan studi.
10. Rekan-rekan **conversion 19 Andita, galy, abi, cardo, tio, ray, jutri, alsem, anto, henry, Inez, marcel, max, rachel, meiky, Aldi Frianto Salempang, key, ike, santa, a//lung, sam, gita, anca, louis, bambang, angko, gibe, yovan** atas segala bantuan yang tak terhingga dan cinta kasihnya terhadap penulis selama perkuliahan. Semoga hidup baik-baik saja.
11. Sobat terkasih **Jalil** dan **Cece** yang telah membantu dan menjadi penghibur penulis dikalah susah dan senang selama perkuliahan tubes dan skripsi.
12. **Band Hindia, The 1975, Coldplay, Kodaline.** dengan lagu-lagunya yang selalu menguatkan penulis ketika sedang feel down.
13. Serta seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih atas seluruh bantuan moril maupun materiyang telah diberikan. Semoga tuhan melimpahkan rahmat dan berkat serta membalas kebaikan kepada semua pihak yang telah membantu. Akhir kata, tidak ada gading sempurna yang tidak retak. Semoga skripsi yang masih jauh dari sempurna ini dapat bermanfaat dan dapat menambah pengetahuan bagi semua pihak yang membutuhkan.

Gowa, Juli 2023

Gabriella Lisugau

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Seperti yang diketahui bahwasanya Indonesia merupakan negara maritim yang terdiri dari banyak pulau dengan keanekaragaman sumber hayati laut yang melimpah dalam hal ini pada bidang eksplorasi dan eksploitasi di laut.

Wilayah laut Indonesia yang mencapai luas 3,11 juta Km<sup>2</sup> menyebabkan potensi sektor kelautan menjadi tidak ternilai, terutama dari sektor kekayaan alam lautnya. Potensi kekayaan laut menjadi sedemikian penting sebagaimana diprioritaskan oleh Indonesia dalam Konsep green economy dan blue economy yang bermuara pada pembangunan berkelanjutan sebagaimana disampaikan oleh Presiden RI saat memberikan sambutannya dalam Konferensi Rio+20 (United Nations Conference on Sustainable Development) di Rio de Janeiro, Brasil pada tanggal 20-22 Juni 2012 (Purwendah 2022).

Lingkungan laut merupakan bagian dari perekonomian suatu negara. Dengan panjang garis pantai sekitar 95.181 km, perairan Indonesia memiliki potensi yang tinggi. Ukuran tersebut merupakan urutan kedua setelah Kanada sebagai Negara yang memiliki garis pantai kedua terpanjang di dunia. Nilai perekonomian dari laut ditaksir mencapai US\$3 triliun -US\$5 triliun atau setara dengan Rp. 36.000 triliun -Rp. 60.000 triliun per tahun (Purwendah 2022).

Sumber daya hasil eksplorasi dan eksploitasi tersebut haruslah dilakukan pengolahan dan produksi yang cukup baik. Dengan demikian dalam menunjang kelancaran distribusi hasil eksplorasi dan eksploitasi dilaut diperlukan peran kapal sebagai sarana yang sangat efisien dalam mendistribusikan hasil bumi tersebut. Kapal merupakan alat transportasi laut yang mampu membawa muatan berupa barang dan penumpang dengan jumlah yang besar dibandingkan dengan transportasi lainnya, sehingga sangat penting untuk memperhatikan kekuatan struktur kapal yang memberikan efek besar terhadap kapal agar bisa beroperasi dengan waktu yang lama serta dengan lingkungan yang cepat berubah (Rabbani et al, 2017).

Namun dalam proses pendistribusian tersebut memiliki tantangan yang cukup besar yang dihadapi termasuk didalamnya adalah kecelakaan kapal tanker yang biasanya diakibatkan oleh beban lingkungan ekstrim saat proses pelayaran maupun adanya kerusakan pada kapal itu sendiri. Hal ini memungkinkan

terjadinya pencemaran akibat kecelakaan tersebut. Berdasarkan Peraturan Pemerintah No.19 Tahun 1999 yang dimaksud pencemaran laut adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan laut oleh kegiatan manusia sehingga kualitasnya turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan laut tidak sesuai lagi dengan baku mutu dan/atau fungsinya (Presiden RI 1999). Ada beberapa peristiwa kecelakaan kapal tangker dari tahun 1967 hingga tahun 2017 yang terjadi di Selat Malaka dimana beberapa diantaranya tidak diketahui berapa besar tumpahan minyak yang terjadi yaitu pada kecelakaan kapal di tahun 1967, 1971,1986,1988,1992 dan 1997. Selain itu terdapat juga kecelakaan kapal tangker di Selat Malaka yang menumpahkan lebih dari 1 juta ton yaitu di tahun 1978,1979,1983 dan 1988 (Tarigan et al, 2016).

Kerusakan akibat kandas dapat terjadi pada lambung kapal dan mengancam keselamatan kapal dan lingkungan sekitarnya. Fenomena ini harus diselidiki sebagai salah satu persyaratan fungsional untuk desain struktur kapal. Struktur konstruksi kapal akan mengalami berbagai beban antara lain beban internal yang disebabkan oleh pembebanan yang ada di kapal dan beban eksternal seperti gelombang laut serta posisi kapal terhadap gelombang itu sendiri dan juga angin. Desain dan material dari struktur kapal tersebut turut mempengaruhi nilai dari kekuatan struktur kapal dalam mengangkat muatan dan menahan beban-beban yang dialaminya. Bentuk dan konstruksi kapal mempunyai fungsi tertentu sesuai muatan yang dibawa dan rute pelayaran.

Salah satu aspek terpenting dalam desain struktural adalah untuk menganalisis kemampuan struktur dalam memenuhi tujuan dari desain termasuk bahwa struktur tidak akan gagal dalam kondisi aktivitas apapun. Sebuah struktur mungkin gagal dalam beroperasi karena beberapa kasus seperti lingkungan yang ekstrim, kelebihan beban dari kapasitas struktural dan faktor-faktor lainnya (Muis Alie et al, 2016)

Telah diketahui dengan baik bahwa kekuatan batas (*ultimate strength*) sangat penting dalam desain kapal. Kekuatan ini harus diperhitungkan untuk melindungi kapal dari kerusakan. Dalam studi ini, terdapat tiga jenis kekuatan akan dinilai: longitudinal, transversal dan lokal. Kekuatan longitudinal adalah yang paling signifikan dan parameternya yang selalu dinilai untuk menetapkan kapasitas momen lentur kapal terhadap beban eksternal saat di laut (Muis Alie et al,2019)



Pada kasus kecelakaan *oil tanker Exxon Valdez* tahun 1989 di Prince William Sound, Alaska, Amerika Serikat (AS) menunjukkan tidak efektifnya Undang-Undang Polusi Minyak tahun 1990 (OPA 90) berstandar Internasional mengenai pencegahan polusi lingkungan yang disebabkan oleh kapal. Untuk itu, diberlakukan persyaratan penggunaan lambung ganda (*hull*) pada kapal tanker baru dan kapal tanker lama. Karena itu International Maritime Organization (IMO) mengambil tindakan dan menetapkan standar lambung ganda pada tahun 1992 dalam *International Convention for the Prevention of the Pollution from Ships (MARPOL)* (Ramadhan et al, 2016)

Berdasarkan latar belakang tersebut serta penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan analisa kekuatan kapal tanker, menjadi latar belakang dalam pengerjaan tugas akhir dengan penelitian tentang analisa kekuatan *chemical tanker*.

## **1.2 Rumusan masalah**

Berdasarkan pada latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana kekuatan melintang kapal *chemical tanker*

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan melintang kapal *chemical tanker*

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Adapun hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat diantaranya :

1. Untuk bidang industri dapat memberikan kontribusi kekuatan pada kapal *chemical tanker* terhadap perusahaan yang hendak membuat ataupun membeli kapal *chemical tanker*.
2. Untuk bidang akademis dapat memperluas wawasan mahasiswa dan mahasiswi serta menjadi masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya pada bidang ilmu pengetahuan

## **1.5 Batasan masalah**

Untuk menyederhanakan dan memudahkan dalam penelitian ini, maka ruang lingkup penelitian dibatasi dengan beberapa hal berikut.

1. Pemodelan dilakukan pada bagian penampang *midship* kapal *chemical tanker*.

2. Kekuatan melintang kapal dihitung dalam satu jarak gading besar.
3. Analisis kekuatan menggunakan metode NLFEA.
4. Ketidakterampilan awal, cacat pengelasan dan retak diabaikan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Kapal Tanker

Kapal tanker adalah kapal khusus yang muatannya dapat berupa minyak, bahan kimia, gas, dan muatan lainnya yang dapat menimbulkan kebakaran dan ledakan. Muatan ini sangat berbahaya tidak hanya untuk kapal tetapi juga kondisi lingkungan (Ardianus 2021a)

Kapal tanker merupakan alat transportasi yang dispesifikasi untuk mengangkut muatan minyak, tidak hanya dari tempat pengeboran menuju darat, akan tetapi kapal tanker juga digunakan untuk sarana angkut perdagangan minyak antar pelabuhan atau antar negara. Kapal tanker memiliki karakteristik khusus yang berbeda dengan kapal lainnya ini disebabkan kapal tanker adalah kapal yang menetapkan standar keselamatan yang sangat tinggi mengingat muatan yang dibawanya sangat berbahaya. Saat kapal mengalami tubrukan atau kandas, penetrasi pada bagian sisi dan bawah kapal dapat mengalami kerugian ekonomi dan potensi kerusakan lingkungan yang parah.

Perkembangan teknologi sangat berpengaruh terhadap industri pelayaran khususnya industri perkapalan, baik itu terkait penanganan muatan maupun dalam operasional kapal seperti komunikasi dan navigasi. Dengan meningkatnya perkembangan teknologi diharapkan dapat meningkatkan keselamatan kapal dilaut, mencegah terjadinya kecelakaan jiwa/meninggalnya orang dan untuk perlindungan lingkungan khususnya lingkungan maritim dan juga melindungi harta benda dilaut (*property*) serta untuk efisiensi pengoperasian kapal.

Lambung kapal adalah struktur panel kaku yang sangat rumit terdiri dari komponen struktur seperti *deck*, *bottom*, *side*, sekat, rangka melintang dan memanjang. Meskipun analisis *FE non linier* diterima secara luas sebagai alat yang andal untuk penyelidikan perilaku struktural *non linier*, aplikasi untuk analisis keruntuhan progresif lambung kapal *Centre girder* masih sangat terbatas karena banyaknya permintaan pada sumber daya komputer dan tenaga kerja.

Menurut G.S marton dalam buku *Tanker Operational Fifth Edition* dalam industry pelayaran ada beberapa kategori kapal tanker (Marton 2017)

1. Adapun jenis kapal tanker menurut muatannya antara lain:
  - a. *Oil tanker* dimana untuk jenis ini terdapat 2 jenis yaitu *crude tanker* yang merupakan kapal tanker yang membawa muatan minyak mentah dan

*Oilproduct tanker* adalah kapal tanker yang membawa muatan minyak mentah yang sudah diolah dari kilang menjadi berbagai produk. Produk minyak yang ringan seperti solar , bensin, minyak tanah, dan *gas oil*, disebut *clean product*. Sedangkan yang lebih berat seperti minyak bakar (*oil fuel*) dan *residu* disebut *dirty product*



Gambar 2. 1 Kapal Oil Tanker

[tps://pgjonline.com/media/4782/oil-tanker-deepwater-2-2000.jpg](https://pgjonline.com/media/4782/oil-tanker-deepwater-2-2000.jpg)

- b. *Chemical tanker* adalah jenis kapal tanker yang dirancang untuk mengangkut bahan kimia dan juga untuk mengangkut jenis bahan sensitive dengan standar kebersihan tanki yang tinggi seperti minyak nabati, lemak, minyak sawit, soda kaustik dan *methanol*. Untuk membawa kargo berbahaya, tanker ini memiliki standar keamanan yang tinggi, antara lain: Tanki dilapisi bahan khusus (seperti *stainless stell*, *epoxy resin* dan *zinc silicate*) demi mencegah reaksi antara bahan kimia dan lambung kapal. Setiap tangka memiliki *system* pompa dan perpipaan yang tersendiri, sehingga muatan dalam setiap tangka dapat dimuat dan

dikeluarkan secara terpisah. Pemisahan ini dilakukan untuk pencegahan kontaminasi antar bahan kimia dengan jenis berbeda.



Gambar 2. 2 Chemical Tanker  
(<https://images.maritimeprofessional.com/images/maritime/photo-credit-odfjell-93030.jpg>)

- c. *Liquefied Natural Gas (LNG)* Tanker adalah Kapal Tanker adalah jenis kapal tanker yang dirancang untuk mengangkut muatan gas alam cair. Adapun contoh kapal *Liquefied Natural Gas (LNG)* dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2. 3 LNG Tanker  
(<https://bspc.ir/en/wp-content/uploads/2020/05/Journal11.jpg>)

## 2. Berdasarkan ukurannya

- a. *Handy-size tankers* adalah kapal tanker yang mempunyai bobot 5.000-35.000 Ton. Umumnya digunakan untuk mengangkut minyak jadi (*Product oil*)
- b. *Medium-size tankers* adalah kapal tanker yang mempunyai bobot mati antara 35.000-160.000 Ton. Dan umumnya digunakan untuk mengangkut minyak mentah, atau kadang berfungsi sebagai "*mother ship*" jika digunakan mengangkut minyak jadi.
- c. VLCC (*Very-Large Crude Carriers*) adalah kapal tanker yang mempunyai bobot mati antara 160.000-300.000 ton. Umumnya digunakan untuk crude oil saja.
- d. ULCC (*Ultra-Large Crude Carriers*) adalah kapal tanker yang mempunyai bobot mati lebih dari atau sama dengan 300.000 ton. Umumnya digunakan untuk mengangkut *crude oil* saja.

### 2.2 Sistem Konstruksi Kapal

Pemilihan jenis sistem untuk suatu kapal sangat ditentukan oleh ukuran kapal (dalam hal ini panjangnya sehubungan dengan kebutuhan akan kekuatan memanjang), jenis/fungsi kapal menjadikan dasar pertimbangan-pertimbangan lainnya. Sistem kerangka/konstruksi kapal (*framing system*) dibedakan dalam dua jenis utama; yaitu sistem kerangka melintang (*transverse framing system*) dan sistem membujur atau memanjang (*longitudinal framing system*). Dari kedua sistem utama ini maka dikenal pula sistem kombinasi (*combination/mixed framing system*) (Sofi'i dan Djaja, 2018).

### 2.3 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 :

1. Pada alas : *Centre Centre girder* dan *Side Centre girder*
2. Pada sisi : *Side Stringer*
3. Pada geladak : *Deck Centre girder* atau *carling*

#### 2.4 Sistem Konstruksi Memanjang

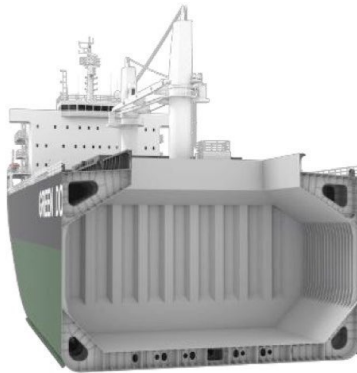
Dalam sistem ini gading-gading utama tidak dipasang vertikal, tetapi dipasang membujur pada sisi kapal dengan jarak antara, diukur ke arah vertikal, sekitar 700 mm-1.000 mm. gading-gading ini pada sisi dinamakan pembujur sisi (*side longitudinal*). Pada setiap jarak tertentu (sekitar 3-5 m) dipasang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

#### 2.5 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.

## 2.6 *Singel Hull tanker*

Kapal tanker lambung tunggal (*single hull tanker*) memiliki satu lambung dan membawa minyak langsung di dalam struktur lambung. Beberapa kapal *single hull tanker* membawa minyak dan air pemberat (*ballast*) di dalam tangki yang sama sedangkan beberapa *single hull tanker* memiliki tangki *ballast* terpisah di dalam lambung kapal (misalnya minyak dibawa langsung ke dalam lambung kapal, tetapi tangki *ballast* dipisahkan dari muatan) (Terhune 2011).



Gambar 2. 4 *Singel hull tanker*

(<https://gcaptain.com/introducing-new-green-dolphin-575-bulk-carrier-concept-design-photos/>)

## 2.7 *Double hull tanker*

Kemampuan kapal lambung ganda (*hull*) untuk mencegah atau mengurangi tumpahan minyak menyebabkan standarisasi kapal jenis lain termasuk kapal tanker minyak oleh konvensi Internasional atau konvensi MARPOL untuk pencegahan polusi dari kapal. Namun dengan tidak efektifnya undang-undang polusi minyak tahun 1990 (OPA 90) mengenai pencegahan polusi lingkungan yang disebabkan oleh kapal. Untuk itu, *international maritime organization (IMO)* mengambil tindakan dan menetapkan standar lambung ganda pada tahun 1992 dalam *international convention for the prevention of the pollution from ships (MARPOL)*. Konvensi ini mengharuskan semua kapal minyak



dengan bobot mati (DWT) 600 ton atau lebih yang diserahkan pada atau setelah tanggal 6 Juli 1996 menggunakan lambung ganda (Ramadhan et al, 2016).



Gambar 2. 5 *hull tanker*

(<https://sites.google.com/site/supertankeri458/home/konstruksija-tankera>)

Lambung ganda (*hull*) tidak melindungi terhadap tabrakan atau pendaratan yang menyebabkan sebagian besar polusi minyak, meskipun ini menjadi alasan bahwa lambung ganda diamankan oleh undang-undang Amerika Serikat.

Semua kapal tanker yang dibangun sejak tahun 1990 adalah konstruksi lambung ganda. Gambar 2.5 menunjukkan pengaturan tangki khas untuk kapal tangki lambung ganda. Lebar tangki berkisar dari 2,0 meter untuk tanker ukuran Panamax hingga 3,0 hingga 4,0 meter untuk VLCC's. Ketinggian dasar ganda umumnya sebanding dengan lebar tangki.

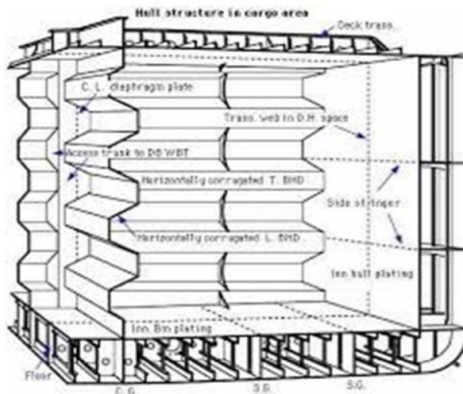
Sebagian besar tanker Panamax, Aframax, dan Suezmax memiliki pengaturan tangki kargo dua arah. Sebagian besar VLCC memiliki pengaturan tangki kargo 3 arah. Pada awal tahun 1990-an, beberapa Tanker Panamax dan Aframax dibangun dengan pengaturan satu tangki yang melintasi. Itu menunjukkan bahwa kapal tanker ini memiliki aliran minyak diharapkan lebih

tinggi dalam hal terjadi kecelakaan yang melanggar lambung bagian dalam, dan berpotensi menjadi tidak stabil selama operasi pemuatan.

Sejak saat itu, IMO telah mengadopsi peraturan stabilitas utuh dan peraturan aliran keluar minyak yang tidak disengaja yang secara efektif menghalangi konstruksi desain tersebut. Regulasi stabilitas MARPOL Intact mulai berlaku pada tahun 2005 diikuti oleh peraturan kinerja aliran keluar minyak Disengaja pada tahun 2010. Peraturan ini dikembangkan dan dikenal oleh industri selama tahun 1990-an dan sebagian besar kapal tangki lambung ganda yang dibangun sejak pertengahan tahun 1990 sesuai dengan peraturan ini.

Kapal *chemical tanker* umumnya telah memiliki *hull*, yang secara esensial merupakan kombinasi dari *double bottom* dan *double side*. Lebar tangki samping mungkin kurang dari pada desain *double side*. Namun, karena *ballast* yang dibutuhkan bisa dibagi antara sisi dan ruang bawah. Oleh karena itu, kapal *hull* mungkin lebih rendah kerusakan ambang sisi yang berkelanjutan pada saat bertabrakan.

Pada Gambar 2.7 penampang *midship hull tanker* yang di potong melintang, dapat diperhatikan konstruksi *hull tanker* memiliki *double bottom* dimana terdapat *bottom* dan *inner bottom* dan *double side* dimana terdapat *side* dan *inner side*.



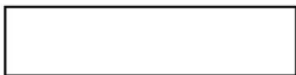
Gambar 2. 6 Struktur utama batang chemical tanker

## 2.8 Kekuatan Struktur kapal

Salah satu kriteria terpenting dalam desain kapal adalah kekuatan. Ketika sebuah kapal berada di bawah beban eksternal seperti gelombang, daya apung atau tekanan, reaksi internalnya harus menahan beban eksternal tersebut. Dalam hal ini, beban luar ditahan oleh lambung kapal, yang penampangnya terdiri dari pelat dan stiffner, yang memiliki pengaruh signifikan terhadap *ultimate strenght*, terutama dalam arah memanjang (Muis Alie et al, 2016)

Hal ini selanjutnya diilustrasikan pada Gambar 2.8 untuk sebuah kapal yang berada pada kondisi air tenang (misalnya di pelabuhan). Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.8(a), tongkang yang diturunkan dari penampang konstan dan kerapatan, yang mengapung di air akan memiliki berat dan daya apung yang merata sepanjang tongkang. Hal ini ditunjukkan oleh kurva berat dan daya apung, terlihat pada Gambar 2.8(b).

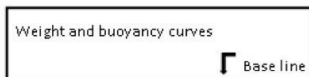
Jika tongkang dimuat di tengah (Gambar 2.8(c)), distribusi berat akan berubah dan kurva yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.8(d). Perbedaan antara kurva berat dan daya apung menghasilkan distribusi momen lentur sepanjang kapal. Momen lentur ini dikenal sebagai momen lentur air tenang,  $M_s$ , seperti yang terlihat pada tongkang yang dimuat pada Gambar 2.8 (Bai 2003).



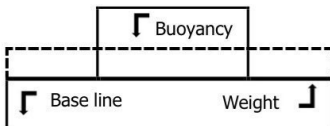
(a) Rectangular barge-unloaded

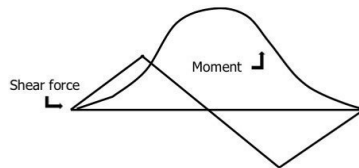


(b) Barge – half loaded



(c) Weight and buoyancy curves of unloaded barge



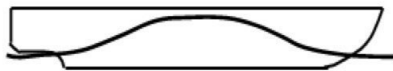
(d) *Weight and buoyancy curves of loaded barge*(e) *Still water shear force and bending**moment curves of loaded barge*

Gambar 2. 7 Perubahan momen lentur pada tongkang persegi panjang kondisi air tenang

## 2.9 Beban Melintang

Beban melintang mewakili beban yang bekerja pada batang melintang dan menyebabkan distorsi struktural pada penampang melintang. Kekuatan beban melintang meliputi tekanan hidrostatis pada kulit terluar, berat muatan kargo yang bekerja pada struktur bawah, tekanan air pemberat menyebabkan deformasi tangki pemberat, dan lain lain.

Bagian melintang kapal mengapung di air tenang diilustrasikan pada Gambar 2.9 Bagian ini dikenai: (a) tekanan hidrostatis akibat air disekitarnya, (b) beban internal karena berat kapal sendiri serta bobot kargo. Beban ini tidak selalu sama satu sama lain di setiap titik, akibatnya beban yang bekerja pada batang melintang akan menghasilkan distorsi melintang seperti yang ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 2.10.

(a) *Ship in Hogging condition*(b) *Ship in sagging condition*

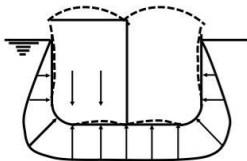
Gambar 2. 8 momen lentur gelombang pada gelombang reguler

Dengan mempertimbangkan beban melintang dan beban *longitudinal*, karakteristik berikut penting sebagai sudut pandang analisis kekuatan: Distorsi akibat beban *longitudinal* tidak mempengaruhi deformasi bagian melintang.

Momen lentur *longitudinal* atau gaya geser tidak akan berpengaruh pada distorsi penampang. Kekuatan beban melintang biasanya digunakan dalam kasus menyelidiki kekuatan batang utama, seperti cincin melintang, bingkai web melintang, dll (Okumoto 2009).

Sistem rangka konstruksi melintang kapal ialah merupakan konstruksi dimana beban yang bekerja pada konstruksi diterima oleh pelat kulit dan balok-balok memanjang dari kapal dengan pertolongan balok-balok yang terletak melintang kapal. Adapapun manfaat dari rangka konstruksi melintang ialah:

1. Menghasilkan konstruksi yang sederhana
2. Mudah dalam pembangunannya
3. Kekuatan melintang kapal baik sekali dengan adanya gading-gading utama
4. Jumlah dinding sekat melintang diperkecil
5. Memperkecil ruang palka



Gambar 2. 9 Deformasi karena beban melintang

## 2.10 Beban Lokal

Beban lokal mencakup beban yang mempengaruhi batang kekuatan lokal seperti panel *shell*, *stiffener* dan penghubung konstruksi antara *stiffener* (Okumoto 2009).

Kekuatan lokal batang struktur primer dan sekunder dievaluasi dengan menggunakan tekanan karena beban lokal, seperti tekanan lateral atau beban terkonsentrasi dan lain lain. Sekali lagi teori dasar balok *Bernoulli-Euler* digunakan saat menghitung tekanan atau defleksi untuk *stiffener* dan *centre girder*. Teori lempeng digunakan untuk pelat. Persamaan untuk tegangan dan defleksi, dengan menggunakan asumsi yang sama seperti teori dasar balok atau teori lempeng, dapat ditemukan dalam buku teks tentang kekuatan material (Bai 2003).

### 2.11 Momen Lentur Batas Vertikal

Momen lentur-batas vertikal dalam analisa kekuatan struktur kapal terdiri dari beban pada air tenang ( $M_{sw}$ ) untuk skenario pembebanan statis dan penjumlahan beban pada air tenang ( $M_{sw}$ ) dan beban akibat gelombang ( $M_W$ ) untuk skenario pembebanan statis dan dinamis (IACS 2010)

Menjumlahkan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang untuk mendapatkan nilai ekstrim dari momen lentur-batas vertikal (Paik, et al, 1998)

Menurut (Hughes and Paik 2010) ,mengasumsikan distribusi tegangan lentur di atas penampang lambung pada batasan *ultimate* di bawah momen lentur vertikal, dimana seluruh material yang terkompresi telah mencapai kekuatan batas dengan tekuk dan semua material yang mengalami tension akan kalah. Momen lentur batas mengintegrasikan dengan asumsi tegangan lentur di atas penampang.

Berdasarkan studi eksperimental model kapal skala besar dan studi numerik kapal skala penuh diakui bahwa kehancuran keseluruhan dari lambung kapal ketika momen lentur vertikal terjadi karena runtuhnya *flange* yang tertekan, tetapi terdapat kekuatan cadangan setelah *flange* tertekan runtuh. Hal ini karena setelah *flange buckle* yang ditekan, sumbu netral dari penampang lambung bergerak ke arah *flange* yang ditahan (terjadi tegangan), dan peningkatan lebih lanjut dalam penerapan momen lentur dipertahankan sampai *flange* yang ditahan (terjadi tegangan) menjadi luluh. Pada tahap selanjutnya dari proses ini, struktur vertikal (misalnya, sekat *longitudinal* atau struktur *shell* samping) di sekitar *flange* terkompresi dan *flange* yang ditegang mungkin juga gagal. Namun, di sekitar sumbu netral akhir, struktur vertikal biasanya tetap dalam keadaan elastis linier sampai runtuhnya keseluruhan gelagar lambung terjadi. Hal ini pada sifat geometrik dan material dari penampang lambung kapal, bagian ini tentu saja gagal, yang sesuai dengan anggapan (Hughes dan Paik 2010).

### 2.12 Beban yang bekerja pada konstruksi kapal

Untuk setiap kasus beban, beban yang diterapkan yang digunakan untuk analisis struktur kapal harus mencakup bagian statis dan dinamis dari setiap komponen beban. Kasus muatan kapal menunjukkan efek gabungan dari beban dominan dan beban lain yang bekerja secara bersamaan pada struktur lambung termasuk tekanan gelombang eksternal, tekanan tangki internal dan beban inersia pada komponen dan peralatan struktur. 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. Beban-beban pada konstruksi kapal dapat dikelompokkan sesuai dengan karakteristik beban-beban yang bekerja pada konstruksi kapal tersebut. Dalam menghitung bagian dinamis suatu beban, perlu mempertimbangkan berbagai kondisi laut, yang menghasilkan respons kritis yang dipertimbangkan dari struktur lambung. Kasus Beban yang dikembangkan kemudian digunakan dalam analisis struktur untuk menentukan tegangan yang dihasilkan dan efek beban lainnya di dalam struktur lambung pengelompokan beban konstruksi kapal sesuai karakteristik bebannya dapat dilihat sebagai berikut.

Adapun beban yang digunakan dalam analisa struktur kapal mencakup beban statis dan dinamis. Perencanaan dari pembuatan kapal diharuskan menggunakan bahan material yang tepat sehingga menghasilkan kinerja kapal yang lebih baik dan aman saat pelayarannya.

Pemilihan bahan material ini mempunyai banyak pengaruh teknis dalam suatu kapal. Beban-beban pada konstruksi kapal dapat dikelompokkan sesuai dengan karakteristik beban-beban yang bekerja pada konstruksi kapal tersebut. Pengelompokan beban konstruksi kapal sesuai karakteristik bebannya dapat dilihat sebagai berikut:

1. Beban statis yaitu beban yang bersifat tetap, misalnya beban dari berat kapal dan beban dari gaya tekan ke atas.
2. Beban dinamis dengan frekuensi rendah yaitu beban yang timbul dalam tenggang waktu beberapa saat dengan frekuensi getaran yang cukup rendah dibandingkan dengan frekuensi getaran lambung kapal.
3. Beban dinamis dengan frekuensi tinggi yaitu beban yang berubah-ubah dengan frekuensi yang cukup tinggi dan dapat menimbulkan tegangan pada konstruksi kapal, misalkan beban hidrodinamis yang disebabkan oleh putaran propeller di kapal dan adanya putaran motor penggerak kapal.

### 2.13 Beban luar alas kapal

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal (Biro Klasifikasi Indonesia 2022). Beban luar alas kapal dapat dihitung dengan Persamaan 1.

$$P_b = 10 \cdot T + P_o \cdot C_f \quad (1)$$

Dimana:

$P_B$  = Beban luar alas kapal ( $\text{kN/m}^2$ )

$T$  = Sarat kapal (m)

$P_o$  = *Basic eksternal dynamic load* ( $\text{kN/m}^2$ )

$C_F$  = Faktor distribusi

## 2.14 Beban luar sisi kapal

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang timbul karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal (Biro Klasifikasi Indonesia 2022). Beban luar sisi kapal dibagi atas dua beban yaitu:

1. Beban luar sisi kapal dibawah garis air muat ( $P_{s1}$ )

2. Beban luar sisi kapal diatas garis air muat ( $P_{s2}$ )

Adapun beban luar sisi kapal tersebut dihitung dengan Persamaan 2 dan 3.

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

$$P_{s2} = P_o \cdot C_F \quad (3)$$

Dimana :

$P_{s1}$  = Beban luar sisi kapal dibawah garis air muat ( $\text{kN/m}^2$ )

$P_{s2}$  = Beban luar sisi kapal diatas garis air muat ( $\text{kN/m}^2$ )

$P_o$  = *Basic eksternal dynamic load* ( $\text{kN/m}^2$ )

$C_F$  = Faktor distribusi

$a$  = Jarak antar *stiffener* (m)

$z$  = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)

$T$  = Sarat kapal (m)

$H$  = Tinggi kapal (m)

## 2.15 Beban Geladak Cuaca

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak dibelakang 0,15 L dari garis tegak haluan (FP) (Biro Klasifikasi Indonesia 2022). Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 4.

$$P_o = P_o \frac{20 \cdot T}{(10 + z - T) H} C_o \quad (4)$$



Dengan  $P_0$  terdiri dari  $P_{01}$  untuk arah gelombang searah atau berlawanan arah kapal dan  $P_{02}$  untuk arah gelombang melintang arah kapal yang dapat dihitung seperti pada Persamaan 5 dan Persamaan 6.

$$P_{01} = 2,1 \cdot (C_B + 0,7) \cdot C_D \cdot C_L \cdot f \quad (5)$$

$$P_{02} = 2,6 \cdot (C_B + 0,7) \cdot C_D \cdot C_L \quad (6)$$

Dimana :

$P_D$  = Beban geladak cuaca ( $\text{kN/m}^2$ )

$P_0$  = *Basic eksternal dynamic load* ( $\text{kN/m}^2$ )

$C_D$  = Faktor Distribusi

$F$  = 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 tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)

$T$  = Sarat kapal (m)

$H$  = Tinggi kapal (m)

## 2.16 Momen Lentur-Batas pada Air Tenang

Momen lentur dan gaya geser pada kondisi air tenang berasal dari gaya apung dan distribusi berat sepanjang panjang kapal. Pengaruh momen lentur air tenang pada momen total Kapal dengan massa total dan draft air tenang, gelombang momen *sagging* dan *Hogging* secara efektif konstan untuk gelombang tertentu. Jika momen air tenang diubah dengan memvariasikan distribusi massa momen total berubah dengan jumlah yang sama. Adapun momen lentur yang lebih besar terjadi pada *sagging* atau *Hogging*, hal ini tergantung dari tipe kapal, antara lain koefisien blok. Apabila koefisien blok rendah, momen lentur *sagging* cenderung lebih besar dari *Hogging*, mengurangi perbedaan pada peningkatan koefisien blok (Tupper 2013).

## 2.17 Regangan

Regangan merupakan perubahan relatif ukuran atau bentuk suatu benda yang mengalami tegangan. Regangan dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang benda terhadap panjang benda mula-mula. Selain

itu regangan menjadi tolok ukur seberapa jauh benda tersebut berubah bentuk. 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 7.

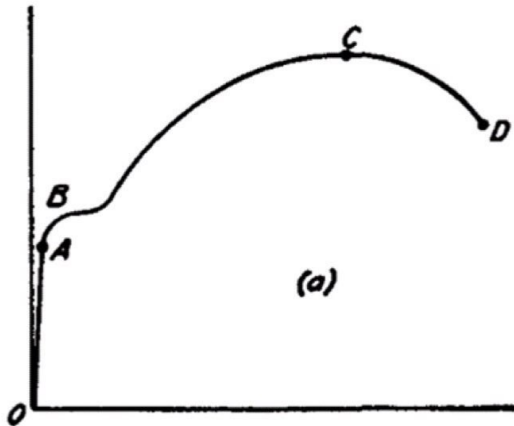
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

Dimana :

$\varepsilon$  = Regangan

$\Delta L$  = Pertambahan panjang (m)

$L$  = Panjang mula-mula (m)



Gambar 2. 10 Hubungan antara tegangan dan regangan

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.11, dapat dilihat bahwa batas elastis (*elastic limit*) bahan tercapai. Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan, sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Yaitu bahan secara tiba-tiba mulur yang disebut titik mulur (*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  $F_u$  yaitu tegangan maksimum batas kekuatan bahan. Tegangan ini

disebut tegangan batas (*ultimate Stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. Diluar titik  $F_u$ , pemanjangan akan berlanjut, tetapi secara perlahan tegangan berkurang, sampai akhirnya batang patah. Secara sederhana regangan dapat dikatakan seberapa banyak perubahan panjang dari suatu material. Jika tegangan adalah pembebanan pada material dari arah luar, maka regangan adalah respons material dari pembebanan tersebut. Hubungan antara tegangan dan regangan mengikuti hukum Hooke untuk elastisitas, dalam batas (limit) elastik suatu benda, dan hal ini menunjukkan bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangan .

### **2.18 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.

### **2.19 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 hooke masih bisa ditolerir. Dalam praktek, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis.

### **2.20 Deformasi plastis (*plastic deformation*)**

Deformasi plastis 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.

### **2.21 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 8 dan 9 :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$E = \frac{F.L}{A.\Delta L} \quad (9)$$

Dimana :

E = Modulus Young (N/mm<sup>2</sup>)

A = Luas Penampang (mm<sup>2</sup>)

F = gaya (N)

L = panjang mula-mula (mm)

$\Delta L$  = 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 2.1 Satuan SI untuk E adalah pascal (Pa) atau N/mm<sup>2</sup>

Tabel 2. 1 *Modulus Young* pada Material

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

## 2.22 Tegangan yang bekerja

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.

## 2.23 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 batang 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 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 9:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (9)$$

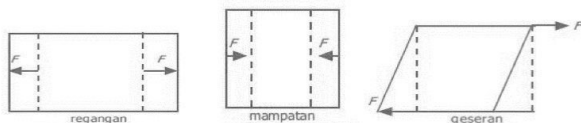
Dengan:

$\sigma$  = tegangan (N/mm<sup>2</sup>)

F = gaya (N)

A = luas penampang (N/mm<sup>2</sup>)

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm<sup>2</sup>. Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut.



Gambar 2. 11 Tegangan-Regangan

## 2.24 Tegangan Izin dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. 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 ini harus tidak boleh lebih kecil dari yang dihitung dengan tegangan izin dasar

(tanpa kenaikan sepertiganya) apabila beban yang bekerja adalah gabungan bobot mati dan hidup.

Modulus penampang tidak boleh kurang dari nilai formula yang dikeluarkan oleh IACS (2016) untuk kapal dengan panjang tidak kurang dari 150 m sebagai berikut:

$$S_p = \frac{M_t}{\sigma_p} \times 10^3 \text{ m}^3 \quad (10)$$

Dimana  $S_p$  adalah modulus penampang ijin,  $M_t$  adalah momen lentur total,  $\sigma_p$  adalah tegangan lentur ijin sebesar 175/k (N/mm<sup>2</sup>) dengan nilai k sebesar 1,0 (*mild steel*), 0,93 (*grade AH27*), 0,78 (*Grade AH32*), 0,72 (*Grade AH36*) dan 0,68 (*Grade AH40*).

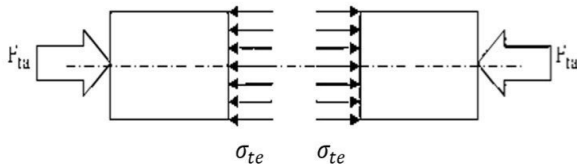
Inersia ijin bagian *midship* tidak boleh kurang dari nilai formula yang dikeluarkan oleh IACS (2016) untuk kapal dengan panjang tidak kurang dari 150 m sebagai berikut:

$$I_{min} = 3C^2B(C_b + 0,7), \text{ m}^4 \quad (11)$$

## 2.25 Tegangan tekan

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 ( $\sigma_{te}$ ) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan ( $F_{ta}$ ) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan yang terlihat pada Gambar 2.13.

Rasio/Perbandingan antara perpendekan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan  $\varepsilon_{ta}$  secara matematik dapat dilihat pada Gambar :



Gambar 2.12 Tegangan Tekan

Selanjutnya dapat dinyatakan dengan rumus:

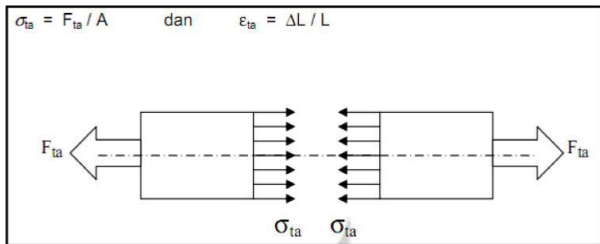
$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (12)$$

Dimana :

- $\sigma_{te}$  = Tegangan tekan (N/mm<sup>2</sup>)  
 $F_{ta}$  = Gaya tekan (N)  
 $A$  = Luas penampang (mm<sup>2</sup>)

## 2.26 Tegangan Tarik

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. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbunya. Tegangan Tarik ( $\sigma_{ta}$ ) terjadi akibat bekerjanya gaya Tarik ( $F_{ta}$ ) pada satuan luas penampang ( $A$ ) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio/Perbandingan antara perpanjangan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tarik  $\epsilon_{ta}$  secara matematik dapat ditulis dengan dan dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 13 Tegangan Tarik

## 2.27 Tegangan lentur

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. Merupakan gaya yang bekerja pada jarak tertentu ( $L$ ) dari tumpuan benda dengan arah kerja tegak lurus sumbunya.

### 2.28 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.

### 2.29 Tegangan geser

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 dalam satuan ( $\text{N/mm}^2$ ). Tegangan geser terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser didistribusikan pada sebuah luas penampang melintang yang paralel (tangensial) dengan gaya geser tersebut.

Tegangan geser timbul akibat kerja dari dua gaya geser ( $P$ ) 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 Tegangan geser yaitu tegangan ( $\tau$ ) 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 13 :

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

Dimana :

- $\tau$  = tegangan geser ( $\text{N/mm}^2$ )
- $P$  = gaya geser atau gaya lintang ( $\text{N}$ )
- $A$  = Luas penampang ( $\text{mm}^2$ )

### 2.30 Kekuatan batas (*ultimate strength*)

Kekuatan batas (*ultimate strength*) adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami keruntuhan (*collapse*) total (McKenzie 2020). Perhitungan kekuatan batas kapal tanker (MU) berdasarkan keakuratan dan kompleksitas dapat dihitung dengan metode PSDM (*Presumed Stress Distribution Method*), metode ISUM (*Smith Method and Idealized Structural Unit Method*), metode ISFEM (*Intelligent Supersize Finite*



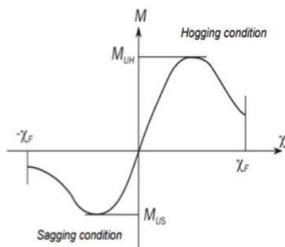
element method), (*Finite Element Analysis*) NLFEA dan harus memenuhi kriteria Persamaan 14 (GL 2017):

$$M_t \leq \frac{M_u}{Y_R} \quad (14)$$

Dimana :

$M_t$  = Momen lentur-batas total vertikal (Nm)  
 $Y_R$  = Faktor keamanan kekuatan batas lentur *vertical*. kondisi *sagging* = 1,1 dan kondisi *Hogging* = 1,21

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.15. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *Hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.



Gambar 2. 14 Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan

### 2.31 Metode matriks kekakuan

Metode elemen hingga (*finite element method*) biasa dipandang sebagai perluasan dari metode perpindahan ke masalah continuum berdimensi dua dan tiga seperti plat, struktur selaput (*shell*) dan benda pejal. Dalam metode ini, continuum sebenarnya diganti dengan sebuah struktur ideal ekuivalen yang terdiri dari elemen-elemen unik (*discrete element*). Elemen ini disebut elemen berhingga dan dihubungkan bersama-sama di sejumlah titik simpul (Zulfikar et al. 2015). 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 (Ardianus 2021b).

Penyelesaian dari metode elemen hingga umumnya menggunakan

metode matriks. Metode matriks cara kekakuan dikembangkan dengan anggapan struktur bersifat elastik-linier. Prinsip superposisi digunakan supaya terbentuk persamaan keseimbangan aksi yang selaras perpindahan titik kumpul. Solusi persamaan simultan yaitu perpindahan titik kumpul. Selanjutnya, besaran reaksi serta aksi ujung batang dapat dihitung.

Prosedur perhitungan diformalisasi dengan menganggap semua titik kumpul mengalami perpindahan dengan demikian hubungan aksi dan perpindahan pada semua batang ditangani seragam. Matriks kekakuan struktur dirakit dengan cara penjumlahan langsung dari matriks kekakuan batang serta matriks beban ekuivalen struktur dirakit dengan cara sama dari matriks beban ekuivalen pada ujung batang dengan syarat semua arah dalam sumbu struktur dan ordo matriks Sesuai koordinat struktur. Cara ini disebut metode kekakuan langsung (*direct stiffness*). Kondisi titik tumpuan akan diperhitungkan kemudian. Persamaan 15 menunjukkan persamaan antara aksi dan perpindahan elemen batang.

$$[S_M][D_M] = [A_M] \quad (15)$$

Dimana :

$S_M$  = Aksi pada titik ujung batang akibat satu satuan perpindahan pada ujung batang

$D_M$  = Perpindahan ujung batang

$A_M$  = Aksi pada ujung batang

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L} & -\frac{6EI}{L} & 0 & \frac{12EI}{L} & -\frac{6EI}{L} \\ 0 & \frac{6EI}{L} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Weaver dan Gere (1980), merumuskan matriks [SM] seperti pada persamaan 16 dimana Ax adalah luas penampang batang, E adalah modulus elastisitas, merupakan panjang batang, Iz adalah inersia terhadap sumbu Z.

Elemen matriks  $[S_M]$  ditentukan dengan menggunakan tabel aksi ujung batang akibat perpindahan pada struktur terkekang. Angka-angka dengan huruf miring adalah indeks perpindahan pada batang yang disebut koordinat lokal.

### 2.32 Deformasi Material

Deformasi material merupakan perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah material karena sebuah gaya kerja yang diterapkan padanya. Dalam hal ini deformasi material yang dimaksud timbul akibat gaya kerja berupa kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan lipatan atau memutar (torsion). Perilaku mekanik dari material merupakan respon dari beban yang diaplikasikan. Sifat mekanik material dapat diketahui dengan cara melakukan pengujian dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan, durasi serta kondisi lingkungan yang diatur sedemikian rupa sehingga mendekati kondisi aslinya. 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 17 berikut:

$$\delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (17)$$

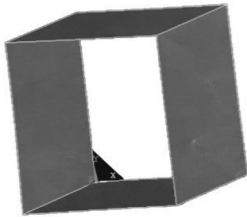
Dimana:

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

### 2.33 Multiple Point Constrained (MPC)

Sebagai contoh sebuah *Box Centre girder* berukuran 5000 x 5000x5000 mm dengan material pelat t = 10 mm diketahui material propertis dengan

Modulus Elastis =  $200000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ , *Poisson Ratio* = 0,3 dan densitas =  $7,8 \times 10^{-5} \text{ (N/mm}^2\text{)}$ , adapun bentuk *Box Centre girder* dapat dilihat seperti gambar yang telah didesain di ANSYS (Muis Alie, et al 2021a)



Gambar 2. 15 *Box Centre girder* tanpa elemen di tengah batang

(Muis Alie et al, 2021a)

Gambar 2.15 menunjukkan bahwa *Box Centre 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).

### 2.34 Metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (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. Menghitung dan membandingkan kekuatan-batas struktur kapal dengan menggunakan metode teori balok, metode *presumed stress distribution*, NLFEA, ISUM dan ISFEM (Hughes and Paik 2010). NLFEA dapat menyelesaikan masalah struktur meliputi analisa tegangan, *buckling* dan analisa getaran. Penyelesaian dari persoalan-persoalan struktur yang kompleks dapat diselesaikan dengan formulasi dari metode elemen hingga. Penggunaan

aplikasi NLFEA memungkinkan untuk mengetahui informasi penting terkait analisa struktur yang kompleks terutama dalam industri. Metode ini akan melakukan pendekatan terhadap nilai-nilai yang tidak diketahui pada setiap titik secara diskrit. Penelitian ini akan menggunakan metode NLFEA untuk menghitung kekuatan-batas *longitudinal* struktur kapal tanker baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat kandas dan tubrukan. 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:

- a. Analisa statis
- b. Analisa kuasi-statis
- c. Analisa dinamis

Analisa statis dan analisa kuasi 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 kuasi Newton-Raphson dan algoritma resiko. Algoritma N-R dan kuasi 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 tanker yaitu kontrol kelengkungan dan kontrol momen yang dihasilkan dengan analisis yang diolah. 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*.

#### 5. Ketidaksempurnaan Geometrik

Selama fabrikasi struktur kapal (pematangan, *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 ini disebabkan oleh nilai yang diolah dan dihasilkan harus sesuai dengan grafik kurva tegangan regangan. Penelitian ini menggunakan spesifikasi material pada Tabel 2.2, serta kurva tegangan regangan seperti pada Gambar 2.17.

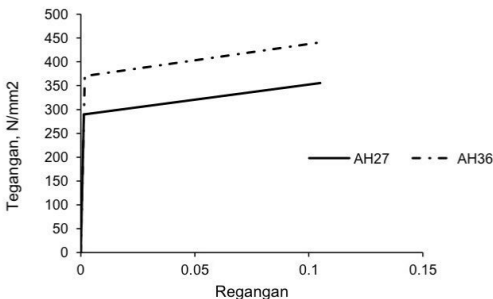
Tabel 2. 2 Spesifikasi material

Spesifikasi Material	Jenis Material	
	AH27	AH37
<i>Density</i> (Kg/m <sup>3</sup> )	7850	7850
<i>Modulus Young</i> (N/mm <sup>2</sup> )	210000	210000
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3	0,3
<i>Yield Strength</i> (N/mm <sup>2</sup> )	290	370
<i>Tangent Modulus</i> (N/mm <sup>2</sup> )	625	675

(Committee 2015)

Berdasarkan Tabel di atas Material AH27 dan AH37 merupakan material khusus untuk marine. Modulus elastisitas sebesar 210000 N/mm<sup>2</sup>, rasio poisson 0,3 dan tegangan luluh AH27 sebesar 290 N/mm<sup>2</sup>, AH36 sebesar 370 N/

mm<sup>2</sup>serta *Tangent Modulus* AH27 sebesar 625 N/mm<sup>2</sup>dan AH36 sebesar 675 N/mm<sup>2</sup>. Model material *bilinear isotropic hardening* dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut.



Gambar 2. 16 Model material *bilinear* isotropic hardening

(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 400 mm dengan bentuk quadmapped.

#### 8. Tipe Elemen

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