

SKRIPSI

**ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL DOUBLE HULL
TANKER DENGAN PERTIMBANGAN TINGGI DOUBLE
BOTTOM**

Disusun dan diajukan oleh

ANDI MUHAMMAD ALFIAN ARAFAT

D081171301



**PROGRAM STUDI TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2021**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL DOUBLE HULL TANKER
DENGAN PERTIMBANGAN TINGGI DOUBLE BOTTOM**

Disusun dan diajukan oleh

ANDI MUHAMMAD ALFIAN ARAFAT

D081171301

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 1 Oktober 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Mub. Zubair Muis Alle, ST., MT., Ph.D.

Ir. Juswan, MT.

NIP.197606062005011003

NIP.196212311989031031

Mengetahui,

Ketua Program Studi



Dr. Ir. Chaidir Faetonan, ST., MT.

NIP.197506052002121603

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Andi Muhammad Alfian Arafat

NIM : D081171301

Program Studi : Teknik Kelautan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL DOUBLE HULL
TANKER DENGAN PERTIMBANGAN TINGGI DOUBLE BOTTOM”

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian 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, 10 September 2021

Yang Menyatakan,



Andi Muhammad Alfian Arafat

ABSTRAK

ANDI MUHAMMAD ALFIAN ARAFAT. Analisis kekuatan membujur kapal *double hull tanker* dengan pertimbangan tinggi *double bottom* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie dan Juswan**).

Kekuatan memanjang kapal merupakan salah satu aspek penting dalam proses desain kapal karena menentukan kemampuan kapal dalam menjalankan fungsinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan memanjang kapal *Double Hull Tanker* dengan mempertimbangkan pengaruh tinggi *double bottom*, dalam bentuk tegangan kerja yang berkerja pada bagian *deck* dan *bottom* pada saat mengalami kondisi *hogging* dan *sagging* menurut aturan Biro Klasifikasi Indonesia dan *International Association of Clasification Society*. Analisis kekuatan memanjang kapal menggunakan metode *Finite Element Alanaysis*. Objek dari penelitian ini adalah daerah *midship* dari kapal *double hull tanker* dalam satu jarak gading. Pengaruh perubahan tinggi *double bottom* menyebabkan posisi dari *netral axis* berubah. Perubahan posisi *netral axis* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi tegangan yang bekerja pada bagian *deck* dan *bottom*. Didapatkan hasil kekuatan memanjang kapal *double hull tanker* akibat perubahan tinggi *double bottom* adalah $1,295 \times 10^{13}$ Nmm, $1,032 \times 10^{13}$ Nmm, $9,090 \times 10^{12}$ Nmm pada kondisi *hogging* sedangkan untuk kondisi *sagging* adalah $-8,995 \times 10^{12}$ Nmm, $-8,019 \times 10^{12}$ Nmm, dan $-7,333 \times 10^{12}$ Nmm. Disimpulkan bahwa kekuatan memanjang kapal lebih besar pada kondisi awal dibandingkan menurut aturan Biro Klasifikasi Indonesia dan *International Association of Clasification Society*.

Kata kunci: *double hull tanker*, tinggi dasar ganda, *sagging*, *hogging*, NLFEA, kekuatan batas.

ABSTRACT

ANDI MUHAMMAD ALFIAN ARAFAT. *Analysis of the longitudinal strength of double hull tankers with consideration of double bottom height (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie and Juswan**)*

The longitudinal strength of the ship is one of the important aspects in the ship design process because it determines the ship's ability to carry out its functions. This study aims to determine the longitudinal strength of double hull tanker considering the influence of double bottom height., in terms of working stress acting on deck and bottom under sagging and hogging conditions according to the rules of National Classification and the International Association of Classification Societies. The longitudinal strength is carried out by applying the Nonlinear Finite Element Analysis. In this case, the object of research is the midship area of the double hull tanker in one frame space. The influence of double bottom height causes the neutral axis position is changed. The difference of the neutral axis position gives significant influence on stress distribution acting on deck and bottom part. It is observed that the double bottom height affects to the longitudinal strength on the double hull tanker. It is obtained that the longitudinal strength of double hull tanker due to change of double bottom height are $1,295 \times 10^{13}$ Nmm, $1,032 \times 10^{13}$ Nmm, $9,090 \times 10^{12}$ Nmm in hogging condition while for sagging condition does are, are $-8,995 \times 10^{12}$ Nmm, $-8,019 \times 10^{12}$ Nmm, and $-7,333 \times 10^{12}$ Nmm. It is found that the longitudinal strength is larger on existing condition compare to national classification and International Association of Classification Society, respectively.

Keywords: double hull tanker, double bottom height, sagging, hogging, NLFEA, ultimate strength

PRAKATA

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dan atas kehendakNya lah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat diatasi. Salawat serta salam penulis panjatkan kehadiran Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“ANALISIS KEKUATAN MEMBUJUR KAPAL DOUBLE HULL TANKER
DENGAN PERTIMBANGAN TINGGI DOUBLE BOTTOM”

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Dr. Yassir Arafat, ST., MT.** dan Ibu **Delnia** merupakan dukungan yang selalu menguatkan hati untuk setiap tahapan penelitian dan penulisan skripsi ini, serta keberhasilan penulis sampai tahap skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Keberhasilan skripsi ini, tak luput pula berkat bantuan dari berbagai pihak yang diterima penulis, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan secara tulus dan ikhlas kepada yang terhormat:

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama sekaligus Kepala Labo OSAREL yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
2. Bapak **Ir. Juswan, MT.** selaku dosen pembimbing pendamping yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk

memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.

3. Bapak **Dr. Charul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. Bapak **Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D.** selaku penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga saya dapat menyelesaikan studi.
5. **Dosen–Dosen Departemen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
6. **Staf Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Saudara dan Saudari, **Andi Anisa Bonesia Ekasanti Arafat, S.Pd., Andi Muhammad Zaki Abadin Arafat, dan Andi Nadila Adelia Arafat** yang tak henti memberikan kasih sayang, dukungan, dan doa kepada penulis.
8. **Windi Widianingrum, ST.**, yang selalu memotivasi dan memberi semangat selama berkuliah sampai terselesaikannya skripsi ini.
9. **Teman-teman Mahasiswa khususnya Teknik Kelautan 2017, Asisten Lab Fisika Dasar dan PERIZCOPE CREW** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka. Tak lupa pula penulis sampaikan banyak terimakasih kepada kanda-kanda **Senior** dan dinda-dinda **Junior** atas motivasi dan dukungannya.

10. Teman-teman **KKN UNHAS GEL 105 Manggala 1** yang telah memberikan pengalaman yang berharga dalam masa pengabdian kami ber-KKN di Kec. Manggala.
11. Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terima kasih yang sebesar besarnya untuk segala sumbangsih selama proses penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan sebagai bahan untuk menutupi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Gowa, September 2021

Andi Muhammad Alfian Arafat

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR NOTASI	xi
DAFTAR ISTILAH	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kapal Tanker	5
2.2 Ukuran Kapal Tanker	7
2.3 Konstruksi Kapal Tanker	8
2.4 Momen Lentur dan Gaya Geser	16
2.5 Deformasi Material	21
2.6 Hubungan Tegangan dan Regangan	22
2.7 Kekuatan Batas Kapal Tanker (<i>Ultimate Strength</i>)	28
2.8 Metode <i>Nonlinear Finite Element Analysis</i> (NLFEA)	30
2.9 Pembebanan <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i>	34
BAB 3 METODE PENELITIAN	37
3.1 Jenis Penelitian	37
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	37
3.3 Penyajian Data	37
3.4 Analisa Data	39
3.5 Diagram Alir	41
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1 Objek Penelitian	42
4.2 Perhitungan Momen Lentur Batas Vertikal	43
4.3 Tegangan Izin	45

4.4 Tegangan Kerja Kapal Tanker terhadap Momen Lentur Batas Vertikal	46
4.5 Kekuatan Batas Momen Vertikal Kapal <i>Tanker</i> T3	51
BAB 5 PENUTUP.....	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kapal <i>Oil Tanker</i>	5
Gambar 2.2 Kapal <i>Chemical Tanker</i>	6
Gambar 2.3 Kapal <i>LNG Tanker</i>	6
Gambar 2.4 Ukuran Kapal <i>Tanker</i>	7
Gambar 2.5 Konstruksi Kapal <i>Tanker</i>	8
Gambar 2.6 <i>Single Hull Tanker</i>	9
Gambar 2.7 Kapal <i>double hull tanker</i> dengan dua sekat memanjang.....	11
Gambar 2.8 Kapal <i>double hull tanker</i> dengan satu sekat memanjang.....	11
Gambar 2.9 <i>Double Hull Tanker</i>	13
Gambar 2.10 Dasar Berganda Kerangka Melintang	15
Gambar 2.11 Dasar Berganda Kerangka Membujur.....	15
Gambar 2.12 Disrtibusi beban (<i>load diagram</i>), gaya geser (<i>shear force</i>), terhadap momen lentur (<i>bending moment</i>).	17
Gambar 2.13 Perubahan Momen Lentur pada Tongkang Persegi Panjang Kondisi Air Tenang.....	18
Gambar 2.14 Momen Lentur Gelombang pada Gelombang Reguler	19
Gambar 2.15 Momen Lentur Ketika Air Tenang dan Bergelombang	19
Gambar 2.16 Jenis-Jenis Tegangan.....	22
Gambar 2.17 Diagram Tegangan – Regangan Baja.....	23
Gambar 2.18 TeganganTarik	26
Gambar 2.19 Tegangan Tekan	26
Gambar 2.20 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan	29
Gambar 2.21 Kondisi syarat batas untuk kontrol kelengkungan	32
Gambar 2.22 Model material <i>bilinear isotropic hardening</i>	34
Gambar 2.23 Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal	34
Gambar 2.24 Faktor distribusi K_M	35
Gambar 2.25 Momen lentur vertikal akibat gelombang	36
Gambar 3.1 Konfigurasi Penampang Kapal <i>Tanker Tipe T3</i>	39
Gambar 3.2 Diagram Alir/ <i>Flowchart</i> Penelitian.....	41

Gambar 4.1 Perilaku dan distribusi tegangan kerja <i>hull girder</i> pada kondisi awal akibat <i>sagging</i>	46
Gambar 4.2 Perilaku dan distribusi tegangan kerja <i>hull girder</i> pada kondisi awal akibat <i>hogging</i>	47
Gambar 4.3 Perilaku dan distribusi tegangan kerja <i>hull girder</i> menurut aturan BKI akibat <i>sagging</i>	48
Gambar 4.4 Perilaku dan distribusi tegangan kerja <i>hull girder</i> menurut aturan BKI akibat <i>hogging</i>	49
Gambar 4.5 Perilaku dan distribusi tegangan kerja <i>hull girder</i> menurut aturan IACS akibat <i>sagging</i>	50
Gambar 4.6 Perilaku dan distribusi tegangan kerja <i>hull girder</i> menurut aturan IACS akibat <i>hogging</i>	50
Gambar 4.7 Grafik Momen kelengkungan <i>hull girder</i> tanker T3	52
Gambar 4.8 Deformasi kekuatan batas <i>hull girder</i> kondisi utuh akibat <i>hogging</i>	53
Gambar 4.9 Deformasi kekuatan-batas <i>hull girder</i> kondisi utuh akibat <i>sagging</i>	54
Gambar 4.10 Grafik Momen kelengkungan <i>hull girder</i> tanker T3 menurut aturan BKI.....	55
Gambar 4.11 Deformasi kekuatan batas <i>hull girder</i> kondisi utuh akibat <i>hogging</i> Aturan BKI	56
Gambar 4.12 Deformasi kekuatan batas <i>hull girder</i> kondisi utuh akibat <i>sagging</i> Aturan BKI.....	57
Gambar 4.13 Grafik Momen kelengkungan <i>hull girder</i> tanker T3 menurut aturan IACS	58
Gambar 4.14 Deformasi kekuatan batas <i>hull girder</i> kondisi utuh akibat <i>hogging</i> Aturan IACS	59
Gambar 4.15 Deformasi kekuatan batas <i>hull girder</i> kondisi utuh akibat <i>sagging</i> menurut IACS	60
Gambar 4.16 Grafik Momen Kelengkungan Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3, T3 BKI, dan T3 IACS	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Modulus Young</i> pada Material	25
Tabel 2.2 Spesifikasi material	33
Tabel 3.1 Konfigurasi Material Stifener Kapal Tanker T3	38
Tabel 4.1 Karakteristik Material Penyusun <i>Hull Girder</i> Kapal Tanker T3	42
Tabel 4.2 Ketebalan Material Penyusun <i>Hull Girder</i> Kapal Tanker T3	42
Tabel 4.3 Formula perhitungan momen lentur batas vertikal	43
Tabel 4.4 Momen lentur-batas vertikal <i>sagging</i> dan <i>hogging</i> tanker T3	45
Tabel 4.5 Tegangan izin kerja material tanker	46
Tabel 4.6 Rekapitulasi Tegangan Kerja arah Z Kapal Tanker T3	51
Tabel 4.7 Kekuatan Batas Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3 Kondisi Awal	51
Tabel 4.8 Rekapitulasi Tegangan Kerja arah z Kapal Tanker akibat kekuatan batas	53
Tabel 4.9 Kekuatan Batas Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3 Menurut Aturan BKI	54
Tabel 4.10 Rekapitulasi Tegangan Kerja arah Z Kapal Tanker akibat kekuatan batas	57
Tabel 4.11 Kekuatan Batas Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3 Menurut Aturan IACS	58
Tabel 4.12 Rekapitulasi Tegangan Kerja arah Z Kapal Tanker akibat kekuatan batas	60
Tabel 4.13 Rekapitulasi Kekuatan Batas Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3	61
Tabel 4.14 Rekapitulasi Perhitungan Kriteria Kekuatan Batas Kapal <i>Double Hull Tanker</i>	62

DAFTAR NOTASI

B	= Lebar kapal	(mm)
b	= lebar kerusakan akibat kandas	(mm)
b_x	= gaya apung	(N)
C	= koefisien momen lentur	
C_b	= koefisien blok kapal	
D	= tinggi kapal	(mm)
E	= modulus elastisitas	(N/mm ²)
F_x	= gaya geser arah sumbu x	N
h	= tinggi kerusakan akibat tubrukan	(mm)
I	= inersia penampang	(mm ⁴)
I_{min}	= inersia Ijin	(mm ⁴)
K_M	= faktor distribusi	
l	= panjang kerusakan akibat tubrukan / kandas	(mm)
L	= panjang kapal	(mm)
M	= momen lentur	(Nmm)
M_{US}	= kekuatan batas momen lentur sagging	(Nmm)
M_{UH}	= kekuatan batas momen lentur hogging	(Nmm)
M_{sw}	= momen lentur pada air tenang	(Nmm)
M_w	= momen lentur akibat gelombang	(Nmm)
M_t	= momen lentur- batas total	(Nmm)
S	= modulus penampang	(mm ³)
S_b	= modulus penampang bagian bottom	(mm ³)
S_d	= modulus penampang bagian deck	(mm ³)
S_p	= modulus penampang ijin	(mm ³)
Z	= jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur	(mm)
Z_b	= jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur bottom	(mm)
Z_d	= jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur deck	(mm)
σ	= tegangan lentur	(N/mm ²)
σ_p	= tegangan lentur ijin	(N/mm ²)

DAFTAR ISTILAH

<i>ANSYS</i>	: <i>Software</i> yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
<i>BKI</i>	: Biro Klasifikasi Indonesia
<i>IACS</i>	: International Association of Classification Societies
Defleksi	: Perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertical yang diberikan pada balok atau batang
Deformasi	: Perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah objek karena pengaruh gaya
<i>Mesh</i>	: Membagi Struktur menjadi bagian-bagian kecil
Modulus Elastisitas	: Sebuah ukuran yang digunakan untuk merepresentasikan kekakuan suatu bahan.
Modulus Geser	: Satu dari beberapa kuantitas untuk pengukuran kekakuan suatu bahan
Momen	: Sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi.
<i>Run</i>	: Menjalankan program untuk menghitung hasil analisis
<i>Tanker T3</i>	: Type kapal tanker Aframax dengan konfigurasi material penampang hull girder terlampir pada lampiran 2.
<i>Software</i>	: Istilah khusus untuk data yang diformat dan disimpan secara digital, termasuk program komputer, dokumentasinya dan berbagai informasi yang bisa dibaca dan bisa ditulis oleh komputer.
<i>Tensile Strength</i>	: Tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah bahan ketika diregangkan atau ditarik, sebelum bahan tersebut patah

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Setiap perancangan dan pembuatan kapal dari suatu perusahaan galangan kapal, terdapat proses yang mencakup berbagai aspek baik secara teknis, ekonomis dan eksploitasi. Salah satu aspek teknis yang turut mempengaruhi tingkat keamanan kapal disaat bereksploitasi baik pada kondisi laut yang tenang dan kondisi laut yang bergelombang tidak lain adalah kekuatan dari struktur konstruksi kapal tersebut. Kekuatan dari struktur kapal itu pun tidak lepas dari pengaruh desain dan komponen penyusun struktur kapal, salah satunya adalah tinggi *double bottom* terhadap kekuatan struktur kapal dalam mengangkut muatan dan menahan beban-beban yang dialaminya.

Struktur *double hull* telah banyak diterapkan dalam desain sisi dan bawah kapal. Dalam peristiwa tubrukan, struktur *double hull* dari kapal yang bertabrakan dapat mengalami deformasi plastik besar dan fraktur. Secara khusus, kapal tanker yang terlibat dalam insiden kecelakaan menyebabkan tumpahnya minyak mentah atau produk minyak bumi ke laut, mengakibatkan kerugian ekonomi yang parah dan potensi kerusakan lingkungan. Dalam urutan untuk mencegah tumpahan minyak dari tangki yang pecah, pecahnya bagian dalam lambung harus dihindari. Dengan demikian, perlu untuk dapat mengevaluasi akurat dampak resistensi *double hull* kapal di pra-desain awal strukturnya, tidak hanya melibatkan kasus terburuk, tetapi juga peristiwa tabrakan kecil lainnya yang mungkin dialami kapal selama layanan.

Perlu adanya perhatian atau fokus lebih terhadap pengaruh desain konstruksi penyusun struktur kapal terhadap beban yang bekerja pada kapal dalam berbagai kondisi, untuk mendapatkan desain konstruksi struktur kapal yang tahan terhadap berbagai kondisi pembebanan sesuai fungsi dari kapal tersebut. Dalam hal ini yang menjadi objek adalah pengaruh dari tinggi *double bottom* terhadap kekuatan batas kapal. Adapun badan-badan klasifikasi yang mengatur penggunaan *double bottom* antara lain yang ditunjukkan oleh Aturan dan Pedoman baru yang disediakan oleh BKI dan IACS.

Para ahli di bidang perkapalan dan bangunan lepas pantai sudah banyak melakukan penelitian tentang pengaruh dari struktur konstruksi penyusun kapal dengan menggunakan metode NLFEA. Kendala bersyarat dari pengangkut curah yang rusak karena tabrakan kapal [1]. Analisa kekuatan batas *hull girder* berdasarkan hasil eksperimen dan teori *dimensional* [2]. Metode analitik untuk menilai struktur lambung ganda pada kapal dengan benturan [3]. Penilaian kekuatan struktur sisi lambung ganda pada kapal tanker tabrakan kapal kecil [4]. Tinjau eksperimen dan prosedur perhitungan untuk tabrakan kapal dan kerusakan landasan [5]. Investigasi kekuatan penumpu lambung kapal dengan alasan kerusakan [6]. Analisa kekuatan sisa dari *hull girder* yang rusak secara asimetris dengan metode elemen hingga [7]. Analisa *progresif* dari unsur *local* dan kekuatan ultisasi kapal Ro-Ro [8]. Pengaruh konfigurasi simetris dan asimetris bentuk analisa kekuatan *bucling* dan kekuatan *fatigue* tetap pada *platform offshore* [9]. Menganalisis kekuatan *gider hull* kapal pada kerusakan *grounding* [10]. Penilaian keandalan lambung *girder* untuk kapal FPSO [11]. Sisa analisis kekuatan akhir tanker minyak pada lambung ganda setelah tabrakan [12]. Pengembangan prosedur berorientasi desain sederhana untuk memprediksi kerusakan tabrakan struktur perlindungan FPSO [13]. Analisis kekuatan kapal *container* yang utuh dan rusak yang dikenakan beban lentur asimetris [14].

Berdasarkan latar belakang di atas, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan double hull tanker dan analisa kekuatan menjadi latar belakang dalam pengerjaan tugas akhir ini dengan penelitian tentang Analisa Kekuatan Memanjang Kapal *Double Hull Tanker* dengan Pertimbangan Tinggi *Double Bottom*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh tinggi *double bottom* terhadap kekuatan kapal *double hull tanker* dengan membandingkan tinggi *double bottom* menurut aturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *Internasional Association of Classification Society* (IACS).

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian dapat terarah sesuai dengan kerangka yang direncanakan, maka

penelitian dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut:

1. Beban yang bekerja hanya momen lentur vertikal longitudinal (*hogging* dan *sagging*).
2. Analisa dilakukan pada *midship section* dari kapal *double hull tanker*.
3. Ketidaktepatan awal material, *crack*, dan cacat pengelasan diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh tinggi *double bottom* menurut aturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *Internasional Association of Classification Society* (IACS) terhadap kekuatan membujur (memanjang) kapal.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya bidang ilmu analisa struktur baja.
2. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kepada perusahaan-perusahaan.
3. Sebagai informasi dalam hal menentukan kebijakan dalam hal regulasi/peraturan pada Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *Internasional Association of Classification Society* (AICS).

1.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan skripsi ini dibagi dalam beberapa bagian untuk mendapat alur penulisan yang jelas, dan sistematis sekaligus memungkinkan pembaca agar dapat menginterpretasikan hasil tulisan ini secara tepat, maka dibuat sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB 1: PENDAHULUAN

Pada bab ini penulis menguraikan latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2: TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini penulis menjelaskan mengenai kerangka acuan yang berisi tentang teori singkat yang digunakan dalam menyelesaikan dan membahas permasalahan penelitian.

BAB 3: METODE PENELITIAN

Pada bab ini penulis menjelaskan mengenai langkah-langkah sistematis penelitian yang terdiri dari lokasi penelitian, waktu penelitian, data penelitian, serta variabel yang diteliti.

BAB 4: HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dipaparkan hasil dari penelitian yang dilakukan, serta pembahasan terkait penelitian tersebut.

BAB 5: PENUTUP

Pada bab ini penulis menyimpulkan hasil dari penelitian, serta memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Tanker

Kapal tanker merupakan alat transportasi yang dispesifikasikan untuk mengangkut muatan minyak, tidak hanya dari tempat pengeboran menuju darat, namun tanker juga digunakan untuk sarana angkut perdagangan minyak antar pelabuhan atau antar negara. Kapal tanker memiliki karakteristik khusus yang berbeda dengan kapal lainnya. Kapal Tanker adalah kapal yang menetapkan standar keselamatan yang sangat tinggi mengingat muatan yang dibawanya sangat berbahaya. Adapun kapal tanker dibagi menurut fungsinya.

2.1.1 *Oil Tanker*

Oil Tanker adalah jenis kapal tanker yang dibangun atau disesuaikan untuk mengangkut minyak curah. Ada 2 jenis *oil tanker*, yaitu *Crude Tanker* dan *Product Tanker*. *Crude Tanker* adalah tanker yang membawa muatan minyak mentah, sedangkan *Product Tanker* adalah tanker yang membawa muatan yang sudah diolah dari kilang. Ukuran *Crude Tanker* biasanya lebih besar dari *Product Tanker*. Adapun contoh kapal *oil tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



(Sumber: *liquefiedgascARRIER.com*, 2015)

Gambar 2.1 Kapal *Oil Tanker*

2.1.2 *Chemical Tanker*

Chemical Tanker adalah jenis kapal tanker yang dirancang untuk mengangkut bahan kimia. *Chemical Tanker* juga digunakan untuk mengangkut jenis bahan sensitif dengan standar kebersihan tanki yang tinggi seperti minyak nabati, lemak, minyak sawit, soda kaustik, dan metanol. Adapun contoh kapal *Chemical Tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



(Sumber: liquefiedgascarrier.com, 2015)

Gambar 2.2 Kapal *Chemical Tanker*

2.1.3 *Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker*

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

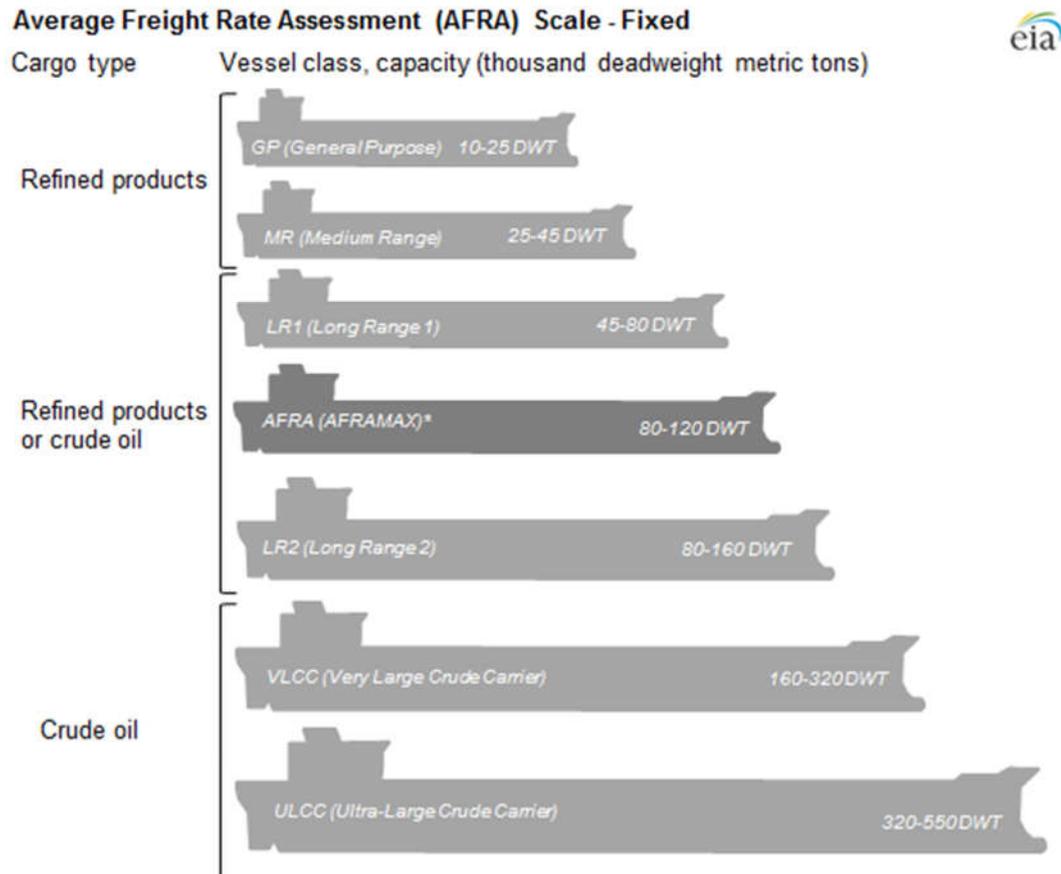


(Sumber: liquefiedgascarrier.com, 2015)

Gambar 2.3 Kapal *LNG Tanker*

2.2 Ukuran Kapal Tanker

Berdasarkan ukurannya, kapal tanker dapat dikelompokkan seperti pada gambar 2.4



Gambar 2.4 Ukuran Kapal Tanker

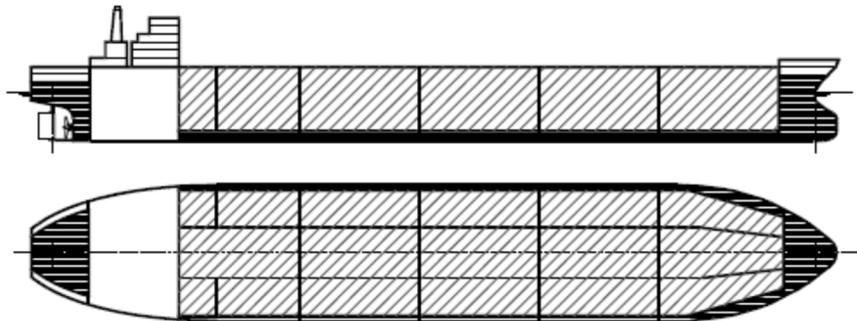
1. *General Purpose Tanker*. Biasanya digunakan mengangkut *refined product*, berukuran 10,000 MT hingga 25,000 MT dwt.
2. *Handysize Tanker*. Biasanya digunakan untuk mengangkut *refined product*, ukurannya 25,000 MT hingga 40,000 MT dwt.
3. *MR (Medium Range) Tanker*. Digunakan untuk mengangkut *refined product*, dengan ukuran 40,000 MT hingga 55,000 MT dwt.
4. *LR1 (Long Range 1) Tanker*. Ada yang membawa *refined products* dan *crude oil*. Tanker kategori ini yang mengangkut *dirty product* biasanya disebut *panamax tankers*. LR1 dan *panamax tanker* memiliki bobot mati 55,000 MT hingga 80,000 MT.

5. LR2 (*Long Range 2*) *Tanker*. Jenis ini membawa *product* dan *crude oil*. Ukurannya berkisar 80,000 MT dwt -160,000 MT dwt. Tanker pengangkut *crude oil* biasanya disebut *Aframax tanker* (80,000 MT -120,000 MT dwt) dan *Suezmax tanker* (120,000 MT – 160,000 MT dwt).
6. *Very Large Crude Carrier* (VLCC) dan *Ultra Large Crude Carrier* (ULCC). Tanker ini hanya pengangkut minyak mentah. Ukuran VLCC adalah 320,000 MT dan ULCC sebesar 550,000 MT dwt.

2.3 Konstruksi Kapal Tanker

Kapal tanker dibuat untuk mengangkut minyak mentah melalui laut atau perairan dari pelabuhan muat atau pelabuhan produksi ke pelabuhan bongkar/pengolahan dan minyak produk dari pelabuhan pengolahan menuju pelabuhan bongkar/distribusi.

Ukuran dari kapal pengangkut minyak mentah biasanya lebih besar dari pengangkut minyak produksi, tetapi dalam pengaturan jaringan pipa-pipanya lebih kompleks. Adapun contoh konstruksi kapal tanker dapat dilihat pada Gambar 2.5.



(Sumber: National Academy Press, 1998)

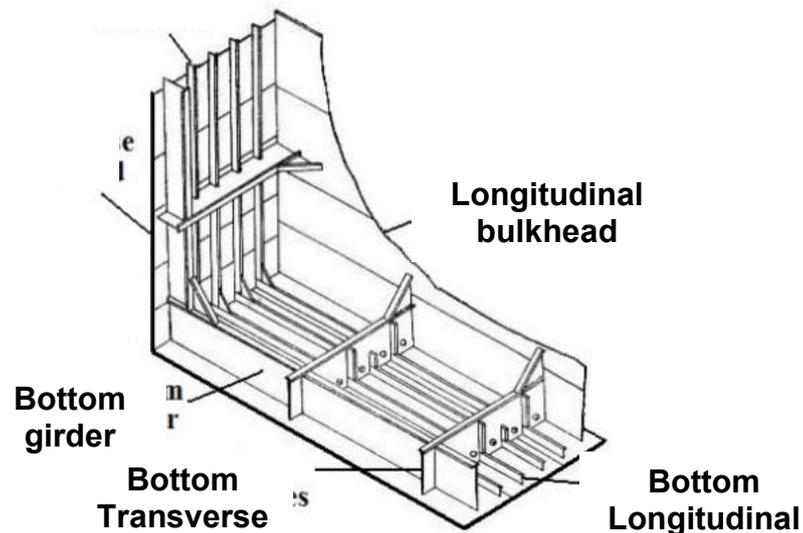
Gambar 2.5 Konstruksi Kapal Tanker

Faktor-faktor yang mempengaruhi disain dan konstruksi kapal tanker adalah:

1. Faktor *safety* : Sebagai pengangkut muatan berbahaya.
2. Faktor stabilitas : Muatan cair dalam tanki dapat bergerak bebas.
3. Faktor Pencemaran : Dapat terjadi tumpahan minyak di laut.

2.3.1 Konstruksi *Single Hull*

Single hull tanker memiliki satu lambung dan membawa minyak langsung di dalam struktur lambung. Beberapa kapal *Single hull tanker* membawa minyak dan air pemberat ke dalam tangki yang sama, sementara beberapa kapal *Single hull tanker* memiliki tangki pemberat terpisah di dalam lambung (yaitu minyak dibawa langsung ke dalam lambung kapal, tapi tangki pemberat terpisah dari muatan). Akibat hanya satu lapisan, kapal *single hull tanker* menimbulkan ancaman lebih besar terhadap lingkungan laut jika terjadi kecelakaan apapun. Adapun contoh *single hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.6 *Single Hull Tanker*

Sejak tenggelamnya tanker (*single hull*) ERIKA dilepas pantai Perancis (Desember 1999) yang menyebabkan polusi (*oil spill*) perairan sekitarnya, maka banyak terjadi perubahan dalam peraturan klasifikasi, statutori, dan perdagangan yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas pengoperasian kapal tanker. IMO melalui peraturan MARPOL 73/78-Annex 1, Regulation 13G, Amandemen 2001 membagi kapal tanker minyak dalam 3 kategori, yaitu kategori 1, 2, dan 3. Dengan rincian sebagai berikut:

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

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

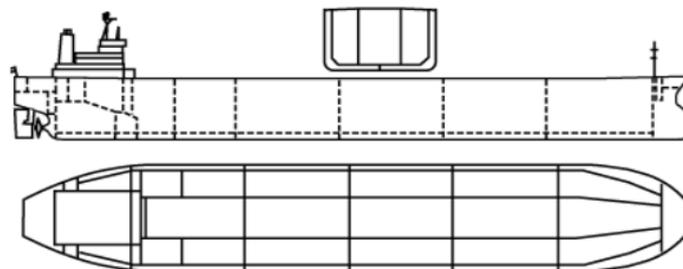
2.3.2 Konstruksi *Double Hull*

Sejumlah produsen telah menggunakan kapal tanker minyak dengan konstruksi *double hull* karena memperkuat lambung kapal, mengurangi kemungkinan tumpahan minyak dalam tabrakan berdampak rendah dan *grounding* di atas kapal lambung tunggal. Selain itu, konstruksi *double hull* juga mengurangi kemungkinan kebocoran yang terjadi pada dampak kecepatan rendah di daerah

pelabuhan saat kapal sedang dalam tahap uji coba. Penelitian kerusakan dampak kapal telah mengungkapkan bahwa kapal tanker berlambung ganda tidak mungkin melubangi kedua lambung kapal ketika tabrakan, mencegah minyak merembes keluar.

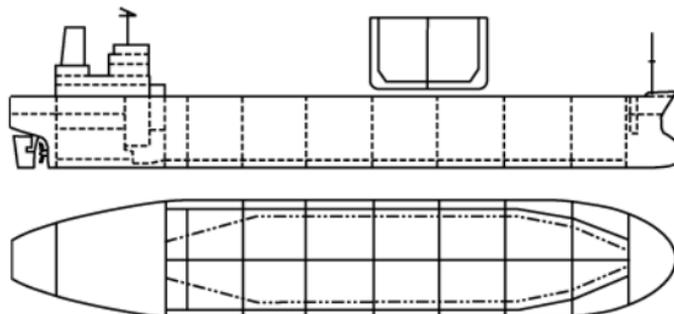
International Association of Classification Societies (IACS) memperkenalkan serangkaian panduan manual dengan tujuan memberikan arahan untuk membantu *Surveyors* IACS, dan pihak-pihak lain yang berkepentingan yang terlibat dalam survei, penilaian dan perbaikan struktur lambung untuk jenis kapal tertentu.

Panduan tersebut salah satunya untuk kapal tanker minyak lambung ganda yang dibangun terutama untuk pengangkutan minyak dalam jumlah besar dan yang memiliki tangki kargo yang dilindungi oleh lambung ganda yang meluas untuk seluruh wilayah kargo, yang terdiri dari sisi ganda dan dasar bawah ruang untuk pengangkutan air balast atau ruang hampa. Gambar 2.7 dan 2.8 menunjukkan gambaran umum tentang tanker minyak *double hull* dengan dua sekat longitudinal atau satu sekat memanjang.



(Sumber: IACS, 2007)

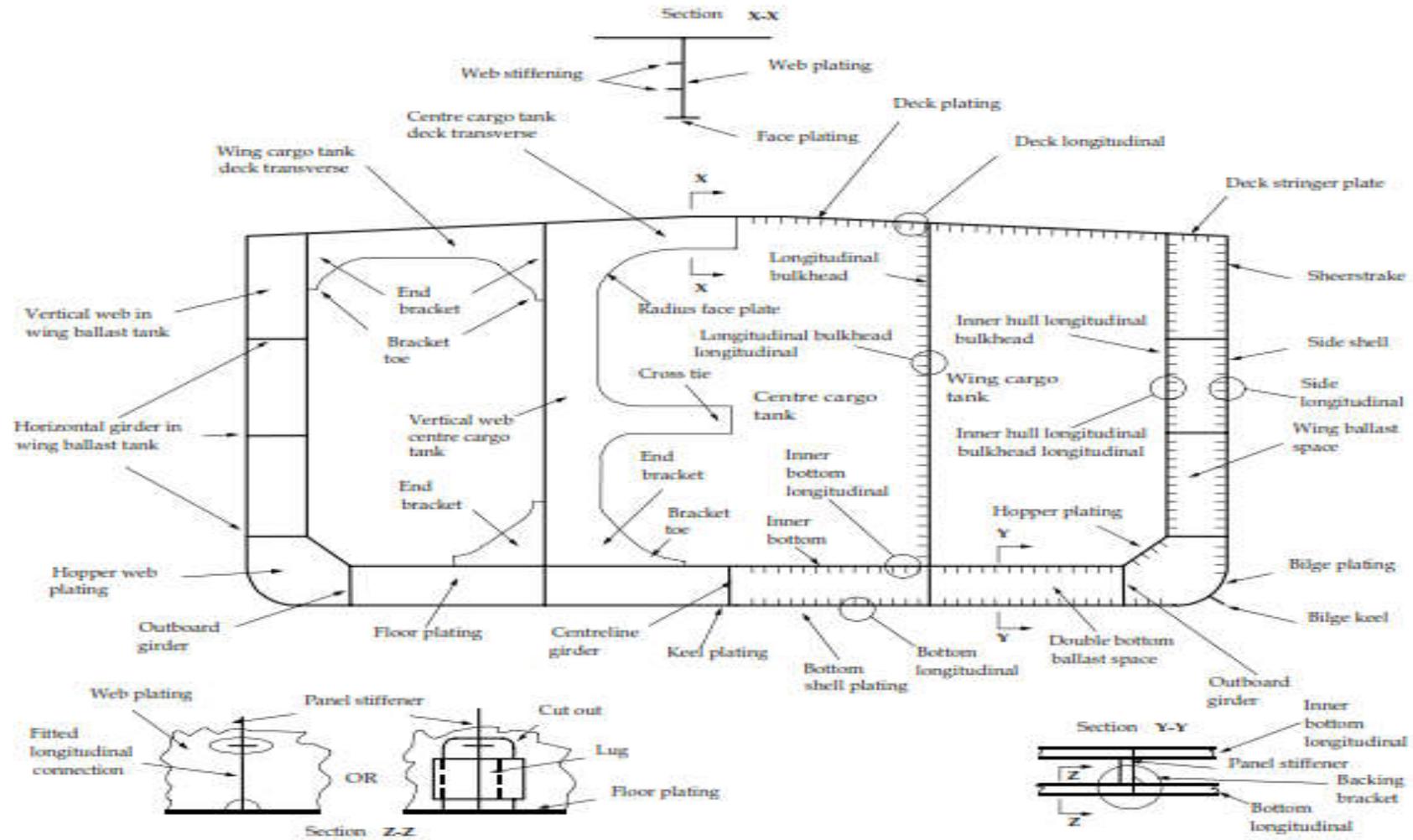
Gambar 2.7 Kapal *double hull tanker* dengan dua sekat memanjang



(Sumber: IACS, 2007)

Gambar 2.8 Kapal *double hull tanker* dengan satu sekat memanjang

Double Hull, seperti namanya, adalah lambung kapal tanker dengan lapisan permukaan lambung kedap air. Lapisan dalam dan luar lambung ada di bagian bawah dan juga sisi kapal tanker. Konstruksi *double hull* membantu mengurangi risiko pencemaran laut selama benturan, kandas, dan bentuk kerusakan lambung kapal lainnya. Adapun konstruksi *midship* kapal *double hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



(Sumber: National Academy, 1991)

Gambar 2.9 Double Hull Tanker

Beberapa Kapal tanker, kapal *carrier* kombinasi, dan beberapa kapal *carrier* minyak mentah sudah memiliki *Double 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 *double hull tanker* mungkin lebih rendah kerusakan ambang sisi yang berkelanjutan pada saat bertabrakan.

2.3.3 Konstruksi Dasar Ganda (*Double Bottom*)

Double bottom ialah bagian dari konstruksi kapal yang dibatasi, bagian bawah oleh kulit kapal bagian bawah (*bottom shell plating*), bagian atas oleh plat dasar dalam (*inner bottom plating*), bagian samping oleh lempeng samping (*margin plate*), Bagian depan oleh sekat kedap air terdepan/sekat pelanggaran (*collision bulkhead*), bagian belakang oleh sekat kedap air paling belakang/sekat ceruk buritan (*after peak bulkhead*).

Guna dasar ganda (*Double Bottom*), antar lain:

1. Bila kapal kandas dan mengalami kebocoran, masih ada dasar yang kedap air.
2. Sebagai ruangan muatan cair, air tawar, bahan bakar, ballas.
3. Membantu stabilitas kapal
4. Menambah kekuatan melintang kapal

Konstruksi dasar ganda (*Double Bottom*), terdiri dari:

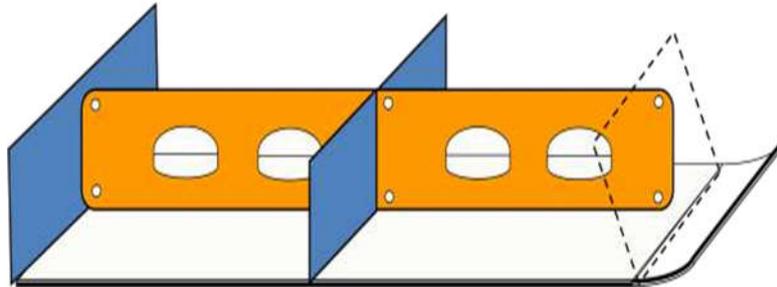
1. Sistem konstruksi kerangka melintang dengan wrang–wrang penuh dan wrang– wrang terbuka.
2. Sistem konstruksi kerangka membujur dengan wrang–wrang penuh dan wrang-wrang terbuka.

Ciri-ciri dari kerangka dasar ganda (*Double Bottom*) melintang, antar lain:

1. Dilengkapi dengan wrang – wrang penuh pada setiap gading dibawah kamar mesin.
2. Jarak antara wrang penuh tidak lebih dari 3.05 m diselingi wrang terbuka
3. Wrang penuh yang terbentang melintang dari penyanggah tengah sampai lempeng samping pada setiap sisinya diberi lobang peringan.

4. Pada system kerangka melintang, penyanggah tengah dan lempeng samping tidak terputus.

Gambar dari struktur *double bottom* konstruksi melintang dapat dilihat pada Gambar 2.10.

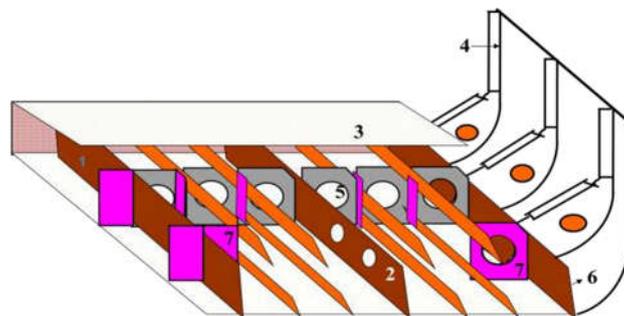


Gambar 2.10 Dasar Berganda Kerangka Melintang

Ciri-ciri dari kerangka dasar ganda (*Double Bottom*) membujur, antar lain:

1. Wrang penuh dipasang dibawah gading – gading kamar mesin, kursi ketel, dinding kedap air dan pada ujung bracket deep tank.
2. Penyanggah tenah diberi *bracket* dengan jarak 1.25 meter
3. Bila jarak antara sebuah wrang dengan wrang lainnya sampai 12 atau lebih jarak gading, dipasang penguat tegak paling sedikit 100 mm untuk memperkuat longitudinal
4. Kapal – kapal yang lebarnya sampai 14 – 21 m, longitudinals terputus pada wrang kedap air dan sebagai gantinya diberi bracket.
5. Jarak antara wrang yang satu dengan lainnya tidak lebih 3.7 m, kecuali kapal tersebut diperuntukkan bagi pengangkutan barang–barang berat atau biji-bijian tambang.

Gambar dari struktur *double bottom* konstruksi membujur dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Dasar Berganda Kerangka Membujur

Adapun aturan dari tinggi dasar ganda (*Double Bottom*), antar lain:

1. Menurut BKI

Apabila diperlukan dasar ganda untuk dipasang, dasar bagian dalam harus dilanjurkan ke sisi kapal sedemikian rupa untuk melindungi bagian bawah terhadap pergantian lambung kapal, perlindungan semacam itu akan dianggap memuaskan jika dasar bagian dalam tidak lebih rendah pada bagian manapun selain bidang yang sejajar dengan garis lunas dan yang terletak tidak kurang dari jarak vertikal h diukur dari garis lunas, sebagaimana dihitung oleh rumus:

$$h_{db} = \frac{B}{20} \quad (2.1)$$

Namun, tidak ada nilai h yang kurang dari 760 mm, dan tidak perlu diambil lebih dari 2000 mm.

2. Menurut IACS

Untuk pengangkut curah, dasar ganda harus dipasang memanjang dari sekat tabrakan ke sekat puncak buritan, sejauh hal ini dapat dilakukan dan kompatibel dengan desain dan pengerjaan kapal yang tepat. Untuk kapal tanker minyak, *double bottom* harus dipasang untuk melindungi wilayah kargo dan ruang pompa.

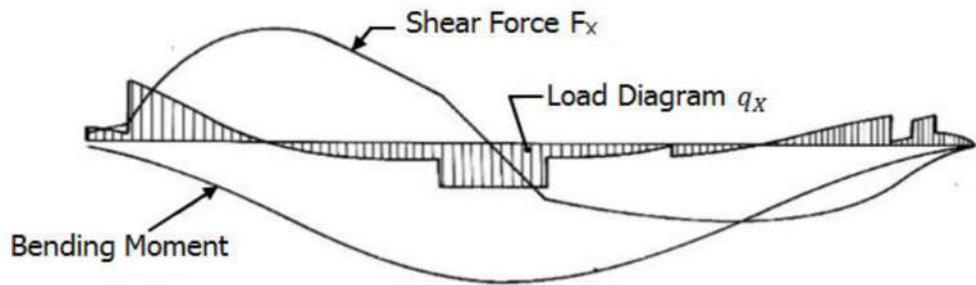
Jika *double bottom* perlu dipasang, *inner bottom* harus dilanjutkan ke sisi kapal sedemikian rupa untuk melindungi *bottom* dari pergantian *bilge* di area dimana ruang *hopper* atau *double side* yang tidak disediakan.

Jika tidak ditentukan, ketinggian *double bottom* tidak boleh kurang dari yang lebih rendah dari:

$$h_{db} = \frac{B}{15} \quad (2.2)$$

2.4 Momen Lentur dan Gaya Geser

Kekuatan longitudinal lambung kapal dievaluasi berdasarkan momen lentur dan gaya geser yang bekerja pada kapal. Adapun Momen lentur dan gaya geser pada kapal dapat dilihat pada Gambar 2.12.



(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.12 Distribusi beban (*load diagram*), gaya geser (*shear force*), terhadap momen lentur (*bending moment*).

Adapun distribusi beban kapal dapat dihitung dengan Persamaan berikut.

$$q_x = b_x - w_x \quad (2.3)$$

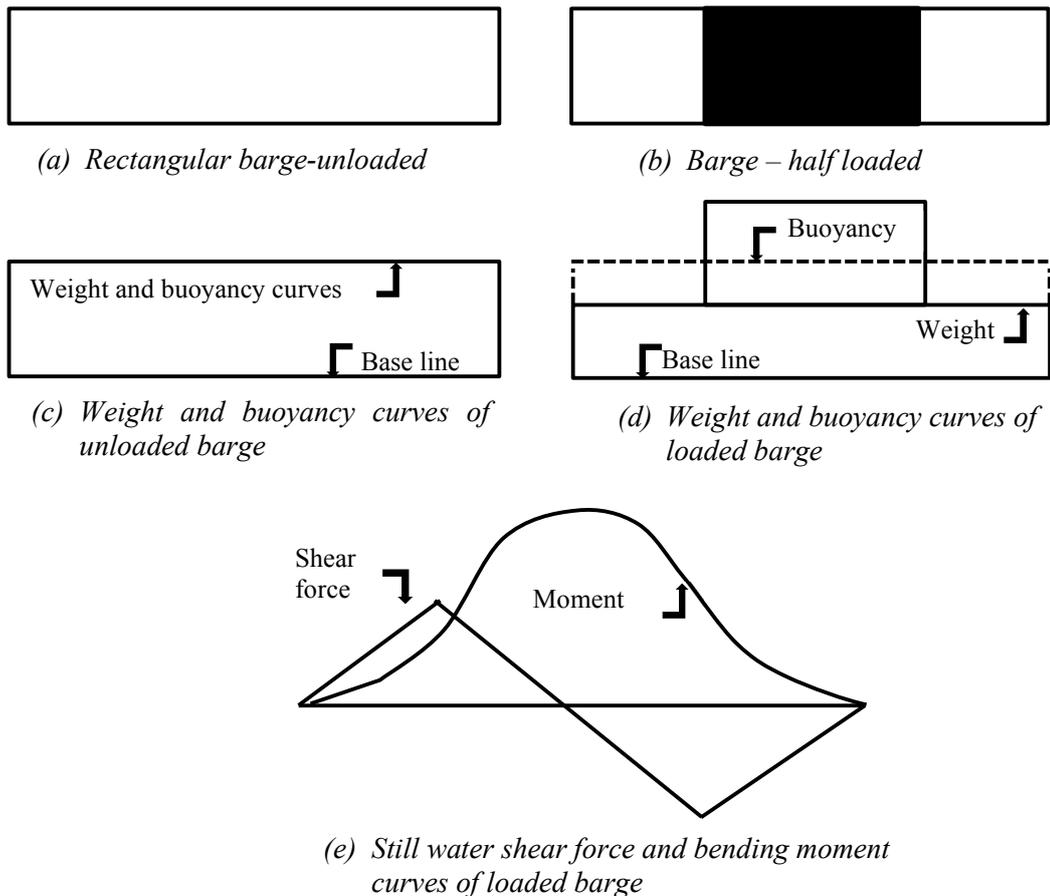
Dimana: berat dan gaya apung diasumsikan sebagai b_x dan w_x

Adapun rumus distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal dapat dihitung dengan Persamaan berikut ini:

$$F_x = \int_x^0 (b_x - w_x) dx \quad (2.4)$$

$$M_x = \int_x^0 F_x dx \quad (2.5)$$

Hal ini selanjutnya diilustrasikan pada Gambar 2.13 untuk sebuah kapal yang berada pada kondisi air tenang (misalnya di pelabuhan). Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.13(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 2.13(b). Jika tongkang dimuat di tengah Gambar 2.13(c), distribusi berat akan berubah dan kurva yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.13(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 2.13(e).

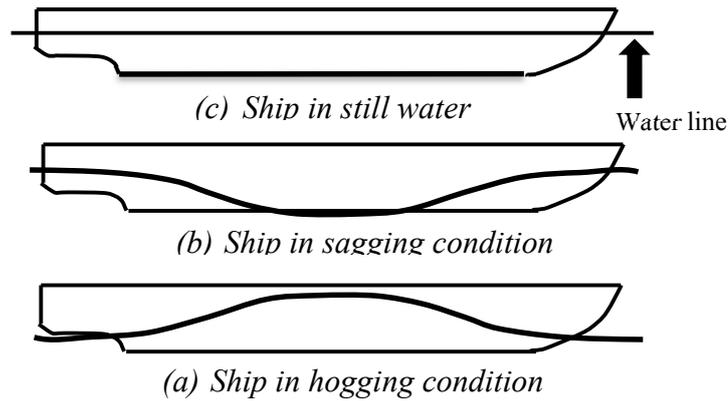


(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.13 Perubahan Momen Lentur pada Tongkang Persegi Panjang Kondisi Air Tenang

Untuk kapal pada kondisi bergelombang, momen lentur dipisahkan menjadi dua istilah, yaitu momen lentur air tenang (M_{sw}) dan momen lentur akibat gelombang (M_w). kombinasi beban statis dan beban dinamis untuk menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur-batas vertikal kapal dapat dihitung dengan penjumlahan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 2.6

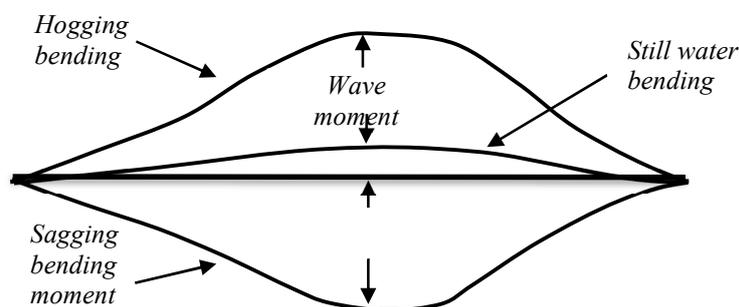
$$M_t = M_{sw} + M_w \quad (2.6)$$



(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.14 Momen Lentur Gelombang pada Gelombang Reguler

Gambar 2.14 mengilustrasikan kapal pada gelombang sama dengan panjangnya. Gambar 2.14(a) menunjukkan kondisi air tenang dimana hanya momen lentur yang bekerja pada kapal adalah momen lentur kondisi air tenang itu sendiri. Gambar 2.14(b) menunjukkan kondisi dimana gelombang berongga berada di tengah kapal. Hal ini menghasilkan distribusi daya apung di dekat ujung kapal dan dengan demikian kapal mengalami kondisi *sagging*. Pada kondisi *sagging*, dek pada kapal mengalami tekan sedangkan bagian bawahnya mengalami tarik (*tension*). Gambar 2.14(c) menunjukkan puncak gelombang berada di tengah kapal. Hal ini menunjukkan gaya apung lebih besar pada bagian tengah kapal dibandingkan diujung kapal sehingga menghasilkan kondisi *hogging*. *Hogging* berarti kapal melengkung pada bagian tengah.



(Sumber: Tupper, 2004)

Gambar 2.15 Momen Lentur Ketika Air Tenang dan Bergelombang

Gambar 2.15 menunjukkan momen lentur vertikal pada kondisi *hogging* dan *sagging* pada kondisi air tenang dan bergelombang. Adapun besaran momen lentur batas vertikal pada kondisi air tenang (MSW) untuk panjang kapal lebih dari 90 meter, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 2.7 untuk kondisi *sagging*, dan 2.8, untuk kondisi *hogging*.

$$M_s = -0,05168 K_m CL^2 B (C_b + 0,7) \quad (2.7)$$

$$M_s = -0,01 K_m CL^2 B (11,97 - 1,96 C_b) \quad (2.8)$$

Adapun besaran momen lentur batas vertikal akibat gelombang (MW) untuk panjang kapal lebih dari 90 meter, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 2.9, untuk kondisi *sagging*, dan 2.10, untuk kondisi *hogging*.

$$M_w = -0,11 K_m CL^2 B (C_b + 0,7) \quad (2.9)$$

$$M_w = -0,19 K_m CL^2 B C_b \quad (2.10)$$

Dimana:

KM = Faktor distribusi

B = Lebar kapal (meter)

L = Panjang Kapal (meter)

C_b = Koefisien blok ($\geq 0,6$)

C = $10,75 - ((300 - L) / 100)1,5$ untuk $90 \leq L \leq 300$ m

= 10,75 untuk $300 \leq L \leq 350$ m

= $10,75 - ((L - 350) / 150)1,5$ untuk $350 \leq L \leq 500$ m

2.5 Deformasi Material

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

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

Adapun deformasi yang timbul pada material dapat dihitung dengan Persamaan berikut

$$\delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.11)$$

Dimana:

- σ = Tegangan yang timbul pada material (N/m²)
- ε = Regangan yang timbul pada material
- P = Beban atau gaya yang bekerja pada material (kN/m²)
- A = Luas penampang material (m²)
- E = Modulus elastisitas material (GPa)
- l = Panjang material (m)
- δl = Deformasi material (m)

Dengan Catatan:

1. Rumus di atas dapat juga digunakan untuk tekanan
2. Untuk sebagian besar material, modulus elastisitas untuk kompresi sama dengan tarikan.
3. Terkadang dalam perhitungan, tegangan regangan tarik diberi tanda positif, dan tegangan, regangan tekan/kompresi diberi tanda negatif.

2.6 Hubungan Tegangan dan Regangan

2.6.1 Tegangan Normal

Pengetahuan dan pengertian tentang bahan dan perilakunya jika mendapat gaya atau beban sangat dibutuhkan di bidang teknik bangunan. Jika suatu batang prismatik, dengan luas penampang seragam di sepanjang 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 tampang. Sehingga besar tegangan yang dialami batang prismatik tersebut masing-masing sebesar $\sigma = \frac{F}{A}$ dan $\tau = \frac{F_v}{A}$. 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:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.12)$$

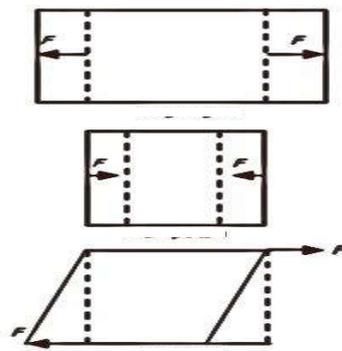
dengan:

σ = tegangan (N/mm²)

F = gaya (N)

A = luas penampang (mm²)

Satuan SI untuk tegangan adalah *pascal* (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm². Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Jenis-Jenis Tegangan

2.6.2 Regangan

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

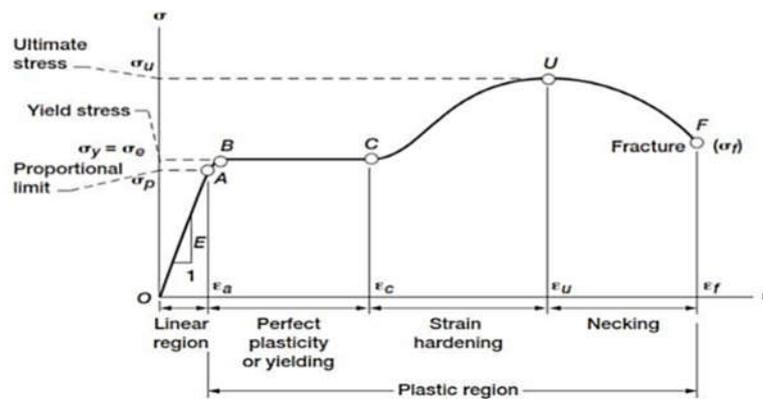
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.13)$$

dengan:

ε = regangan

ΔL = pertambahan panjang (mm)

L = panjang mula-mula (mm)



Gambar 2.17 Diagram Tegangan – Regangan Baja

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.17, batas elastis (*elastic limit*) bahan tercapai (titik B). Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan, sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Yaitu bahan secara tiba-tiba mulur (pada titik C) yang disebut titik luluh (*yield point*), tetapi bahan segera memperlihatkan lagi kemampuan menahan kenaikan tegangan, tetapi pemanjangan sekarang naik dengan laju yang lebih cepat dari tegangan sampai mencapai titik F yaitu tegangan maksimum batas kekuatan bahan. Tegangan ini disebut tegangan batas (*ultimate stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. Diluar titik F, pemanjangan akan berlanjut, tetapi secara perlahan tegangan berkurang, sampai akhirnya batang patah. Penjelasan lebih detail dari Gambar 2.17 sebagai berikut:

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 beban memasuki fase peralihan deformasi elastis ke plastis. Yaitu titik sampai di mana penerapan hukum Hook masih bisa ditolerir. Dalam praktek, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis.

3. Deformasi plastis (*plastic deformation*)

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

4. Titik Putus

Merupakan besar tegangan di mana bahan yang diuji putus atau patah.

Regangan merupakan ukuran mengenai seberapa jauh batang tersebut berubah bentuk. Tegangan diberikan pada material dari arah luar, sedangkan regangan adalah tanggapan material terhadap tegangan pada daerah elastis, besarnya tegangan berbanding lurus dengan regangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan benda tersebut disebut modulus elastisitas atau *Modulus Young*. Pengukuran *modulus Young* dapat dilakukan dengan menggunakan gelombang akustik, karena kecepatan jalannya bergantung pada *modulus Young*. Secara matematis dirumuskan:

$$E = \frac{F.L}{A.\Delta L} \quad (2.14)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

dengan:

E = modulus Young (N/mm²)

F = gaya (N)

L = panjang mula-mula (mm)

ΔL = pertambahan panjang/pendek (mm)

A = luas penampang (mm²)

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/mm².

Tabel 2.1 *Modulus Young* pada Material

Material	Modulus Young (N/mm²)
Aluminium	70 x 10 ⁹
Baja	200 x 10 ⁹
Beton	20 x 10 ⁹

(Sumber: Safety Regulation Group CAP 437 Edition 2012)

2.6.3 Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

Tegangan tarik yaitu tegangan yang timbul akibat gaya tarik. Apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang, dan akibatnya batang ini cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbunya. Tegangan Tarik (σ_{ta}) terjadi akibat bekerjanya gaya Tarik (F_{ta}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan, gambar dari tegangan tarik dapat dilihat pada Gambar 2.18. Rasio/Perbandingan antara perpanjangan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan Tarik ϵ_{ta} secara matematik dapat ditulis sebagai berikut:

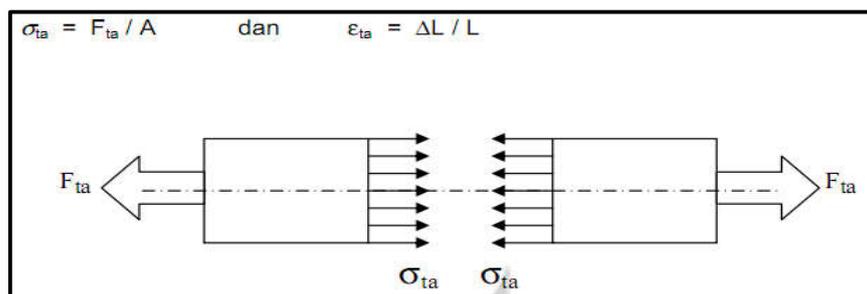
$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (2.16)$$

dengan:

σ_{tr} = tegangan tarik (kg/cm^2 atau kg/mm^2)

F = gaya tarik (N)

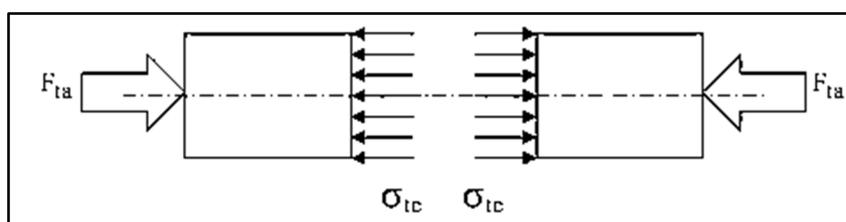
A = Luas penampang (mm^2)



Gambar 2.18 Tegangan Tarik

2.6.4 Tegangan Tekan (Compressive Stress)

Jika batang gaya dikenakan pada ujung-ujung batang dalam arah menuju ke batang, sehingga batang dalam kondisi tertekan, maka terjadi tegangan tekan, batang, Tegangan tekan (σ_{te}) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan (F_{ta}) pada satuan luas penampang (A) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan, gambar dari tegangan tekan dapat dilihat pada Gambar 2.19. Rasio/Perbandingan antara perpendekan yang terjadi (ΔL) terhadap panjang benda semula (L) disebut sebagai regangan tekan ϵ_{ta} .



Gambar 2.19 Tegangan Tekan

selanjutnya dapat dinyatakan dengan rumus:

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (2.17)$$

2.6.5 Tegangan Geser (*Shear Stress*)

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

Tegangan geser (τ) timbul akibat kerja dari dua gaya geser (S) yang saling berlawanan arah (aksi – reaksi) terhadap suatu bidang geser, pada satuan luas bidang penampang tahanan elemen struktur (A). Sehingga bidang penampang tersebut mengalami regangan geser searah bekerjanya gaya. Jika besaran gaya geser (S) dikerjakan pada batang akan menimbulkan tegangan geser (τ). Tegangan geser (τ), yaitu tegangan yang timbul akibat gaya geser atau gaya lintang. Ciri dari gaya geser atau gaya lintang adalah melintang batang atau tegak lurus batang. Persamaan matematisnya sebagai berikut:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.18)$$

dengan:

τ = tegangan geser (N/mm²)

P = gaya geser atau gaya lintang (N)

F = Luas penampang (mm²)

2.6.6 Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

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

2.6.7 Tegangan Luluh (*yield stress*)

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.

2.6.8 Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut bersumber pada AISC [AISC, 1978] dan API [API, RP-2A, 1989]. Untuk jenis struktur dan jenis pembebanan yang tidak dibahas dalam spesifikasi ini, maka harus dilakukan analisa rasional dengan factor 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.

2.7 Kekuatan Batas Kapal Tanker (*Ultimate Strength*)

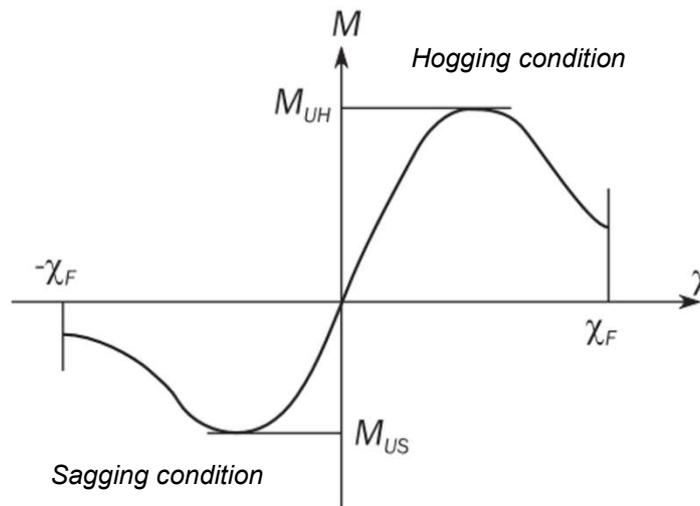
Kekuatan batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total (Huges & Paik, 2010). Perhitungan kekuatan-batas kapal tanker berdasarkan keakuratan dan kompleksitas hingga saat ini terdiri dari 5 metode yaitu: teori balok, metode *Presumed Stress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

Kekuatan-batas kapal tanker (M_U) harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria seperti Persamaan 2.19 dibawah ini (DNV GL, 2017b).

$$M_t \leq \frac{M_u}{Y_R} \quad (2.19)$$

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*).

Hubungan antara momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.20. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.



(Sumber: DNV GL, 2017b)

Gambar 2.20 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan

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

$$\sigma = \frac{M \times Z}{I} \quad (2.20)$$

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 sebagai berikut

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad (2.21)$$

dimana S adalah modulus penampang, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut:

$$S_d = \frac{I}{Z_d} \quad , \text{ untuk bagian } \textit{deck} \quad (2.22)$$

$$S_b = \frac{I}{Z_b} \quad , \text{ untuk bagian } \textit{bottom} \quad (2.23)$$

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 2.24. dan 2.25. sebagai berikut:

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud} \quad , \quad \text{ untuk } \textit{deck} \quad (2.24)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub} \quad , \quad \text{ untuk } \textit{bottom} \quad (2.25)$$

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.

2.8 Metode *Nonlinear 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. Hughes dan Paik (2010), menghitung dan membandingkan kekuatan-batas struktur kapal dengan menggunakan metode teori balok, metode *presumed stress distribution*, NLFEA, ISUM dan ISFEM. 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:

1. Analisa statis
2. Analisa quasi-statis
3. Analisa dinamis

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 tanker yaitu kontrol kelengkungan dan kontrol momen.

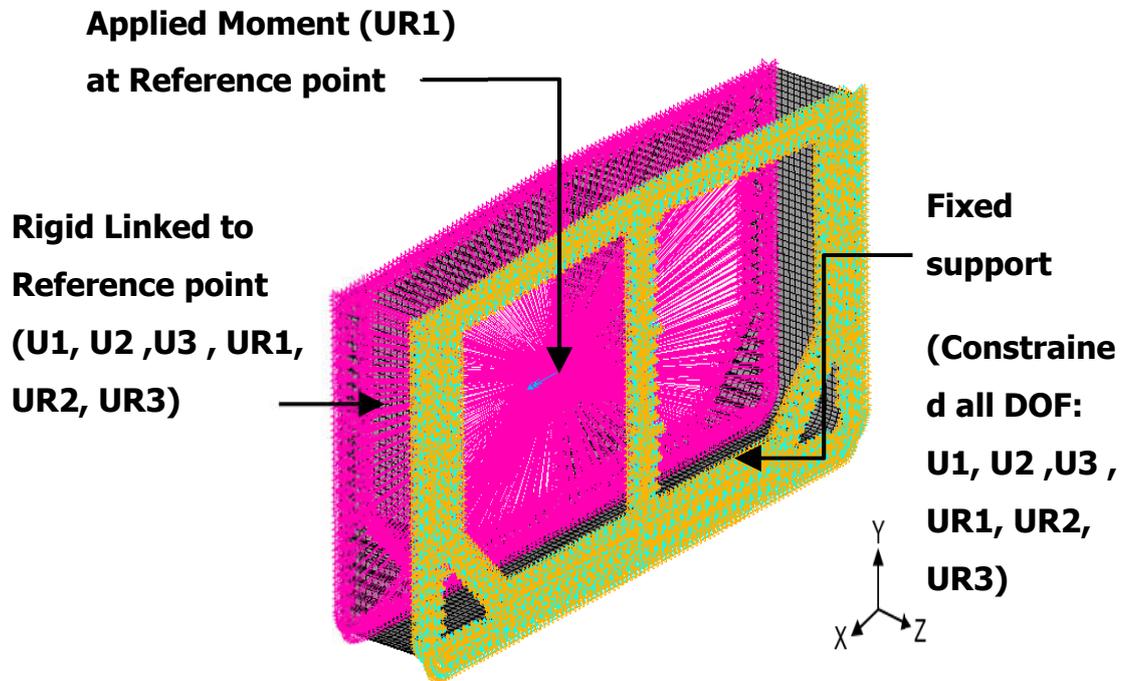
Kontrol kelengkungan dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada kedua ujung model elemen hingga. *Rigid link* dihubungkan ke titik acuan pada sumbu netral. Peningkatan nilai kelengkungan diperoleh dengan menggunakan kecepatan akselerasi dan *damping factor*. Kedua ujung pada titik acuan diberikan beban momen.

Kontrol momen dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada salah satu ujung model elemen hingga dan ujung 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 2.21.



(Sumber: Iqra Ramadhan M., 2017)

Gambar 2.21 Kondisi syarat batas untuk kontrol kelengkungan

5. Ketidaktepatan Geometrik

Selama fabrikasi struktur kapal (pemotongan, *rolling*, pembentukan, pengelasan dan perlakuan panas) terjadi ketidaktepatan geometri dan tegangan sisa yang dapat mempengaruhi kekuatan batas struktur. Metode NLFEA dapat mengkondisikan ketidaktepatan 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 2.2, serta kurva tegangan regangan seperti pada Gambar 2.22.

Tabel 2.2 Spesifikasi material

Spesifikasi Material	Jenis Material	
	AH27	AH37
<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)

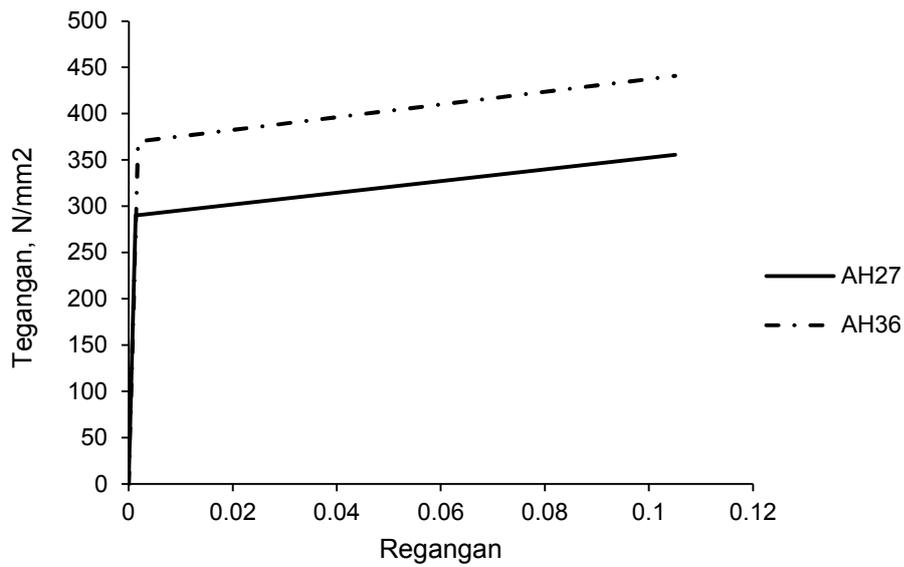
Berdasarkan Tabel 2.2 Material AH27 dan AH37 merupakan material khusus untuk *marine*. Modulus elastisitas sebesar 210000 N/mm², rasio poisson 0,3 dan tegangan luluh AH27 sebesar 290 N/mm², AH36 sebesar 370 N/mm² serta *tangent modulus* AH27 sebesar 625 dan AH36 sebesar 675.

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 350 mm dengan bentuk *quadmapped*.

8. Tipe Elemen

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

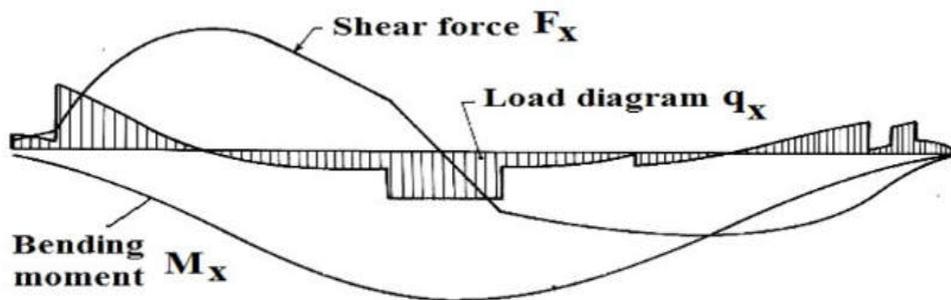


(Sumber: Ship Structure Committee, 2015)

Gambar 2.22 Model material *bilinear isotropic hardening*

2.9 Pembebanan *Hogging* dan *Sagging*

Momen lentur dan gaya geser pada kondisi air tenang berasal dari gaya apung dan distribusi berat sepanjang panjang kapal seperti pada Gambar 2.23.



(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.23 Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal

Berat dan gaya apung diasumsikan sebagai w_x dan b_x , maka distribusi beban adalah

$$q_x = b_x - w_x \tag{2.26}$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal adalah

$$F_x = \int_x^0 (b_x - w_x) dx \quad (2.27)$$

$$M_x = \int_x^0 F_x dx \quad (2.28)$$

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

$$M_{sw} = -0,05168 K_M C L^2 B (C_b + 0,1) kn.m \quad , \text{ kondisi } sagging \quad (2.29)$$

$$M_{sw} = +0,01 K_M C L^2 B (11,97 - 1,9 C_b) kn.m \quad , \text{ kondisi } hogging \quad (2.30)$$

dimana:

K_M = Faktor distribusi seperti pada Gambar 2.24.

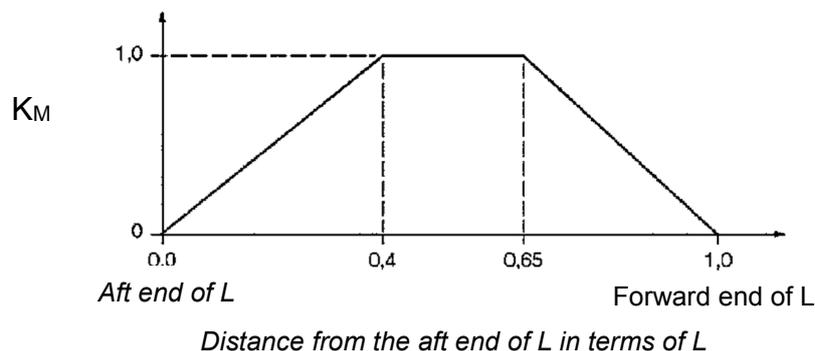
L, B = lebar dan panjang kapal dalam satuan meter

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

$C = 10,75 - [(300 - L)/100]^{1,5}$ untuk $90 \leq L \leq 300$ m

$= 10,75$ untuk $300 \leq L \leq 350$ m

$= 10,75 - [(L - 350)/150]^{1,5}$ untuk $350 \leq L \leq 500$ m

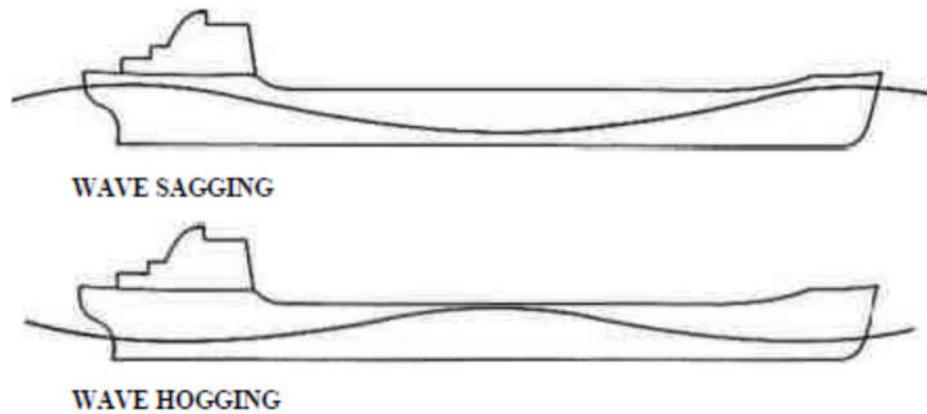


(Sumber: DNV GL, 2017a)

Gambar 2.24 Faktor distribusi K_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 2.25.



(Sumber: National Academy, 1991)

Gambar 2.25 Momen lentur vertikal akibat gelombang

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

$$M_w = -0,11K_M CL^2 B(C_b + 0,7)kn.m \quad , \text{ kondisi } sagging \quad (2.31)$$

$$M_w = +0,19K_M CL^2 BC_b kn.m \quad , \text{ kondisi } hogging \quad (2.32)$$

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.

$$M_t = M_{sw} + M_w \quad (2.33)$$