

**"ANALISIS PENGARUH DEFORMASI RUANG MUAT *DOUBLE-HULL*
TANKER TERHADAP KEKUATAN KAPAL"**

SKRIPSI

Diajukan Guna Memenuhi Persyaratan Untuk Meraih Gelar Strata 1 (S1)

Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin



OLEH :

MOHAMAD FATHURAKHMAN

D321 16 302

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2020

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi:

**"ANALISIS PENGARUH DEFORMASI RUANG MUAT *DOUBLE-HULL*
TANKER TERHADAP KEKUATAN KAPAL"**

Disusun dan diajukan oleh:

MOHAMAD FATHURAKHMAN

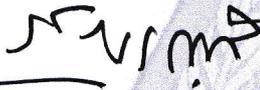
D321 16 302

Telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing pada :

Tanggal : 23 September 2020

Di : Gowa

Pembimbing I



Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D

Nip. 197506082005011003

Pembimbing II



Ir. Juswan, MT.

Nip: 196212311989031031

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Kelautan



Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.

196908021997021001

LEMBAR PENGESAHAN KOMISI PENGUJI

Judul Skripsi:

**"ANALISIS PENGARUH DEFORMASI RUANG MUAT *DOUBLE-HULL*
TANKER TERHADAP KEKUATAN KAPAL"**

Disusun dan diajukan oleh:

MOHAMAD FATHURAKHMAN

D321 16 302

Telah diuji dan dipertahankan di depan panitia ujian skripsi, dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Tanggal : 23 September 2020

Di : Gowa

Dengan Panel Ujian Skripsi

1. Ketua : Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D
2. Sekertaris : Ir. Juswan, MT.
3. Anggota 1 : Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.
4. Anggota 2 : Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Kelautan



Taufiqur Rachman
Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.

196908021997021001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Mohamad Fathurakhman

NIM : D32116302

Program Studi : S1 Teknik Kelautan

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi tugas akhir yang saya tulis ini benar-benar hasil dan karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari saya terbukti atau tidak dapat dibuktikan bahwa atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 23 September 2020

Penulis,



Mohamad Fathurakhman

ABSTRAK

MOHAMAD FATHURAKHMAN, *Analisis Pengaruh Deformasi Ruang Muat Double-Hull Tanker Terhadap Kekuatan Kapal*. Dibimbing oleh **(Muhammad Zubair Muis Alie, dan Juswan)**

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah material karena sebuah gaya kerja yang diterapkan padanya. Dalam hal ini deformasi yang dimaksud timbul akibat adanya momen yang bekerja. Fokus utama dari penelitian ini yakni, deformasi dari ruang muat kapal *double-hull tanker* arah membujur, yang kemudian disimulasikan dalam dua keadaan yakni kondisi *hogging*, dan *sagging*, dan juga dalam dua tipe *double-hull tanker*. Analisa deformasi ini dilakukan menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA)* dengan menggunakan *software* ANSYS R1 2020 Academic Version. Analisis ini dilakukan dengan pemberian tumpuan atau Multi-Point Constraints (MPC pada potongan melintang, serta momen sebesar 6.2277×10^{12} N.mm untuk kondisi *hogging*, dan -5.8883×10^{12} N.mm, untuk kondisi *sagging*.

Kata Kunci: *Double-Hull Tanker, Ruang Muat, Deformasi, Momen, Hogging, Sagging, Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA)*

ABSTRACT

MOHAMAD FATHURAKHMAN, *Deformation effect Analysis of double-hull tanker cargo hold towards vessel strength*. Supervised by **(Muhammad Zubair Muis Alie, and Juswan)**

Deformation refers to the change in size or shape of an object due to applied load, in this case, deformation arise because of moment that apply on that object. The main focus of this research is to know deformation under longitudinal bending in hogging and sagging conditions. There are two types of double-hull tanker are modeled and analyzed using Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA) method, using ANSYS 2020 R1 Academic Version. The analysis was carried out by applying Multi-Point Constraints (MPC), at each side of double-hull cross section. The Applied moments are 6.2277×10^{12} N.mm, and -5.8883×10^{12} N.mm in hogging, and sagging condition, respectively

Keywords: Double-hull Tanker, Cargo Hold, Deformation, Moment, Hogging, Sagging, Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA)

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 kehendaknyalah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat diatasi. Shalawat 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.

Terselesainya penelitian dan penulisan skripsi ini, tidak luput dari bantuan berbagai pihak. Dalam kesempatan ini Penulis dengan tulus mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D** selaku pembimbing pertama dan bapak **Ir. Juswan, MT.**, selaku pembimbing kedua, yang senantiasa menyempatkan waktunya, membimbing, memotivasi serta memberikan saran dan kritiknya, hingga selesainya skripsi ini

Tidak lupa juga terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung penulis hingga selesainya skripsi ini, karena itu penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan secara tulus dan ikhlas kepada yang terhormat :

1. Kedua orangtua, Ibunda **Hj. Faridah Halid H.**, ayahanda **H. Dakir Handoyo**, yang telah memberikan segala bentuk bantuan moril, materi, dan do'a kepada penulis, selama ini.
2. Bapak **Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, serta

selaku penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan. .

3. Bapak **Ashury ST., MT.**, selaku Sekretaris Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak **Daeng Paroka ST., MT., PhD.**, dan, **Dr. Taufiqur Rachman ST., MT.**, selaku dosen penguji yang memberikan saran, dan kritik yang membangun pada penelitian saya.
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. Sdr. **Muh. Fikri Dermawan ST.**, selaku kakak saya yang telah memberikan bantuan moril, materi, dan saran – saran selama masa kuliah, dan mengerjakan skripsi ini.
8. **Teman – teman mahasiswa Teknik Kelautan 2016**, 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.
9. Teman – teman mahasiswa satu konstentrasi, *Offshore Technology*, khususnya **teman – teman laboratoirum OSAREL**
10. **Teman – teman sepermainan SMK Telkom Makassar**, yang senantiasa memberikan canda tawa, bantuan moril kepada penulis.
11. **Teman – teman KKN UNHAS**, Desa Panyangkalang, Kecamatan Mangarabombang, Kabupaten Takalar, atas seluruh bantuan moril yang diberikan selama ini.

12. Dan Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terima kasih yang sebesar besarnya untuk segala bantuannya selama 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, 23 September 2020

Mohamad Fathurakhman

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN KOMISI PENGUJI.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
PRAKATA	v
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
DAFTAR ISTILAH.....	xv
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 Kontruksi Kapal Tanker	8
2.4 Sistem Konstruksi Kapal	13
2.5 Tegangan yang Bekerja pada Kapal.....	13

2.6 Momen Lentur dan Gaya Geser	14
2.7 Modulus Penampang Kapal	18
2.8 Deformasi Material	19
2.9 Peraturan Terkait Ukuran Ruang Muat (<i>Cargo Tanks</i>)	20
2.10 Kekuatan Batas Kapal <i>Tanker (Ultimate Strength)</i>	21
2.11 Metode Untuk Analisa Kekuatan	23
BAB 3 METODE PENELITIAN	28
3.1 Rancangan Penelitian	28
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	28
3.3 Objek Penelitian.....	28
3.4 Jenis Data	41
3.5 Kerangka Alur Penelitian.....	41
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1 Model Penelitian	44
4.2 Perhitungan Momen Lentur Batas Vertikal.....	46
4.3 Tegangan Kerja Ruang Muat.....	48
4.4 Deformasi Ruang Muat.....	54
4.5 Kekuatan Batas Kapal.....	63
4.6 Deformasi Ruang Muat Terhadap Kekuatan Kapal.....	66
BAB 5 PENUTUP	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kategori Ukuran Kapal Tanker (U.S. EIA).....	7
Gambar 2.2 Struktur Utama Komponen pada Bagian Tengah Tanker dari <i>Single Hull</i> Tanker	9
Gambar 2.3 Konstruksi <i>Double-Hull</i> Tanker.....	10
Gambar 2.4 Perbedaan kapal <i>Single-hull</i> Tanker, dan <i>Double-Hull</i> Tanker	12
Gambar 2.5 Disrtibusi beban (<i>load diagram</i>), gaya geser (<i>shear force</i>), terhadap momen lentur (<i>bending moment</i>).....	14
Gambar 2.6 Perubahan Momen Lentur pada Tongkang Persegi Panjang Kondisi Air Tenang	15
Gambar 2.7 Momen Lentur Gelombang pada Gelombang Reguler.....	16
Gambar 2.8 Momen Lentur Ketika Air Tenang dan Bergelombang.....	17
Gambar 2.9 Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan.....	22
Gambar 3.1. Penampang Kapal Tanker Tipe T3.....	29
Gambar 3.2 Penampang Kapal Tanker Tipe T4.....	35
Gambar 3.3 Diagram alur penelitian.....	43
Gambar 4.1 <i>Mesh</i> Model Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker Tipe T3	44
Gambar 4.2 <i>Mesh</i> Model Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker Tipe T4	45
Gambar 4.3 Kondisi Batas Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker	45
Gambar 4.4 Distribusi Tegangan Kerja Arah Z, pada Ruang Muat <i>Double</i> <i>Hull</i> Tanker Tipe T3 saat Kondisi <i>Hogging</i>	49
Gambar 4.5 Distribusi Tegangan Kerja Arah Z, pada Ruang Muat <i>Double</i> <i>Hull</i> Tanker Tipe T3 saat Kondisi <i>Sagging</i>	50
Gambar 4.6 Distribusi Tegangan Kerja Arah Z, pada Ruang Muat <i>double</i> <i>hull</i> Tanker Tipe T4 saat Kondisi <i>Hogging</i>	51

Gambar 4.7 Distribusi Tegangan Kerja Arah Z, pada Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker Tipe T4 saat Kondisi <i>Sagging</i>	52
Gambar 4.8 Deformasi pada Ruang Muat <i>Double Hull</i> Tanker Tipe T3 saat Kondisi <i>Hogging</i>	54
Gambar 4.9 Arah Deformasi pada Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker Tipe T3 saat Kondisi <i>Hogging</i> pada <i>mode vector</i>	55
Gambar 4.10 Deformasi pada Ruang Muat <i>Double-Hull</i> Tanker Tipe T3, saat Kondisi <i>Sagging</i>	56
Gambar 4.11 Arah Deformasi pada Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker Tipe T3 saat Kondisi <i>Hogging</i> pada <i>mode vector</i>	57
Gambar 4.12 Deformasi pada Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker Tipe T4, saat Kondisi <i>Hogging</i>	58
Gambar 4.13 Deformasi pada Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker Tipe T4 saat Kondisi <i>Hogging</i> pada <i>mode vector</i>	59
Gambar 4.14 Deformasi pada Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker Tipe T3, saat Kondisi <i>Sagging</i>	60
Gambar 4.15 Deformasi pada Ruang Muat <i>Double-hull</i> Tanker Tipe T4 saat Kondisi <i>Sagging</i> pada <i>mode vector</i>	61
Gambar 4.16 Grafik Kekuatan Batas <i>Double-hull</i> Tanker T3 Pada Kondisi <i>Hogging</i>	63
Gambar 4.17 Grafik Kekuatan Batas <i>Double-hull</i> Tanker T3 Pada Kondisi <i>Sagging</i>	63
Gambar 4.18 Grafik Kekuatan Batas <i>Double-hull</i> Tanker T4 Pada Kondisi <i>Hogging</i>	64
Gambar 4.19 Grafik Kekuatan Batas <i>Double-hull</i> Tanker T4 Pada Kondisi <i>Sagging</i>	64
Gambar 4.20 Grafik Kekuatan Batas <i>Double-hull</i> Tanker T3, dan T4 Pada Kondisi <i>Hogging</i> , dan <i>Sagging</i>	65
Gambar 4.21 Grafik Hubungan Deformasi Ruang Muat Terhadap Kekuatan Batas Kapal <i>Double-Hull</i> Tanker T3 Pada Kondisi <i>Hogging</i> .	66

Gambar 4.22 Grafik Hubungan Deformasi Ruang Muat Terhadap Kekuatan Batas Kapal *Double-Hull* Tanker T3 Pada Kondisi *Sagging*. 66

Gambar 4.23 Grafik Hubungan Deformasi Ruang Muat Terhadap Kekuatan Batas Kapal *Double-Hull* Tanker T4 Pada Kondisi *Hogging*. 67

Gambar 4.24 Grafik Hubungan Deformasi Ruang Muat Terhadap Kekuatan Batas Kapal *Double-Hull* Tanker T4 Pada Kondisi *Sagging*. 67

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Konfigurasi Elemen Ruang Muat Kapal Tanker Tipe T3.....	30
Tabel 3.2 Konfigurasi Elemen Ruang Muat Kapal Tanker Tipe T4.....	36
Tabel 3.3 Spesifikasi material Penyusun Ruang Muat Kapal <i>Double-Hull Tanker</i> T3 & T4	41
Tabel 4.1 Nilai Momen Yang Diterapkan Pada Kondisi <i>sagging</i>	46
Tabel 4.2 Nilai Momen Yang Diterapkan Pada Kondisi <i>hogging</i>	47
Tabel 4.3 Tegangan Izin Material.....	48
Tabel 4.4 Tegangan Kerja Ruang Muat <i>Double-Hull</i> Tanker T3 Dan T4,Pada Kondisi <i>Hogging</i> Dan <i>Sagging</i>	53
Tabel 4.5 Tegangan Kerja Ruang Muat <i>Double-Hull</i> Tanker T3, Dan T4, Pada Kondisi <i>Hogging</i> Dan <i>Sagging</i>	62
Tabel 4.6 Kekuatan Batas <i>Double-Hull</i> Tanker.....	65
Tabel 4.7 Kekuatan Batas <i>Double-Hull</i> Tanker.....	68

DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Satuan
B	Lebar kapal	(m)
B _x	Gaya apung	(N)
C	Koefisien momen lentur	
C _b	Koefisien blok kapal	
D	Tinggi kapal	(m)
E	Modulus elastisitas	(N/mm ²)
F _x	Gaya geser arah sumbu x	(N)
I	momen inersia	(m ⁴)
I _{min}	momen inersia ijin	(m ⁴)
KM	Faktor distribusi	
L	Panjang kapal	(m)
M	Momen	(N.mm)
M _{SW}	Momen lentur pada air tenang	(N.mm)
M _T	Momen lentur- batas total	(N.mm)
M _U	Momen kekuatan batas kapal	(N.mm)
M _w	Momen lentur akibat gelombang	(N.mm)
S	Modulus penampang	(m ³)
V(x)	Gaya geser di lokasi x	(N)
W(x)	Berat di lokasi x	(N)
z	Jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur	(m)
σ	Tegangan lentur	(N/mm ²)
σ _{max}	Tegangan lentur maksimum	(N/mm ²)
σ _p	Tegangan lentur ijin	(N/mm ²)

DAFTAR ISTILAH

- ANSYS* : *Software* yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
- Deformasi : Perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah objek karena pengaruh gaya
- Double-hull* : Lambung ganda, memiliki 2 lapisan lambung untung meminimalkan kebocoran.
- Hogging* : Kondisi saat bagian tengah kapal melengkung ke atas
- Mesh* : 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.
- Sagging* : Kondisi saat bagian tengah kapal melengkung ke bawah
- Tanker : Jenis kapal yang biasanya digunakan untuk mengangkut muatan berupa cairan, seperti minyak, dan produk turunannya

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya kebutuhan masyarakat dunia akan minyak, dan gas bumi, sejalan dengan berkurangnya cadangan minyak dunia di daratan mendorong berkembangnya industri-industri pengeboran minyak dan gas (migas) di seluruh dunia, terutama pada bidang lepas pantai, dimana pengeksplorasian cadangan minyak di lautan masih sangat sedikit.

Dalam distribusi produk mereka, setelah minyak diambil dari sumur bor dan melalui beberapa tahapan seperti pemisahan dan distilasi, maka langkah selanjutnya adalah pemindahan minyak dan gas itu sendiri, sehingga dibutuhkannya sebuah alat transportasi yang mumpuni, untuk pendistribusian lintas lautan sendiri terdapat beberapa opsi, antaranya adalah pemindahan menggunakan kapal tanker.

Kapal tanker yang merupakan kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak atau produk turunannya. Jenis utama kapal tanker termasuk tanker minyak, tanker kimia, dan pengangkut LNG. Nilai keamanan suatu kapal tentu saja merupakan sebuah aspek penting dalam perancangan, mungkin hal inilah yang mendorong semua kapal *tanker* harus dibangun dengan menerapkan konsep *double-hull* atau dua lapis, dan meninggalkan konsep *single-hull*, terutama setelah terjadinya insiden yang mengakibatkan tumpahan minyak dalam jumlah besar, dan menimbulkan kerusakan lingkungan hidup perairan cukup parah, yaitu Torrey Canyon di Inggris tahun 1967, Exxon Valdez di Alaska tahun 1989, dan Erika di Perancis tahun 1999, menjadi tonggak sejarah perkapalan untuk meningkatkan standar keselamatan pelayaran internasional.

Sejumlah insiden kecelakaan kapal yang terjadi disebabkan oleh kekuatan batas pada bagian struktur kapal, hal tersebut menunjukkan

bahwa perlu adanya pengawasan yang lebih, khususnya terhadap bagian - bagian yang berpotensi mengalami kerusakan yang diakibatkan oleh beban kapal itu sendiri atau beban yang datang dari luar (Choiruddin *et al*, 2015).

Salah satu penyebab terjadinya *ultimate strength failure* pada suatu struktur kapal umumnya adalah disebabkan oleh beban ekstrem dan/atau kurangnya daya tahan struktur terhadap degradasi material. Misalnya, korosi yang terjadi secara terus menerus akan mengurangi dimensi *scantlings*, sehingga *girder* penopang pada lambung kapal akan rawan mengalami *buckling* ataupun retak ketika ditimpa beban ekstrem.

Ada beberapa pendekatan untuk melakukan analisis keruntuhan progresif dari balok lambung kapal. FEM dapat menjadi metode yang ampuh untuk melakukan analisis keruntuhan ini. Banyak penulis menerbitkan makalah tentang penghitungan kekuatan longitudinal residu atau sisa longitudinal balok kapal dalam kondisi utuh atau rusak dengan menggunakan analisis FEM *nonlinier* (Van-Vu, 2005).

Berdasarkan latar belakang diatas, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan analisa kekuatan kapal *double-hull tanker*, maka dalam pengerjaan tugas akhir ini akan dilakukan penelitian tentang ANALISIS PENGARUH DEFORMASI RUANG MUAT DOUBLE-HULL TANKER TERHADAP KEKUATAN KAPAL

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah adalah berapa besar deformasi pada ruang muat *double-hull* tanker terhadap kekuatan kapal.

1.3 Batasan Masalah

Untuk lebih menyederhanakan dan memudahkan penelitian ini maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada hal – hal berikut:

- Beban yang bekerja pada kapal yaitu momen arah membujur.
- Pemodelan dilakukan hanya pada satu ruang muat.
- Beban operasional dan bangunan atas tidak dipertimbangkan.
- Ketidaktersempurnaan awal seperti tegangan sisa pengelasan, cacat pengelasan, korosi, dan retak material diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besar deformasi pada ruang muat *double-hull tanker* terhadap kekuatan kapal

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu sebagai bahan informasi bagi industri – industri, yang bergerak di bidang migas khususnya, transportasi migas ataupun bidang perkapalan, serta bidang – bidang lainnya yang menyangkut penggunaan kapal *double-hull tanker* sebagai media transportasi.

1.6 Sistematika Penulisan

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

BAB I : PENDAHULUAN

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

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB III : METODE PENELITIAN

Pada bab ini penulis menjelaskan mengenai langkah – langkah sistematis penelitian yang terdiri dari lokasi, dan waktu penelitian, perolehan data, variabel yang diteliti.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini penulis menjelaskan hasil dari penelitian yang dilakukan, dan pembahasan terkait penelitian tersebut.

BAB V : PENUTUP

Pada bab yang terakhir ini penulis menyimpulkan hasil dari penelitian, dan menambahkan saran, untuk penelitian berikutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Tanker

Kapal tanker adalah kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak atau produk turunannya, seperti minyak mentah, minyak yang telah diolah dikilang, bahan kimia, minyak nabati, minyak sawit, metanol, gas alam cair, dsb. Tanker adalah konsep yang relatif baru, berasal dari tahun pada akhir abad ke-19. Sebelumnya teknologi sama sekali tidak mendukung pengangkutan curah cair. Pasar juga tidak siap untuk menghadapi penjualan kargo dalam jumlah besar, oleh karena itu sebagian besar kapal mengangkut berbagai produk yang berbeda dalam ruang yang berbeda pula untuk diperdagangkan. (Hayler, William B.; Keever, John M., 2003)

Cairan biasanya dimuat dalam tong – tong oleh karena itu muncullah istilah "*tonnage*", yang mengacu pada volume ruang penyimpanan dalam hal berapa banyak tong anggur atau *wine* yang dapat dibawa. Bahkan air minum, air bersih untuk kelangsungan hidup awak kapal juga dihitung dalam *tonnage*. Pengangkutan cairan curah pada kapal sebelumnya menimbulkan beberapa masalah, yaitu:

- Penahan, pada kapal kayu untuk curah cair, seperti air, minyak, memiliki banyak celah yang dapat menyebabkan bocor atau merembesnya cairan. Pengembangan lambung besi dan baja memecahkan masalah ini.
- Bongkar – muat, pada saat melakukan aktivitas bongkar muat untuk cairan curah harus terlebih dahulu dipompa, pengembangan pompa yang efisien dan sistem perpipaan sangat penting untuk pengembangan *tanker*. Pada awalnya mesin uap dikembangkan sebagai penggerak utama untuk sistem pemompaan, selain itu pasar juga menerima produk

dalam jumlah yang terbatas, dikarenakan sifat tong, yang hanya dapat memiliki volume relatif kecil untuk cairan, menyebabkan kelangkaan dan harga yang mahal pada jenis curah cair.

- *Free Surface Effect*, atau efek permukaan bebas, cairan dalam jumlah banyak yang dibawa di atas kapal akan berdampak pada stabilitas kapal, terutama ketika cairan tersebut mengalir di sekitar palka atau tangki sebagai respon terhadap pergerakan kapal. Efeknya dapat diabaikan dalam penggunaan tong, namun dapat menyebabkan terbaliknya kapal jika tong berkumpul pada satu tempat, masalah ini dapat diselesaikan dengan pemberian sekat pembatas, agar tong tidak bergerak secara bebas.

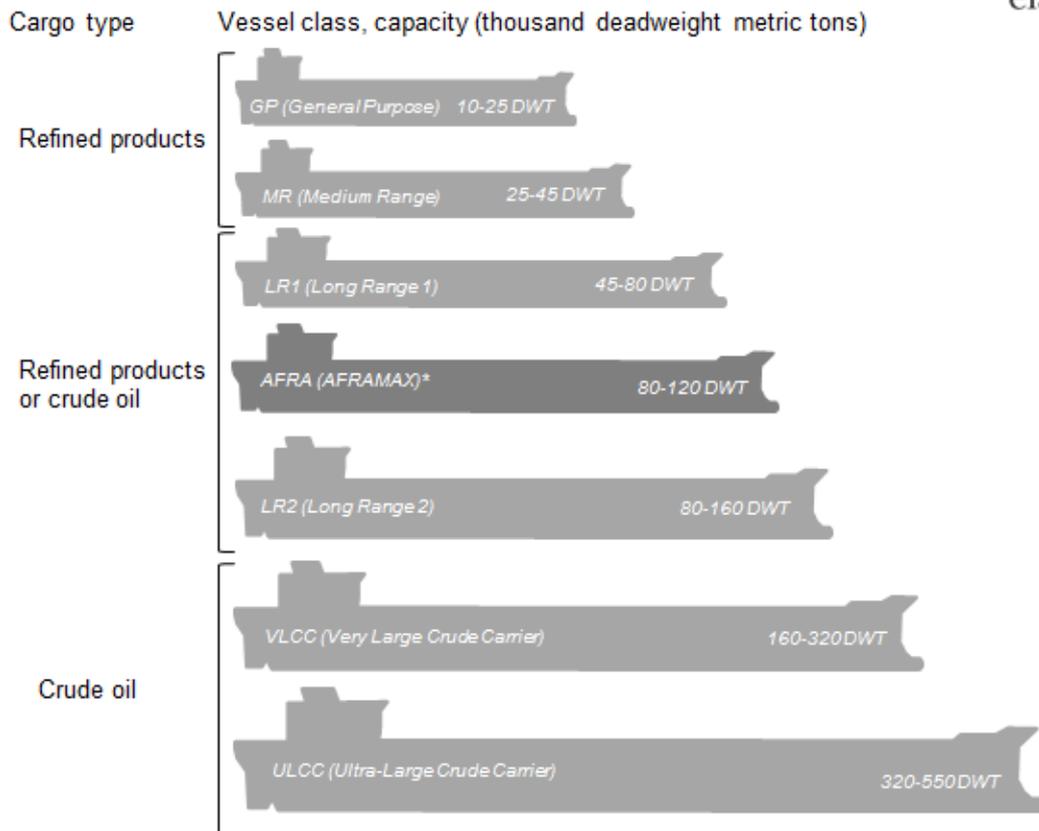
Tanker pertama kali digunakan oleh industri minyak untuk mengirim bahan bakar olahan dalam jumlah besar dari kilang ke pelanggan. Yang kemudian akan disimpan pada tangki yang besar di daratan, dan dibagi lagi untuk pengiriman ke lokasi yang berbeda. Penggunaan kapal *tanker* menjadi populer karena cairan lain juga lebih murah untuk diangkut dalam jumlah besar, disimpan di terminal khusus, kemudian dibagi. Bahkan tempat pembuatan bir Guinness menggunakan *tanker* untuk mengangkut *beer* tersebut melintasi Laut Irlandia.

Produk yang berbeda memerlukan penanganan dan transportasi yang berbeda, dengan varian khusus seperti "*Chemical Tanker*", "*Oil Tanker*", dan "*LNG Carrier*" yang dikembangkan untuk menangani bahan kimia berbahaya, produk minyak dan turunannya, dan gas alam cair. Varian luas ini dapat dibedakan lebih lanjut berkenaan dengan kemampuan untuk hanya membawa produk tunggal atau secara bersamaan mengangkut kargo campuran seperti beberapa bahan kimia yang berbeda atau produk minyak olahan. (Wiltshire, Andrew 2008)

2.2 Ukuran Kapal *Tanker*

Berdasarkan ukurannya, baik *product/refined tanker* dan *crude carrier*, dikelompokkan sebagai berikut:

Average Freight Rate Assessment (AFRA) Scale - Fixed



(Sumber: U.S. Energy Information Administration, London *Tanker* Brokers' Panel)

Gambar 2.1 Kategori Ukuran Kapal *Tanker* (U.S. EIA)

1. *General Purpose Tanker* Biasanya digunakan mengangkut *refined product*, berukuran 10,000 MT hingga 25,000 MT dwt.
2. *Handysize Tanker* 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) Tanker* ini hanya pengangkut minyak mentah. Ukuran VLCC adalah 320,000 MT
7. *Ultra Large Crude Carrier (ULCC), Tanker* ini hanya pengangkut minyak mentah ULCC sebesar 550,000 MT dwt.

2.3 Kontruksi Kapal *Tanker*

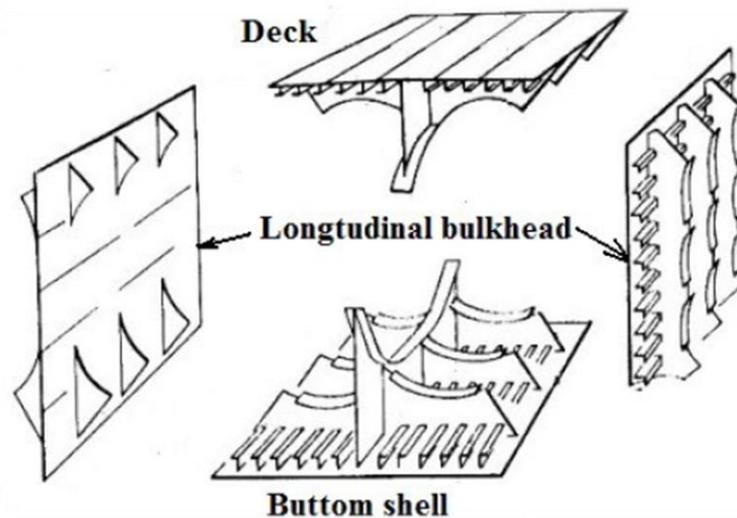
Konstruksi kapal *tanker* didesain dan dibuat secara khusus dengan ketetapan standar keselamatan yang sangat tinggi sesuai dengan spesifikasi yang diatur dalam IMO melalui peraturan MARPOL 73/78-Annex 1, *Regulation 13G*, Amandemen 2001 serta SOLAS (Keselamatan Jiwa di Laut).

Faktor-faktor yang mempengaruhi desain dan konstruksi kapal *tanker* antara lain:

1. Faktor keamanan: sebagai pengangkut muatan berbahaya.
2. Faktor stabilitas: muatan cair dalam tangki dapat bergerak bebas.
3. Faktor pencemaran: dapat terjadi pencemaran berupa tumpahan minyak di laut.

2.3.1 *Single-hull Tanker*

Tanker lambung tunggal (*Single-hull Tanker*), merupakan jenis *tanker* yang hanya memiliki satu lambung dan minyak yang dibawa disimpan dalam struktur lambung tersebut.



(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.2 Struktur Utama Komponen pada Bagian Tengah *Tanker* dari *Single Hull Tanker*

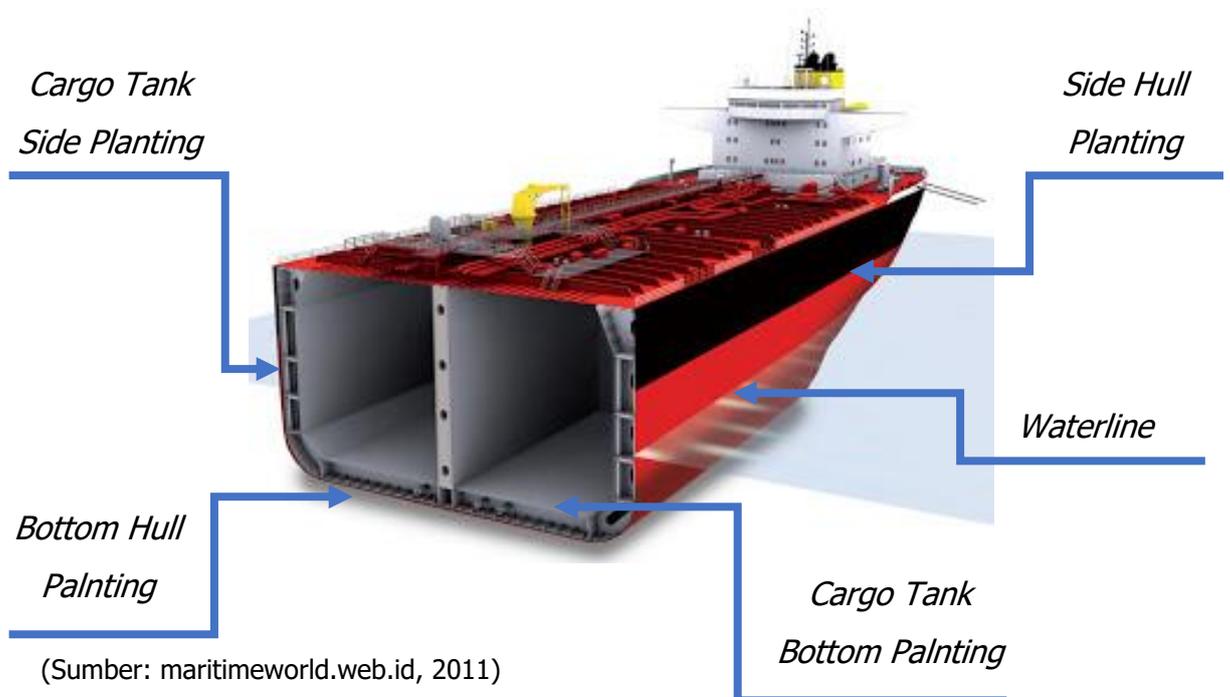
Dengan struktur lambung yang hanya memiliki satu lapisan menyebabkan kemungkinan akan ancaman kebocoran lebih besar. Setelah terjadinya beberapa kecelakaan besar seperti yang terjadi Torrey Canyon di Inggris tahun 1967, Exxon Valdez di Alaska tahun 1989, dan Erika di Perancis tahun 1999, juga mendorong pembuatan regulasi atau peraturan terkait pembatasan kapal *single-hull tanker*, *classification societies*, *double-hull Oil Tankers*. Mulai 1 Januari 2010, menetapkan kapal minyak *single-hull tanker* berbobot 20.000 DWT atau lebih, dilarang masuk perairan Uni Eropa. Perlakuan sama juga berlaku bagi kapal *tanker single-hull* 600 DWT atau lebih, mulai tahun 2015.

2.3.2 Double-Hull Tanker

Penggunaan *double-hull tanker* merupakan solusi bagi kapal tanker, sesuai namanya kapal ini memiliki lambung ganda, jenis kapal ini memiliki dua tingkat atau lapisan, yaitu: lapisan luar dan lapisan dalam. lambung ganda sekarang ini menjadi persyaratan penting dalam kapal, terutama kapal *tanker* minyak, dikarenakan regulasi atau peraturan pembatasan layer *single-hull tanker*.

Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan tabrakan atau atau kerusakan serupa, lapisan kedua bertindak sebagai *back-up* dan mencegah masuknya air laut ke dalam kapal. Konstruksi lapisan ganda membantu mengurangi risiko terjadinya pencemaran laut akibat benturan, atau kebocoran.

Adapun contoh konstruksi kapal *double-hull tanker* dapat dilihat pada gambar berikut ini

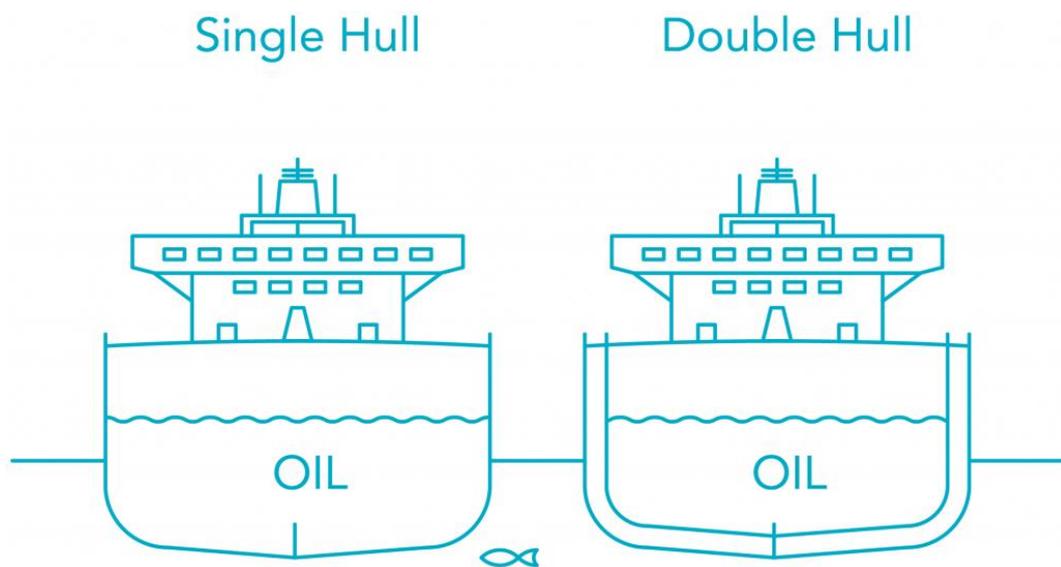


Gambar 2.3 Konstruksi *Double-Hull* Tanker

1. *Cargo Tank Side Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian sisi dalam kapal *double-hull* tanker yang berfungsi sebagai tangki penyimpanan muatan minyak.
2. *Side Hull Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian sisi luar kapal *double-hull* tanker yang berfungsi sebagai pelindung (*back-up*) dan mencegah masuknya air laut ke dalam tangki penyimpanan muatan minyak. Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan tabrakan atau serupa.
3. *Cargo Tank Bottom Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian bawah dalam dari kapal *double-hull* tanker yang berfungsi sebagai tangki penyimpanan muatan minyak. Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan atau tabrakan.
4. *Bottom Hull Planting* adalah material pendukung atau penyusun bagian bawah luar kapal *double hull tanker* yang berfungsi sebagai pelindung (*back-up*) dan mencegah masuknya air laut ke dalam tangki penyimpanan muatan minyak. Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan tabrakan atau serupa.
5. *Waterline* adalah garis potong yang mendatar secara horizontal yang dalam hal gambar 2.4. menunjukkan garis air kapal *double hull tanker* dalam kondisi tanpa muatan.

Dikarenakan terdapat ruang antara lapisan luar lambung dan lapisan dalam, air untuk pemberat (*ballast tank*) disimpan dalam ruang kosong pada kedua sisi, dan di bagian bawah kapal.

Penggunaan lambung ganda dalam kapal *tanker* minyak yang direkomendasikan dalam MARPOL, (*Marine Pollution*) atau konvensi internasional untuk pencegahan pencemaran dari kapal konvensi. Rekomendasi ini pun muncul setelah mengamati kelebihan ketika penggunaan lapisan (*hulls*) ganda di kapal penumpang yang telah dianjurkan untuk memiliki lambung ganda sesuai dengan SOLAS (Keselamatan Jiwa di Laut) memenuhi atau konvensi.



(Sumber: www.clearseas.org, 2018)

Gambar 2.4 Perbedaan kapal *Single-hull* Tanker, dan *Double-Hull* Tanker

Adapun kekurangan yang dimiliki oleh kapal berlambung ganda adalah terkadang kapal cenderung tidak stabil. Hal ini dikarenakan dari dua lapisan lambung yang menggantikan pusat gravitasi kapal.

Pemeliharaan kapal berlambung ganda juga sangat penting, lambung ganda sangat rentan terhadap erosi sehingga diperlukan perhatian ekstra terhadap kondisi *tanker*

2.4 Sistem Konstruksi Kapal

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

1. Sistem konstruksi melintang (*longitudinal framing system*)
2. Sistem konstruksi memanjang (*transverse framing system*)
3. Sistem konstruksi campuran (*mixed framing system*)

2.5 Tegangan yang Bekerja pada Kapal

Tegangan didefinisikan sebagai tahapan terhadap gaya-gaya luar. Ini diukur dalam bentuk gaya per satuan luas. Dalam praktik tegangan sering diberikan dua pengertian: (1) gaya per satuan luas, (2) tegangan total gaya adalah gaya total pada suatu bidang (Zainuri, 2008).

Tegangan dasar ada dua yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal dapat berupa tegangan tarik dan tegangan tekan.

Tegangan Tarik (*tensile stress*), apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang, akibatnya batang cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang, maka gaya tersebut disebut gaya tarik.

Tegangan tekan (*compressive stress*), apabila sepasang gaya aksial menekan suatu bidang dan akibatnya cenderung untuk memperpendek atau menekan batang tersebut, gaya ini disebut gaya tekan dan menghasilkan tegangan tekan dalam aksial batang disuatu bidang yang tegak lurus atau normal terhadap sumbu.

Tegangan geser (*shearing*), berbeda dengan tegangan tarik dan tekan dimana tegangan ini umumnya disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja secara transversal pada suatu batang.

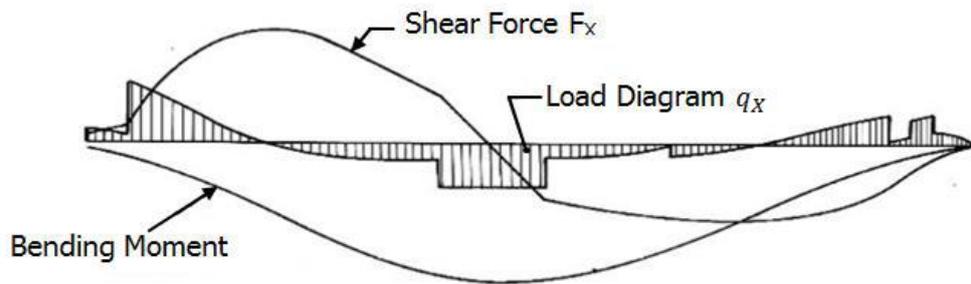
Hubungan antara tegangan yang dihasilkan oleh suatu gaya P yang bekerja pada setiap luas satuan A mengalami tegangan yaitu:

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana: σ = Tegangan (N/mm²)
 P = Gaya luar total beban (N)
 A = Luas penampang batang (mm²)

2.6 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 berikut ini.



(Sumber : Shama, 2013)

Gambar 2.5 Distribusi beban (*load diagram*), gaya geser (*shear force*), terhadap momen lentur (*bending moment*).

Adapun distribusi beban kapal dapat dihitung dengan Persamaan berikut.

$$q_x = b_x - w_x \dots\dots\dots(2.2)$$

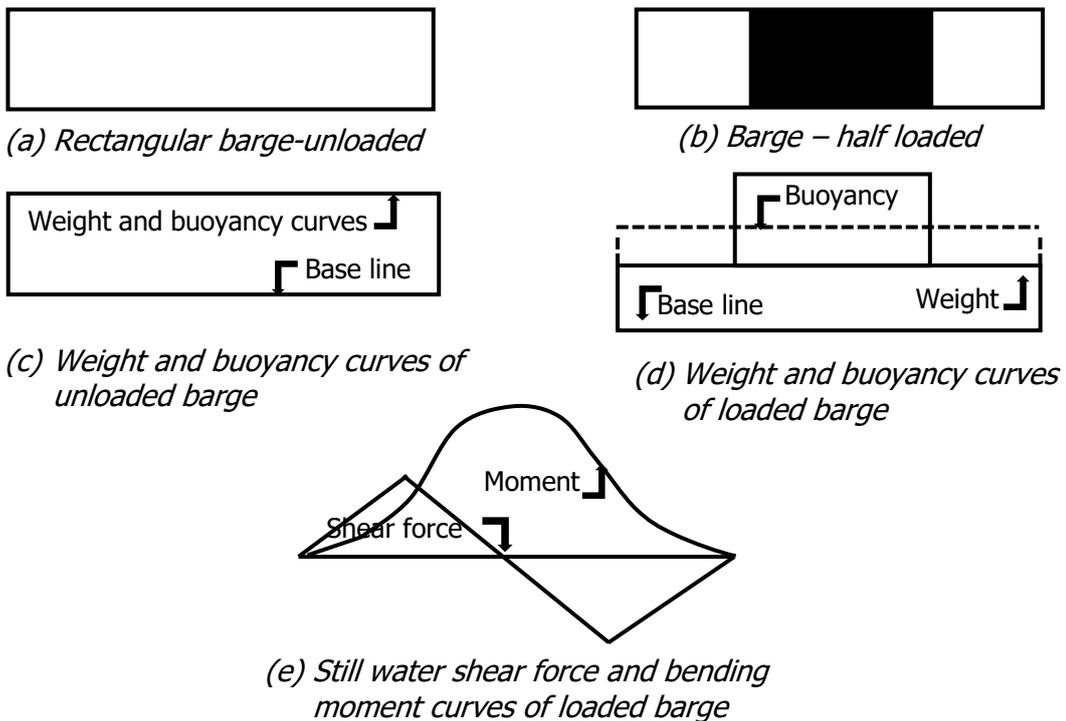
Dimana: berat dan gaya apung diasumsikan sebagai b_x dan w_x

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

$$f_x = \int_0^X (b(x) - w(x))dx \dots\dots\dots(2.3)$$

$$m_x = \int_0^X V(x)dx \dots\dots\dots(2.4)$$

Hal ini selanjutnya diilustrasikan pada Gambar 2.6 untuk sebuah kapal yang berada pada kondisi air tenang (misalnya di pelabuhan). Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.6(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 2.6(b). Jika tongkang dimuat di tengah (Gambar 2.6(c)), distribusi berat akan berubah dan kurva yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.6(d). Perbedaan antara kurva berat dan daya apung menghasilkan distribusi momen lentur sepanjang kapal. Momen lentur ini dikenal sebagai momen lentur air tenang, seperti yang terlihat pada tongkang yang dimuat pada Gambar 2.6(e) (Bai, 2003).

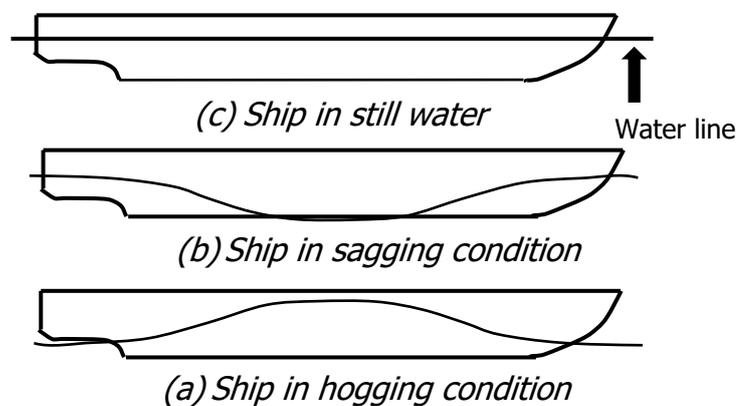


(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.6 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 2.5

$$M_T = M_{SW} + M_W \dots\dots\dots(2.5)$$

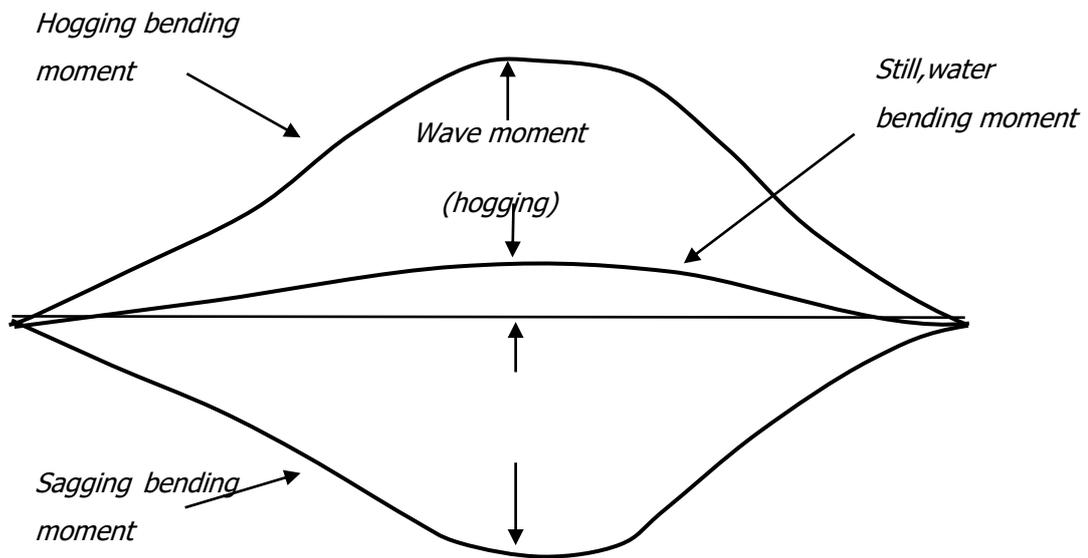


(Sumber: Shama, 2013)

Gambar 2.7 Momen Lentur Gelombang pada Gelombang Reguler

Gambar 2.7 mengilustrasikan kapal pada gelombang sama dengan panjangnya. Gambar 2.7(a) menunjukkan kondisi air tenang dimana hanya momen lentur yang bekerja pada kapal adalah momen lentur kondisi air tenang itu sendiri. Gambar 2.7(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 2.7(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 (Bai, 2003).



(Sumber: Tupper, 2004)

Gambar 2.8 Momen Lentur Ketika Air Tenang dan Bergelombang

Adapun besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang (M_{SW}) untuk panjang kapal lebih dari 90 meter, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 2.6 untuk kondisi *sagging*, dan 2.7, untuk kondisi *hogging*.

$$M_{SW} = -0,05168K_m CL^2 B(C_b + 0,7) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$M_{SW} = -0,01K_m CL^2 B(11,97 - 1,96C_b) \dots\dots\dots(2.7)$$

Adapun besaran momen lentur-batas vertikal akibat gelombang (M_W) untuk panjang kapal lebih dari 90 meter, DNVGL (2017a) memberikan Persamaan 2.8, untuk kondisi *sagging*, dan 2,9, untuk kondisi *hogging*.

$$M_W = -0,11K_m CL^2 B(C_b + 0,7) \dots\dots\dots(2.8)$$

$$M_W = -0,19K_m CL^2 BC_b \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

KM = Faktor distribusi

B = Lebar kapal (m)

L = Panjang Kapal (m)

C_b = Koefisien blok (≥ 0,6)

C = 10,75 – ((300 - L) / 100)1,5 untuk 90 ≤ L ≤ 300 m

= 10,75 untuk 300 ≤ L ≤ 350 m

= 10,75 – ((L - 350) / 150)1,5 untuk 350 ≤ L ≤ 500m

2.7 Modulus Penampang Kapal

Modulus penampang merupakan nilai perbandingan antara momen inersia penampang terhadap sumbu yang melalui titik berat penampang (sumbu netral) dengan jarak terjauh dari ujung penampang ke titik berat penampang tersebut. Dalam perhitungan modulus penampang melintang kapal, harus terlebih dahulu diketahui momen inersia total dari penampang tersebut, sehingga perlu dihitung momen inersia pada setiap penampang melintang atau elemen- elemen konstruksi (momen inersia pribadi). Modulus penampang dapat dihitung dengan Persamaan 2.10.

$$W = \frac{I}{Z} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana:

W = Modulus penampang (m³)

I = Momen inersia total (m⁴)

Z = Jarak terjauh dari sumbu netral ke bagian konstruksi (m)

Adapun modulus penampang (W) untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu penampang bagian *deck* dengan Persamaan 2.11, dan penampang bagian *bottom* dengan Persamaan 2.12.

$$W_d = \frac{I}{z_d} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$W_b = \frac{I}{z_b} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

W_d = Modulus penampang *deck* (m^3)

W_b = Modulus penampang *bottom* (m^3)

I = Momen inersia (m^4)

z_d = Jarak sumbu netral potongan penampang kapal ke *deck* (m)

z_b = Jarak sumbu netral potongan penampang kapal ke *bottom* (m)

2.8 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

$$\delta l = \varepsilon \cdot l = \frac{\sigma \cdot l}{E} = \frac{PI}{AE} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

σ = Tegangan yang timbul pada material (N/m²)

ε = Regangan yang timbul pada material (N/m²)

P = Beban atau gaya yang bekerja pada material (KN/m²)

A = Luas penampang material (m²)

E = Modulus elastisitas material (N/m²)

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.

2.9 Peraturan Terkait Ukuran Ruang Muat (*Cargo Holds*)

Panjang dari setiap ruang muat pada kapal *double-hull tanker* tidak boleh melebihi 10 m, atau salah satu dari nilai berikut dimana :

- Dimana tidak terdapat sekat memanjang dalam ruang muat

$$l = (0,5 \frac{b_i}{B} + 0.15 L) \dots\dots\dots (2.14)$$

tapi tidak melewati dari 0,2 L; atau

- Dimana terdapat sekat memanjang ditengah, dalam ruang muat

$$l = (0,25 \frac{b_i}{B} + 0.15 L) \dots\dots\dots (2.15)$$

atau

- Dimana terdapat dua, atau lebih sekat memanjang dalam ruang muat
 - Untuk ruang muat dibagian sayap (sisi)

$$l = 0,2 L \dots\dots\dots (2.16)$$

- Untuk ruang muat dibagian tengah (*center*) jika

$$\frac{b_i}{B} \geq 1,5, l = 0,2L \dots\dots\dots (2.17)$$

(Marine safety. 2004)

2.10 Kekuatan Batas Kapal *Tanker* (*Ultimate Strength*)

Kekuatan batas (*ultimate strength*) adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami keruntuhan (*collapse*) total (Huges & Paik, 2010). Perhitungan kekuatan- batas kapal *tanker* (M_U) 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*) FEA dan harus memenuhi kriteria Persamaan 2.18 dari DNVGL, 2017b.

$$M_T \leq \frac{M_U}{\gamma_r} \dots\dots\dots (2.18)$$

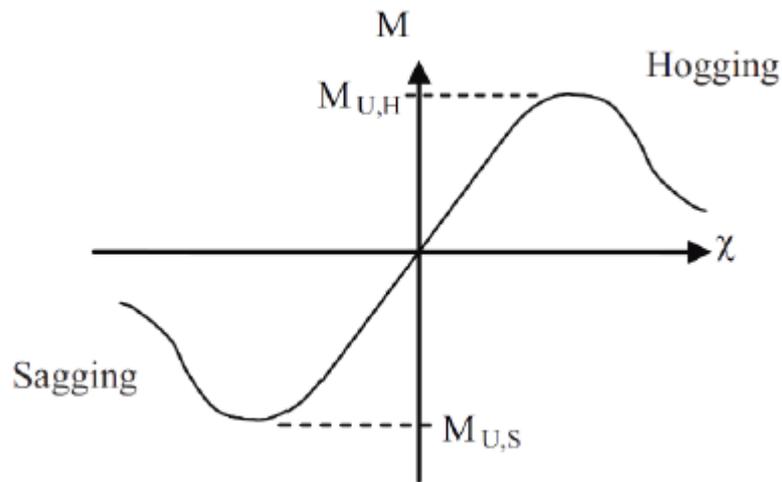
Dimana :

M_T = Momen lentur total vertikal (N.mm)

M_U = Moment maksimum kekuatan batas (N.mm)

γ_r = Faktor keamanan kekuatan-batas lentur vertikal
kondisi sagging = 1,1 dan kondisi hogging = 1,21

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.16. Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.



(Sumber : BKI Vol 2, 2020)

Gambar 2.9 Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan

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*.

Adapun kekuatan-batas akibat momen lentur untuk kapal dapat dihitung dengan Persamaan berikut:

$$M_{us} = S_d \sigma_{ud} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$M_{uh} = S_d \sigma_{ub} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana:

M_{us} = Kekuatan-batas momen lentur kondisi *sagging* (N.mm)

M_{UH} = Kekuatan-batas momen lentur kondisi *hogging* (N.mm)

σ_{ud} = Tegangan tekan batas *deck* (N/mm²)

σ_{ub} = Tegangan tekan batas *bottom* (N/mm²)

2.11 Metode Untuk Analisa Kekuatan

Ada beberapa metode yang biasa digunakan dalam menyelesaikan masalah tentang kekuatan kapal, yakni Metode *Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA)*, Metode Smith, dll, Adapun yang akan digunakan pada penelitian kali ini adalah metode *NLFEA*.

Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA), adalah metode elemen hingga yang digunakan dan direkomendasikan oleh badan klasifikasi tidak hanya nasional, tetapi juga internasional untuk menghitung kekuatan struktur kapal, disamping metode lainnya seperti teori balok, metode *presumed stress distribution*. (Hughes dan Paik (2010).

Metode Elemen Hingga (FEM) telah berkembang pesat dalam analisis struktur mulai dari yang sederhana sampai yang lebih kompleks. Analisis kekuatan kapal dengan Metode Elemen Hingga memberi kontribusi yang sangat besar karena dapat memberi informasi yang lebih detail perihal perilaku struktur kapal sebelum dan sesudah mengalami pembebanan. Detail struktur ini berupa distribusi tegangan, deformasi dan sebagainya yang ditampilkan dalam bentuk tiga dimensi sehingga memberi informasi apakah perilaku tersebut sesuai kondisi nyata. (Muis Alie, et al., 2019)

Metode Elemen Hingga menggunakan formulasi integral untuk membentuk sebuah sistem dari persamaan aljabar. Lebih lanjut, sebuah pendekatan fungsi menerus diasumsikan untuk menggambarkan solusi untuk setiap elemen. Solusi lengkap ini kemudian diturunkan dengan menghubungkan atau membentuk solusi individu, kemudian diteruskan

untuk menghasilkan kontinuitas dengan syarat inkremental. Adapun langkah-langkah dasar dalam metode elemen hingga adalah :

A. Fase *Preprocessing*

1. Membuat dan mendiskritisasi domain solusi ke dalam elemen hingga; yaitu membagi masalah ke dalam titik (*node*) dan elemen.
2. Mengasumsikan sebuah fungsi bentuk untuk merepresentasikan perilaku fisik dari sebuah elemen; yaitu sebuah pendekatan fungsi kontinu diasumsikan untuk merepresentasikan solusi dari sebuah elemen.
3. Membentuk persamaan untuk elemen.
4. Membentuk elemen untuk merepresentasikan seluruh masalah. Membentuk matriks kekakuan global.
5. Menerapkan kondisi syarat batas, kondisi awal dan pembebanan.

B. Fase Solusi

6. Menyelesaikan sebuah persamaan aljabar linear atau *nonlinear* secara simultan untuk memperoleh hasil nodal titik (*node*) seperti nilai perpindahan pada titik-titik yang berbeda atau nilai temperatur pada titik-titik yang berbeda di dalam permasalahan perpindahan panas.

C. Fase *Postprocessing*

7. Memperoleh informasi penting lainnya. Pada tahap ini, merupakan opsi yang mana lebih ditekankan pada nilai-nilai tegangan utama, aliran panas dan lain sebagainya.

Adapun beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan metode NLFEA kali ini yakni:

1. Algoritma *Iterative Solution*

Tiga jenis algoritma *iterative solution* yang dapat digunakan pada metode NLFEA adalah algoritma Newton-Raphson, algoritma quasi Newton-Raphson dan algoritma risiko. 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*.

2. Metode *Arc-Length*

Metode *arc-length* cocok untuk solusi kesetimbangan statis *nonlinier* masalah tidak stabil. Penerapan metode busur-panjang melibatkan penelusuran jalur yang kompleks dalam respon beban-perpindahan ke dalam sistem *buckling/post buckling*. Metode *arc-length* menggunakan metode Crisfield untuk mencegah fluktuasi ukuran langkah selama iterasi ekuilibrium. Diasumsikan bahwa semua besaran beban dapat dikontrol oleh parameter skalar tunggal (yaitu, total *load factor*).

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*.

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 mengondisikan 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.

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*.

8. Tipe elemen

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

SHELL 181 adalah elemen material yang tepat untuk menganalisis struktur *shell* yang tipis hingga sedang. Elemen ini diterapkan dengan 4 *node* dengan 6 derajat kebebasan disetiap *node*, translasi arah x, y, dan z, serta rotasi x, y, dan z.

SHELL 181 sangat cocok untuk linear, rotasi besar, dan/atau aplikasi *nonlinear strain* besar. Perubahan ketebalan *shell* dicatat pada *nonlinear* analisis. Terdapat efek pengikat (beban kekakuan) dari tekanan terdistribusi.

SHELL181 dapat digunakan untuk aplikasi berlapis untuk pemodelan *shell* komposit atau konstruksi berlapis. Akurasi dalam pemodelan *shell* komposit diatur oleh teori *shear-deformation* orde pertama (biasanya disebut sebagai teori *shell* Mindlin-Reissner).