

ANALISA KEKUATAN *CHEMICAL TANKER*

SKRIPSI

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

Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin



OLEH:

ALFRED MICHAEL PADAUNAN

D321 15 501

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2022

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI
ANALISA KEKUATAN *CHEMICAL TANKER*

Disusun dan diajukan oleh

ALFRED MICHAEL PADAUNAN

D32115501

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal July 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

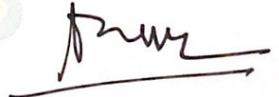
Menyetujui

Pembimbing utama,

Pembimbing Pendamping,



Muh.Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D
NIP.197506082005011003



Ir. H. Juswan, MT.
NIP. 196212311989031031

Ketua Program Studi



Dr. Ir. Chairul Paotonan, S.T., M.T.
NIP.197506052002121003

PERNYATAAN KEASLIAN SKripsi

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : ALFRED MICHAEL PADAUNAN
Nomor Mahasiswa : D32115501
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

"ANALISA KEKUATAN CHEMICAL TANKER"

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

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

Gowa, July 2022

Yang menyatakan,

Alfred Michael Padaunan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan yang maha esa atas segala karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini serta atas kehendaknya lah penulis dapat mengatasi segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi yang berjudul:

“ANALISA KEKUATAN *CHEMICAL TANKER*”

Terimakasih untuk Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D** dan Bapak **Ir. Juswan, MT.** selaku dosen pembimbing yang ditengah-tengah kesibukan, beliau telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga untuk memberikan bimbingan dari awal penelitian hingga terselesaikannya penelitian dan penulisan Skripsi ini.

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Drs Yulius Padaunan** dan Ibu **Jeny bamba, SE.** Serta **Yessy Padaunan, ST.** merupakan dukungan yang selalu menguatkan penulis untuk setiap tahapan penelitian dan penulisan skripsi ini hingga dapat terselesaikan. Dan juga dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih pada pihak-pihak lainnya yang telah membantu terselesaikannya penelitian dan penulisan skripsi ini, terutama kepada:

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D** selaku ketua labo Osarel dan pembimbing selama pengerjaan tugas akhir.
2. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, S.T., M.T.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan.
3. Ibu **Dr. Hasdinar Umar, ST., MT.** selaku Penasehat Akademik (PA) selama penulis menjadi mahasiswa Teknik Kelautan.
4. **Seluruh dosen pengajar Departemen Teknik Kelautan** Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmunya

5. **Seluruh staff tata usaha Departemen Teknik Kelautan** Universitas Hasanuddin atas bantuannya selama penulis menjalankan studi hingga menyelesaikan skripsi ini.
6. **Kevin Pangalinan, ST. , Arlinda Verawati Lukman, ST. , Zulfikar, ST. , Renaldy Yusuf, ST.** Yang banyak memberi motivasi, semangat, saran dan ide – ide selama pengerjaan tugas akhir.
7. **Muhammad Teguh perdana andalan, ST. , Adriany Phady, ST. , Indah Melati Suci, ST.** Yang memberikan ide -ide yang membantu penulis menyelesaikan tugas akhir ini.
8. **Teman-Teman Teknik Kelautan Angkatan 2015,** atas segala dukungannya yang sama-sama berjuang untuk menyelesaikan studi.
9. **Rekan – rekan labo osarel** atas segala dukungannya yang sama-sama berjuang untuk menyelesaikan studi.
10. **Teman ngopi (pertek blok e 18)** terima kasih sudah menemani penulis selama 3 tahun 48 bulan ini.
11. Serta seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih atas seluruh bantuan moril maupun materil yang telah diberikan.

Semoga tuhan melimpahkan rahmat dan berkat serta membalas kebaikan kepada semua pihak yang telah membantu. Akhir kata, tidak ada gading sempurna yang tidak retak. Semoga skripsi yang masih jauh dari sempurna ini dapat bermanfaat dan dapat menambah pengetahuan bagi semua pihak yang membutuhkan.

Gowa, July 2022

Alfred Michael Padaunan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR NOTASI	x
DAFTAR TABEL.....	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
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 KAPAL TANKER.....	4
2.2 <i>Single Hull Tanker</i>	6
2.3 <i>Double Hull Tanker</i>	8
2.4 Kekuatan Struktur Kapal	10
2.5 Beban Longitudinal	13
2.6 Beban Melintang.....	14
2.7 Beban Lokal	15
2.8 Momen Lentur Batas Vertikal.....	15

2.9	Momen Lentur-Batas pada Air Tenang	17
2.10	Momen Lentur-Batas Akibat Gelombang.....	19
2.11	Kombinasi Beban	20
2.12	Tegangan Ijin.....	21
2.13	Kekuatan Batas Struktur Kapal (<i>Ultimate Strength</i>).....	21
2.14	Metode <i>NLFEA</i>	24
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1	Jenis Penelitian.....	29
3.2	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	29
3.3	Penyajian Data	29
3.4	Metode Pengambilan Data.....	31
3.5	Alur Penelitian	31
3.6	Diagram Alir	32
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1	Pemodelan struktur	34
4.2	Perhitungan Momen Lentur Batas Vertikal	35
4.3	Tegangan Izin	36
4.4	Tegangan <i>Chemical Tanker</i> Pada Saat Kondisi <i>Hogging</i>	37
4.5	Kekuatan Batas Momen Vertikal <i>Chemical Tanker</i> Untuk pada Kondisi <i>Hogging</i>	38
4.6	Tegangan Kerja <i>Chemical Tanker</i> Sekat pada saat kondisi <i>Sagging</i>	42
4.7	Kekuatan Batas Momen Vertikal <i>Chemical Tanker</i> Untuk pada Kondisi <i>Sagging</i>	43
4.8	Pembahasan.....	47
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	50

5.1	Kesimpulan	50
5.2	Saran.....	50
	Daftar Pustaka	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Oil tanker.</i>	5
Gambar 2.2 <i>Chemical tanker.</i>	6
Gambar 2.3 <i>LNG tanker.</i>	6
Gambar 2.4 Penampang <i>midship single</i> dan <i>double hull tanker.</i>	7
Gambar 2.5 Struktur utama batang <i>single hull tanker.</i>	8
Gambar 2.6 Tipe kapal <i>tanker.</i>	9
Gambar 2.7 Struktur Utama Batang <i>Chemical Tanker.</i>	10
Gambar 2.8 Perubahan momen lentur pada tongkang persegi panjang kondisi air tenang.	12
Gambar 2.9 Momen lentur gelombang pada gelombang reguler.	12
Gambar 2.10 Deformasi karena beban melintang.	15
Gambar 2.11 Asumsi caldwell mengenai distribusi tegangan lentur pada kondisi batas <i>ultimate</i> di bawah momen lentur vertikal.	16
Gambar 2.12 Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal.	17
Gambar 2.13 Momen lentur ketika air tenang dan bergelombang.	18
Gambar 2.14 Faktor distribusi K_m .	19
Gambar 2.15 Momen lentur vertikal akibat gelombang.	20
Gambar 2.16 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan.	23
Gambar 3.1 Konstruksi Penampang <i>Midhship Chemical Tanker.</i>	30
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian.	33
Gambar 4.1 <i>Mesh</i> model <i>midship chemical tanker.</i>	34

Gambar 4.2 Kondisi batas <i>chemical tanker</i> .	35
Gambar 4.3 Perilaku dan distribusi tegangan pada kondisi <i>hogging</i> .	37
Gambar 4.4 Grafik momen pada kondisi <i>hogging</i> .	39
Gambar 4.5 Deformasi struktur pada kekuatan batas.	40
Gambar 4.6 Deformasi struktur pada saat <i>collapse</i> .	41
Gambar 4.7 Perilaku struktur akibat <i>sagging</i> .	43
Gambar 4.8 Grafik Momen pada Kondisi <i>sagging</i> .	44
Gambar 4.9 Deformasi struktur pada kekuatan batas.	45
Gambar 4.10 Deformasi struktur pada saat <i>collapse</i> .	46
Gambar 4.11 Grafik momen kelengkungan <i>chemical tanker</i> .	48

DAFTAR NOTASI

B	=Lebar kapal	(m)
Bx	=Gaya apung	(N)
C	=Koefisien momen lentur	
Cb	=Koefisien blok kapal	
H	=Tinggi kapal	(m)
E	=Modulus elastisitas	(N/mm ²)
Fx	=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(x)	=Momen lentur di lokasi X	(Nmm)
M	=Momen	(Nmm)
M _{sw}	=Momen lentur pada air tenang	(Nmm)
M _t	=Momen lentur- batas total	(Nmm)
M _U	=Kekuatan batas kapal	(Nmm)
M _w	=Momen lentur akibat gelombang	(Nmm)
S	=Modulus penampang	(m ³)
Sb	=Modulus penampang bagian bottom	(m ³)
Sd	=Modulus penampang bagian deck	(m ³)

S_p	=Modulus penampang ijin	(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)
z_b	=Jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur bottom	(m)
z_d	=Jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur deck	(m)
σ	=Tegangan lentur	(N/mm^2)
σ_{max}	=Tegangan lentur maksimum	(N/mm^2)
σ_p	=Tegangan lentur ijin	(N/mm^2)
γ_r	=Faktor keamanan	

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Konfigurasi ukuran <i>stiffener</i> .	31
Tabel 4.1 Momen lentur batas kondisi <i>hogging</i> .	36
Tabel 4.2 Momen lentur batas kondisi <i>sagging</i> .	36
Tabel 4.3 Tegangan izin.	36
Tabel 4.4 Rekapitulasi tegangan kerja arah z <i>chemical tanker</i> pada kondisi <i>hogging</i> .	38
Tabel 4.5 Kekuatan batas pada kondisi <i>hogging</i> .	39
Tabel 4.6 Rekapitulasi tegangan kerja kondisi <i>ultimate</i> .	41
Tabel 4.7 Rekapitulasi tegangan kerja <i>chemichal tanker</i> kondisi <i>collapse</i> .	42
Tabel 4.8 Rekapitulasi tegangan kerja pada kondisi <i>sagging</i> .	43
Tabel 4.9 Kekuatan batas pada kondisi <i>sagging</i> .	45
Tabel 4.10 Rekapitulasi tegangan kerja kondisi <i>ultimate</i> .	46
Tabel 4.11 Rekapitulasi tegangan kerja <i>chemichal tanker</i> kondisi <i>collapse</i> .	47

ABSTRAK

ALFRED MICHAEL PADAUNAN. ANALISA KEKUATAN *CHEMICAL TANKER* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Juswan**)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa kekuatan *chemical tanker*. Pemodelan dilakukan pada bagian *midship* dengan satu jarak gading menggunakan Metode *Nonlinear Finite Element Analysis* (NLFEA). Tipe elemen *shell* 181 serta *mesh* 300 mm dengan menerapkan *arc-length method* untuk memperoleh kurva hubungan momen-curvature. Ketidakterselesaian awal, retak dan tegangan sisa pengelasan diabaikan. Hasil yang diperoleh dengan menggunakan metode NLFEA menunjukkan deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh luas penampang dan momen lentur. Untuk nilai kekuatan batas kondisi *Hogging* yaitu $4,117 \times 10^{12}$ Nmm dan pada kondisi *sagging* yaitu $- 4,211 \times 10^{12}$ Nmm.

Kata kunci: *Chemical tanker, luas penampang, NLFEA, kekuatan batas.*

ABSTRACT

ALFRED MICHAEL PADAUNAN. *The Ultimate Strength Analysis of Chemical tanker (Supervised by Muhammad Zubair Muis Alie and Juswan)*

The objective of the present study is to analyze the ultimate strength of chemical tanker. Midship section is modeled with one frame space by using Non Linear Finite element Analysis (NLFEA) method. The element type is use shell 181, with mesh 300 mm and the arc-length method is applied to obtain the moment-curvature curve relationship. Initial deflection, crack and residual stress are neglected. The results obtained using NLFEA method show that deformation is influenced by the cross-section area and bending moment. The ultimate strength in hogging condition is 4.117×10^{12} Nmm and sagging condition -4.211×10^{12} Nmm.

Keywords: Chemical tanker, cross section, NLFEA, ultimate strength.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Indonesia adalah negara maritim, yang memiliki wilayah laut yang luas, sekitar 2/3 dari luas wilayahnya. Dengan luas wilayah lautan yang besar Indonesia memiliki sumber daya alam yang melimpah berupa hasil-hasil tambang.

Dengan potensi sumber daya alam yang besar, tentunya diperlukan struktur untuk mendistribusikan sumber daya tersebut, Kapal merupakan salah satu struktur yang di gunakan untuk mendistribusikan hasil bumi, diantara hasil bumi tersebut terdapat muatan berupa *oil*, gas, dan bahan-bahan kimia, yang di angkut dengan kapal tanker. Terdapat 2 jenis kapal tanker yaitu *single hull tanker* dan *double hull tanker*, *double hull tanker* memiliki *double bottom* dan *double side*, sedangkan *single hull tanker* hanya memiliki satu. Karena memiliki dua lapis struktur kedap air, kapal *double hull tanker* dapat mengurangi resiko polusi yang di akibatkan kebocoran kapal.

Oleh karena tidak efektifnya Undang-undang Polusi Minyak tahun 1990 (OPA 90) mengenai pencegahan polusi lingkungan yang disebabkan oleh kapal, maka *International Maritime Organization* (IMO) mengambil tindakan dan menetapkan standar *double hull* pada tahun 1992 dalam *International Convention for the Prevention of the the Pollution from Ships* (MARPOL). Akan tetapi tidak dapat dipungkiri kapal *single hull tanker* masih ada namun sudah jarang digunakan di masa sekarang.

Chemical tanker merupakan struktur yang di gunakan untuk mengangkut bahan kimia. Kapal *chemical tanker* memiliki tantangan

keamanan tambahan karena muatan kapal menimbulkan risiko kebakaran, ledakan, keracunan dan pencemaran lingkungan [1] .

Salah satu aspek terpenting dalam desain struktural adalah untuk menganalisis kemampuan struktur dalam memenuhi tujuan dari desain termasuk bahwa struktur tidak akan gagal dalam kondisi aktivitas apapun. Sebuah struktur mungkin gagal dalam beroperasi karena beberapa kasus seperti lingkungan yang ekstrim, kelebihan beban dari kapasitas struktural dan faktor-faktor lainnya [2]. Sejumlah insiden kecelakaan kapal yang terjadi disebabkan oleh kekuatan batas pada bagian struktur kapal, hal tersebut meunjukkan 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 [3].

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.

Berdasarkan latar belakang diatas maka diperlukan analisa kekuatan pada *chemical tanker*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka penelitian ini difokuskan pada kekuatan membujur *chemical tanker* dalam kondisi hogging dan sagging.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini, sebagai berikut:

1. Pemodelan dilakukan pada bagian penampang *midship*.

2. Ketidak sempurnaan awal, retak dan cacat pengelasan diabaikan.
3. Kekuatan membujur kapal dihitung dalam satu jarak gading besar.
4. Analisa kekuatan menggunakan Metode *NLFEA*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan peneltian ini adalah untuk mengetahui kekuatan membujur *chemical tanker* dalam kondisi *hogging* dan *sagging*

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 dan Konstruksi kapal.
2. Bagi bidang industri, memberikan konstribusi kekuatan kapal *chemical tanker* kepada perusahaan-perusahaan yang hendak membuat atau membeli kapal *chemical Tanker*.

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. Jalur laut yang semakin padat dan kecepatan kapal menjadi lebih tinggi, maka ada kemungkinan potensi kecelakaan kapal yang disebabkan oleh kandas atau tubrukan dapat terjadi selama kapal beroperasi. Saat kapal mengalami tubrukan atau kandas, penetrasi pada bagian sisi dan bawah kapal dapat mengalami kerugian ekonomi dan potensi kerusakan lingkungan yang parah.

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

Lambung kapal adalah struktur panel kaku yang sangat rumit terdiri dari komponen struktur seperti *deck*, *bottom*, *side*, sekat, rangka melintang dan memanjang. Meskipun analisis FE nonlinier diterima secara luas sebagai alat yang andal untuk penyelidikan perilaku struktural nonlinier, aplikasi untuk analisis keruntuhan progresif lambung kapal girder masih sangat

terbatas karena banyaknya permintaan pada sumber daya komputer dan tenaga kerja.

Kapal *tanker* adalah kapal yang menetapkan standar keselamatan yang sangat tinggi mengingat muatan yang dibawanya sangat berbahaya. Berikut Jenis-jenis kapal tanker dibagi berdasarkan muatan.

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 :



Gambar 2.1 *Oil tanker* [19].

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.



Gambar 2.2 *Chemical tanker* [19].

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 (LNG)* dapat dilihat pada gambar 2.3



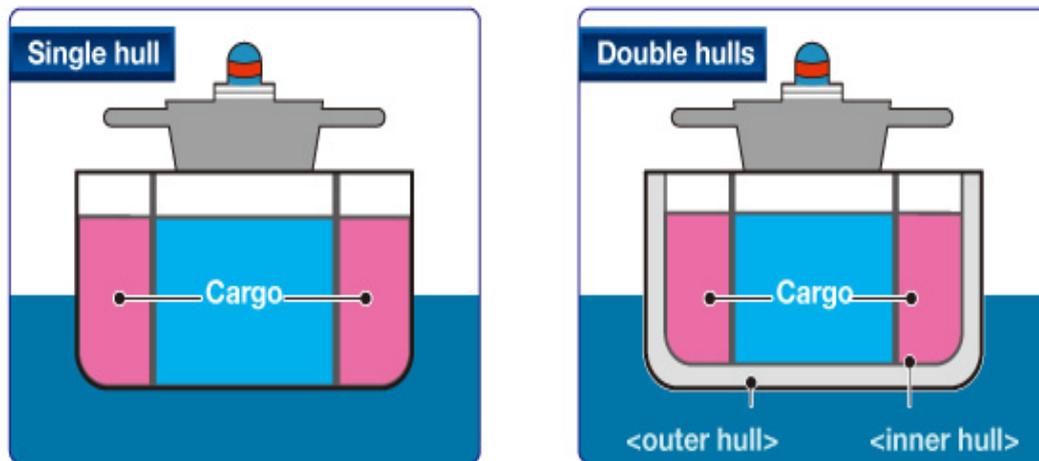
Gambar 2.3 *LNG tanker* [19].

2.2 *Single Hull Tanker*

Kapal *tanker* lambung tunggal (*single hull*) memiliki satu lambung dan membawa minyak langsung di dalam struktur lambung. Beberapa kapal

single hull tanker membawa minyak dan air pemberat (*ballast*) di dalam tangki yang sama sedangkan beberapa *single hull tanker* memiliki tangki *ballast* terpisah di dalam lambung kapal (misalnya minyak dibawa langsung ke dalam lambung kapal, tetapi tangki *ballast* dipisahkan dari muatan) ditunjukkan pada Gambar 2.4 (a).

Pada Gambar 2.5 dapat dilihat konstruksi memanjang pada *single hull tanker* dengan pemisahan muatan dan tangki *ballast*. Tangki pemberat (*Ballast Tank*) yang terpisah masih bisa terlindungi dari laut oleh satu lambung. Agar tumpahan minyak tidak terjadi dari kapal *Tanker Single Hull*, maka hanya lambung tunggal yang harus terobos [4].



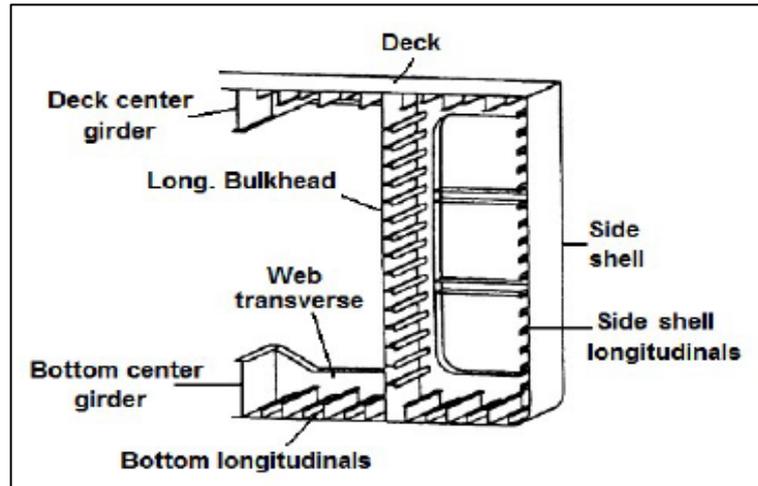
(a) *Single hull tanker*

(b) *Double hull tanker*

Gambar 2.4 Penampang midship single dan double hull tanker [21].

Beberapa kapal hanya memiliki dasar ganda (*double bottom*) atau sisi ganda (*double side*). Sebelum pertengahan 1990-an, sebagian besar *Tanker* non-lambung tunggal (*single hull*) adalah kapal yang membawa cairan dan kargo kering dalam jumlah besar.

mengikuti peraturan yang diberlakukan pada 1990an semua kapal yang mengangkut minyak dalam jumlah besar harus memiliki dasar ganda pada tahun 2010 [4].



Gambar 2.5 Struktur utama batang kapal single hull tanker [5].

2.3 Double Hull Tanker

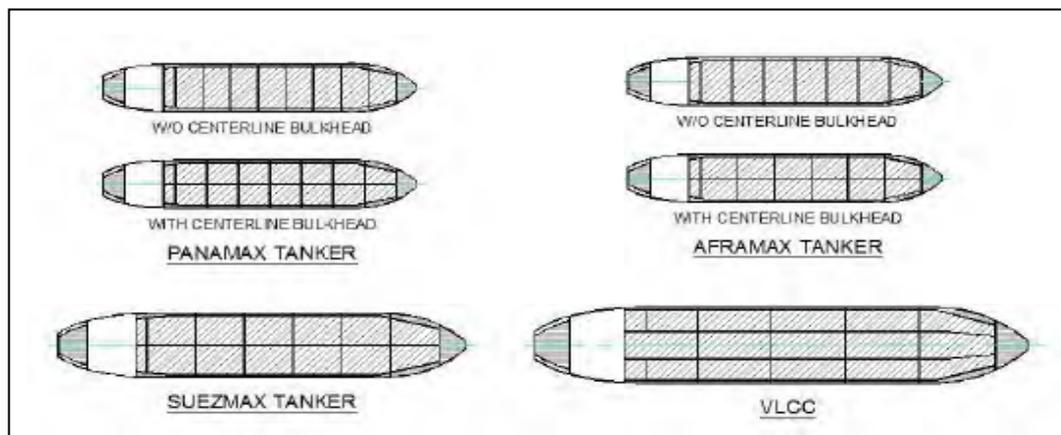
Kemampuan kapal lambung ganda (*double hull*) untuk mencegah atau mengurangi tumpahan minyak menyebabkan standarisasi kapal jenis lain termasuk kapal *Tanker* minyak oleh *Konvensi Internasional* atau *Konvensi MARPOL* untuk Pencegahan Polusi dari Kapal. Lambung ganda (*double hull*) tidak melindungi terhadap tabrakan atau pendaratan yang menyebabkan sebagian besar polusi minyak, meskipun ini menjadi alasan bahwa lambung ganda diamanatkan oleh undang-undang Amerika Serikat.

Semua kapal *tanker* yang dibangun sejak tahun 1990 adalah konstruksi lambung ganda. Gambar 2.6 menunjukkan pengaturan tangki khas untuk kapal tangki lambung ganda. Lebar tangki berkisar dari 2,0 meter untuk *tanker* ukuran Panamax hingga 3,0 hingga 4,0 meter untuk VLCC's. Ketinggian dasar ganda umumnya sebanding dengan lebar tangki.

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

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

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

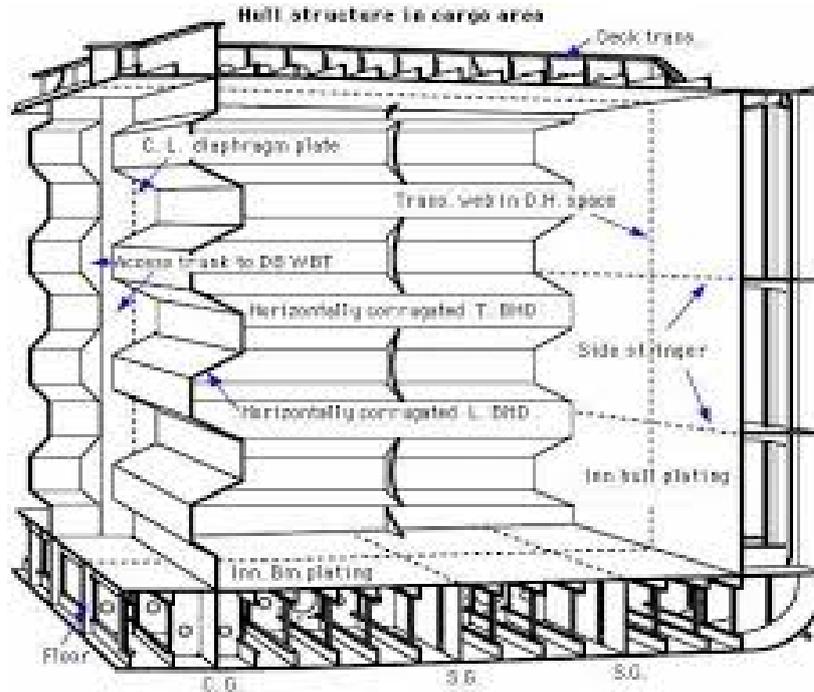


Gambar 2.6 Tipe kapal *tanker* [20].

Kapal *chemical tanker* umumnya telah 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* mungkin lebih rendah kerusakan ambang sisi yang berkelanjutan pada saat bertabrakan [4].

Pada Gambar 2.7 penampang *midship double hull tanker* yang di potong melintang. dapat diperhatikan konstruksi *double hull tanker* memiliki

double bottom dimana terdapat *bottom* dan *inner bottom* dan *double side* dimana terdapat *side* dan *inner side*.



Gambar 2.7 Struktur utama batang *chemical tanker* [5].

2.4 Kekuatan Struktur Kapal

Salah satu kriteria terpenting dalam desain kapal adalah kekuatan. Ketika sebuah kapal berada di bawah beban eksternal seperti gelombang, daya apung atau tekanan, reaksi internalnya harus menahan beban eksternal tersebut. Dalam hal ini, beban luar ditahan oleh lambung kapal, yang penampangnya terdiri dari pelat dan *stiffner*, yang memiliki pengaruh signifikan terhadap *ultimate strenght*, terutama dalam arah memanjang [6].

Kekuatan longitudinal lambung kapal dievaluasi berdasarkan momen lentur dan gaya geser yang bekerja pada kapal. Mengingat sebuah kapal sebagai balok (*Beam*) di bawah beban terdistribusi, gaya geser di lokasi X , $V(x)$, dapat dinyatakan sebagai

$$V(x) = \int_0^x (b(x) - w(x)) dx \quad (1)$$

Dimana $b(x)$ dan $w(x)$ menunjukkan masing-masing gaya apung dan berat pada lokasi (x) . Lentur momen di lokasi (x) , $M(x)$ adalah integral dari kurva geser.

$$M(x) = \int_0^x V(x) dx \quad (2)$$

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

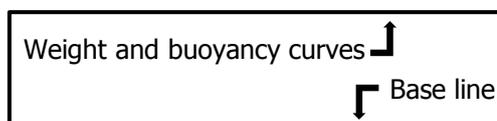
Jika tongkang dimuat di tengah (Gambar 2.8(c)), distribusi berat akan berubah dan kurva yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2.8(d). Perbedaan antara kurva berat dan daya apung menghasilkan distribusi momen lentur sepanjang kapal. Momen lentur ini dikenal sebagai momen lentur air tenang, M_s , seperti yang terlihat pada tongkang yang dimuat pada Gambar 2.8(e)[7].



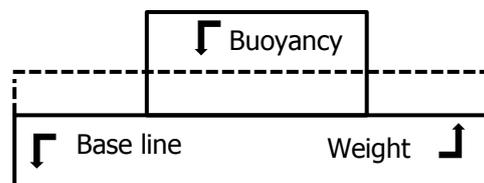
(a) Rectangular barge-unloaded



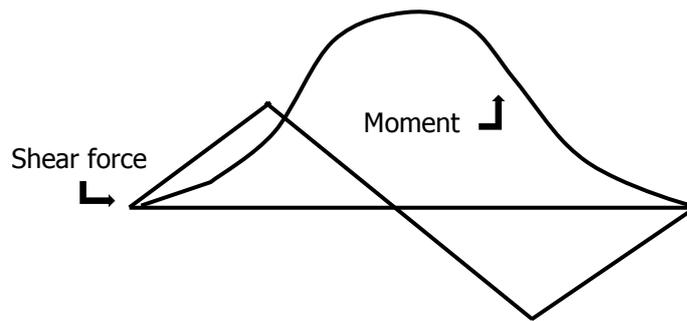
(b) Barge - half loaded



(c) Weight and buoyancy curves of unloaded barge

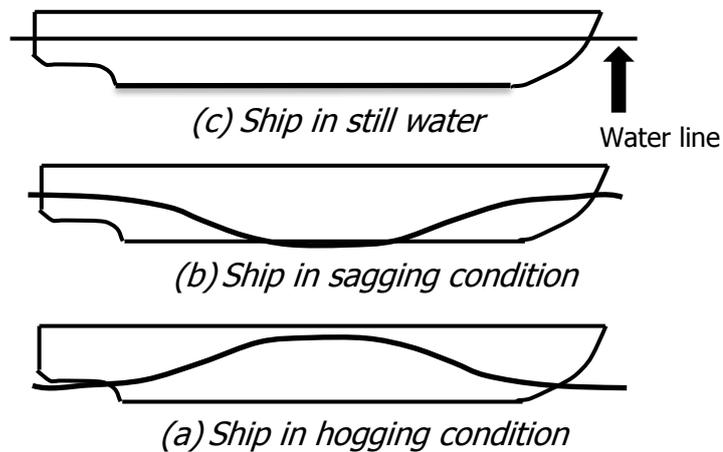


(d) Weight and buoyancy curves of loaded barge



(e) Still water shear force and bending moment curves of loaded barge

Gambar 2.8 Perubahan momen lentur pada tongkang persegi panjang kondisi air tenang [5].



Gambar 2.9 Momen lentur gelombang pada gelombang reguler [5].

Untuk kapal pada kondisi bergelombang, momen lentur dipisahkan menjadi dua istilah:

$$M = M_s + M_w \quad (3)$$

Dimana M_s menunjukkan momen lentur air tenang dan M_w menunjukkan momen lentur gelombang berurutan. Gambar 2.9 mengilustrasikan kapal pada gelombang sama dengan panjangnya.

Pada Gambar 2.9(c) menunjukkan kondisi air tenang dimana hanya momen lentur yang bekerja pada kapal adalah momen lentur kondisi air tenang itu sendiri.

Pada Gambar 2.9(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*, *deck* pada kapal mengalami tekan sedangkan bagian bawahnya mengalami tarik (*tension*).

Pada Gambar 2.9(a) 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 [7].

Kebanyakan aturan desain mengontrol kekuatan *hull girder* dengan menentukan properti bagian minimum yang diperlukan dari penampang *hull girder*. Properti bagian yang diperlukan dihitung berdasarkan pada beban *hull girder* dan tekanan maksimum *hull girder* untuk badan paralel *midship* (wilayah di mana penampang seragam).

2.5 Beban Longitudinal

Beban longitudinal adalah beban yang mempengaruhi kekuatan lambung kapal secara keseluruhan, dimana kapal dianggap sebagai *beam* atau *girder*, karena profilnya yang ramping. Mereka diwakili dalam hal momen lentur longitudinal, gaya geser dan momen torsi. Kekuatan beban longitudinal dapat dibagi menjadi dua kategori, beban longitudinal statis dan beban longitudinal dinamis.

Beban longitudinal statis disebabkan oleh ketidaksetaraan berat lokal dan daya apung dalam kondisi air tenang. Misalnya, perbedaan antara berat dan daya apung pada arah longitudinal menyebabkan momen lentur statis dan gaya geser statis, dan pembebanan muatan asimetris menyebabkan momen torsi statis.

Beban longitudinal yang dinamis diinduksi oleh gelombang. Saat kapal berada di atas puncak gelombang pada kondisi ekstrem, hal itu

menimbulkan momen lentur "*Hogging*" dan gaya geser dimana bagian *deck* mengalami tarik dan *bottom* mengalami tekan. Bila gelombang melalui momen lentur "*Sagging*" dan mengalami gaya geser dimana *deck* mengalami tekan dan *bottom* mengalami tarik. Beban ini bereaksi secara bergantian di atas *hull girder* saat gelombang berlangsung di sepanjang kapal. Pada kasus di mana kapal bertemu dengan gelombang yang miring dihasilkan momen puntir dinamis [8].

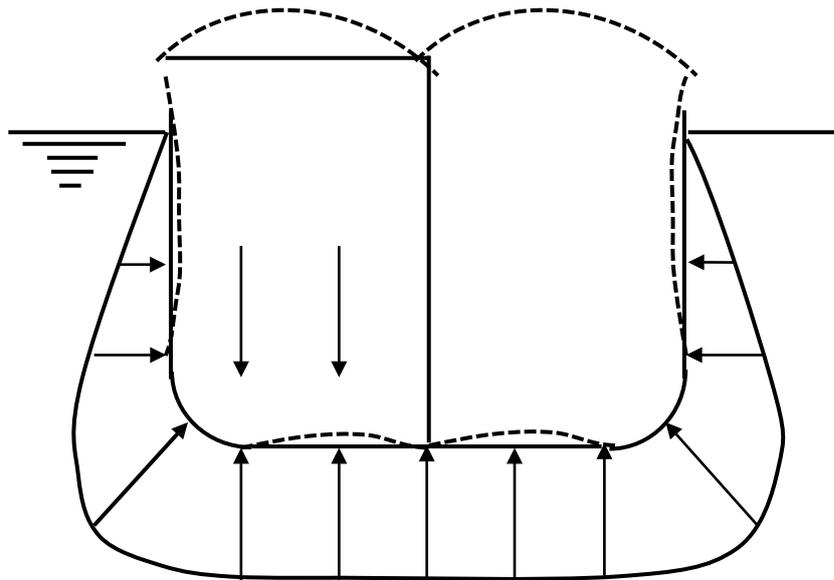
2.6 Beban Melintang

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

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

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

Momen lentur longitudinal atau gaya geser tidak akan berpengaruh pada distorsi penampang. Kekuatan beban melintang biasanya digunakan dalam kasus menyelidiki kekuatan batang utama, seperti cincin melintang, bingkai web melintang, dll [8].



Gambar 2.10 Deformasi karena beban melintang [8].

2.7 Beban Lokal

Beban lokal mencakup beban yang mempengaruhi batang kekuatan lokal seperti *panel shell*, *stiffener* dan penghubung konstruksi antara *stiffener* [8].

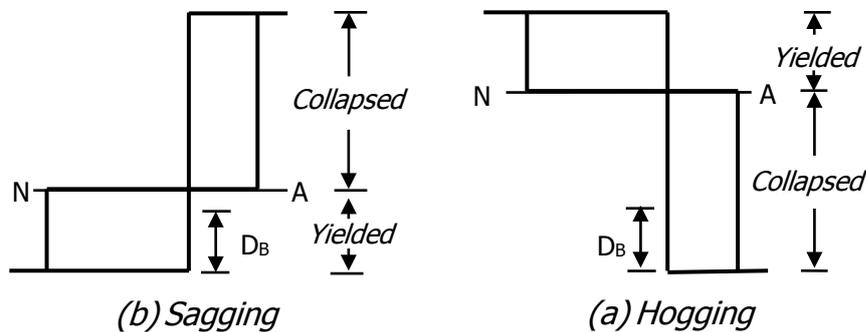
Kekuatan lokal batang struktur primer dan sekunder dievaluasi dengan menggunakan tekanan karena beban lokal, seperti tekanan lateral atau beban terkonsentrasi dan lain lain. Sekali lagi teori dasar balok Bernoulli-Euler digunakan saat menghitung tekanan atau defleksi untuk *stiffener* dan *girder*. Teori lempeng digunakan untuk pelat. Persamaan untuk tegangan dan defleksi, dengan menggunakan asumsi yang sama seperti teori dasar balok atau teori lempeng, dapat ditemukan dalam buku teks tentang kekuatan material, misalnya, oleh buku Timoshenko pada tahun 1956 [7].

2.8 Momen Lentur Batas Vertikal

Momen lentur-batas vertikal dalam analisa kekuatan struktur kapal terdiri dari beban pada air tenang (M_{sw}) untuk skenario pembebanan statis dan penjumlahan beban pada air tenang (M_{sw}) dan beban akibat gelombang (M_W) untuk skenario pembebanan statis dan dinamis [9].

Menjumlahkan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang untuk mendapatkan nilai ekstrim dari momen lentur-batas vertikal [10].

Menurut [11], mengasumsikan distribusi tegangan lentur di atas penampang lambung pada batasan ultimate di bawah momen lentur vertikal, seperti yang digambarkan pada Gambar 2.8, dimana seluruh material yang terkompresi telah mencapai kekuatan batas dengan tekuk dan semua material yang mengalami *tension* akan kalah. Momen lentur batas mengintegrasikan dengan asumsi tegangan lentur di atas penampang [11].



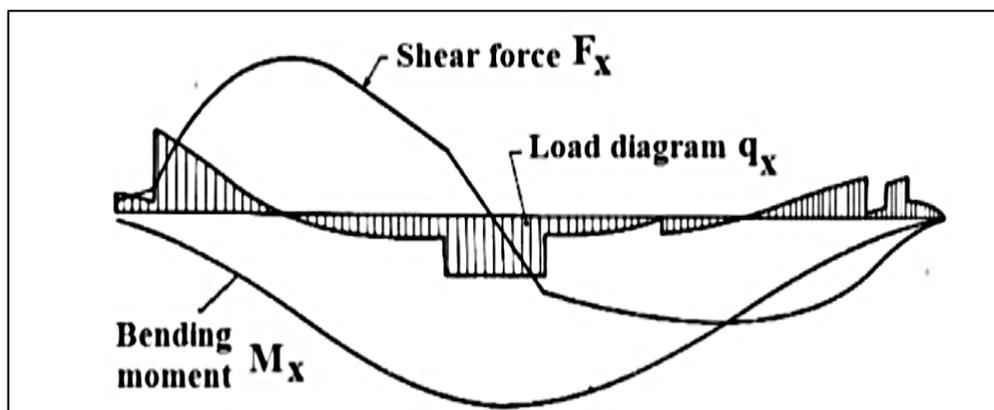
Gambar 2.11 Asumsi caldwell mengenai distribusi tegangan lentur pada kondisi batas *ultimate* di bawah momen lentur vertikal [11].

Berdasarkan studi eksperimental model kapal skala besar dan studi numerik kapal skala penuh diakui bahwa kehancuran keseluruhan dari lambung kapal ketika momen lentur vertikal terjadi karena runtuhnya *flange* yang tertekan, tetapi terdapat kekuatan cadangan setelah *flange* tertekan runtuh. Hal ini karena setelah *flange buckle* yang ditekan, sumbu netral dari penampang lambung bergerak ke arah *flange* yang ditahan (terjadi tegangan), dan peningkatan lebih lanjut dalam penerapan momen lentur dipertahankan sampai *flange* yang ditahan (terjadi tegangan) menjadi luluh. Pada tahap selanjutnya dari proses ini, struktur vertikal (misalnya, sekat longitudinal atau struktur shell samping) di sekitar *flange* terkompresi dan

flange yang ditegang mungkin juga gagal. Namun, di sekitar sumbu netral akhir, struktur vertikal biasanya tetap dalam keadaan elastis linier sampai runtuhnya keseluruhan gelagar lambung terjadi. Hal ini pada sifat geometrik dan material dari penampang lambung kapal, bagian ini tentu saja gagal, yang sesuai dengan anggapan [11].

2.9 Momen Lentur-Batas pada Air Tenang

Momen lentur dan gaya geser pada kondisi air tenang berasal dari gaya apung dan distribusi berat sepanjang panjang kapal seperti pada Gambar 2.9



Gambar 2.12 Distribusi beban, gaya geser dan momen lentur pada kapal [5].

Pengaruh momen lentur air tenang pada momen total ditunjukkan pada Gambar 2.9 Kapal dengan massa total dan draft air tenang, gelombang momen *sagging* dan *hogging* secara efektif konstan untuk gelombang tertentu. Jika momen air tenang diubah dengan memvariasikan distribusi massa momen total berubah dengan jumlah yang sama. Adapun momen lentur yang lebih besar terjadi pada *sagging* atau *hogging*, hal ini tergantung dari tipe kapal, antara lain koefisien blok. Apabila koefisien blok rendah, momen lentur *sagging* cenderung lebih besar dari *Hogging*, mengurangi perbedaan pada peningkatan koefisien blok [12].

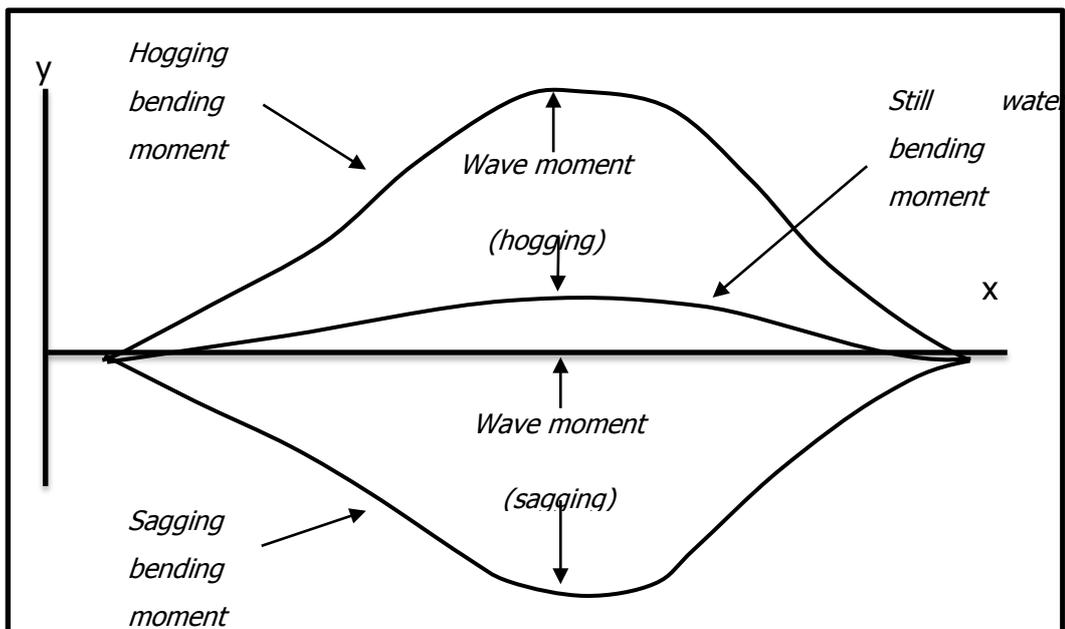
Berat dan gaya apung diasumsikan sebagai dan maka distribusi beban adalah

$$qx = b_x - w_x \quad (4)$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal adalah:

$$F(x) = \int (b_x - w_x) dx \quad (5)$$

$$M(x) = \int_0^x F(x) dx \quad (6)$$



Gambar 2.13 Momen lentur ketika air tenang dan bergelombang [12].

Menurut [13], memberikan formula besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang (M_{sw}) untuk panjang kapal lebih dari 90 m, sebagai berikut:

$$M_{sw} = 0.01K_m CL^2 B(11.9 - 1.9C_b) Kn - m, \text{ kondisi hogging} \quad (7)$$

$$M_{sw} = -0.05168K_m CL^2 B(C_b + 0.7) Kn - m, \text{ kondisi sagging} \quad (8)$$

Dimana,

K_m = Faktor distribusi seperti pada gambar 2.10

B = lebar kapal

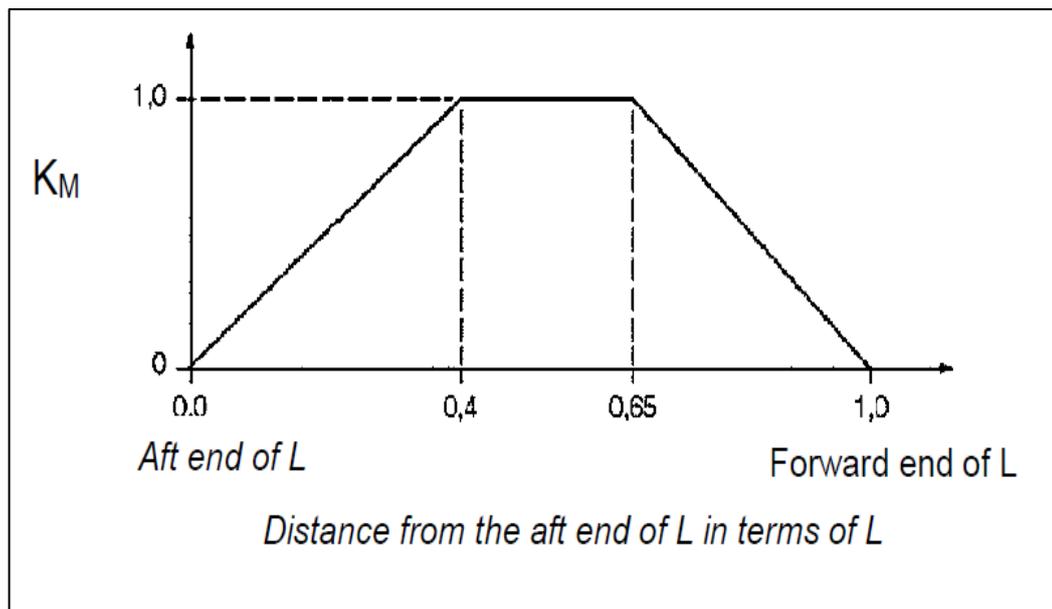
L = panjang kapal

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 (9)

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

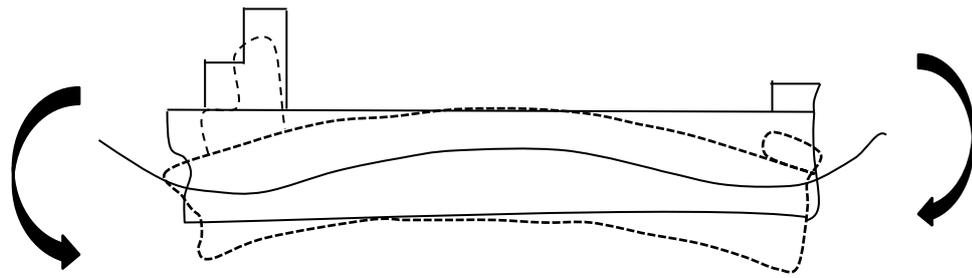
= $10,75 - [(L - 350)/150]^{1,5}$ untuk $350 \leq L \leq 500$ m (11)



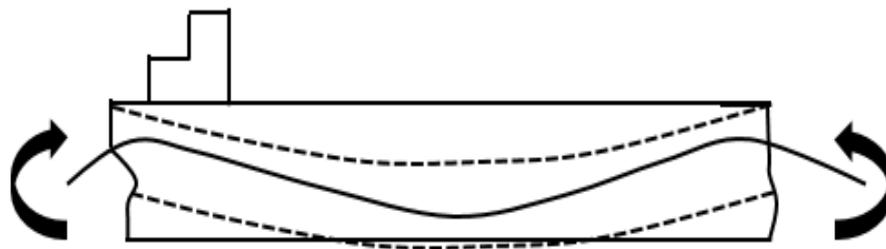
Gambar 2.14 Faktor distribusi K_m [13].

2.10 Momen Lentur-Batas Akibat Gelombang

Beban dinamis longitudinal diakibatkan oleh gelombang. Ketika kapal berada pada puncak gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *hogging* seperti Gambar 2.12 (a). Kapal saat berada di lembah gelombang, mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *sagging* seperti Gambar 2.12 (b).



(a) Hogging



(b) Sagging

Gambar 2.15 Momen lentur vertikal akibat gelombang [13].

[13], mengeluarkan rumus untuk memperkirakan besaran momen lentur-batas vertikal akibat gelombang (M_w) untuk panjang kapal lebih dari 90 m, sebagai berikut:

$$M_w = 0,19K_m CL^2 BC_b \cdot kN - m, \text{ kondisi } Hogging \quad (12)$$

$$M_w = -0,11K_m CL^2 B(C_b + 0,7)kN - m, \text{ kondisi } Sagging \quad (13)$$

Dimana, C dan K_m seperti pada Persamaan 8, 9 dan 10.

2.11 Kombinasi Beban

Kombinasi beban statis dan dinamis 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 [14].

$$M_t = M_{sw} + 1,2M_w \quad (14)$$

2.12 Tegangan Ijin

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

$$S_p = \frac{M_t}{\sigma_p} \times 10^3 \text{ m}^3 \quad (15)$$

Dimana S_p adalah modulus penampang ijin, M_t adalah momen lentur total, σ_p adalah tegangan lentur ijin sebesar $175/k$ (N/mm²) dengan nilai k sebesar 1,0 (*mild steel*), 0,93 (*Grade AH27*), 0,78 (*Grade AH32*), 0,72 (*Grade AH36*) dan 0,68 (*Grade AH40*).

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

$$I_{min} = 3CL^3B(C_b - 0,7)m^4 \quad (16)$$

2.13 Kekuatan Batas Struktur Kapal (*Ultimate Strength*)

Kekuatan struktur konstruksi merupakan salah satu aspek teknis yang turut mempengaruhi tingkat keselamatan kapal baik di kondisi laut yang tenang, bergelombang bahkan di atas dok. Struktur konstruksi kapal akan mengalami berbagai beban antara lain beban internal yang disebabkan oleh pembebanan yang ada di kapal dan beban eksternal seperti gelombang laut serta posisi kapal terhadap gelombang itu sendiri dan juga angin. Tolak ukur yang dapat menjamin kekuatan struktur kapal adalah tegangan (*stress*) [15].

Kekuatan *hull girder ultimate* didefinisikan sebagai kapasitas lentur maksimum balok lambung di luar lambung mana yang akan roboh. Caldwell

(1965) pertama kali mengusulkan metode rasional yang mempertimbangkan kedua beban dan efek pengaruhnya [16].

Kekuatan-batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total [11]. 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_t) harus dihitung dengan metode *NLFEA* atau metode *buckling* dan harus memenuhi kriteria seperti Persamaan 15 di bawah ini [14].

$$M_t \leq \frac{M_u}{\gamma_R} \quad (17)$$

Dimana M_u adalah momen lentur-batas total vertikal dan γ_R adalah faktor keamanan untuk kekuatan-batas lentur vertikal (1,21 untuk kondisi *Hogging*) dan (1,1 untuk kondisi *Sagging*) .

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.13 Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging*. Gambar 2.13 memiliki nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.

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

$$\sigma = \frac{M z}{I} \quad (18)$$

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:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{S} \quad (19)$$

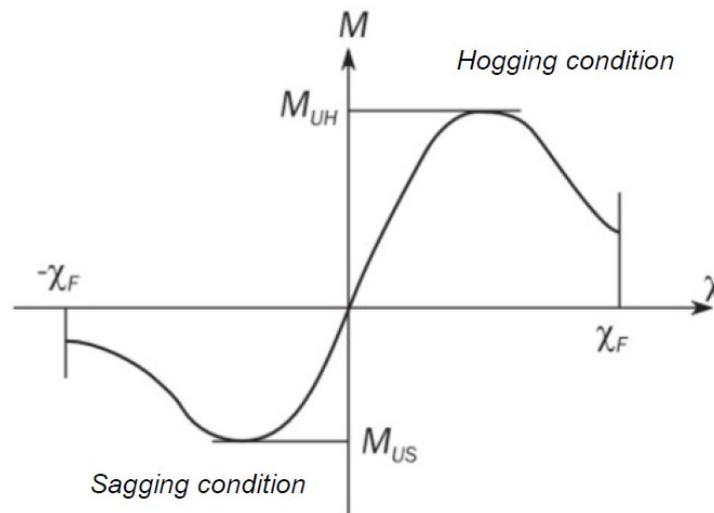
Dimana S adalah modulus penampang.

Modulus penampang (S) seperti pada Persamaan 18, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut:

$$S_d = \frac{I}{z_d}, \text{ untuk bagian } \textit{deck} \quad (20)$$

$$S_b = \frac{I}{z_b}, \text{ untuk bagian } \textit{bottom} \quad (21)$$

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*.



Gambar 2.16 Grafik kekuatan momen lentur dan kelengkungan [14].

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 20 dan 21 sebagai berikut:

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud}, \text{ untuk } \textit{deck} \quad (22)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub}, \text{ untuk } \textit{bottom} \quad (23)$$

2.14 Metode NLFEA

Finite Element Method (FEM) atau biasanya disebut *Finite Element Analysis* (FEA), adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*), seperti analisa tegangan pada struktur, frekuensi pribadi dan mode shape-nya, perpindahan panas, elektromagnetis, dan aliran fluida [17].

Metode ini digunakan pada masalah-masalah rekayasa dimana *exact solution/analytical solution* tidak dapat menyelesaikannya. Inti dari FEM adalah membagi suatu benda yang akan dianalisa, menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang tiap elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Proses pembagian benda menjadi beberapa bagian disebut *meshing*.

Permodelan *finite element analysis* untuk kekuatan batas kapal *hull girder* meliputi properti material, tipe element, ukuran *mesh*, panjang model dan kondisi batas. Kemudian pengaruh tegangan sisa pengelasan dan defleksi awal.

Secara potensial, hasil yang paling akurat mengenai penilaian *ultimate strength* dapat diperoleh dengan menggunakan analisis NLFEM dari keseluruhan model struktural yang didiskritkan, yang memungkinkan

simulasi dan evaluasi respon struktural non-linier untuk berbagai tingkat pembebanan. Namun, kualitas hasil yang diperoleh sangat bergantung pada kepatutan teknik idealisasi struktural yang digunakan (geometri, sifat material, ketidaksempurnaan struktural awal); kesetiaan diskritisasi (digunakan jenis elemen hingga, kepadatan mesh); dan sejauh mana model yang dianalisis (model struktural lengkap atau parsial).

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa sejumlah besar waktu, pengetahuan dan pengalaman masih diperlukan untuk menyelesaikan seluruh prosedur analisis NLFEM secara sukses (terutama untuk pra/pasca pemrosesan). Oleh karena itu, pemanfaatan NLFEM dalam praktik analisis kekuatan *ultimate girder* lambung saat ini sebagian besar dikurangi menjadi analisis model parsial untuk tujuan verifikasi metode analisis alternatif, atau untuk analisis langka dari model lengkap dan terperinci untuk merekonstruksi keadaan dan mengidentifikasi sebab-sebab keruntuhan struktural yang nyata terjadi selama eksploitasi strukturstruktur tertentu.

Di sisi lain, analisis NLFEM sering digunakan untuk derivasi dan verifikasi berbagai formulasi sederhana dari respons elasto-plastik dari komponen struktural yang dikenakan dengan berbagai jenis muatan murni atau gabungan [18].

Perhitungan kekuatan-batas struktur dengan metode *NLFEA* perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

1. Tipe Metode *NLFEA*

Kekuatan-batas momen lentur kapal pada kondisi utuh dan rusak dapat dianalisa dengan menggunakan 3 tipe metode *NLFEA* yaitu analisa statis, analisa quasi-statis, 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. 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*.

4. 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.

5. 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*.

6. Ketidaksempurnaan Geometrik

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

7. 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.

8. *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*.

9. *SHELL 181*

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.

SHELL 181 dapat digunakan untuk aplikasi berlapis untuk pemodelan shell komposit atau konstruksi berlapis. Akurasi dalam pemodelan shell komposit diatur oleh teori *shear-deformation* orde pertama (biasanya disebut sebagai teori shell Mindlin-Reissner).