

SKRIPSI

**STUDI VARIASI JARAK *SIDE TRANSVERSE* (PELINTANG
SISI) PADA KONSTRUKSI WING TANK OIL TANKER**

Disusun dan Diajukan oleh:

**MAWARDI
D031 18 1016**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

SKRIPSI

**STUDI VARIASI JARAK *SIDE TRANSVERSE* (PELINTANG
SISI) PADA KONSTRUKSI WING TANK OIL TANKER**

Disusun dan Diajukan oleh:

**MAWARDI
D031 18 1016**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI VARIASI JARAK *SIDE TRANSVERSE* (PELINTANG SISI) PADA KONSTRUKSI WING TANK OIL TANKER

Disusun dan Diajukan oleh

MAWARDI
D031 18 1016

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 24 Agustus 2023 Dan dinyatakan memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. A. Ardianti, ST., MT.
19850526 201212 2 002



Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dipl-Ing
19600425 198811 1 001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT.
19730206 200012 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Mawardi
NIM : D031 18 1016
Program Studi : Teknik Perkapalan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“Studi Variasi Jarak *Side Transverse* (Pelintang Sisi) Pada Konstruksi *Wing tank Oil Tanker*”

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri. Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko. Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

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

Gowa, 24 Agustus 2023

Yang Menyatakan


Mawardi

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah puji syukur penulis ucapkan atas rahmat dan karunia Allah *subhanahu wa ta'ala* sehingga dengan nikmat ini, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Studi Variasi Jarak *Side Transverse* (Pelintang Sisi) pada Konstruksi Wing Tank Oil Tanker**” sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana teknik. Serta tak lupa pula penulis mengucapkan salam serta shalawat kepada baginda tercinta, Rasulullah Muhammad *shallallahu ‘alaihi wasallam*.

Terdapat berbagai macam hambatan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, namun semuanya dapat teratasi penulis atasi, yang tentu saja berkat bantuan berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak. Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua tercinta, Ayahanda Abd. Rahman dan Ibunda alm. Nurbiah, tante Sulina dan Kamxariah yang memberikan kasihnya seperti kasih orang tua, dan juga sepupu-sepupu yang tak hentinya memberikan dukungan.
2. Ibu Dr. Eng. A. Ardianti, ST., MT. dan Bapak Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dipl-Ing selaku pembimbing I dan pembimbing II yang telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Prof. Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT. selaku ketua Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Farianto Fachruddin L, ST., MT. dan Bapak Hamzah, ST., MT. selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan saran dan kritik yang membangun guna menyempurnakan tugas akhir ini.
5. Bapak Ir. Lukman Bochari, MT. selaku penasehan akademik (PA) yang senantiasa membimbing selama menjalani masa studi di teknik terkapalan.
6. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas ilmu dan wawasan yang diberikan selama masa studi.
7. Seluruh staf pegawai Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membantu selama ini.

8. Teman-teman angkatan 2018, Thruzter 2018, dan Rumah Bahagia yang selalu memberi dukungan, yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
9. Senior-senior dan adik-adik labo struktur yang senantiasa berbagi ilmu dan dukungannya.
10. Siti Radibah Imatufariq, Meilinda Sari R., Cici Khumairah, Riska Auliah, dan Ainun Chamila sebagai sahabat-sahabat penulis yang selalu mendengar keluhan dan memberikan dukungan serta semangat selama proses penulisan tugas akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa tugas akhir ini jauh dari kata sempurna, dan masih banyak kekurangan karena keterbatasan penulis. Sehingga penulis sangat mengharapkan kritikan dan saran yang membangun.

Gowa, Agustus 2023

Mawardi

ABSTRAK

Mawardi. 2023 “Studi Variasi Jarak *Side Transverse* (Pelintang Sisi) Pada Konstruksi WingTank Oil Tanker” (Dibimbing oleh **Andi Ardianti** dan **Ganding Sitepu**).

Kapal tanker memiliki aturan khusus yaitu keharusan untuk mengadopsi konstruksi double hull dimana tangki muat (*cargo tank*) harus dikelilingi tangki lain yang terdiri dari double bottom tank dan wing tank. Pada konstruksi *wingtank* terdapat komponen konstruksi pelintang sisi (*side transverse*) sebagai komponen kekuatan melintang kapal. Pada umumnya jarak antar pelintang sisi dengan dimensi yang sama dibuat identik, namun jarak antar pelintang sisi pada kapal tanker SM-90 dibuat 2 jenis yaitu $3a_0$ dan $4a_0$, yang mana a_0 adalah jarak antar gading normal, yang diatur sedemikian rupa demi tercapainya kekuatan kapal yang diharapkan dan efisien dalam hal penggunaan material. Penelitian ini dilakukan untuk mencari pengaturan jarak antar pelintang sisi yang paling efisien yang bisa diterapkan, bukan hanya pada kondisi normal, namun pada kondisi kapal yang ekstrem. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi numerik metode elemen hingga dengan perangkat lunak ANSYS *mechanical* APDL pada 4 model dengan variasi jarak pelintang sisi yang berbeda, pada 3 kondisi sarat yang berbeda, dan beban dari muatan diabaikan. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa variasi yang memiliki nilai tegangan maksimum di bawah nilai tegangan izin pada semua kondisi pembebanan adalah variasi yang jarak antar pelintang sisinya selang-seling $3a_0$ dan $4a_0$ dengan nilai tegangan maksimum 179.51 MPa dan variasi yang jarak antar pelintangnya $3a_0$ namun $2a_0$ khusus pada tengah tangki yang nilai tegangan maksimumnya 158.4 MPa. Semua variasi memiliki respon yang sama terhadap pembebanan yang diberikan dengan tegangan maksimum terjadi pada tepi *manhole* di kompartemen bawah dan hanya memiliki nilai tegangan yang berbeda. Variasi yang jarak antar pelintangnya selang-seling $3a_0$ dan $4a_0$ adalah yang paling efisien karena nilai tegangannya kurang dari tegangan izin dan jumlah pelintang sisinya lebih sedikit dari variasi yang jarak antar pelintangnya $3a_0$ pada ujung dan $2a_0$ pada tengah tangki.

Kata kunci: *wingtank*, pelintang sisi, tegangan.

ABSTRACT

Mawardi. 2023 “Study on Variation of Side Transverse Spacing in Wingtank Oil Tanker Construction” (Supervised by **Andi Ardianti** and **Ganding Sitepu**).

Tankers has special rules that require them to adopt double hull construction where the cargo tank must be surrounded by another tank consisting of double bottom tanks and wing tanks. Within the wing tank construction, there is a component called the side transverse, serving as a transverse strength component of the ship. In general, the spacing between side transverse with the same dimensions is made identical, but the distance between side transverse on the SM-90 tanker is made of 2 types, between $3a_0$ and $4a_0$ which are arranged in such a way as to achieve the expected strength of the ship and be efficient in terms of material usage. This research was conducted to find the most efficient spacing arrangement that can be applied, not only in normal conditions but also in extreme conditions. This research was carried out by numerical simulation of the finite element method with ANSYS mechanical APDL software on 4 models by varying distances between side transverses, under three different draught conditions, and pressure due to liquid inside the cargo tank is neglected. The research reveals that the variation with maximum stress values below the permissible stress limit for all loading conditions is the one with alternating spacing of $3a_0$ and $4a_0$ between side transverses, resulting in a maximum stress of 179.51 MPa and variation with a spacing of $3a_0$ at the ends and $2a_0$ at the center of the tank yields a maximum stress of 158.4 MPa. All variations exhibit a similar response to applied loads, with the maximum stress occurring at the edge of the lower compartment's manhole and only differing in stress magnitude. Variation with the distance between the side transverse alternating $3a_0$ and $4a_0$ is considered the most efficient because the stress due to stress values lower than the permissible limit, and it utilizes fewer side transverses compared to the variation with a spacing of $3a_0$ at the ends and $2a_0$ at the center of the tank.

Keywords: wingtank, side transverse, stress.

DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR NOTASI.....	xi
BAB I 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.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Kapal Tanker	5
2.2. Konstruksi <i>Double Hull</i>	6
2.3. Beban Pada Struktur Kapal	9
2.4. Tegangan	14
2.5. Regangan.....	20
2.6. Metode Elemen Hingga.....	21
2.7. Ansys	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1. Jenis Penelitian	30
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	30
3.3. Jenis Data dan Metode Pengambilan Data	30
3.4. Prosedur Analisis.....	31
3.5. Kerangka Berpikir	42
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Pembebanan pada Struktur <i>Wingtank</i>	43
4.2. Hasil Simulasi Pembebanan Struktur <i>Wingtank</i>	46
4.3. Hasil Analisis.....	48
4.4. Pembahasan	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	52
5.1. Kesimpulan.....	52
5.2. Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perbandingan konstruksi single hull dengan double hull.....	7
Gambar 2.2 Penampang melintang double hull tanker	7
Gambar 2.4 Oil tanker cargo hold transverse section	9
Gambar 2.5 Kapal pada gelombang yang miring terhadap kapal	10
Gambar 2.6 Deformasi akibat transverse strenght load	11
Gambar 2.7 Struktur bottom akibat tekanan air	12
Gambar 2.8 Batang yang mengalami tarik dan tekan	15
Gambar 2.9 Pembengkokan pada balok kantilever.....	18
Gambar 2.10 Hubungan antara tanda momen lentur dan tanda kurvatur	19
Gambar 2.11 Regangan yang terjadi pada balok prismatik akibat beban Tarik ..	20
Gambar 2.12 Perbandingan solusi elemen hingga dengan matematis biasa	23
Gambar 2.13 Elemen segitiga dan segiempat	23
Gambar 2.14 1D elemen linear dan fungsi interpolasi dalam elemen	24
Gambar 2.15 Beberapa bentuk dasar elemen hingga	27
Gambar 2.16 Elemen segitiga isoparametrik dengan penomeran lokal	28
Gambar 3.1 Letak wing ballast tank 3	33
Gambar 3.2 Variasi A (existing)	34
Gambar 3.3 Variasi B (selang-seling $3a_0-4 a_0$)	34
Gambar 3.4 Variasi C (konstan $3a_0$ kecuali $2a_0$ pada tengah tangki).....	34
Gambar 3.5 Variasi D (konstan $4a_0$)	34
Gambar 3.6 <i>Side shell construction</i>	36
Gambar 3.7 <i>Frame section detail construction</i>	36
Gambar 3.8 Detail manhole	37
Gambar 3.9 Komponen konstruksi wingtank.....	37
Gambar 3.10 Hasil meshing model	38
Gambar 3.11 Grafik konvergensi.....	39
Gambar 3.12 Tumpuan model.....	40
Gambar 4.1 Ilustrasi Pembebanan.....	43
Gambar 4.2 Kurva distribusi Beban Sisi Kapal (P_s)	46
Gambar 4.3 Kontur Tegangan Von-mises pada Model A Kondisi Sarat 1.....	47
Gambar 4.4 Diagram Tegangan Maksimum Konstruksi Wingtank.....	49

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Material.....	31
Tabel 3.2 Variasi Jarak Pelintang Sisi.....	33
Tabel 3.3 Konvergensi	39
Tabel 4.1 Beban Area pada 3 Kondisi Sarat	45
Tabel 4.2 Beban Area pada 3 Kondisi Sarat	45
Tabel 4.3 Tegangan von-mises maksimum variasi A	47
Tabel 4.4 Nilai dan letak tegangan maksimum.....	48

DAFTAR NOTASI

a_0	Jarak antar gading normal
P_s	Beban sisi
T	Sarat desain
$T_{1,2,3}$	Kondisi sarat
B	Lebar
z	Jarak pusat beban ke <i>baseline</i>
P_0	Beban dinamis eksternal dasar
P_{01}	Beban dinamis eksternal dasar
C_F	Faktor distribusi
y	Jarak pusat beban ke <i>centreline</i>
σ	Tegangan normal; Tegangan lentur
$\sigma_{x,y,z}$	Tegangan normal pada sumbu x, y, dan z
σ_i	Tegangan izin
σ_v	Tegangan <i>von-mises</i> /ekuivalen
P	Gaya
V	Gaya geser
E	Modulus elastisitas
τ	Tegangan geser
$\tau_{xy,xz,yz}$	Tegangan geser pada bidang xy, xz, yz
I	Inersia
M	Momen
b	Tebal
St	Statis momen
δ	Perubahan panjang
L	Panjang; Panjang awal
ϵ	Regangan normal
$\gamma_{xy,xz,yz}$	Regangan geser pada bidang xy, xz, yz
k	Faktor material
ν	Poisson's ratio
G	Modulus geser

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kapal tanker adalah kapal yang dikhususkan untuk mengangkut muatan cair/liquid dalam bentuk curah. Kapal tanker diantaranya adalah *crude oil carrier*, *product tankers*, *gas tankers*, *chemical carriers* (Molland AF, 2011). Kapal tanker memiliki aturan khusus terkait konstruksinya, salah satunya adalah kapal tanker setelah tahun 1993 harus mengikuti aturan tentang *Double hull* yang ditetapkan MARPOL, yaitu *cargo tank* sepenuhnya dikelilingi oleh *double bottom tank* dan *wing tank* yang bisa digunakan sebagai tangki *ballast*. Dalam konstruksi wing tank terdapat *web frame* atau *side transverse* sebagai komponen kekuatan kapal secara melintang (*transversal*) yang posisinya sebagaimana *web frame* yang ada pada sistem konstruksi melintang (*transversal*).

Umumnya pada sistem framing sebuah kapal, jarak antar gading-gading/*frame* pada bagian atau blok kapal yang sama akan dibuat identik (*equal-distance*), begitu pula dengan *web frame* atau *side transverse* pada kapal tanker. Komponen konstruksi ini menahan beban dari 2 arah yaitu *hydrostatic pressure* dari air laut melalui *outer shell* dan beban dari muatan dalam *cargo tank* melalui *inner shell*. Dengan membuat jarak yang sama antar *frame* maka pendistribusian beban yang diterima akan cenderung lebih merata. Hal ini akan mempengaruhi proses perancangan kapal karena perhitungan kekuatan hanya perlu dilakukan pada 1 sampel karena hasil perhitungan dibagian yang lain akan sama. Selain dalam proses perencanaan, pada tahap fabrikasi material juga akan lebih dimudahkan karena jika beban yang diterima semua *frame* cenderung sama maka dimensi profil *frame* juga akan sama.

Namun pada proyek kapal tanker SM-90, jarak antar pelintang sisi dibuat 2 jenis, yaitu 3 kali jarak gading utama ($3a_0$) dan 4 kali jarak gading utama ($4a_0$), dan penempatannya membentuk pola yang tidak teratur. SM-90 adalah proyek pembangunan kapal tanker yang dikerjakan oleh PT. Samudra Marine Indonesia yang kapasitas 3700 DWT

Ada beberapa kemungkinan mengapa jarak antar pelintang sisi pada kapal ini dibuat bervariasi, salah satu yang memungkinkan adalah karena faktor ketersediaan material yang sesuai. Dimensi profil sebuah *frame* ditentukan dengan menghitung nilai modulus yang bisa menahan beban yang diberikan. Sebuah galangan akan berusaha mengoptimalkan penggunaan material yang digunakan. Apabila galangan memiliki persediaan metaerial yang dimensinya lebih besar dari yang seharusnya akibatnya digunakalah material tersebut. Namun karena dimensi profil gading memiliki fungsi terhadap berat total kapal maka diaturlah jarak antar pelintang sisi tersebut sehingga memiliki bobot yang seringan mungkin namun tetap memenuhi persyaratan kekuatan yang ditetapkan kelas yaitu nilai tegangan yang dihasilkan kurang dari nilai tegangan izin.

Ada beberapa variasi yang dianggap memungkinkan untuk digunakan dalam kasus kapal tanker SM-90. Dan dari semua variasi jarak tersebut akan memberikan respon yang berbeda-beda setelah diberikan pembebanan. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian tentang variasi jarak antar *transverse side* (pelintang sisi) untuk meminimalisir jumlah pelintang sisi dan untuk memudahkan pembangunan jika pengaturan jarak antar pelintang sisi lebih teratur. Dan dapat diketahui karakteristik dari masing-masing variasi tersebut berupa tegangan dari struktur saat diberikan pembeban.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang ada di atas, maka dirumuskan beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Berapa tegangan maksimum yang terjadi pada konstruksi *wing tank* dari masing-masing variasi jarak pelintang setelah diberikan pembebanan?
2. Variasi jarak pelintang manakah yang lebih efisien digunakan berdasarkan besar tegangan dan jumlah pelintang yang digunakan?

1.3. Batasan Masalah

Dalam pengerjaan penelitian ini, permasalahan hanya difokuskan atau dibatasi pada batasan masalah berikut ini:

1. Data kapal yang digunakan adalah kapal oil tanker SM-90
2. Analisa dilakukan pada konstruksi *wing tank* pada ruang muat (*cargo oil tank*) yaitu *wing ballast tank 3*
3. Panjang tangki dan dimensi konstruksi pelintang sisi tetap, hanya jarak dan jumlah pelintang yang divariasikan.
4. Kapal dalam kondisi ekstrem sehingga muatan dalam tangki dikosongkan.
5. Beban yang diberikan hanya beban eksternal, dan meniadakan beban internal akibat muatan.
6. Pengerjaan kekuatan struktur menggunakan pendekatan metode elemen hingga (*finite elemen methode*) yang dikerjakan dengan software AnsysTM.
7. Konsentrasi tegangan akibat pengelasan diabaikan.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui tegangan-tegangan yang terjadi pada konstruksi *wingtank* masing-masing variasi jarak pelintang setelah diberikan pembebanan.
2. Memilih variasi atau jarak antar pelintang yang paling efisien ditinjau dari besar tegangan dan jumlah pelintang yang digunakan

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin dicapai dengan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Memperkaya pengetahuan terkhusus dalam bidang konstruksi kapal
2. Sebagai pertimbangan bagi desainer atau engineer kapal dalam merancang kapal saat ditemui persoalan atau kasus yang serupa.

1.6. Sistematika Penulisan

Untuk mendapatkan alur penulisan yang jelas dan memudahkan pembaca mendapatkan uraian dan makna secara sistematis, maka penyajian materi penulisan ini dijabarkan secara umum dalam kerangka penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN, pada bab ini diuraikan latar belakang permasalahan, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, pada bab ini dipaparkan teori-teori yang mendukung penelitian ini. Terdiri dari Kapal tanker, Konstruksi *double hull*, Beban-beban yang bekerja pada struktur, tegangan, regangan, deformasi, metode elemen hingga dan Ansys.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN, pada bab ini dijelaskan jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, jenis dan metode pengambilan data, prosedur analisis dan diagram alur penelitian.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN, pada bab ini dijelaskan hasil dari analisis kekuatan *wing tank* sebagai akibat dari variasi jarak antar *side transverse/web frame* dan kondisi sarat

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN, pada bab ini dijelaskan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan. Pada bab ini juga berisikan saran sebagai pertimbangan dalam penyempurnaan analisis lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA, berisikan referensi referensi yang digunakan pada penelitian ini

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kapal Tanker

Kapal tanker adalah kapal yang dikhususkan untuk mengangkut muatan cair/liquid dalam bentuk curah. Kapal tanker memiliki karakteristik khusus yang berbeda dengan kapal lainnya dan dengan ketetapan standar keselamatan yang sangat tinggi mengingat muatan yang dibawanya sangat berbahaya. Kapal tanker terbagi menjadi *crude oil tanker*, *product tanker*, *gas tanker*, dan *chemical tanker*.

2.1.1. Crude Oil Tanker

Jenis tanker ini mengangkut minyak mentah yang belum diolah dan dimensi dari kapal tanker jenis ini cenderung lebih besar karena faktor ekonomis dan untuk merespon permintaan atau kebutuhan minyak yang semakin besar (Molland, 2011).

Kapal tanker jenis *crude oil tanker* ini dibagi lagi kedalam beberapa klasifikasi, seperti *Ultra Large Crude Carrier* (ULCC) yang memiliki kapasitas lebih dari 300.000 DWT. Dan *Very Large Crude Carrier* (VLCC) yang memiliki kapasitas 200.000-300.000 DWT. Meskipun sudah ada kapal jenis *Crude Carrier* yang kapasitasnya 500.000 DWT, namun kebanyakan kapal jenis ini kapasitasnya lebih kecil yaitu 130.000-150.000 DWT.

2.1.2. Product Oil Tanker

Minyak mentah yang dimuat atau diangkut oleh *crude carrier* kemudian diolah menjadi banyak produk turunan dan yang mengangkutnya adalah tanker jenis *Product Oil tanker*. Produk turunan atau olahan minyak mentah yang diangkut oleh *product oil tanker* juga termasuk didalamnya minyak gas, bahan bakar penerbangan, dan minyak tanah (Molland, 2011).

2.1.3. Gas Tanker/Liquified Gas Tanker

Muatan yang paling sering dimuat oleh kapal tanker jenis ini adalah *liquefied nature gas* (LNG) dan *liquefied petroleum gas* (LPG). Muatan ini dipertahankan dalam wujud cairnya dengan kombinasi tekanan dan temperatur rendah. Sebuah kapal khusus mengangkut jenis muatan khusus dalam sistem tangki yang beragam dengan pengaturan tekanan dan mendinginkan gas (Molland, 2011).

2.1.4. *Chemical Tanker*

Beragam jenis bahan kimia diangkut melalui jalur laut yang sering kali muatan yang ingin dipindahkan beracun dan mudah terbakar sehingga persyaratan pada kapal diperketat untuk memastikan keamanan atau keselamatan kapal dan lingkungan sekitar.

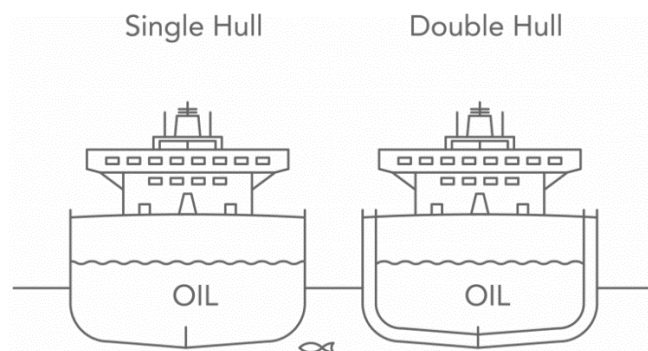
Akibat muatan kapal tanker yang berbahaya baik terhadap kapal itu sendiri maupun terhadap lingkungan. Akibatnya regulasi yang mengatur tentang konstruksi kapal tanker juga lebih ketat. Salah satu regulasi tentang konstruksi kapal tanker yang membedakannya dengan kapal pada umumnya adalah konstruksi *double hull* (Molland, 2011).

Biasanya ruang muat atau *cargo tank* pada kapal tanker dibagi menjadi beberapa bagian tangki, yang dipisahkan oleh sekat melintang dan membujur (memanjang). *International Maritime Organization* (IMO) mengatur dalam konvensi MARPOL 1973/1978 mengenai lokasi penempatan dan ukuran dari tangki-tangki ini, yang mana aturan ini diterapkan atau diterima secara global pada tahun 1983 (Molland, 2011).

2.2. Konstruksi *Double Hull*

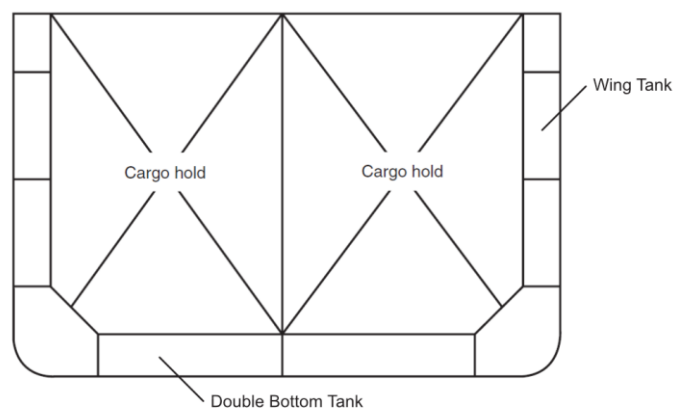
Akibat muatan kapal tanker yang berbahaya baik terhadap kapal itu sendiri maupun terhadap lingkungan. Akibatnya regulasi yang mengatur tentang konstruksi kapal tanker juga lebih ketat. Salah satu regulasi tentang konstruksi kapal tanker yang membedakannya dengan kapal pada umumnya adalah konstruksi *double hull*.

Konstruksi lambung ganda atau double hull adalah bentuk tindakan pencegahan yang diterapkan untuk mengurangi risiko pencemaran lingkungan laut akibat tumpahan (*spill*) cairan dari kapal. Kapal dengan lambung tunggal (*single hull*) dibandingkan dengan kapal dengan kapal yang mengadopsi system lambung ganda (*double hull*) memiliki risiko yang lebih tinggi terjadinya pencemaran lingkungan saat terjadinya insiden/kecelakaan karena memiliki 2 lapisan lambung seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Perbandingan konstruksi *single hull* dengan *double hull*
(Sumber: clearseas.org)

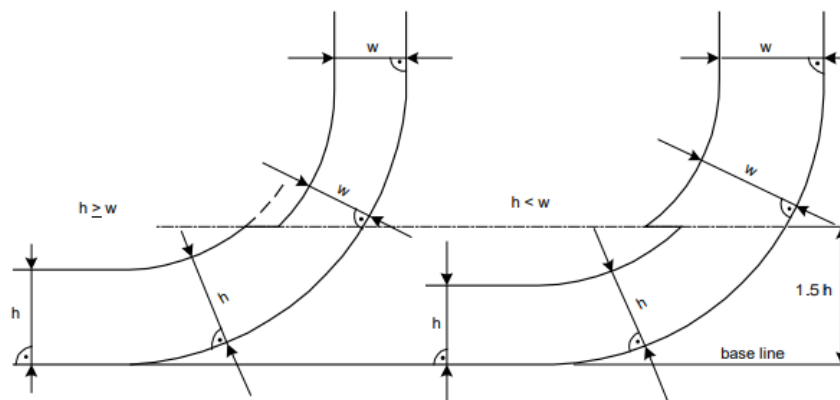
Seluruh atau sepanjang *cargo tank* harus dilindungi oleh tangki *ballast* atau ruang lain selain ruang muat dan tangki bahan bakar (*fuel oil tank*) dengan pengaturan seperti pada Gambar 2.2. Ruang yang dimaksudkan sebagai perlindungan terhadap *cargo tank* adalah *Wing tank* dan *Double bottom tank* (Canadian ministry of transportation, 2005).



Gambar 2.2 Penampang melintang double hull tanker
(Sumber: Molland AF, 2011)

Wingtank berada pada sisi kapal secara keseluruhan kedalaman/tinggi kapal atau dari sisi atas double bottom sampai bagian dek paling atas. Dan diatur sedemikian rupa sehingga tangka muatan atau cargo tank terletak didalam (Canadian ministry of transportation, 2005).

Setiap kapal tanker yang memiliki kapasitas 600 dwt namun kurang dari 5,000 dwt harus memengadopsi konstruksi *double hull* di sepanjang ruang atau tangki muat/*cargo tank* seperti pada Gambar 2.3 (DNV-GL, 2015).

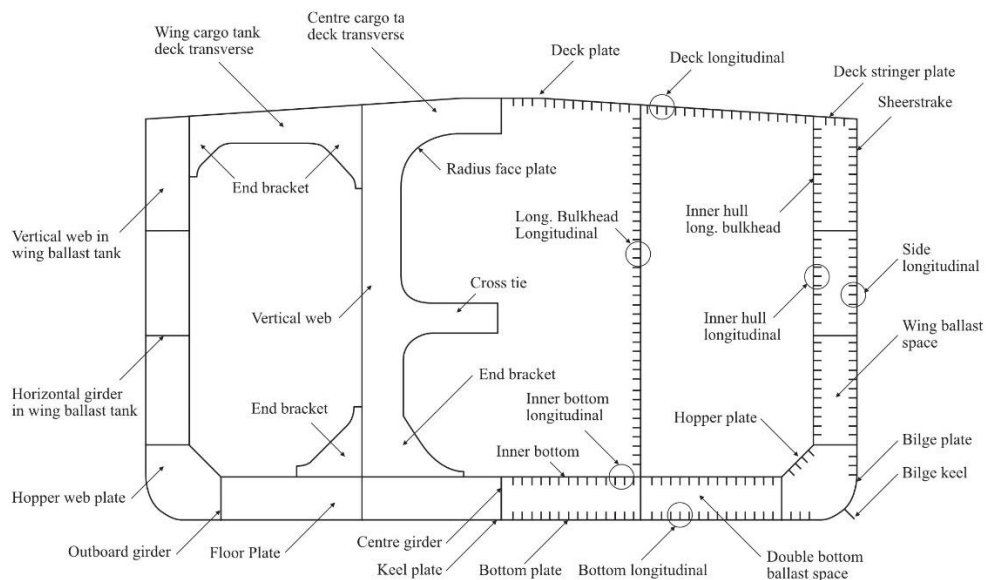


Gambar 2.3 Cargo tank boundary
(Sumber: DNV-GL)

Yang menjadi objek dari penelitian ini adalah pada konstruksi *wing tank*, dalam rules BKI Volume XVI: IACS Common Structural for Double Hull Oil Tankers edisi 2014, yang menjadi bagian utama dari konstruksi *wingtank* diantaranya adalah:

1. *Vertikal Web/Side Transverse*
2. *Horizontal Girder/Stringer*
3. *Inner Hull*
4. *Side Shell*
5. *Side Longitudinal/Longitudinal Frame*

Untuk lebih jelasnya, perhatikan Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Oil tanker cargo hold transverse section*
(Sumber: BKI rules, 2014)

Pada kapal tanker yang menggunakan sistem konstruksi memanjang, untuk mendukung kekuatan melintang lambung dan menyokong *longitudinal frame* pada *deck* dan *bottom* maka konstruksi *transverse/web* dipasang pasang pada pelat sisi secara vertikal *dengan* jarak yang teratur (Eyres, 2001).

2.3. Beban Pada Struktur Kapal

Sebuah kapal dalam kondisi utuh jelas akan bertahan jika diberikan beban yang lebih kecil daripada beban desain, dan dalam kondisi laut normal dan dalam keadaan muat kapal tidak akan mengalami kegagalan struktur seperti *buckling* dan kerusakan lainnya. Bagaimanapun, kapal yang sudah menua/berumur bisa saja mengalami penurunan kualitas strukturnya akibat terjadi korosi (karat), kelelahan struktur, dan kerusakan lokal yang konsekuensinya mengurangi ketahanan struktur dari kapal tersebut, dan dalam keadaan tersebut, kapal bisa saja mengalami kerusakan atau kegagalan struktur bahkan jika beban yang diterima oleh kapal lebih kecil daripada beban desain (Paik, 2001).

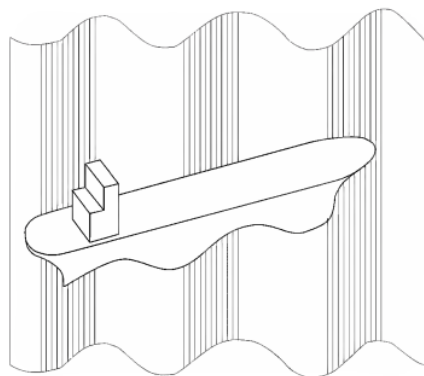
Seorang desainer kapal harus paham terhadap karakteristik beban yang terjadi atau dialami oleh lambung kapal seakurat mungkin. Seperti arah kerja dari sebuah beban, frekuensi, pola distribusi beban pada struktur lambung kapal, perilaku, dan

lain sebagainya. Tahapan pertama adalah memperkirakan atau mengasumsikan beban apa saja yang bekerja pada struktur kapal, untuk memperkirakan kekuatan struktur dalam jalur atau pendekatan yang masuk akal dan untuk mengembangkan desain (Okumoto, 2009).

Beban yang bekerja pada struktur kapal dikategorikan menjadi 3 jenis yaitu *Longitudinal strength loads; transverse strength load; dan local strength load* (Okumoto, 2009).

1. *Longitudinal Strength Load*

Longitudinal Strength Load berarti beban yang mempengaruhi secara keseluruhan dari kekuatan lambung kapal, seperti *bending moment, shear force*, dan momen torsi yang bekerja pada lambung kapal. Kapal memiliki bentuk yang ramping dan memanjang, maka kapal secara keseluruhan akan berperilaku seperti sebuah balok/*beam* dari sudut pandang deformasi global (Okumoto, 2009).



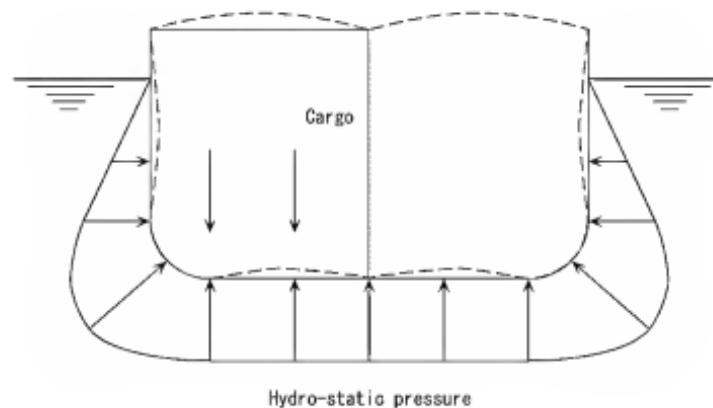
Gambar 2.5 Kapal pada gelombang yang miring terhadap kapal
(Sumber: Okumoto, 2009)

Pada Gambar 2.5, diperlihatkan sebuah kapal yang melintasi atau melewati sebuah gelombang secara diagonal. Gelombang tersebut tidak hanya menyebabkan terjadinya deformasi *bending moment* secara memanjang vertikal, namun juga *bending moment* bekerja pada bidang atau secara horizontal sebagai akibat dari gaya yang ditimbulkan gelombang bekerja pada sisi kapal (Okumoto, 2009).

Selain menimbulkan *bending moment*, akibat perbedaan atau variasi gelombang yang bekerja sepanjang kapal atau setiap *section*, gelombang tersebut juga menimbulkan terjadinya moment torsional. Jika beban yang bekerja pada kapal secara memanjang lebih besar dari beban batas atau beban desain, maka kapal akan terpuntir atau bengkok. Oleh karena itu, *longitudinal strength load* menjadi salah satu yang paling penting dalam perhitungan kekuatan dari struktur lambung kapal secara keseluruhan (Okumoto, 2009).

2. *Transverse Strength Load*

Transverse Strength Load merepresentasikan beban yang bekerja pada kapal secara melintang (*transverse*) yang menimbulkan penyimpangan struktur pada penampang melintang. *Transverse Strength Load* mencakup beban tekanan hidrostatik pada pelat kulit luar kapal, berat dari muatan yang bekerja pada struktur dasar kapal (*Bottom*), tekanan air ballas yang menimbulkan deformasi pada tangki *ballast*, dan lain sebagainya (Okumoto, 2009).



Gambar 2.6 Deformasi akibat *transverse strength load*
(Sumber: Okumoto, 2009)

Gambar 2.6 memberikan gambaran 2 beban secara melintang (*Transverse*) yaitu beban akibat tekanan hidrostatik dari air di sekeliling lambung kapal, dan beban akibat berat atau bobot dari muatan dalam ruang kargo kapal (Okumoto, 2009).

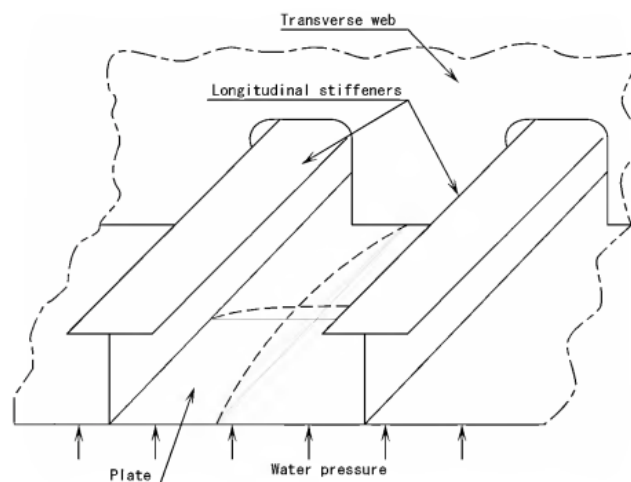
Kedua gaya ini tidak sama satu sama lain, akibatnya terjadi penyimpangan berupa deformasi seperti yang diilustrasikan garis putus-putus pada gambar di atas (Okumoto, 2009).

3. *Local Strenght Load*

Local Strenght Load termasuk beban yang mempengaruhi kekuatan lokal seperti panel kulit kapal (*Shell*), *Stiffener*, dan sambungan pada konstruksi antara *stiffener-stiffener* (Okumoto, 2009).

Kategori beban di atas secara luas digunakan untuk tujuan *practical design*. Pada Gambar 2.7, sebuah beban yang bekerja pada struktur diperlakukan secara terpisah dengan pertimbangan sebuah beban akan ditransfer dari struktur lokal ke struktur yang lebih besar (Okumoto, 2009).

Pertama, kekuatan dari panel pelat kulit bottom ditentukan mengenai tekanan lateral dari air. Kedua, kekuatan dari *stiffeners* yang menopang panel pelat kulit bottom kapal harus dievaluasi. Ketiga, kekuatan dari *transverse web* yang menopang stiffener di akhir harus dihitung dan akhirnya kekuatan global dari struktur bottom kapal dapat dibahas (Okumoto, 2009).



Gambar 2.7 Struktur bottom akibat tekanan air
(Sumber: Okumoto, 2009)

Beban-beban yang terjadi pada struktur kapal juga diatur dalam rules BKI. Khusus beban yang terjadi pada kapal tanker dengan panjang kurang dari 150 m diatur dalam section 24 B 2.2, yang dibagi menjadi 2 bagian, yaitu beban internal (*tank pressure*) dan beban eksternal.

Beban lokal statis-dinamis ditentukan dengan merujuk pada section 4. *Design load*, dimana beban yang bekerja pada struktur *wingtank* adalah beban sisi (P_s). Persamaan untuk menentukan nilainya terbagi menjadi 2, yaitu jika pusat beban berada diatas garis air dan pusat beban yang berada dibawah garis air, masing-masing kemudian terbagi lagi berdasarkan arah gelombang terhadap kapal.

Beban sisi jika pusat beban dibawah garis air untuk gelombang yang searah atau melawan arah gerak kapal ditentukan dengan Persamaan 2.1.

$$P_s = 10 (T - z) + P_0 \cdot c_F \left(1 + \frac{z}{T} \right) \quad kN/m^2 \quad (2.1)$$

Dimana:

- T : Sarat/*draft* desain kapal (m)
- z : Jarak vertikal pusat beban dari baseline (m)
- P_0 : Beban dinamis eksternal *basic* (kN/m²)
- C_F : Faktor distribusi

Jika arah gelombang memotong atau melintang terhadap arah gerak kapal disimbolkan dengan P_{s1} yang ditentukan dengan Persamaan 2.2.

$$P_s = 10 (T - z) + P_{01} \cdot c_F \left[1 + \frac{z}{T} \left(2 - \frac{|y|}{B} \right) \right] \quad kN/m^2 \quad (2.2)$$

Dimana:

- T : Sarat/*draft* desain kapal (m)
- z : Jarak vertikal pusat beban dari baseline (m)
- P_{01} : Beban dinamis eksternal *basic* (kN/m²)
- C_F : Faktor distribusi

- B : Lebar kapal (m)
 y : Jarak vertikal antara pusat beban dan *centreline* (m)

Sedangkan untuk menentukan beban sisi jika pusat beban di atas garis air untuk gelombang yang searah atau melawan arah gerak kapal menggunakan Persamaan 2.3.

$$P_s = P_0 \cdot c_F \left(\frac{20}{10 + z - T} \right) \quad kN/m^2 \quad (2.3)$$

Dimana:

- T : Sarat/*draft* desain kapal (m)
 z : Jarak vertikal pusat beban dari baseline (m)
 P₀ : Beban dinamis eksternal *basic* (kN/m²)
 C_F : Faktor distribusi

Jika arah gelombang memotong atau melintang terhadap arah gerak kapal disimbolkan dengan P_{s1} yang ditentukan dengan Persamaan 2.4.

$$P_s = P_{01} \cdot \left(\frac{20}{5 + z - T} \right) \cdot \frac{|y|}{B} \quad kN/m^2 \quad (2.4)$$

Dimana:

- T: Sarat/*draft* desain kapal (m)
 z : Jarak vertikal pusat beban dari baseline (m)
 P₀₁ : Beban dinamis eksternal *basic* (kN/m²)
 B : Lebar kapal (m)
 y : Jarak vertikal antara pusat beban dan *centreline* (m)

2.4. Tegangan

2.4.1. Tegangan Izin BKI

Tegangan izin merupakan merupakan tegangan yang tidak boleh dilampaui sebuah sistem struktur, dimanapun letaknya akibat faktor keamanan (Gere &

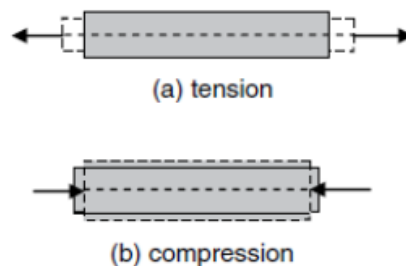
Timoshenko, 2000). Khusus untuk kapal tanker dengan pembebanan sesuai dengan BKI (2022), tegangan izin yang terjadi pada komponen melintang kapal diatur batas nilai tegangan izin untuk tegangan ekuivalen adalah.

$$\sigma_i = \frac{180}{k} \quad N/mm^2 \quad (2.5)$$

Nilai k atau faktor material yang digunakan sesuai dengan rules BKI (2022). Oleh karena itu, nilai tegangan izin (σ_i) adalah sebesar 180 N/mm² atau MPa untuk baja normal.

2.4.2. Tegangan Pada Batang Tarik

Setiap material adalah elastis pada keadaan alaminya. Karena itu jika gaya luar bekerja pada benda, maka benda tersebut akan mengalami deformasi. Ketika benda tersebut mengalami deformasi, molekulnya akan membentuk tahanan terhadap deformasi. Tahanan ini per satuan luas dikenal dengan istilah tegangan. Secara matematik tegangan bisa didefinisikan sebagai gaya per satuan luas. Konsep dasar dalam mekanika bahan adalah tegangan dan regangan. Dapat ditinjau pada sebuah benda berbentuk batang prismatik seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Batang yang mengalami tarik dan tekan
(Sumber: Ye, 2008)

Dengan asumsi bahwa tegangan terbagi merata pada setiap batang, maka dapat diturunkan rumus untuk menghitung tegangan adalah:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.6)$$

Dimana:

σ = tegangan normal (N/mm²)

P = besar gaya yang bekerja (N)

A = luas penampang (mm²)

Persamaan 2.6 memberikan intensitas tegangan merata pada batang prismatis yang dibebani secara aksial dengan penampang sembarang. Apabila batang ini ditarik dengan gaya P , maka tegangannya adalah tegangan tarik (*tensile stress*); apabila gayanya mempunyai arah sebaliknya, sehingga menyebabkan batang tersebut mengalami tekan, maka terjadi tegangan tekan (*compressive stress*). Karena tegangan ini mempunyai arah yang tegak lurus permukaan potongan, maka tegangan ini disebut tegangan normal (*normal stress*). Jadi, tegangan normal dapat berupa tarik atau tekan. Apabila konvensi tanda untuk tegangan normal dibutuhkan, biasanya tegangan tarik didefinisikan bertanda positif dan tegangan tekan bertanda negatif. (Gere & Timoshenko, 2000).

Adapun persamaan untuk tegangan normal dapat dilihat pada Persamaan 2.7, Persamaan 2.8, dan Persamaan 2.9.

$$\sigma_x = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [\epsilon_x(1 - \nu) + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)] \quad (2.7)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [\epsilon_y(1 - \nu) + \nu(\epsilon_x + \epsilon_z)] \quad (2.8)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [\epsilon_z(1 - \nu) + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)] \quad (2.9)$$

2.4.3. Tegangan Pada Balok Lentur

2.4.3.1. Tegangan Geser

Gaya pada benda menyebabkan perubahan ukuran benda. Pengaruh vektor gaya terhadap sumbu x menghasilkan besaran tensile stress dengan lambang σ_x . Indeks x menyatakan arah vektor gaya. Pengaruh gaya terhadap sumbu y dan z menghasilkan momen yang disebut tegangan geser (*shear stress*). Tegangan geser (*shear stress*) dilambangkan τ yang secara matematis didefinisikan pada Persamaan 2.9 dan Persamaan 2.10.

$$\tau = \frac{V \cdot St}{I \cdot b} \quad (2.10)$$

Dimana:

- τ = tegangan geser (N/mm²)
- V = gaya sejajar bidang elemen (N)
- St = statis momen (mm³)
- I = Inersia (mm⁴)
- b = tebal (mm)

Persamaan tegangan geser (*shear stress*) dapat dilihat pada Persamaan 2.11, Persamaan 2.12, dan Persamaan 2.13.

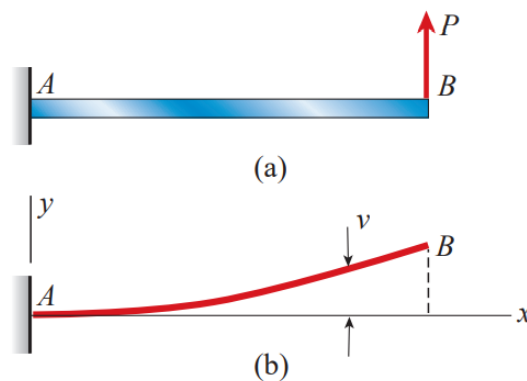
$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \gamma_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} \quad (2.11)$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \gamma_{xz} = G \cdot \gamma_{xz} \quad (2.12)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yz} = G \cdot \gamma_{yz} \quad (2.13)$$

2.4.3.2. Tegangan Lentur

Beban yang bekerja pada sebuah balok (*beam*) menyebabkan beam melentur/*bending*, hal tersebut menyebabkan deformasi sumbu beam hingga membentuk kurva. Sebagai contoh, asumsikan sebuah balok kantilever AB dikenai beban P pada ujung bebas (Gambar 2.9a). sumbu yang awalnya lurus membengkok hingga membentuk kurva (Gambar 2.9b), yang disebut dengan defleksi. (Gere & Goodno, 2009)



Gambar 2.9 Pembengkokan pada balok kantilever
(Sumber: Gere & Goodno, 2009)

Hubungan tegangan-regangan yang paling umum ditemui pada bidang keteknikan adalah persamaan *linear-elastic* material. Untuk material seperti itu kita substitusikan Hooke's law untuk tegangan *uniaxial* ($\sigma = E\epsilon$) ke dalam persamaan *strain-curvature* sehingga didapatkan (Gere & Goodno, 2009).

$$\sigma = -\frac{M \cdot y}{I} \quad (2.14)$$

Dimana:

σ = Tegangan lentur (N/mm²)

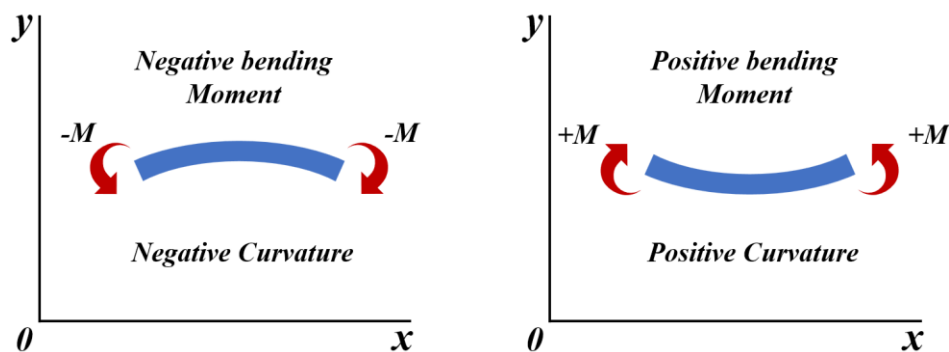
M = Momen lentur (Nmm)

I = Momen inersia penampang (mm^4)

y = Jarak dari sumbu netral (mm^4)

Persamaan 2.14 disebut dengan *flexure formula*, menunjukkan bahwa tegangan berbanding lurus dengan momen lentur M dan berbanding terbalik dengan momen inersia I dari penampang balok. Selain itu, tegangan bervariasi secara linear dengan jarak y dari titik berat. Tegangan yang dihitung dari *flexure formula* disebut dengan tegangan lentur (*bending stresses*) atau *flexural stresses* (Gere & Goodno, 2009).

Jika momen lentur dari balok adalah positif, maka tegangan lentur akan positif (tensil) pada bagian penampang balok dimana y negatif, yaitu dibagian bawah balok. Tegangan pada bagian atas balok akan negatif (kompresi). Jika momen lentur negatif, maka tegangan lentur kebalikannya. Hubungan ini ditunjukkan pada Gambar 2.10 (Gere & Goodno, 2009)



Gambar 2.10 Hubungan antara tanda momen lentur dan tanda kurvatur
(Sumber: Gere & Goodno, 2009)

2.4.4. Tegangan *Von-mises*

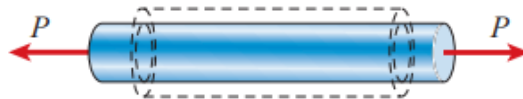
Analisis menggunakan perangkat lunak elemen hingga memiliki kelebihan yaitu dapat menghasilkan nilai tegangan *Von Mises* atau tegangan ekuivalen, yaitu jenis tegangan yang mengakibatkan kegagalan pada struktur material yang dirumuskan oleh penemunya yang bernama *Von Mises*. Untuk penentuan tegangan *Von Mises*, terlebih dahulu menghitung tegangan utama yang bekerja

pada struktur, setelah tegangan utama ditemukan maka tegangan *Von Mises* bisa didapatkan dengan Persamaan 2.15 (Jong, 2009).

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{[\sigma^1 - \sigma^2]^2 + [\sigma^2 - \sigma^3]^2 + [\sigma^3 - \sigma^1]^2}{2}} \quad (2.15)$$

2.5. Regangan

Sebuah batang seperti pada Gambar 2.11 akan mengalami perubahan panjang akibat dari beban aksial tarik/ tekan yang diberikan. Perubahan panjang dari batang adalah hasil kumulatif dari semua elemen bahan diseluruh volume batang.



Gambar 2.11 Regangan yang terjadi pada balok prismatic akibat beban Tarik
(Sumber: Gere & Goodno, 2009)

Dengan asumsi bahwa batang mengalami perubahan konstan diseluruh permukaan maka untuk menghitung perpanjangan pesatuan panjang atau regangan adalah dengan menggunakan Persamaan 2.16.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.16)$$

Dimana:

ε = regangan normal (mm/mm)

δ = perubahan panjang (mm)

L = panjang awal (mm)

Jika batang tersebut mengalami tarik, maka regangannya disebut regangan tarik, yang menunjukkan perpanjangan bahan. Jika batang tersebut mengalami

tekan, maka regangannya adalah regangan tekan dan batang tersebut memendek. Regangan tarik biasanya bertanda positif dan regangan tekan bertanda negatif. Regangan ϵ disebut regangan normal karena regangan ini berkaitan dengan tegangan normal (Gere & Timoshenko, 2000).

2.6. Metode Elemen Hingga

Tenaga dan sumber daya computer yang digunakan dalam pengerjaan dan penyelesaian permasalahan yang sederhana menggunakan metode elemen hingga seperti *cantilever* dan *beam* sangat tinggi dibanding dengan keuntungan yang diperoleh. Persoalan yang sederhana seperti tadi bisa dan sebaiknya diselesaikan dengan metode sederhana atau perhitungan biasa, namun tidak semua persoalan dalam struktur itu sederhana. Semakin kompleks sebuah system, maka menyelesaikan persoalan teknis dengan perhitungan-perhitungan dasar mekanika semakin tidak memungkinkan. Sehingga digunakanlah metode elemen hingga (*finite element method*). Manfaat sesungguhnya dari metode elemen hingga adalah kemampuannya untuk menyelesaikan persoalan kompleks yang solusi analisa tidak bisa didapatkan atau membutuhkan waktu dan biaya yang besar jika dilakukan dengan cara biasa (Thompson, 2017).

Analisis elemen hingga adalah teknik numerik matematis untuk menghitung kekuatan dan perilaku struktur komponen teknik dengan membagi obyek menjadi bentuk jala (mesh) (Wibawa, 2019, h.19). Metode elemen hingga (*Finite Element Methode*) digunakan untuk membagi system yang perilakunya tidak bisa diprediksi atau dihitung menggunakan bentuk persamaan yang tertutup, menjadi bagian-bagian, atau elemen lebih kecil yang solusinya diketahui atau dapat diperkirakan (Thompson, 2017).

Tipe masalah teknis dan matematis phisis yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisa struktur dan kelompok masalah-masalah non-struktur (Susatio, 2004).

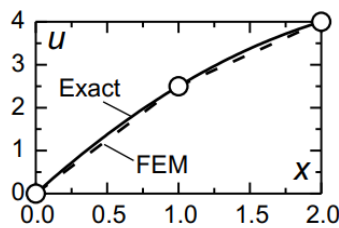
Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi:

1. Analisa tegangan/*Stress*, meliputi analisa *Truss* dan *frame* serta masalah-masalah yang berhubungan dengan tegangan-tegangan yang terkonsentrasi.
2. *Buckling*.
3. Analisa getaran.

Dalam persoalan-persoalan yang menyangkut geometri yang rumit, seperti persoalan pembebanan terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Hal ini disebabkan karena matematika analisis memerlukan besaran atau harga yang harus diketahui pada setiap titik pada struktur yang dikaji.

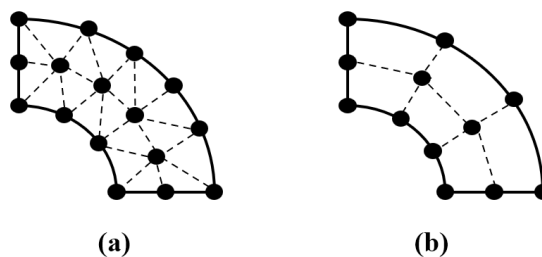
Penyelesaian analisis dari suatu persamaan diferensial suatu geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit, tidak mudah diperoleh. Formulasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini (Susatio, 2004). Tetapi untuk benda-benda yang mempunyai bentuk yang tidak teratur, penyelesaiannya akan sulit menggunakan cara matematis. Sehingga perlu digunakan cara numerik, yang dalam perkembangannya disebut sebagai metode elemen hingga (*Finite Element Method*).

Proses inti MEH adalah membagi problem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau elemen-elemen dari mana solusi yang lebih sederhana dapat dengan mudah diperoleh. Solusi dari setiap elemen jika digabungkan akan menjadi solusi problem secara keseluruhan. Gambar 2.12 menjelaskan cara kerja MEH di mana solusi suatu problem yang kompleks diaproksimalkan oleh solusi elemen. Untuk mendapatkan solusi elemental, MEH menggunakan fungsi interpolasi untuk mengaproksimalkan solusi elemen. Untuk contoh ini suatu fungsi linear yang sederhana dipergunakan sebagai fungsi interpolasi. Setelah solusi setiap elemen diperoleh, dengan menggabungkan solusi-solusi elemen maka solusi keseluruhan problem dapat diperoleh. Dengan menggunakan fungsi polinomial seperti fungsi kuadrat sebagai fungsi interpolasi, solusi yang lebih akurat bisa diperoleh.



Gambar 2.12 Perbandingan solusi elemen hingga dengan matematis biasa
(Sumber: Nikishkov, 2004)

Prinsip MEH adalah membagi domain permasalahan, baik itu domain ruang (spatial domain) atau domain waktu (time domain), menjadi sub domain atau elemen yang lebih kecil. Dengan menghitung solusi pada elemen-elemen dan selanjutnya menggabungkan keseluruhan solusi elemental, solusi total dari permasalahan diperoleh. Dalam menghitung solusi per elemen tentunya solusi elemen harus memenuhi beberapa ketentuan, seperti kontinuitas pada titik-titik nodal dan antarmuka (interface) elemen. Gambar 2.13 menggambarkan dua jenis elemen MEH, yaitu elemen segitiga (Gambar 2.13a) dan segiempat (Gambar 2.13b).



Gambar 2.13 Elemen segitiga dan segiempat
(Sumber: Susatyo, 2004)

Dengan MEH, solusi yang diperoleh adalah fungsi interpolasi setiap elemen. Setelah fungsi interpolasi elemen dihitung, solusi keseluruhan dapat diperoleh. Fungsi-fungsi interpolasi setiap elemen ditentukan oleh nilai pada titik *mesh*.

Untuk meringkas secara umum bagaimana metode elemen hingga bekerja, berikut adalah langkah utama atau prosedur dalam mencari solusi menggunakan metode elemen hingga menurut Nikishkov (2004):

1. Diskritisasi Kontinum

Tahap pertama adalah membagi solusi menjadi elemen-elemen hingga. *Mesh* elemen hingga biasanya dihasilkan oleh program *pre-processor*. *Mesh* terdiri dari beberapa *array* utama yang merupakan koordinat nodal (*node*) dan hubungan antar elemen.

2. Memilih fungsi interpolasi

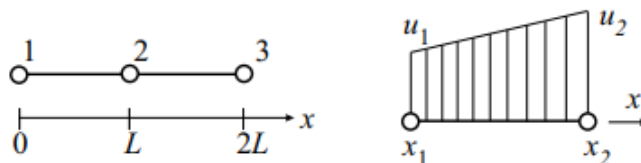
Fungsi interpolasi biasanya digunakan untuk menginterpolasi bidang-bidang variable di antara elemen. Seringkali, fungsi polinomial dipilih sebagai fungsi interpolasi. Derajat dari fungsi polinomial tergantung pada jumlah nodal (*node*) yang ada pada pada elemen.

3. Memilih properti elemen

Harus dibuatkan persamaan dalam bentuk matriks dalam menggunakan metode elemen hingga, yang mana akan berkaitan dengan nilai nodal dari fungsi yang tidak diketahui ke parameter lain. Untuk tugas atau pekerjaan ini, pendekatan yang berbeda dapat digunakan; namun yang paling nyaman digunakan adalah metode galerkin (*galerkin method*)

4. Menggabungkan persamaan elemen

Untuk menemukan sistem persamaan global (secara keseluruhan) untuk mendapatkan solusi secara menyeluruh kita harus menggabungkan semua persamaan elemen. Dengan kata lain kita harus mengombinasikan persamaan elemen lokal dari semua elemen yang digunakan dalam diskritisasi. Hubungan antar elemen (konektifitas elemen) digunakan untuk proses penggabungan. Sebelum *solution*, kondisi batas (yang mana tidak dihitung dalam persamaan elemen) harus ditentukan.



Gambar 2.14 1D elemen linear dan fungsi interpolasi dalam elemen
(Sumber: Nikishkov, 2004)

5. Menyelesaikan sistem persamaan global

Sistem persamaan global elemen hingga biasanya jarang, simetris dan pasti positif. Metode langsung dan berulang-ulang dapat digunakan untuk *solution*. Nilai nodal dari fungsi yang dicari didapatkan sebagai hasil dari *solution*.

6. Komputasi hasil tambahan

Dalam banyak kasus, kita perlu penghitung atau mengetahui parameter tambahan. Sebagai contoh, dalam persoalan mekanik regangan dan tegangan, didapatkan setelah *solution* dari sistem persamaan global.

Proses analisa struktur menggunakan metode elemen hingga menjadi 7 tahapan berikut (Susatyo, 2004).

1. Pemilihan tipe elemen dan diskritisasi

Amatilah benda atau objek yang akan di analisa untuk memilih jenis elemen yang akan digunakan.

2. Pemilihan fungsi pemindah/fungsi interpolasi

Jenis-jenis fungsi yang digunakan adalah fungsi linier, fungsi kuadratik, fungsi kubik, atau fungsi polinomial derajat tinggi.

3. Mencari hubungan strain/displacement dan stress/strain

Sebagai contoh, hubungan strain/displacement dan stress/strain untuk kasus satu dimensi berlaku:

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.17)$$

$$\sigma_x = E \epsilon_x \quad (2.18)$$

Dimana:

ϵ_x = Strain

σ_x = Stress

E = Modulus elastisitas

u = Displacement

4. Mendapatkan matrix kekakuan dari elemen yang dibuat

Untuk benda atau objek yang terdiri dari beberapa buah elemen, lakukan penggabungan (*assemblage*) dari matriks kekakuan elemen menjadi matriks kekakuan global yang berlaku untuk seluruh benda atau struktur

5. Gunakan persamaan kesetimbangan $\{\mathbf{F}\} = [\mathbf{k}] \{\mathbf{d}\}$

Dengan persamaan ini masukkan syarat batas yang diketahui dalam soal.

6. Selesaikan persamaan pada langkah 5, dengan menghitung harga yang belum diketahui

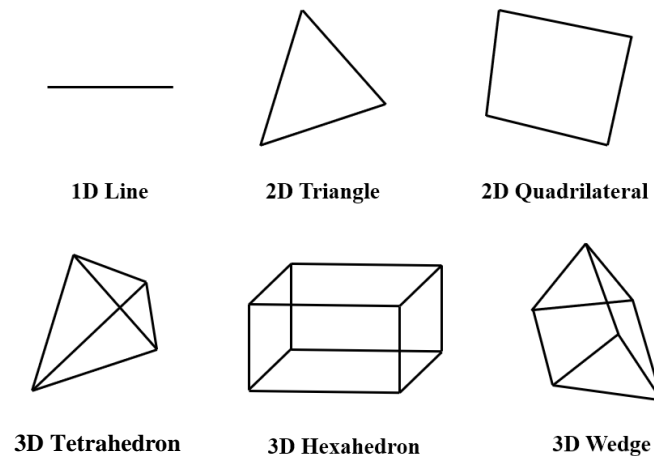
Jika perhitungan melibatkan matriks dengan ukuran yang kecil, biasanya ditempuh dengan langkah *partitioning* matriks, tetapi jika perhitungan melibatkan matriks dengan ukuran yang besar, computer adalah jalan terbaik untuk mendapatkan solusinya.

7. Hitung strain dan stress dari setiap elemen

8. Interpretasikan kembali hasil-hasil perhitungan yang diperoleh

Seperti telah dijelaskan langkah pertama yang penting dalam MEH adalah diskretisasi. Diskretisasi ini dilakukan dengan *meshing*, yaitu dengan membagi-bagi suatu kontinum (model fisik kontinu) menjadi sejumlah terhingga elemen-elemen sederhana yang lebih kecil, yang gabungannya mendekati geometri kontinum semula. *Meshing* ini dapat dilakukan secara manual atau dibantu program preprocessor yang terintegrasi dalam paket program MEH, atau program khusus *pre-processor*. Kata ‘mendekati’ dalam definisi diskretisasi ditekankan karena bisa saja bentuk keseluruhan model elemen hingga (hasil diskretisasi) tidak secara eksak sama dengan geometri kontinum semula. Ini terjadi terutama untuk model kontinum dengan batas-batas kurva lengkung pada model 2D dan batas-batas permukaan lengkung pada model 3D. Elemen ‘sederhana’ yang dimaksudkan di sini adalah elemen yang bentuknya sederhana. Bentuk-bentuk

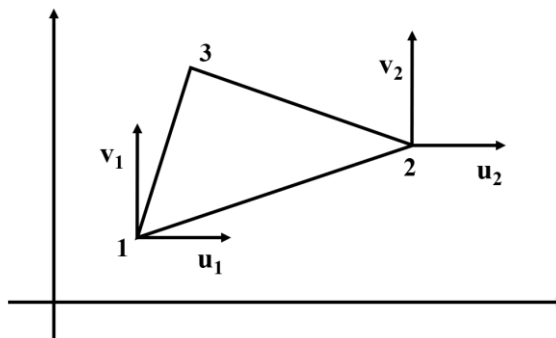
elemen yang umum digunakan untuk model 1D, 2D, dan 3D diperlihatkan pada Gambar 2.15. (Tjong, 2021).



Gambar 2.15 Beberapa bentuk dasar elemen hingga
(Sumber: Tjong, 2021)

Setiap elemen hingga memiliki sejumlah titik khusus yang disebut titik nodal. Titik titik nodal ini sangat penting karena pada titik-titik ini didefinisikan nilai-nilai variabel utama yang tidak diketahui. Jumlah seluruh variabel utama pada satu titik nodal disebut derajat kebebasan titik nodal (nodal DOF). Jumlah seluruh derajat kebebasan titik nodal dari suatu elemen hingga adalah derajat kebebasan elemen (elemen DOF). Selain itu, titik-titik nodal berfungsi sebagai titik penghubung antara satu elemen dengan elemen lainnya dalam model elemen hingga. Tidak ada bagian lain pada elemen hingga yang berinteraksi dengan elemen lainnya kecuali pada titik nodal (Tjong, 2021).

Dalam penelitian ini digunakan elemen segitiga isoparametrik dengan 3 node, adapun bentuk elemen segitiga isoparametrik tiga node dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Elemen segitiga isoparametrik dengan penomeran lokal
(Sumber: Susatyo, 2004)

Elemen isoparametrik adalah elemen yang menggunakan koefisien interpolasi yang sama antara fungsi displacement dan fungsi koordinat spasial. Adapun tahapan yang dilakukan dalam proses analisa adalah sebagai berikut (Susatyo, 2004):

- Menentukan fungsi *displacement*
- Menurunkan persamaan strain dan energi strain
- Menurunkan fungsi energi akibat pembebanan
- Penggunaan dari prinsip energi minimum

2.7. Ansys

Ansys adalah software pemodelan elemen hingga yang tujuannya secara umum adalah menyelesaikan berbagai macam permasalahan mekanika (*mechanics*) secara numerik. Permasalahan-permasalahan yang dimaksud termasuk di dalamnya statis/dinamis, analisa struktur (baik linear dan nonlinear), transfer/perpindahan panas, dan permasalahan fluida, termasuk juga *acoustic* dan persoalan elektromagnetik (Stolarski, 2006).

Secara umum, solusi elemen hingga menggunakan software ansys dapat dijabarkan atau dibagi menjadi 3 langkah berikut ini (Stolarski, 2006, h.37-38):

1. **Preprocessing:** pendefinisian masalah

Langkah utama pada tahap ini adalah (i) mendefinisikan *keypoint*/garis/area/volume, (ii) mendefinisikan tipe elemen dan property

material/geometri, dan (iii) *mesh* garis/area/volume sesuai yang diperlukan.

Tingkat dari detail (*mesh*) yang diperlukan akan tergantung pada dimensionality dari objek yang akan dianalisis, contohnya 1D, 2D, *axysimmetric*, dan 3D.

2. ***Solution***: Pembebanan, pengekangan, dan penyelesaian

Pada tahapan ini, penting untuk mendefinisikan beban secara spesifik (beban titik atau beban merata/tekanan), pengekangan (translasi dan rotasi), dan akhirnya penyelesaian serangkaian persamaan yang dihasilkan.

3. ***Postprocessing***: pengolahan lebih lanjut dan melihat hasil

Pada tahapan ini, mungkin saja ingin diketahui dan melihat (i) daftar perpindahan nodal, (ii) elemen gaya dan momen, (iii) plot defleksi, dan (iv) kontur diagram tegangan atau peta temperatur.