

SKRIPSI

**PENGARUH KONFIGURASI ELEMEN PENAMPANG TERHADAP
UMUR *DOUBLE HULL TANKER***

Disusun dan diajukan oleh

KOFIFA INDAH SARI

D081 18 1317



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI
PENGARUH KONFIGURASI ELEMEN PENAMPANG TERHADAP
UMUR *DOUBLE HULL TANKER*

Disusun dan diajukan oleh

KOFIFA INDAH SARI

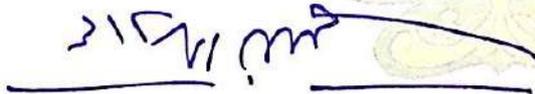
D081181317

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas
Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 6 Juli 2022 dan dinyatakan
telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

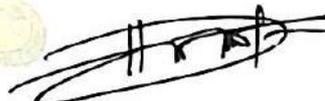
Pembimbing utama,

Pembimbing Pendamping,



Muh. Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.

NIP.197606062005011003



Habibi, S.T., M.T.

NIP. 198704252019031012

Ketua Program Studi



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

NIP. 197506052002121003

PERNYATAAN KEASLIAN SKripsi

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kofifa Indah Sari
Nomor Mahasiswa : D081181317
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

"Pengaruh Konfigurasi Elemen Penampang Terhadap Umur *Double Hull 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, 6 Juli 2022

Yang menyatakan,



Kofifa Indah Sari

ABSTRAK

KOFIFA INDAH SARI. Pengaruh Konfigurasi Elemen Penampang Terhadap Umur Double Hull Tanker (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Habibi**).

Umur sebuah kapal dipengaruhi oleh berbagai aspek baik teknis, ekonomis dan operasional. Pada studi kasus kali ini, pengaruh konfigurasi elemen penampang terhadap umur *double hull tanker* tipe T3 dan *double hull tanker* tipe T4 dengan mempertimbangkan perbedaan bentuk, dimensi dan jumlah *stiffener* pada kedua kapal tersebut. Perbedaan dari kedua kapal tersebut berpengaruh terhadap umur dari masing-masing kapal. Analisis kelelahan struktur kapal dilakukan dengan menggunakan metode Palmgren-Miner berdasarkan kurva S-N dengan mencari nilai tegangan signifikan (*stress significant*), jumlah dari siklus kegagalan (*number of cycle*) dan rentang tegangan (*stress range*) yang menghasilkan umur *double hull tanker* tipe T3 dan T4. Pengaruh tegangan rata-rata (*von mises stress*) dan spektrum gelombang JONSWAP mempengaruhi nilai dari momen dan gaya yang bekerja pada kapal yang mempengaruhi waktu terjadinya 1 siklus kelelahan (*mean zero crossing period*) lebih cepat apabila beban yang diterima lebih besar. Selain itu, pengaruh S-N curve pada nilai siklus yang diizinkan (N) untuk penggunaan siklus rentang tegangan (*stress range*) dari ANSYS dan nilai tegangan referensi (*reference stress*) berbanding lurus dengan umur pada umur struktur kapal. Sehingga pada *double hull tanker* tipe T4 menjadi lebih lama yaitu 29 tahun dibandingkan umur *double hull tanker* tipe T4 yaitu 27 tahun.

Kata kunci: Tanker, JONSWAP, *von mises stress*, Palmgren-Miner, kelelahan

ABSTRACT

KOFIFA INDAH SARI. *The Effect of Cross-sectional Element Configuration on the fatigue life of Double Hull Tanker (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Habibi**)*

Fatigue life of a ship is influenced by various aspects both technical, economic and operation. In this study, the effect of cross-sectional element configuration on the fatigue life of the double hull tanker type T3 and the double hull tanker type T4 by considering the differences on the shape, dimension and number of stiffened plate of the two ships. The difference of the stiffened plates both two ships affects the fatigue life. Fatigue life analysis of the two ships is carried out using the Palmgren-Miner method based on the S-N curve by looking for the significant stress value, the number of cycles of failure and the stress range which resulted in the fatigue life of the double hull tanker type T3 and T4. The effect of the average stress and the JONSWAP wave spectrum will affect the value of the moments and a forces acting on the ship which affects the time of 1 cycle of fatigue faster when the load received is larger. In addition, the influence of the S-N curve on the allowable cycle value (N) which is used for the stress range of ANSYS and the reference stress is directly proportional to the fatigue life of the ship's structure. So that the double hull tanker type T4 becomes longer with 29 years compared to the fatigue life of the double hull tanker type T4 with 27 years.

Keywords: Double hull tanker, JONSWAP, von mises stress, Palmgren-Miner, fatigue life

PRAKATA

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT berkat Rahmat dan Hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir skripsi ini. Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis selama proses pengerjaan skripsi ini, namun atas kehendak-Nya pula penulis dapat mengatasi segala hambatan dalam penelitian dan penulisan skripsi ini. Salawat serta salam penulis panjatkan kehadiran Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

"PENGARUH KONFIGURASI ELEMEN PENAMPANG TERHADAP UMUR *DOUBLE HULL TANKER*"

Selesainya penelitian dan penulisan skripsi ini pada waktunya, tidak luput pula berkat bantuan dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus mengucapkan terima kasih dan penghormatan setinggi-tingginya kepada ayahanda **Manna** dan Ibunda **Mariani** yang telah mendedikasikan hidupnya untuk merawat, menyayangi, mencintai dan mengasahi serta mendidik penulis dengan sepenuh hati. Tak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih kepada kakak-kakak terkasih, **Jumriati, Radi, Heri, Pina**, yang tiada henti memberikan nasehat-nasehat positif, serta dorongan untuk tetap semangat kepada penulis.

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

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama sekaligus Penasehat Akademik (PA) yang

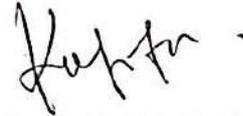
ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk nasehat, bimbingan dan pengarahan selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan hingga pengerjaan skripsi mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.

2. Bapak **Habibi, ST., MT.** selaku dosen pembimbing kedua yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Chairul Paotonan, ST., MT** selaku Ketua Program Studi Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. Bapak **Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.** dan Bapak **Ir. Juswan, ST., MT.** selaku dosen penguji yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran dalam setiap seminar.
5. **Dosen–Dosen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
6. **Tenaga Kependidikan Program Studi Teknik Kelautan,** yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Kakak **Indah Melati Suci., S.T.,** yang telah membantu dan meluangkan waktunya untuk saya dalam mengerjakan skripsi.
8. **Teman-teman Labo OSAREL, Bipa, Andri, Dirham, Yulin, Indri dan Safitri** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka.
9. **Teman-teman Mahasiswa Teknik Kelautan 2018 terkhusus kelas A, Dinda, Ainun, Dila, Cica, Miss, Yuna, Tina dan Elmy** atas segala dukungannya. Tak lupa pula penulis sampaikan banyak terimakasih kepada kanda-kanda Senior dan dinda-dinda Junior atas motivasi dan dukungannya.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan

sebagai bahan untuk menutupi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.
Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Gowa, 6 Juli 2022



Kofifa Indah Sari

DAFTAR ISI

PRAKATA	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR NOTASI	xiii
DAFTAR ISTILAH.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Kapal Tanker	6
2.2 Desain Struktur <i>Double Hull Tanker</i>	9
2.3 Sistem Konstruksi Kapal	13
2.4 Tegangan yang Bekerja	14
2.5 Beban-Beban yang Bekerja.....	15
2.6 Analisis Kelelahan	17
2.7 Kurva S-N.....	19
2.8 Metode Palmgren-Miner	21
2.9 <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i>	22
2.10 Spektrum Gelombang	23
2.11 <i>Stress Response Spectra</i>	26
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Jenis Penelitian	28
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	28
3.3 Penyajian Data	28

3.4 Analisa Data	33
3.5 Diagram Alir	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1. Data Objek Penelitian.....	37
4.2. Distribusi Tegangan	51
4.3. Spektrum Gelombang.....	51
4.4. <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO)	52
4.5. <i>Stress Response Spectra</i>	54
4.6. Umur Kelelahan (Fatigue Life)	55
BAB V KESIMPULAN	60
5.1. Kesimpulan	60
5.2. Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Oil Tanker.....	6
Gambar 2.2. Kapal Chemical tanker	7
Gambar 2.3. Kapal LNG tanker	7
Gambar 2.4. Double hull tanker.....	8
Gambar 2.5. Konstruksi kapal tanker	10
Gambar 2.6. Single Hull Tanker	10
Gambar 2.7. Double Hull Tanker.....	12
Gambar 2.8. Kurva S-N	20
Gambar 3.1. Konfigurasi Penampang Kapal	29
Gambar 3.2. Konfigurasi Penampang Kapal	31
Gambar 3.3. Diagram Alir.....	35
Gambar 4.1. Penampang <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T3	37
Gambar 4.2. Penampang <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T4	38
Gambar 4.4. Perbedaan Konfigurasi Tipe Stiffener Penampang <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T4	50
Gambar 4.5 Distribusi tegangan untuk <i>double hull tanker</i> T3.....	51
Gambar 4.6 Distribusi tegangan untuk <i>double hull tanker</i> T4.....	51
Gambar 4.7 Grafik variasi spektrum gelombang di medan.....	52
Gambar 4.8 Response Amplitude Operator <i>double hull tanker</i> tipe T3 dan <i>double hull tanker</i> tipe T4.....	53
Gambar 4.10 <i>Stress response spectra double hull tanker</i> tipe T3 dan T4.....	54

DAFTAR TABEL

Table 2.1. Formulasi fatigue S-N curve	21
Tabel 3.1. Konfigurasi Material <i>Stiffener</i> Kapal Tanker T3.....	29
Tabel 3.2. Konfigurasi Material <i>Stiffener</i> Kapal Tanker T4.....	32
Tabel 4.1. Ketebalan Material Penyusun Struktur Kapal <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T3 dan Kapal <i>Double Hull Tanker</i> Tipe T4	38
Tabel 4.2. Konfigurasi Material Pelat Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3.....	39
Tabel 4.3. Konfigurasi Material Pelat Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3.....	41
Tabel 4.4. Konfigurasi Material <i>Stiffener</i> Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T3.....	44
Tabel 4.5. Konfigurasi Material <i>Stiffener</i> Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T4.....	45

DAFTAR NOTASI

$X_p(\omega)$	= Amplitudo Struktur	(mm)
$\eta(\omega)$	= Amplitudo Gelombang	(mm)
$S_R(\omega)$	= Spektrum Gelombang	(mm ² /sec)
S	= Spektrum Gelombang	(mm ² /sec)
RAO	= Response Amplitudo Operator	(N/mm ² /mm)
ω	= Frekuensi Angular	Rad/sec
H_s	= Tinggi Gelombang Signifikan	(mm)
h	= Kedalaman Perairan	(mm)
A	= Luas Penampang	(mm ²)
σ	= Tegangan	(N/mm ²)
F	= Gaya	(N)
$T_{z\sigma}$	= Mean Zero Crossing Period	(s)
σ_{eff}	= Tegangan Amplitudo Efektif	(N ² /mm ⁴)
σ_b	= Tegangan Lentur	(N/mm ²)
M_b	= momen lentur	Nmm
z	= Sumbu Netral	(mm)
I	= Inersia Penampang	(mm ⁴)

DAFTAR ISTILAH

- ANSYS* : *Software* yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
- BKI : Biro Klasifikasi Indonesia
- NLFEA : *Non Linear Finite Element Analysis*
- JONSWAP : Joint North Sea Wave Project
- Kelelahan : Kondisi yang dialami struktur akibat adanya beban berulang secara terus-menerus
- Modulus Elastisitas : Sebuah ukuran yang digunakan untuk merepresentasikan kekakuan suatu bahan.
- Von Mises Stress : Nilai dari tegangan rata-rata yang digunakan untuk menentukan apakah suatu material akan patah.
- Momen : Sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi.
- Software* : Istilah khusus untuk data yang diformat dan disimpan secara digital, termasuk program komputer, dokumentasinya dan berbagai informasi yang bisa dibaca dan bisa ditulis oleh komputer.
- Failure* : Kegagalan suatu struktur yang tidak mampu mencapai atau melampaui nilai-nilai kinerja tertentu.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada dasarnya kapal merupakan alat transportasi laut yang dirancang sedemikian rupa dengan perhitungan keamanan yang kompleks. Sehingga memiliki kelebihan yang lebih dibandingkan alat transportasi lainnya. Kelebihan kapal terletak pada konstruksi dari struktur yang dapat membawa beban dari muatan barang dan penumpang dalam jumlah yang besar. Konstruksi dari struktur kapal tersebut juga dapat menahan berbagai beban-beban yang dialaminya, antara lain beban internal yang disebabkan oleh pembebanan yang ada di kapal dan beban eksternal seperti beban gelombang, laut dan angin, serta posisi dari kapal tersebut terhadap beban gelombang laut dan beban angin yang datang/terjadi.

Proses perancangan sebuah kapal mencakup berbagai aspek baik teknis, ekonomis dan operasional. Kekuatan struktur konstruksi merupakan salah satu aspek teknis yang turut mempengaruhi tingkat keamanan pada kapal di saat beroperasi baik di kondisi laut yang tenang maupun bergelombang. Kekuatan suatu konstruksi memberikan efek besar pada suatu struktur. Efek dari kekuatan adalah kekuatan dari konstruksi yang menentukan umur dari struktur itu sendiri. Pada kapal, struktur merupakan konstruksi yang sangat kompleks. Tolok ukur yang dapat menjamin kekuatan struktur kapal adalah tegangan (*stress*) yang dialami oleh struktur konstruksi di saat beroperasi di kondisi kritis, haruslah lebih kecil daripada tegangan dari material yang dipakai untuk membentuk komponen konstruksi.

Tidak hanya mempertimbangkan dari sisi kekuatan, umur kapal juga harus bisa diprediksi. Tujuannya, agar bisa dilakukan perbaikan atau peremajaan terhadap komponen-komponen struktur baik lokal maupun global sebelum mengalami kegagalan struktur. Mengetahui kegagalan pada struktur kapal dapat dilakukan dengan analisis faktor-faktor penyebab

kegagalan struktur kapal. Salah satu faktor penyebab kegagalan struktur kapal adalah kelelahan (*fatigue*). Kerusakan kapal akibat kelelahan (*fatigue*), baik pada komponen struktur utama maupun struktur sekunder dan tersier. Dalam hal ini beban gelombang yang secara terus menerus dan merupakan fungsi periodik merupakan salah satu penyebab terjadinya kelelahan pada elemen-elemen pendukung struktur kapal baik dari arah melintang dan memanjang. Selanjutnya *fatigue* pada elemen-elemen pendukung kekuatan struktur kapal berdampak pada terciptanya konsentrasi tegangan di sekitar sambungan elemen-elemen tersebut. *Fatigue* dalam hal ini umur kapal sangat berkaitan erat dengan adanya ketidakpastian yang berarti. Oleh karena itu umur kapal sangat penting dianalisis untuk mengetahui lebih jauh seberapa lama kapal tersebut dapat beroperasi dengan berbagai macam beban yang bekerja pada kapal tersebut [1]

Sebuah kapal sama halnya dengan struktur yang lainnya, mempunyai kekuatan batas, dan apakah untuk tujuan desain berkala, investigasi kerusakan, atau untuk menentukan proses dampak dari hal umur yang berkaitan dengan penurunan mutu struktur kapal, prosedur yang berkaitan dengan perhitungan bahwa kekuatan secara akurasi adalah sebuah kebutuhan [2]. 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 menerus akan mengurangi dimensi *scantlings*, sehingga *girder* penopang pada lambung kapal akan rawan mengalami *buckling* ataupun retak ketika ditimpa beban ekstrem.

Dalam penelitian sebelumnya kapal *double hull tanker* tipe T3 yang dianalisis dengan metode NLFEA (*Non Linear Finite Element Analysis*) di Ansys dan metode Smith dimana hasil analisisnya kemudian dibandingkan (*compare*) terhadap kekuatan batas *double hull tanker* tipe T3 dan *double hull tanker* tipe T4 [3].

Berdasarkan hal tersebut dimana penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya tidak sama sekali memperhitungkan nilai daripada konfigurasi elemen penampang kapal tersebut maka Penulis bertujuan untuk menganalisis pengaruh konfigurasi elemen penampang terhadap umur kapal struktur konstruksi *double hull tanker* tersebut.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah berapa perbandingan umur *double hull tanker* tipe T3 dan T4 yang disebabkan oleh perbedaan konfigurasi elemen penampang.

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian dapat terarah sesuai dengan kerangka yang direncanakan, maka penelitian dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut:

1. Studi kasus struktur konstruksi *double hull tanker* tipe T3 dan *double hull tanker* tipe T4.
2. Analisis elemen penampang konstruksi *double hull tanker* tipe T3 dan *double hull tanker* T4 dengan menggunakan metode numerik.
3. Menggunakan spektrum gelombang JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) sesuai dengan nilai variasi spektum gelombang tertinggi.
4. Menggunakan metode Palmgren-Miner untuk menentukan umur *double hull tanker* tipe T3 dan *double hull tanker* T4.
5. Data gelombang yang digunakan adalah wilayah perairan Indonesia

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui umur *double hull tanker* tipe T3 dan *double hull tanker* T4 yang dipengaruhi oleh konfigurasi elemen penampang.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian pengaruh konfigurasi penampang

terhadap umur *Double Hull Tanker* tipe T3 dan *Double Hull Tanker* T4 dengan metode Palmgren-Miner dan diolah dengan spektrum gelombang JONSWAP ini adalah:

1. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya mengetahui analisis struktur baja.
2. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kepada perusahaan-perusahaan.
3. Sebagai informasi dalam hal menentukan kebijakan dalam hal regulasi/peraturan pada galangan kapal untuk membuat perencanaan struktur *double hull tanker*.

1.6. Sistematika Penulisan

Untuk mendapatkan alur penulisan yang jelas dan sistematis sekaligus memungkinkan pembaca dapat menginterpretasikan hasil tulisan secara tepat, maka tugas akhir ini disusun menjadi beberapa bagian, yaitu: BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang permasalahan atau alasan yang mendasari penulis dalam melakukan penelitian mengenai umur *double hull tanker*, rumusan masalah yang akan dianalisis, batasan masalah penelitian yang tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini karena keterbatasan alat bantu dan membatasi agar penelitian lebih spesifik juga dalam bab ini terdapat tujuan dari penelitian dan manfaat penelitian yang dapat diambil dari penelitian ini serta sistematika penulisan skripsi.

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi kajian pustaka yang mendukung permasalahan yang dihadapi berupa teori-teori dasar mengenai gambaran umum *double hull tanker*, mengenai konstruksi *double hull tanker*, teori tentang cara menganalisis umur *double hull tanker* dengan metode Palmgren-Miner serta cara perhitungan spektrum gelombang JONSWAP yang mempengaruhi beban pada struktur kapal.

BAB III Metode Penelitian

Bab ini berisi jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, objek penelitian yaitu penampang midship pada *double hull tanker* tipe T3 dan *double hull tanker* tipe T4, jenis dan sumber data dimana penelitian ini bersifat kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta penampilan dari hasilnya dengan melakukan investigasi untuk mendapatkan nilai umur *double hull tanker* T3 dan *double hull tanker* T4 dengan mengetahui perbandingan antara pengaruh elemen penampang yang berbeda dan spektrum gelombang JONSWAP pada lokasi yang sama serta kerangka alur pemikiran.

BAB IV Pembahasan

Bab ini berisi pembahasan tentang investigasi umur kelelahan *double hull tanker* tipe T3 dan *double hull tanker* tipe T4, mulai dari dimensi kapal yang digunakan, material, gambar penampang *double hull tanker* yang diteliti dan juga berupa hasil investigasi tegangan rata-rata (*Von Mises Stress*) menggunakan metode numerik berupa nilai momen yang bekerja pada kondisi *hogging* dan *sagging*, nilai tegangan rata-rata akan diolah dengan spektrum gelombang JONSWAP untuk menganalisis umur dari struktur *double hull tanker*.

BAB V Kesimpulan

Bab ini merupakan penutup dari keseluruhan dari isi penelitian yang mencakup kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dibahas pada bab-bab sebelumnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Tanker

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

Berdasarkan jenis muatannya, kapal tanker dibagi menjadi 3 jenis :

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 [4]. Ukuran *Crude Tanker* biasanya lebih besar dari *Product Tanker*. Adapun contoh *oil tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Oil Tanker [5]

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 dan soda kaustik. Adapun contoh kapal *Chemical Tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Kapal Chemical tanker [6]

3. Liquefied Natural Gas (KNG) Tanker

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



Gambar 2.3. Kapal LNG tanker [7]

4. Double Hull Oil Tanker

Double hull oil tanker adalah Sebuah kapal tanker dengan lambung ganda mengacu pada kapal tanker minyak yang memiliki lambung ganda. Mereka mengurangi kemungkinan kebocoran yang terjadi dibandingkan dengan kapal tanker lambung tunggal. Adapun contoh *double hull tanker*

dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Double hull tanker [8]

Sedangkan berdasarkan ukurannya, kapal tanker dibagi menjadi 5 yaitu:

1. Coastal Tanker dengan ukuran sebagai berikut:

LOA	: 205 m
Beam	: 29 m
Draft	: 16 m
Bobot mati	: < 50.000 DWT

2. Aframax dengan ukuran sebagai berikut:

LOA	: 245 m
Beam	: 34 m
Draft	: 20 m
Bobot mati	: 50.001 - 80.000 DWT

3. Suez-Max dengan ukuran sebagai berikut:

LOA	: 285 m
Beam	: 45 m
Draft	: 23 m
Bobot mati	: 80.001 - 160.000 DWT

4. VLCC (*Very Large Crude Carrier*) dengan ukuran sebagai

berikut:

LOA	: 350 m
Beam	: 55 m
Draft	: 28 m
Bobot mati	: 160.001 - 300.000 DWT

5. ULCC (*Ultra Large Crude Carrier*) dengan ukuran sebagai

berikut:

LOA	: 415 m
Beam	: 63 m
Draft	: 35 m
Bobot mati	: > 300.000 DWT

2.2 Desain Struktur *Double Hull Tanker*

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

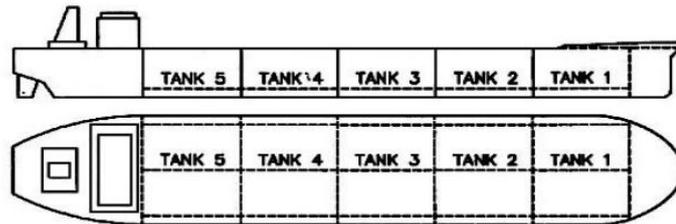
Konstruksi kapal tanker didesain dan dibuat secara khusus dengan ketetapan standar keselamatan yang sangat tinggi sesuai dengan spesifikasi yang diatur dalam IMO melalui peraturan MARPOL 73/78-Annex 1, Regulation 13G, Amandemen 2001 serta SOLAS (*Safety Of Life At Sea*).

Faktor-faktor yang mempengaruhi desain dan konstruksi kapal tanker antara lain [9]:

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

Ukuran dari kapal pengangkut minyak mentah biasanya lebih besar

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

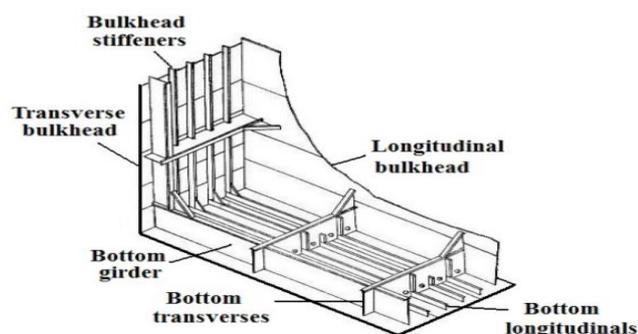


Gambar 2.5. Konstruksi kapal tanker [4]

konstruksi kapal tanker terbagi dua yaitu *Single Hull tanker* dan *double hull tanker* yang mana akan dijelaskan pada paragraf 1 dan 2.

1. Single hull tanker

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



Gambar 2.6. Single Hull Tanker [4]

Sejak tenggelamnya tanker (*single hull*) ERIKA dilepas pantai Perancis (Desember 1999) yang menyebabkan polusi (*oil spill*) perairan

sekitarnya, maka banyak terjadi perubahan dalam peraturan klasifikasi, statutori, dan perdagangan yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas pengoperasian kapal tanker. IMO melalui peraturan MARPOL 73/78-Annex 1, Regulation 13G, Amandemen 2001 membagi kapal tanker minyak dalam 3 kategori, yaitu kategori 1, 2, dan 3. Dengan rincian sebagai berikut:

1. *Oil tanker* kategori 1

- Kapal tanker 20.000 dwt atau lebih yang memuat *crude oil, fuel oil, heavy diesel oil, or lubricating oil, and*
- Kapal tanker 30.000 dwt atau lebih yang memuat jenis minyak selain yang disebutkan diatas. (Tanker praMARPOL, yaitu tanker *single hull* yang tidak mempunyai *segregated ballast tanks* pada *protective locations*).

2. *Oil tanker* kategori 2

- Kapal tanker 20.000 dwt atau lebih, *single hull* yang memuat *crude oil, fuel oil, heavy diesel oil, or lubricating oil, and*
- Tanker MARPOL 30.000 dwt atau lebih, *single hull* yang memuat jenis minyak selain yang disebut diatas, yang dilengkapi *segregated ballast tanks* pada *protective locations*.

3. *Oil tanker* kategori 3

- Tanker 5.000 dwt atau lebih, *single hull* yang ukurannya dibawah tanker kategori 1 dan 2 diatas.

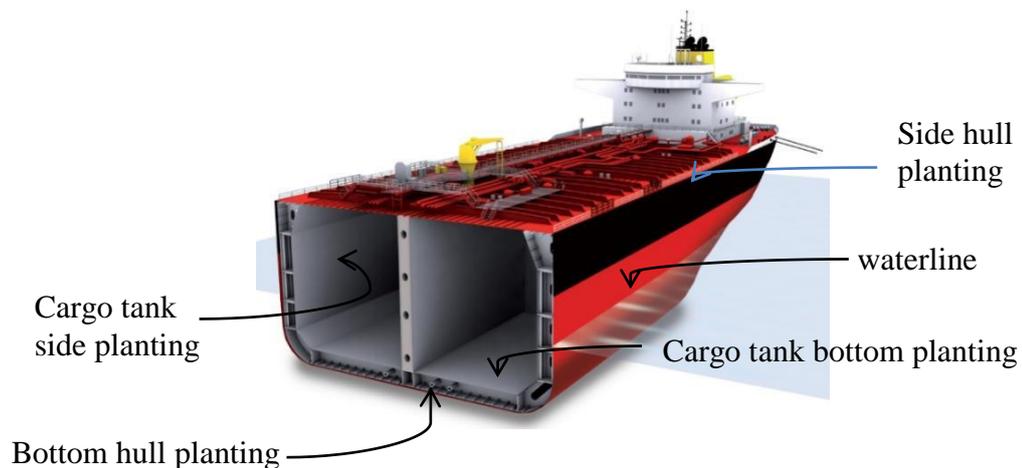
Selanjutnya ditentukan bahwa tanker dengan kategori 1, 2, dan 3 diatas harus memenuhi regulation 13 F, yang menyebutkan tentang adanya *wingtanks* dan *double bottom tanks*, alias "*double hull*" dalam batas-batas yang ditentukan menurut kategori diatas dan tanggal penyerahan kapal . Apabila persyaratan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

2. *Double hull tanker*

Double hull tanker merupakan jenis kapal yang memiliki dua tingkat atau lapisan sekam - lapisan luar dan lapisan dalam. Sistem lapisan (*hulls*)

ganda bekerja sedemikian rupa sehingga pada sisi dan bagian bawah kapal, ada dua lapisan dengan ruang kosong antara lapisan. Dengan demikian, lapisan ganda sangat meminimalkan kerugian untuk kargo kapal saat kecelakaan terjadi. Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan tabrakan, lapisan kedua bertindak sebagai pelindung (*back-up*) dan mencegah masuknya air laut ke dalam kapal [10].

Konstruksi lapisan ganda membantu mengurangi risiko pencemaran laut selama benturan, landasan, dan bentuk kerusakan lambung kapal lainnya. Adapun contoh konstruksi kapal *double hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Double Hull Tanker [30]

1. *Cargo Tank Side Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian sisi dalam kapal *double hull tanker* yang berfungsi sebagai tangki penyimpanan muatan minyak.
2. *Side Hull Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian sisi luar kapal *double hull tanker* yang berfungsi sebagai pelindung (*back-up*) dan mencegah masuknya air laut ke dalam tangki penyimpanan muatan minyak. Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan tabrakan atau serupa.
3. *Cargo Tank Bottom Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian bawah dalam dari kapal *double hull tanker* yang berfungsi

sebagai tangki penyimpanan muatan minyak.

4. *Bottom Hull Planting* adalah material pendukung/penyusun bagian bawah luar kapal *double hull tanker* yang berfungsi sebagai pelindung (*back-up*) dan mencegah masuknya air laut ke dalam tangki penyimpanan muatan minyak. Jika satu lapisan rusak karena kecelakaan tabrakan atau serupa.
5. *Waterline* adalah garis potong yang mendatar secara horizontal yang dalam Gambar 2.7. menunjukkan garis air kapal *double hull tanker* dalam kondisi tanpa muatan.

Setelah korban Exxon Valdez yang terjadi pada tahun 1989, kebutuhan lapisan (*hulls*) ganda pada lambung kapal tanker terasa lebih. Sehingga penggunaan lapisan (*hulls*) ganda dalam kapal tanker minyak direkomendasikan dalam MARPOL (Konvensi Internasional untuk Pencegahan Pencemaran dari Kapal) konvensi. Rekomendasi ini pun muncul setelah mengamati kelebihan ketika penggunaan lapisan (*hulls*) ganda di kapal penumpang yang telah dianjurkan untuk memiliki lambung ganda sesuai dengan SOLAS (Keselamatan Jiwa di Laut) memenuhi atau konvensi.

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

2.3 Sistem Konstruksi Kapal

Sistem konstruksi kapal merupakan suatu kesatuan yang terdiri dari komponen atau elemen penyusun struktur kapal yang dihubungkan bersama atau dirangkai satu sama lain sehingga membentuk satu konstruksi tertentu yang kemudian akan dihubungkan atau disatukan

menjadi satu struktur kapal. Untuk sistem konstruksi kapal dapat dibagi menjadi:

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

2.4 Tegangan yang Bekerja

Tegangan didefinisikan sebagai tahapan terhadap gaya-gaya luar. Ini diukur dalam bentuk gaya per satuan luas. Dalam praktek tegangan sering diberikan dua pengertian: (1) gaya per satuan luas, (2) tegangan total gaya adalah gaya total pada suatu bidang [11] .

Tegangan yang bekerja pada struktur kapal umumnya disebabkan oleh beban aksial dan beban lentur. Akibat dari beban-beban tersebut menghasilkan tegangan aksial dan tegangan lentur yang menyebabkan kelelahan pada struktur kapal.

Tegangan aksial (*axial stress*), adalah tegangan yang bekerja secara tegak lurus terhadap sumbu penampang.

Tegangan lentur (*bending stress*), adalah tegangan yang bekerja secara sesajar sepanjang balok dengan arah yang membujur.

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

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

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

Dimana: σ = Tegangan (N/mm²)

P = Gaya total (N)

A = Luas penampang batang (mm²)

Analisis tegangan metode numerik dengan bantuan *software* umumnya menggunakan tegangan ekuivalen atau yang biasa disebut

dengan *Von Mises Stress*. Tegangan ekuivalen (σ_e) ini dituliskan dengan bentuk sebagai berikut:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad (2.2)$$

Dimana subskrip 1, 2, dan 3 menyatakan arah sumbu tegangan-tegangan yang bekerja. Tegangan-tegangan yang bekerja ke tiga sumbu arah tersebut. Secara umum mempertimbangkan adanya tekuk (*buckling*) dan luluh (*yielding*). Tegangan-tegangan yang bekerja terdistribusi pada setiap bagian/elemen konstruksi *Double Hull Tanker* termasuk besaran tegangan yang dihasilkan [1]

2.5 Beban-Beban yang Bekerja

Untuk setiap Kasus Beban, beban yang diterapkan yang digunakan untuk analisis struktur kapal harus mencakup bagian statis dan dinamis dari setiap komponen beban. Kasus Muatan menunjukkan efek gabungan dari beban dominan dan beban lain yang bekerja secara bersamaan pada struktur lambung termasuk tekanan gelombang eksternal, tekanan tangki internal dan beban inersia pada komponen dan peralatan struktur. Dalam menghitung bagian dinamis suatu beban, perlu mempertimbangkan berbagai kondisi laut, yang menghasilkan respons kritis yang dipertimbangkan dari struktur lambung. Kasus Beban yang dikembangkan kemudian digunakan dalam analisis struktur untuk menentukan tegangan yang dihasilkan dan efek beban lainnya di dalam struktur lambung [12].

a. Beban Geladak Cuaca (*Load on Weather Decks*)

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak dibelakang 0,15 L dari garis tegak haluan (FP) [13]. Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.3.

$$P_D = P_0 \cdot \frac{20T}{(10 + z - T) \cdot H} \cdot C_D \quad (2.3)$$

Dimana: Satuannya adalah (N/mm²)

b. Beban Luar Sisi Kapal (*Load on The Ship's Side*)

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang timbul karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal [13]. Beban luar sisi kapal dibagi atas dua beban yaitu:

1. Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (P_{S_1})
2. Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (P_{S_2})

$$P_{S_1} = 10.(T - z) + P_0.C_f \left(1 + \frac{z}{T}\right) \quad (2.4)$$

$$P_{S_2} = P_0.C_f \cdot \left(\frac{20}{10 + z - T}\right) \quad (2.5)$$

Dimana:

P_D = Beban geladak cuaca ((N/mm²)

P_{S_1} = Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (N/mm²)

P_{S_2} = Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (N/mm²)

P_0 = *Basic external dynamic load* (N/mm²)

C_f = Faktor distribusi = C_D

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

T = Sarat kapal (m)

h_{db} = Tinggi *double bottom* (m)

H = Tinggi Kapal (m)

c. Beban Luar Alas Kapal (*External Load on The Ship's Bottom*)

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal [13]. Beban luar alas kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.6.

$$P_B = 10.T + P_0.C_f \quad (2.6)$$

Dimana:

P_B = Beban luar alas kapal (N/mm²)

P_0 = *Basic external dynamic load* (N/mm²)

C_f = Faktor distribusi = C_D

T = Sarat kapal (m)

2.6 Analisis Kelelahan

Umur kapal disebabkan oleh respon spektrum tegangan dan *Response Amplitude Operator* (RAO). Respon spektrum tegangan merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan umur kelelahan. Dari sudut pandang ini, dapat disimpulkan bahwa analisis beban tekuk kritis dan umur kelelahan merupakan aspek yang sangat penting dalam desain *Double hull tanker*.

Metode Elemen Hingga digunakan untuk menghitung kekuatan yang disebabkan oleh beban aksial dan lentur [14]. Di antara berbagai metode analisis, yang paling umum digunakan saat ini didasarkan pada elemen hingga. Elemen Hingga merupakan salah satu metode untuk menyelesaikan analisis struktur secara kompleks dan detail serta penggunaannya sudah berkembang [15]. Di sisi lain, metode analisis memerlukan analisis yang kompleks untuk mendapatkan solusi yang hasilnya mendekati yang diperoleh dengan menggunakan elemen hingga. Secara umum metode tersebut menyajikan perbedaan yang signifikan [16].

Finite Element Method (FEM) nonlinier yang dikembangkan yang dapat sepenuhnya mengakomodasi perilaku kabel dan tiang yang sangat nonlinier baik terkena beban statis atau beban dinamis. Formulasi elemen FEM yang mampu mensimulasikan deformasi besar diperkenalkan terlebih dahulu untuk elemen *truss*, kabel, dan *beam* [17]. Serangkaian analisis FEM telah menyelidiki perilaku elastis dan tekuk serta keruntuhan plastis dari ujung atas lambung kapal dari pelat lengkung yang tidak dikeraskan dan, berdasarkan hasil, formula sederhana telah diturunkan untuk menghitung tekuk dan kekuatan batas [18].

Kelelahan melewati tiga tahap: inisiasi, pertumbuhan lambat, dan

timbulnya patahan yang tidak stabil. Retakan kelelahan biasanya berasal dari permukaan. Setelah retakan dimulai, retakan tumbuh perlahan pada siklus tegangan yang berulang, bahkan jika tingkat tegangan di bawah hasil. Dalam Struktur lepas pantai variasi tegangan siklik terutama disebabkan oleh gelombang dan beban angin [19]. Struktur baja yang dilas dan dikenakan beban siklik lebih kecil daripada yang menjadi dasar rancangan untuk menginisiasi *microscopic cracks* yang sedikit demi sedikit bertambah ukurannya sampai setelah mengalami sejumlah siklus tertentu, *crack* tersebut menjadi cukup besar sehingga *fracture* terjadi. Kegagalan struktur ini diketahui sebagai fenomena kelelahan (*phenomenon of fatigue*). Dengan kata lain, kelelahan adalah proses akumulasi kerusakan siklus demi siklus dalam sebuah struktur yang dikenakan tegangan fluktuatif, menjalani beberapa tahapan dari inisial "*crack-free*" sampai pada tahapan "*Failure*". Parameter efek pembebanan yang paling penting adalah komponen tegangan yang berfluktuasi, seringkali disebut dengan stress range. Ada dua jenis berbeda dari kelelahan [20] :

1. *Low-cycle fatigue* terjadi untuk jumlah siklus rendah, kurang dari 5×10^3 , dalam rentang *plastic deformations*.
2. *High-cycle fatigue* terjadi untuk jumlah siklus tinggi dalam rentang *elastic deformations*.

Umumnya kelelahan yang terjadi pada struktur kapal adalah tipe kedua. Umur kelelahan dari sebuah sambungan yang dilas bergantung pada banyak faktor. Antara lain karakteristik material, cacat dan retak mikro, bentuk geometris las dan lainnya. Kerusakan akibat kelelahan pada struktur lepas pantai secara dominan disebabkan oleh beban gelombang. Tegangan yang disebabkan oleh beban ini selalu berubah arah dan besarnya serta berlangsung secara acak. Biasanya ketika bagian struktur yaitu *stiffener* membujur mengalami tekan, itu adalah sesuatu yang bagus. Struktur tersebut tidak akan gagal kecuali dengan menghancurkan atau melebihi kekuatan luluh tekannya. Kemudian kelelahan tidak terjadi untuk

elemen dalam kondisi tertekan [14].

Sejumlah variabel-variabel lain yang menyebabkan kelelahan yang cenderung mengubah kondisi kelelahan, seperti korosi, suhu, kelebihan beban, struktur metalurgi, tegangan sisa dan tegangan kombinasi. Kelelahan merupakan pertimbangan untuk pembangunan rinci dari struktur yang bagian-bagiannya terdapat konsentrasi tegangan misalnya pada daerah pengelasan. Perhitungan kelelahan dilakukan untuk mendapatkan faktor keamanan yang harus dicapai oleh suatu struktur, selama struktur tersebut beroperasi sesuai dengan perencanaan.

Analisis kelelahan dapat dilakukan dengan menggunakan dua metode berikut [21]:

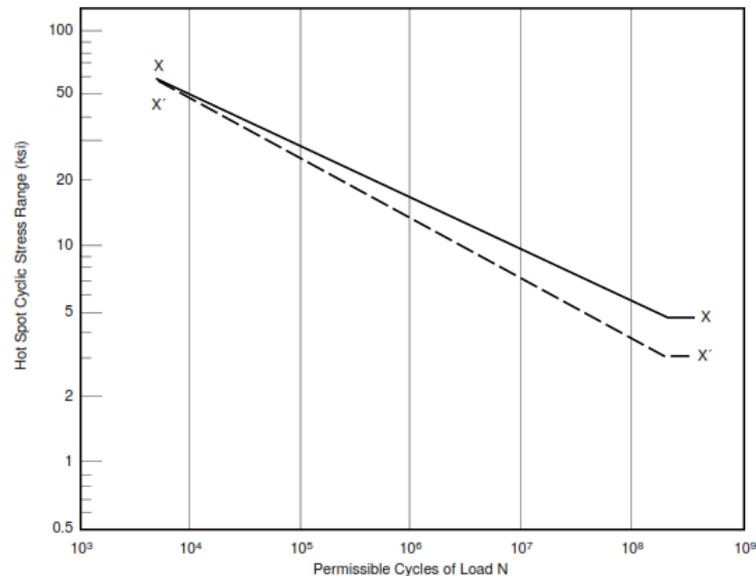
1. Metode Deterministik. Dalam metode ini, energi laut merupakan simulasi menggunakan frekuensi diskrit dan gelombang tinggi dengan angka yang sesuai dengan karakteristik lokasi beroperasi. Tekanan struktur dan *hot spot* yang dihasilkan untuk masing-masing gelombang diskrit. Penjumlahan dari kerusakan kelelahan karena ini beban gelombang diskrit kasus kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan total kerusakan selama umur struktur.
2. Metode Spektral. Metode ini menggunakan energi laut sebagai analisa spektrum yang digunakan terhadap fungsi transfer untuk respon struktur yang telah dikonversi. Fungsi transfer ini kemudian digunakan untuk menghasilkan tekanan *hot spot* pada *joint* tersebut.

2.7 Kurva S-N

Metode kurva S-N adalah pendekatan pertama yang digunakan dalam upaya untuk memahami dan mengukur kelelahan pada struktur. Kurva S-N adalah metode desain kelelahan standar selama hampir 100 tahun. Pendekatan S-N masih banyak digunakan dalam aplikasi desain di mana tegangan yang diterapkan adalah rentang elastis material dan umur

yang dihasilkan untuk siklus kegagalan. Kurva S-N digunakan untuk menyatakan karakteristik kelelahan pada material yang mengalami pembebanan yang berulang pada *magnitude* konstan. Dimana N adalah jumlah siklus pada tegangan yang menyebabkan kerusakan pada struktur. Tingkat keyakinan akurasi penentuan kurva S-N dipengaruhi oleh parameter ini mempunyai ketidakpastian. Kombinasi ketidakpastian dari kedua parameter menjadikan ketidakpastian total kurva S-N.

Dasar dari kurva S-N atau *Wohler curve* adalah plot dari *stress* (S) *versus* jumlah siklus (N). Kurva ini digunakan untuk menyatakan karakteristik kelelahan pada material yang mengalami pembebanan yang berulang pada *magnitude* konstan [22].



Gambar 2.8. Kurva S-N [23]

Gambar 2.8 dapat dijadikan pendekatan untuk analisa kelelahan. Pada formulasi *fatigue S-N curves American Petroleum Institute Recommended Practice 2A-Working Stress Design* [23] untuk menganalisa umur kelelahan struktur bangunan lepas pantai akibat tegangan kerja yang dialami menggunakan persamaan:

$$N = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{ref}} \right)^{-m} \quad (2.9)$$

Dimana N adalah nilai siklus yang di izinkan untuk penggunaan siklus rentang tegangan $\Delta\sigma$ dengan $\Delta\sigma_{ref}$ dan m seperti pada penjelasan Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Formulasi kelelahan kurva S-N [23]

Kurva	$\Delta\sigma_{ref}$ Rentang tegangan pada 2 juta siklus	m <i>inverse log-log slope</i>	Batas tahanan pada 200 juta siklus
X	14,5 ksi (100 MPa)	4,38	5,07 ksi (35 MPa)
X'	11,4 ksi (79 MPa)	3,74	3,33 ksi (23 MPa)

Tabel 2.1 dapat digunakan untuk profil las terkontrol (*with weld profile control*) dan memiliki ketebalan cabang sambungan kurang dari 25 mm. Untuk profil las terkontrol yang sama tetapi ketebalannya lebih besar, perlu menggunakan efek skala. Kurva X' dapat digunakan untuk profil las tanpa kontrol (*without weld profile control*), tetapi sesuai dengan profil dasar standar pelat (ANSI/AWS) dan memiliki ketebalan cabang sambungan kurang 16 mm. Dalam penelitian ini terfokus dengan menggunakan kurva X dimana semua profil las dalam kondisi terkontrol.

2.8 Metode Palmgren-Miner

Kerusakan akibat kelelahan pada struktur lepas pantai secara dominan disebabkan oleh beban gelombang. Tegangan yang disebabkan oleh beban ini selalu berubah arah dan besarnya berlangsung secara acak. Tegangan ini terbagi menjadi variasi pengelompokan tegangan yang secara kumulatif mengakibatkan total kerusakan kelelahan. Gesekan pada umur kelelahan diasumsikan oleh *stress range* yang diberikan dalam satu tahun didefinisikan oleh [24] sebagai perbandingan jumlah *cycle* dalam *stress range* itu yang menyebabkan kerusakan [25]. Total kerusakan per tahun yang diberikan oleh jumlah gesekan pada umur pakai (*consume life*) adalah sebagai berikut [14]:

$$D = \sum_i^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2.10)$$

Dimana:

n_i = Jumlah siklus kolom interval rentangan tegangan dari rentangan distribusi tegangan jangka panjang

N_i = Jumlah siklus untuk gagal pada perhitungan tegangan, didapatkan dari kurva S-N

k = Jumlah total dari interval-interval rentangan tegangan

D = Rasio kerusakan jumlah kumulatif

2.9 *Response Amplitude Operator (RAO)*

Akibat adanya gelombang regular, struktur memberikan respon berupa gerakan (*motion*). Sebelum menghitung gerakan terlebih dahulu dihitung gaya yang bekerja pada struktur. Ada beberapa teori untuk menghitung gaya gelombang yang mengenai struktur seperti teori Morrison, difraksi, dan strip. Meskipun rumus matematik dari teori-teori ini berbeda satu sama lain, semua teori tersebut menghitung hal yang sama yaitu gaya eksitasi, *added mass*, dan *damping* pada struktur sebagai fungsi dari frekuensi dan *heading*. Jika persamaan gerak diselesaikan per satuan amplitude gelombang, maka didapatkan sejumlah nilai yang disebut *Response Amplitude Operator (RAO)*.

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \quad (2.11)$$

Dimana:

$X_p(\omega)$ = amplitude struktur (mm)

$\eta(\omega)$ = amplitude gelombang (mm)

Sedangkan fungsi respon pada frekuensi gelombang dapat ditulis sebagai berikut [14]:

$$\text{Respon } (\omega) = (RAO)\eta(\omega) \quad (2.12)$$

Dimana:

η = Amplitude struktur (mm)

ω = Frekuensi angular (rad/sec)

RAO sering disebut sebagai *transfer function* karena RAO mentransfer beban luar (gelombang) menjadi suatu respon pada struktur. Dalam perhitungan RAO, gelombang dianggap regular dan sejumlah frekuensi digunakan untuk mencakup keseluruhan rentang frekuensi yang ada pada spektrum gelombang.

Menurut [26], respon gerakan RAO terbagi menjadi dua yaitu:

1. Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitude gerakan *disbanding* dengan amplitude gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang)
2. Respons gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitude gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang

$(k_w = \frac{\omega^2}{g})$ dengan amplitudo gelombang insiden.

2.10 Spektrum Gelombang

Keadaan laut ditentukan oleh tinggi gelombang signifikan, periode gelombang signifikan, periode puncak, dan arah gelombang. Pengumpulan data dilakukan dengan investigasi visual dan observasi instrumental dengan pelampung, radar, laser, dan satelit. Keadaan laut, dalam jangka pendek, yang biasanya 3 jam, diasumsikan sebagai proses Gaussian ergodik rata-rata nol. Ini dapat ditentukan sepenuhnya oleh spektrum gelombang. Untuk Laut Utara, spektrum JONSWAP direkomendasikan. Untuk kondisi laut terbuka, disarankan menggunakan spektrum Pierson Moskowitz (PM). Dalam jangka panjang, variasi keadaan laut lebih lambat daripada fluktuasi jangka pendek. Hal ini sering didekati dengan serangkaian proses Gaussian yang tidak bergerak dan rata-rata, yang ditentukan oleh tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode gelombang puncak (T_p). Berikut adalah beberapa spektrum yang relevan, dapat diterapkan dalam desain anjungan

lepas pantai [27]. Hal tersebut dapat diungkapkan melalui teori gelombang dan persamaan Morrison. Terlihat bahwa beban gelombang dan arus berubah secara berkala, dan memiliki nilai maksimum pada periode $\frac{3}{4}$ [28].

Spektrum gelombang menggambarkan distribusi energi dari frekuensi yang berbeda dari laut suatu negara. Spektrum harus dipilih berdasarkan karakteristik frekuensi lingkungan gelombang [27].

a. Spektrum Pierson Moskowitz Untuk Beban Gelombang

Spektrum Pierson Moskowitz adalah salah satu spektrum parameter dan digunakan untuk kondisi laut yang berkembang penuh yang dihasilkan oleh angin yang relatif moderat pada tarikan yang besar.

$$S^+(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-4} \right] \quad (2.13)$$

Dimana, α adalah konstanta phillips $\cong 0,0081$

b. Modifikasi Spektrum Pierson Moskowitz (2 Parameter H_s, ω_o)

Ini adalah spektrum dua parameter yang dikembangkan untuk memperhitungkan tinggi gelombang. Spektrum ini cocok untuk kondisi laut yang berkembang sepenuhnya dan biasanya digunakan untuk menggambarkan gelombang badai tropis yang ditimbulkan oleh angin topan. Ini memiliki *bandwidth* frekuensi yang lebih besar.

$$S^+(\omega) = \frac{5}{16} H_s \frac{\omega_o^4}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-4} \right] \quad (2.14)$$

c. Spektrum ISSC (*International Ship Structures Congress*) (2 Parameter H_s, ϖ)

Spektrum ISSC merupakan modifikasi kecil dari spektrum Bretschneider dan direkomendasikan untuk kondisi laut yang berkembang sepenuhnya. Persamaan spektral ini berlaku hanya untuk spektrum berpita sempit dan ketinggian gelombang mengikuti distribusi Gaussian.

$$S^+(\omega) = 0,1107 H_s \frac{\omega^{-4}}{\omega^5} \exp \left[-0,4427 \left(\frac{\omega}{\bar{\omega}} \right)^{-4} \right] \quad (2.15)$$

$$\bar{\omega} = \frac{M_1}{M_0}$$

Dimana, M_1 dan M_0 adalah momen spectral

d. Spektrum JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) (5

Parameter $H_s, \omega_0, \gamma, \tau_a, \tau_b$)

Spektrum JONSWAP adalah bentuk modifikasi dari spektrum PM dan direkomendasikan untuk digunakan dalam analisis keandalan. Spektrum ini hanya berlaku untuk pengambilan terbatas dan digunakan untuk menggambarkan gelombang badai musim dingin di Laut Utara.

$$S^+(\omega) = \frac{\bar{\alpha} g^2}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{\alpha(\omega)} \quad (2.16)$$

Dimana γ adalah parameter puncaknya. Nilai 3.3 menghasilkan spektrum rata-rata untuk kecepatan angin tertentu dan panjang tarikan tertentu. Variasi dari puncaknya parameter tergantung pada durasi angin dan tahap pertumbuhan dan kerusakan badai.

$$\alpha(\omega) = \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\bar{\sigma}^2 \omega_0^2} \right] \quad (2.17)$$

Dimana, $\bar{\sigma}$ adalah parameter lebar spektral dan bentuk parameter yang diperoleh dari:

$$\bar{\sigma}_a = 0,07, \omega \leq \omega_0 \quad (2.18)$$

$$\bar{\sigma}_b = 0,09, \omega > \omega_0 \quad (2.19)$$

Dengan konstanta Phillips yang dimodifikasi diberikan oleh:

$$\bar{\alpha} = 3,25 \times 10^{-3} H_s^2 \omega_0^4 [1 - 0,287 \ln(\gamma)] \quad (2.20)$$

$$\gamma = 5 \quad \text{untuk} \quad \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3,6 \quad (2.21)$$

$$= \exp \left[5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right] \text{ untuk } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 3,6 \quad (2.22)$$

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.23)$$

Dimana, variasi γ dari 1 sampai 7

2.11 *Stress Response Spectra*

Response spectra didefinisikan sebagai respon kerapatan pada struktur akibat gelombang, dalam hal ini berupa *energy density spectrum*. Untuk sistem linear, fungsi dari RAO merupakan fungsi kuadrat. Persamaan dari *response spectra* adalah sebagai berikut [29]:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (2.24)$$

Dimana,

S_R = Spektra gelombang, mm^2/sec

S = Spektrum gelombang, mm^2/sec

RAO = Response Amplitudo Operator, N/mm

ω = Frekuensi angular, rad/sec

Response spectra dapat digunakan untuk mengetahui besar respon maksimum yang mungkin terjadi dalam suatu rentang waktu tertentu. Setelah spektrum tegangan didapat langkah selanjutnya dalam mencari umur kelelahan (*fatigue life*) dengan cara di bawah ini:

Mencari *zero moment* dan *second moment*, semuanya didapat dari perhitungan spektrum tegangan (*stress*) yaitu:

$$m_0 = \int_0^\infty S_R(\omega) d\omega \quad m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S_R(\omega) d\omega \quad (2.25)$$

Mencari *mean zero crossing period* pada tegangan:

$$T_{z\sigma} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.26)$$

Stress significant

$$\sigma = \sqrt{4m_0} \quad (2.27)$$

Mendapatkan tegangan amplitudo efektif

$$\sigma_{eff} = 0,776x \text{ Stress Significant} \quad (2.28)$$

Menentukan nilai *stress range* dan *number of cycle* kegagalan S-N

$$n = \frac{T}{T_{z\sigma}} \quad (2.29)$$

Setelah itu umur kelelahan (*fatigue life*) bisa didapatkan dari Persamaan Miner [30] :

$$D = \sum \frac{n}{N_i} \quad (2.30)$$

Fatigue Life

$$FL = \frac{1}{D}, \quad D \text{ adalah perhitungan untuk satu tahun} \quad (2.31)$$

Dimana,

$T_{z\sigma}$ = Periode *mean zero crossing* (s)

n = *Number of Cycle*

σ_{eff} = Tegangan amplitude efektif (N/mm²)

N_i = Berdasarkan kurva S-N

D = *Fatigue Damage* untuk kondisi *sea states*