

SKRIPSI

**PERBANDINGAN METODE PALMGREN-MINER dan PARIS
ERDOGAN TERHADAP UMUR KAPAL *VERY LARGE CRUDE
CARRIER (VLCC)***

Disusun dan diajukan oleh

ANDRI

D081 18 1009



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI
PERBANDINGAN METODE PALMGREN-MINER DAN PARIS
ERDOGAN TERHADAP UMUR KAPAL *VERY LARGE CRUDE*
CARRIER (VLCC)

Disusun dan diajukan oleh

ANDRI

D081 18 1009

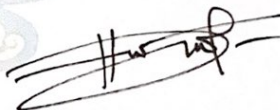
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas
Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 27 Juni 2022 dan dinyatakan
telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing utama,

Pembimbing pendamping,


Muh. Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.
NIP.197506082005011003


Habibi, S.T., M.T.
NIP. 198704252019031012

Ketua Departemen Teknik Kelautan


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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andri
Nomor Mahasiswa : D081 18 1009
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“Perbandingan Metode Palmgren-Miner Dan Paris Erdogan Terhadap Umur Kapal *Very Large Crude Carrier* (VICC)”

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, 27 Juni 2022

Yang menyatakan,



Andri

ABSTRAK

ANDRI. *Perbandingan Metode Palmgren-Miner Dan Paris Erdogan Terhadap Umur Kapal Very Large Crude Carrier (VLCC) (dibimbing oleh Muhammad Zubair Muis Alie dan Habibi)*

Permasalahan yang selalu terjadi pada bangunan apung atau struktur kapal yaitu kerusakan yang dapat menyebabkan struktur tersebut mengalami kegagalan. Kerusakan bangunan laut terutama terjadi akibat kelelahan (*fatigue*). Unit lepas pantai yang menua dapat mengalami kerusakan struktur yang terkait dengan berbagai jenis kerusakan yang ditimbulkan, termasuk elemen yang dibelokkan, penyok, robekan, retakan, kehilangan material dan perforasi. Masing-masing dapat mempengaruhi kekuatan struktur secara berbeda, dan harus dianalisis dengan teknik tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan umur kapal VLCC menggunakan metode Palmgren-Miner dan Paris Erdogan. 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 kapal VLCC. Adapun analisa kelelahan menggunakan metode Paris Erdogan dilakukan dengan menentukan parameter *Stress Intensity Factor*, besar *crack propagation rate*, dan umur lelah pada sambungan kritis. Pengaruh tegangan rata-rata (*von mises stress*) dan spektrum gelombang JONSWAP akan 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 yaitu sebesar tegangan maksimal sebesar 419,442 N/mm² dan tegangan minimal sebesar 18,99 N/mm². Pada penelitian ini, *bottom plate* digunakan dalam analisis umur kelelahan. Dengan asumsi bentuk *crack semi – elliptical*. Hasil analisis didapatkan nilai *Nilai Stress Intensity Factor* pada sambungan kritis retak awal adalah 2,59 mm. Nilai dari kecepatan perambatan retak adalah $2,6 \times 10^{-6}$ in/cycle dengan *meshing* 300 mm. Hasil dari penelitian ini diperoleh umur kapal dengan metode Palmgren-Miner selama 17 tahun dan untuk metode Paris Erdogan selama 14 tahun.

Kata Kunci: VLCC, Palmgren-Miner, Paris Erdogan, JONSWAP, *von mises stress*, kelelahan, *stress intensity factor*

ABSTRACT

ANDRI. *Comparison of the Palmgren-Miner and Paris Erdogan Methods on the Age of the Very Large Crude Carrier (VLCC) (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie and Habibi**)*

The problem that always occurs in floating buildings or ship structures is damage that can cause the structure to fail. Damage on marine structures mainly occurs due to fatigue. Aging offshore units can experience structural damage associated with various types of damage inflicted, including deflected elements, dents, tears, cracks, material loss and perforations. Each of these can affect the structural strength differently, and must be analyzed with specific techniques. This study aims to compare the fatigue life of VLCC vessels using the Palmgren-Miner and Paris Erdogan methods. Fatigue analysis of the ship structure was 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 (number of cycles) and the stress range which resulted in the fatigue life of the VLCC. The fatigue analysis using the Paris Erdogan method is carried out by determining the parameters of the Stress Intensity Factor, the crack propagation rate, and the fatigue life of the critical connection. The effect of the average stress (von mises stress) and the JONSWAP wave spectrum will affect the value of the moments and forces acting on the ship which affects the time of 1 cycle of fatigue (mean zero crossing period) faster if the load received is greater, namely the maximum stress of 419,442 N/mm² and a minimum stress of 18,99 N/mm². In this study, the bottom plate was used in the fatigue life analysis. Assuming a semi-elliptical crack shape. The results of the analysis shown that the value of the Stress Intensity Factor at the initial crack critical joint was to 2,59 mm. The value of the crack propagation is 2.6×10^{-6} in/cycle with a meshing of 300 mm. The results of this study obtained the fatigue life of the ship with the Palmgren-Miner method for 17 years and for the Paris Erdogan method for 14 years.

Keywords : VLCC, Palmgren-Miner, Paris Erdogan, von mises stress, JONSWAP, fatigue, stress intensitiy factor

PRAKATA

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dan atas kehendakNya lah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“Perbandingan Metode Palmgren-Miner Dan Paris Erdogan Terhadap Umur Kapal *Very Large Crude Carrier* (VICC)”

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

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

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
2. Bapak **Habibi, ST. MT.** selaku dosen pembimbing pendamping yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.

4. Bapak **Dr.Ir. Taufiqur Rachman, ST., MT.** selaku penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga saya dapat menyelesaikan studi.
5. **Seluruh Dosen pengajar dan Staff Administrasi** Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bantuannya selama penulis menjalankan studi hingga menyelesaikan tugas akhir.
6. Kakanda **Indah Melati Suci, S.T.** yang telah membantu dalam memberi pemahaman selama proses pengerjaan skripsi ini.
7. **Teman-teman Mahasiswa khususnya rekan di Labo OSAREL 2018 (Safitri, Indri, Kofifa, Yulin, Bipa, dan Dirham)** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah dilalui bersama dalam suka dan duka.

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, 27 Juni 2022

Andri

DAFTAR ISI

PRAKATA	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR NOTASI	xii
DAFTAR ISTILAH.....	xiv
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.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Sejarah Kapal Tanker.....	5
2.2. Jenis Kapal Tanker.....	6
2.3. Konstruksi <i>Single Hull</i> Tanker	8
2.4. Tegangan yang Bekerja	9
2.5. Beban-Beban yang Bekerja.....	10
2.6. Analisis Kelelahan	12
2.7. Kurva S-N.....	15
2.8. Metode Palmgren-Miner	17
2.9. Response Amplitude Operator (RAO).....	17
2.10. <i>Spektrum Gelombang</i>	19
2.11. <i>Stress Response Spectra</i>	22
2.12. <i>Fracture Mechanic</i>	23
2.13. Retak (<i>crack</i>) dan Perambatan Retak	25
2.14. <i>Stress Intensity Factor</i> (SIF).	28

2.15. Perambatan Retak Berdasarkan Material.....	29
2.16. Metode Paris Erdogan.....	30
BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1. Jenis Penelitian.....	31
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian	31
3.3. Penyajian Data	31
3.4. Analisa Data	35
3.5. Diagram Alir	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1. Metode Palmgren-Miner	38
4.1.1. Tegangan Kerja Kapal VLCC Pada Kondisi <i>Sagging</i>	38
4.1.2. Tegangan Kerja Kapal VLCC Pada Kondisi <i>Hogging</i>	39
4.1.3. <i>Von Misses Stress</i>	39
4.1.4. Spektrum Gelombang	41
4.1.5. <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO)	41
4.1.6. <i>Stress Response Spectra</i>	43
4.1.7. Umur Kelelahan (<i>Fatigue Life</i>)_Palmgren-Miner.....	43
4.2. Metode Paris Erdogan	45
4.2.1. <i>Hot Spot Stress</i>	45
4.2.2. <i>Initial Crack</i>	46
4.2.3. Perhitungan <i>Stress Intensity Factor</i> (SIF)	47
4.2.4. Perhitungan Kecepatan Perambatan Retak.....	47
4.2.5. Umur Kelelahan (<i>Fatigue Life</i>) Paris Erdogan.....	49
4.3. Perbandingan umur kelelahan.....	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	52
5.1. Kesimpulan	52
5.2. Saran.....	52
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kapal <i>Crude Carrier Oil Tanker</i>	6
Gambar 2.2. Kapal <i>Product Tanker</i>	7
Gambar 2.3. Kapal <i>Chemical Tanker</i>	8
Gambar 2.4. Konstruksi <i>Single Hull Tanker</i>	9
Gambar 2.5. Kurva S-N API.....	15
Gambar 2.6. Faktor penyebab struktur rentan	24
Gambar 2.7. Perambatan Retak.....	26
Gambar 2.8. Laju Perambatan Retak Untuk Material <i>Ferrite-Perlite</i>	29
Gambar 3.1. Konfigurasi penampang <i>midship VLCC</i>	32
Gambar 3.2. Diagram alir	37
Gambar 4.1. Distribusi tegangan kerja kapal VLCC pada kondisi <i>sagging</i> .	38
Gambar 4.2. Distribusi tegangan kerja kapal VLCC pada kondisi <i>hogging</i>	39
Gambar 4.3. Grafik variasi spektrum gelombang JONSWAP	41
Gambar 4.4. <i>Response Amplitude Operator</i> kapal VLCC	42
Gambar 4.5. <i>Stress Response Spectra</i> kapal VLCC	43
Gambar 4.6. <i>Hot Spot Stress</i>	46
Gambar 4.7. <i>Crack</i>	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Formulasi <i>fatigue S-N curves</i>	16
Tabel 3.1. Konfigurasi ukuran <i>stiffener</i>	33
Tabel 4.1. Nilai <i>von misses stress</i>	40
Tabel 4.2. Hasil perhitungan <i>fatigue life VLCC</i>	44
Tabel 4.3. Nilai SIF tiap penambahan Panjang <i>crack</i>	47
Tabel 4.4. Perhitungan Kecepatan Rambat Retak	48
Tabel 4.5. Perhitungan umur kelelahan	49
Tabel 4.6. Perbandingan umur kelelahan	51

DAFTAR NOTASI

A	= Panjang retak	(mm)
a ₀	= Kedalaman retak awal	(mm)
a _f	= Kedalaman retak akhir	(mm)
B	= Lebar kapal	(mm)
C	= Konstanta material	
C _b	= Koefisien blok kapal	
C _D	= Koefisien distribusi	
D	= <i>Fatigue Damage</i> untuk kondisi <i>sea states</i>	
da/dn	= Kecepatan perambatan retak	
E	= Modulus elastisitas	(N/mm ²)
F	= Gaya	(N)
H	= Tinggi kapal	(mm)
I	= Inersia penampang	(mm ⁴)
K	= <i>Stress intensity factor</i>	(ksi ^{1/2} /in)
L	= Panjang kapal	(mm)
M	= Konstanta material	
N	= Jumlah siklus	
P	= Gaya geser atau gaya lintang	(N)
P _B	= Beban luar alas kapal	(N/mm ²)
P _C	= Beban statik kapal	(N/mm ²)
P _D	= Beban geladak cuaca	(N/mm ²)
P _i	= Beban alas dalam kapal	(N/mm ²)
P _{S1}	= Beban luar sisi kapal di bawah garis air muat	(N/mm ²)
P _{S2}	= Beban luar sisi kapal di atas garis air muat	(N/mm ²)
P ₀	= <i>Basic external dynamic load</i>	(N/mm ²)
R	= Rasio tegangan	
S	= Spektra gelombang	(mm ² /s)
S _R	= Spektrum gelombang	(mm ² /s)

T	=	Periode gelombang	(s)
X_p	=	Amplitude struktur	(mm)
Z	=	Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah	(mm)
$\Delta\sigma$	=	<i>Stress range</i>	
ΔK	=	Perubahan stress intensity factor	(ksi $\sqrt{\text{in}}$)
σ	=	Tegangan	(N/mm ²)
σ_{eff}	=	Tegangan amplitude efektif	(N/mm ²)
σ_{nom}	=	Tegangan nominal	(N/mm ²)
η	=	Amplitude gelombang	(mm)
ω	=	Frekuensi sudut	(rad/s)

DAFTAR ISTILAH

<i>ANSYS</i>	:	<i>Software</i> yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
<i>BKI</i>	:	Biro Klasifikasi Indonesia
<i>IACS</i>	:	<i>International Association of Classification Societies</i>
VLCC	:	<i>Very Large Crude Carrier</i>
Crack	:	Retak pada struktur
JONSWAP	:	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
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.
Fracture Mechanic	:	Metode yang digunakan untuk menganalisis umur kelelahan yang disebabkan oleh retak.
<i>Software</i>	:	Istilah khusus untuk data yang diformat dan disimpan secara digital, termasuk program komputer, dokumentasinya dan berbagai informasi yang bisa dibaca dan bisa ditulis oleh komputer.
<i>Failure</i>	:	Kegagalan suatu struktur yang tidak mampu mencapai atau melampaui nilai-nilai kinerja tertentu.
<i>Stress Intensity Factor</i>	:	Parameter yang digunakan untuk melakukan analisa keretakan yang mendeskripsikan tegangan yang terjadi di ujung retak.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal adalah kendaraan air dengan bentuk dan jenis tertentu, yang digerakkan dengan tenaga angin, tenaga mekanik, energi lainnya, ditarik atau ditunda, termasuk kendaraan yang berdaya dukung dinamis, kendaraan di bawah permukaan air, serta alat apung dan bangunan terapung yang tidak berpindah-pindah.

Setiap perancangan dan pembuatan kapal dari suatu perusahaan galangan kapal, terdapat proses yang mencakup berbagai aspek baik secara teknis, ekonomis dan eksploitasi. Salah satu aspek teknis yang turut mempengaruhi tingkat keamanan kapal disaat bereksploitasi baik pada kondisi laut yang tenang dan kondisi laut yang bergelombang tidak lain adalah kekuatan dari struktur konstruksi kapal tersebut. Konstruksi dari struktur kapal 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. Tanker adalah kategori kapal yang didesain dengan lambung dek tunggal termaksud penyusunan tanki-tanki secara integral maupun *independent*, khususnya untuk angkutan cargo curah dalam bentuk cairan [1].

Permasalahan yang selalu terjadi pada bangunan apung atau struktur kapal adalah kerusakan yang dapat menyebabkan struktur tersebut mengalami kegagalan. Kerusakan bangunan laut terutama terjadi akibat kelelahan (*fatigue*), baik pada komponen struktur utama maupun sekunder dan tersier [2].

Keberadaan kapal tanker VLCC *single hull* sudah jarang ditemui. Hal ini dikarenakan adanya peraturan baru mengenai penggunaan *double hull* pada kapal tanker VLCC. Antara tahun 60-90an banyak kapal tanker yang

beroperasi dengan *single hull*. Pada tahun tersebut banyak terjadi kecelakaan kapal yang mengakibatkan polusi yang berdampak negative untuk kelangsungan alam. Oleh karena tidak efektifnya Undang-undang Polusi Minyak tahun 1990 (OPA 90) mengenai pencegahan polusi lingkungan yang disebabkan oleh kapal, maka *International Maritime Organization* (IMO) mengambil tindakan dan menetapkan standar *double hull* pada tahun 1992 dalam *International Convention for the Prevention of the Pollution from Ships*.

Bangunan apung cenderung mengalami kelelahan karena beban gelombang yang bersifat siklis yang terjadi pada struktur. Kajian dan penelitian mengenai analisa kelelahan dalam memperkirakan umur kelelahan pada konstruksi kapal VLCC banyak dilakukan dan menggunakan metode yang bermacam-macam. Diantara banyak metode yang digunakan, diantaranya yaitu metode Palmgren-Miner dan metode Paris Erdogan.

Berdasarkan uraian sebelumnya, maka fokus utama penelitian ini adalah "Perbandingan Metode Palmgren-Miner Dan Paris Erdogan Terhadap Umur Kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC)".

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah bagaimana perbandingan analisa umur kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC) antara metode Palmgren-Miner dengan metode Paris Erdogan.

1.3 Batasan Masalah

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

1. Menggunakan spektrum gelombang JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) sesuai dengan nilai variasi spektrum gelombang tertinggi
2. Kurva S-N digunakan untuk perhitungan umur struktur

3. Metode Palmgren-Miner dan Paris Erdogan untuk perhitungan umur struktur

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui hasil analisa umur kapal *very large crude carrier* (VLCC) menggunakan metode Palmgren-Miner dan Paris Erdogan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya mengetahui analisis umur kapal.
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 kapal VLCC.

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 perbandingan metode Palmgren-Miner dan Paris Erdogan dalam menganalisa umur kapal VLCC. Selain itu berisi juga mengenai perumusan masalah yang 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 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 kapal VLCC (*Very Large Crude Carrier*), mengenai konstruksi kapal VLCC, teori tentang cara menganalisis umur kapal VLCC dengan metode Palmgren-Miner dan Paris Erdogan, 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 kapal VLCC, 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 kapal VLCC dengan metode yang berbeda dan spektrum gelombang JONSWAP pada lokasi yang berbeda serta kerangka alur pemikiran.

BAB IV Pembahasan

Bab ini berisi pembahasan tentang investigasi umur kelelahan kapal *Very Large Crude Carrier* (VLCC), mulai dari dimensi kapal yang digunakan, material, gambar penampang kapal VLCC yang diteliti dan juga berupa hasil investigasi tegangan rata-rata menggunakan metode numerik berupa nilai momen yang bekerja serta nilai dari *stress intensity factor* yang akan digunakan untuk menganalisis umur dari struktur kapal VLCC.

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 Sejarah Kapal Tanker

Selama abad ini industri minyak bumi telah bangkit dari yang relatif kecil menjadi salah satu industri dimana ekonomi di seluruh dunia sangat berpengaruh akan kebutuhan minyak bumi. Pada berbagai kedalaman di daratan maupun perairan, banyak akumulasi dari hidrokarbon yang telah lama terbentuk dari dekomposisi hewan dan tumbuhan. Hidrokarbon adalah senyawa hidrogen dan karbon yang mempunyai suhu dan tekanan normal, dapat berupa gas, cair, atau padat tergantung dari kompleksitas molekulnya [3].

Kapal tanker adalah kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak atau produk turunannya, seperti minyak mentah, minyak yang telah diolah, bahan kimia, minyak nabati, minyak sawit, methanol, gas alam cair, dan sebagainya. Tanker adalah konsep yang relatif baru, berasal dari akhir abad ke-19. Sebelumnya, teknologi sama sekali tidak mendukung pengangkutan curah cair. Pasar juga tidak siap untuk menghadapi penjualan kargo dalam jumlah besar, oleh karena itu sebagian besar kapal mengangkut berbagai produk yang berbeda dalam ruang yang berbeda pula untuk diperdagangkan.

Pada Desember 1966, dalam kurun waktu tiga minggu, tiga VLCC yang masih baru mengalami ledakan. Tiga kasus ini terjadi ketika proses pembersihan tangki kargo yang kosong. Seluruh awak kapal bertugas meninggal dunia. Ada banyak kebakaran yang terjadi di masa lalu, yang terakhir Seven Skies yang menewaskan empat awak kapal. Akan tetapi tiga kasus ini terjadi dalam waktu yang singkat, dua diantaranya VLCC milik Shell [4]. Tanker pertama kali digunakan oleh industri minyak untuk mengirim bahan bakar dalam jumlah besar dari kilang ke pelanggan. Penggunaan kapal tanker menjadi populer karena cairan lain juga lebih murah untuk diangkut dalam jumlah besar.

2.2 Jenis Kapal Tanker

Kapal tanker terdiri atas tiga jenis yaitu *crude carrier*, *product tanker* dan yang lebih khusus seperti *chemical tanker*, *gas carrier* dan *asphalt / bitumen carrier*. Sampai tahun 2016, terdapat 7,065 buah *Oil tanker* di dunia. Adapun beberapa jenis dari kapal tanker, antara lain:

a. Kapal *Crude Carrier*

Cargo curah cair yang dibawa oleh *Crude Carrier* umumnya homogen. Perbedaan kualitas minyak mentah tidak berpengaruh karena pada akhirnya akan diolah di tahap berikutnya. Ukuran *Crude Carrier* mulai dari 50,000 MT DWT hingga sekitar 500,000 MT DWT. Adapun contoh dari kapal *crude carrier* dapat dilihat pada gambar 2.1 sebagai berikut:



Gambar 2.1 Kapal *Crude Carrier Oil Tanker* [30]

b. Kapal *Product Tanker*

Minyak mentah diolah menjadi berbagai produk minyak. Produk minyak yang ringan seperti bensin, minyak tanah, dan gasoil, disebut *clean product*. Sedangkan yang lebih berat seperti minyak bakar (*oil fuel*) dan residu disebut *dirty product*. *Product Tanker* terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan ukuran dan muatannya (*clean atau dirty product*). *Clean Product Tanker* dapat mengangkut sebagian *dirty product* (kecuali jenis minyak yang paling berat), sedangkan *Dirty*

Product tanker tidak dapat memuat clean product. Tangki pada *clean product* tanker dilapisi bahan khusus (*coating*) untuk mencegah korosi dan harus selalu dibersihkan terlebih dahulu sebelum pemuatan. *Clean product tanker* memiliki sistem pemisah sehingga dapat memuat cargo yang berbeda tanpa resiko bercampur. Tangki pada *dirty product* tanker tidak dilapisi bahan khusus dan tidak memiliki sistem pemisahan, namun dilengkapi koil pemanas untuk mencegah pembekuan produk minyak yang memiliki densitas besar. Adapun contoh dari kapal *product tanker* dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Kapal *Product Tanker* [30]

c. Kapal *Chemical* Tanker

Kapal *Tanker* kimia adalah kapal kargo yang dibangun atau disesuaikan dan digunakan untuk mengangkut bahan kimia cair dalam bentuk curah. Kapal tanker kimia diharuskan mematuhi berbagai aspek keselamatan yang diuraikan dalam bagian B dari SOLAS Bab VIII dan *International Bulk Chemical Code* (IBC Code). Kargo kimia curah cair termasuk jenis muatan yang berbahaya, sebagian besar mudah terbakar dan/atau beracun. IBC Code membagi kapal tanker kimia dalam tiga jenis berdasarkan kapabilitasnya mengangkut bahan kimia, yaitu ST1, ST2, dan ST3. *Chemical* tanker disebut juga parcel tanker. Biasanya berukuran kecil, dari sekitar 5.000 ton DWT hingga

25.000 dwt. Beberapa kapal tanker pengangkut bahan kimia ini ada yang berukuran hingga 50.000 ton DWT. Pada tahun 2016, populasi kapal tanker jenis di dunia adalah 5.204 unit (Statistika.com). Adapun contoh dari kapal *chemical*/tanker dapat dilihat pada gambar 2.3

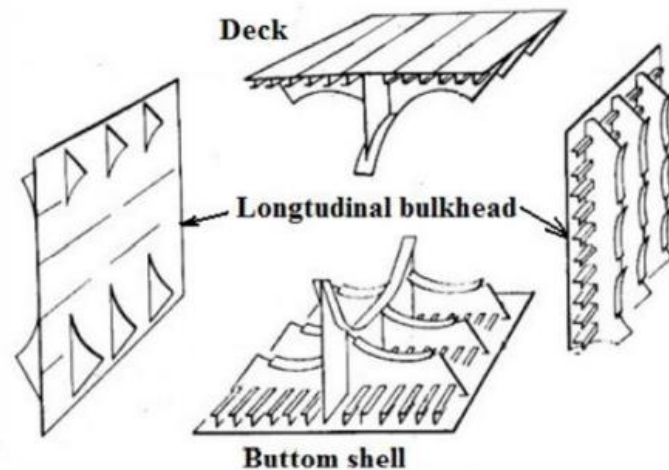


Gambar 2.3 Kapal *Chemical Tanker* [30]

2.3 Konstruksi *Single Hull* Kapal Tanker

Tanker lambung tunggal (*single-hull tanker*), merupakan jenis tanker yang hanya memiliki satu lambung dan minyak yang dibawa disimpan dalam struktur lambung tersebut. Tanker *single hull* memiliki satu lambung dan secara langsung mengangkut minyak di dalam struktur lambung kapal. Beberapa tanker *single hull* mengangkut minyak dan air *ballast* dalam tangki yang sama; terdapat juga tanker *single hull* yang memiliki tangki *ballast* yang terpisah dengan lambung kapal (yaitu minyak dibawa langsung ke dalam lambung kapal, tapi tangki ballast terpisah dari muatan). Tangki *ballast* yang terpisah masih dapat terlindungi dari air laut oleh satu lambung. Jika terjadi tumpahan 10 minyak, maka hanya satu lambung yang akan diterobos [4].

Adapun contoh struktur utama komponen pada bagian tengah tanker dari *single hull tanker* dapat dilihat pada gambar 2.4 sebagai berikut:



Gambar 2.4 Konstruksi *Single Hull Tanker* [28]

Dengan struktur lambung yang hanya memiliki satu lapisan menyebabkan kemungkinan akan ancaman kebocoran yang lebih besar. Setelah terjadinya beberapa kecelakaan besar kapal tanker seperti yang terjadi pada kapal *Torrey Canyon* di Inggris tahun 1967, *Exxon Valdez* di Alaska tahun 1989, dan *Erika* di Perancis tahun 1999, juga mendorong pembuatan regulasi atau peraturan terkait pembatasan kapal *single-hull tanker, classification societies, double-hull Oil Tankers*.

2.4 Tegangan yang Bekerja

Tolak ukur yang dapat menjamin kekuatan struktur kapal adalah tegangan (*stress*). 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 [5].

Tegangan dasar ada dua yaitu tegangan normal dan tegangan geser. 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:

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

Dimana:

σ = Tegangan (N/mm²)

F = Gaya total (N)

A = Luas penampang (mm²)

Analisis tegangan metode numerik dengan bantuan *software* umumnya menggunakan tegangan ekuivalen atau yang biasa disebut dengan *von mises stress*. Tegangan ekuivalen atau tegangan rata-rata (σ_e) ini dituliskan dengan bentuk sebagai berikut:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right]} \quad (2.2)$$

Dimana x, y, dan z menyatakan arah sumbu tegangan-tegangan pada setiap elemen yang bekerja. Secara umum mempertimbangkan adanya tekuk (*buckling*) dan luluh (*yielding*). Tegangan-tegangan yang bekerja terdistribusi pada setiap bagian/elemen konstruksi kapal VLCC termasuk besaran tegangan yang dihasilkan [6].

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 [7].

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) [8]. Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.3.

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

Dimana:

- P_D = Beban geladak cuaca (N/mm²)
- P_o = Beban dinamis luar (N/mm²)
- C_D = Faktor distribusi
- z = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)
- T = Sarat kapal (m)
- H = Tinggi kapal (m)

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 [8]. 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})

$$P_{S_1} = 10.(T - z) + P_o.C_F.(1 + \frac{z}{T}) \quad (2.4)$$

$$P_{S_2} = P_o.C_F.\frac{20}{10+z-T} \quad (2.5)$$

Dimana:

P_D = Beban geladak cuaca (N/mm²)

P_{S1} = Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (N/mm²)

P_{S2} = Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (N/mm²)

P_O = Beban dinamis luar (N/mm²)

C_F = Faktor distribusi

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

T = Sarat kapal (m)

h_{db} = Tinggi *double bottom* (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 [8].

Beban luar alas kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.6.

$$P_B = 10.T + P_o.C_F \quad (2.6)$$

Dimana:

P_B = Beban luar alas kapal (N/mm²)

P_o = Beban dinamis luar (N/mm²)

C_F = Faktor distribusi

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 kapal VLCC. Metode elemen hingga digunakan untuk menghitung kekuatan yang disebabkan oleh beban aksial dan lentur [9]. 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 [10]. 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 [11].

Finite Element Method (FEM) non linier 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* [12]. 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 [13].

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 [14]. 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 retak 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:

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 [15].

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 [16]:

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

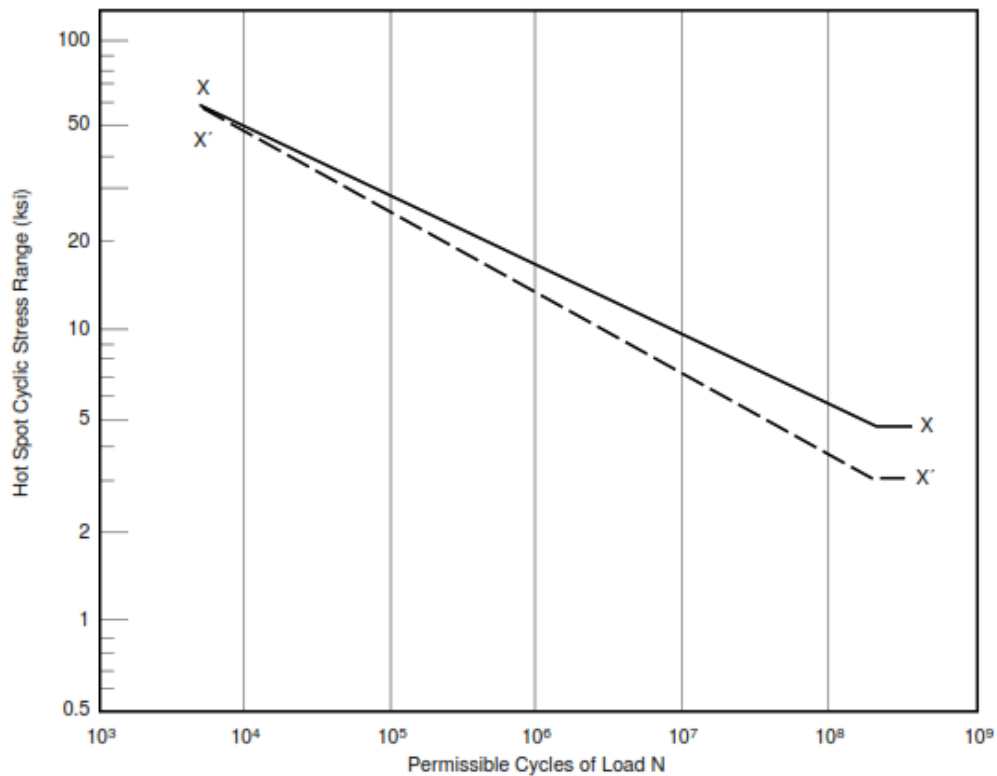
kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan total kerusakan selama umur struktur.

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. 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. Adapun kurva S-N dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Kurva S-N API [15]

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 [17].

Gambar 2.5 dapat dijadikan pendekatan untuk analisa kelelahan. Pada formulasi *fatigue S-N curves American Petroleum Institute Recommended Practice 2A-Working Stress Design* [18] untuk menganalisa umur kelelahan struktur bangunan lepas pantai akibat tegangan kerja yang dialami menggunakan persamaan:

$$N = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{ref}} \right)^{-m} \quad (2.7)$$

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 *fatigue S-N curves* [18]

<i>Curve</i>	$\Delta\sigma_{ref}$ <i>Stress range at 2 million cycles</i>	M <i>inverse log-log slope</i>	<i>Endurance limit at 200 million cycles</i>
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 ini 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 [19] sebagai perbandingan jumlah siklus dalam stress range itu yang menyebabkan kerusakan [20]. Total kerusakan per tahun yang diberikan oleh jumlah gesekan pada umur pakai (*consume life*) adalah sebagai berikut :

$$D = \sum_i^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2.8)$$

Dimana:

- n_i = Jumlah siklus kegagalan
- N_i = Jumlah siklus kegagalan yang diizinkan
- 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, beban tambahan, dan redaman 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)*.

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \quad (2.9)$$

Dimana:

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

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

Sedangkan fungsi respon pada frekuensi gelombang dapat ditulis sebagai berikut [21] :

$$X_p(\omega) = (RAO)\eta(\omega) \quad (2.10)$$

Dimana:

η = Amplitud struktur (mm)

ω = Frekuensi sudut (rad/detik)

RAO sering disebut sebagai fungsi transfer 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 [2], respon gerakan response amplitud operator (RAO) terbagi menjadi dua yaitu:

1. Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitud gerakan *disbanding* dengan amplitud gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang).
2. Respons gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitud 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. Hal 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 [22]. 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 3/4 [23].

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.

$$S^+(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \quad (2.11)$$

Dimana:

S^+ = Spektrum gelombang Pierson Moskowitz

α = Konstanta phillips $\cong 0,0081$

g = Percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

ω = Frekuensi gelombang (rad/s)

ω_0 = Frekuensi gelombang laut dalam (rad/s)

b. Modifikasi Spektrum Pierson Moskowitz (2 Parameter H_s, ω_0)

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.

$$S^+(\omega) = \frac{5}{16} H_s \frac{\omega_0^4}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \quad (2.12)$$

Dimana:

- S^+ = Spektrum gelombang Pierson Moskowitz
- α = Konstanta phillips $\cong 0,0081$
- g = Percepatan gravitasi bumi (m/s^2)
- H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)
- ω = Frekuensi gelombang (rad/s)
- ω_0 = Frekuensi gelombang laut dalam (rad/s)

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.

$$S^+(\omega) = 0,1107 H_s \frac{\omega^{-4}}{\omega^5} \exp \left[-0,4427 \left(\frac{\omega}{\varpi} \right)^{-4} \right] \quad (2.13)$$

$$\varpi = \frac{M_1}{M_0}$$

Dimana:

- S^+ = Spektrum gelombang Pierson Moskowitz
- α = Konstanta phillips $\cong 0,0081$
- g = Percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

- H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)
 ω = Frekuensi gelombang (rad/s)
 ω_0 = Frekuensi gelombang laut dalam (rad/s)
 M_1/M_2 = Momen spectral (N.m)

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.

$$S^+(\omega) = \frac{\bar{\alpha} g^2}{\omega^5} \exp\left[-1,25\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4\right] \gamma^{\alpha(\omega)} \quad (2.14)$$

Variasi dari puncaknya parameter tergantung pada durasi angin dan tahap pertumbuhan dan kerusakan badai.

$$\alpha(\omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\bar{\sigma}^2 \omega_0^2}\right] \quad (2.15)$$

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

$$\bar{\sigma}_a = 0,07; \omega \leq \omega_0 \quad (2.16)$$

$$\bar{\sigma}_b = 0,09; \omega > \omega_0 \quad (2.17)$$

Dengan konstanta Phillips yang dimodifikasi diberikan oleh:

$$\bar{\alpha} = 3,25 \times 10^{-3} H_s^2 \omega_0^4 [1 - 0,287 \ln(\gamma)] \quad (2.18)$$

$$\gamma = 5 \text{ untuk } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3,6 \quad (2.19)$$

$$= \exp\left[5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right] \text{ untuk } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 3,6 \quad (2.20)$$

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.21)$$

Dimana, Variasi γ dari 1 sampai 7

Dimana:

S^+ = Spektrum gelombang Pierson Moskowitz

α = Konstanta phillips $\cong 0,0081$

g = Percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)

ω = Frekuensi gelombang (rad/s)

ω_0 = Frekuensi gelombang laut dalam (rad/s)

m_1 = Zero momen

γ = Parameter puncak JOHNSWAP

T_p = Periode gelombang puncak (s)

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 [21] :

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (2.22)$$

Dimana:

S_R = Spektra gelombang ($mm^2/detik$)

$S(\omega)$ = Spektrum gelombang ($mm^2/detik$)

RAO = *Response amplitude operator* (N/mm)

ω = Frekuensi sudut (rad/detik)

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:

$$m_0 = \int_0^\infty S_R(\omega) d\omega \quad m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S_R(\omega) d\omega \quad (2.23)$$

Mencari *mean zero crossing period* pada tegangan:

$$T_{z\sigma} = 2\pi \sqrt{\frac{m_o}{m_2}} \quad (2.24)$$

Stress significant

$$\sigma = \sqrt{4m_o} \quad (2.25)$$

Mendapatkan tegangan amplitudo efektif

$$\sigma_{eff} = 0,776 \times \text{Stress Significant} \quad (2.26)$$

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

$$n = \frac{T}{T_{z\sigma}} \quad (2.27)$$

Setelah itu umur kelelahan (*fatigue life*) bisa didapatkan dari Persamaan Miner [24]:

$$D = \sum \frac{n}{N_i} \quad (2.28)$$

Fatigue Life

$$FL = \frac{1}{D}, \quad D \text{ adalah perhitungan untuk satu tahun} \quad (2.29)$$

Dimana:

T = Periode dalam 1 tahun (s)

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

n = Jumlah dari siklus

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

N_i = Jumlah dari siklus berdasarkan kurva S-N

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

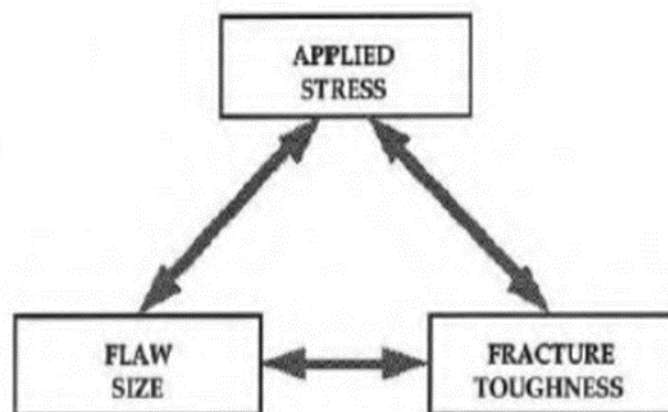
2.12 Fracture Mechanic

Ukuran retak awal yang diketahui maupun diasumsikan merupakan persyaratan dalam melakukan analisis umur kelelahan menggunakan metode mekanika kepecahan. Untuk struktur yang mengalami ketidaksempurnaan atau cacat (seperti porosi pengelasan, inclusion, dan cacat pengecoran) ukuran retak awalnya dapat diketahui [25]. *Fracture mechanics* merupakan metode analisis umur kelelahan struktur dengan

mempertimbangkan retak awal (*initiation crack*). Karena suatu struktur dalam masa operasi selalu terkena beban lingkungan yang bersifat siklis maka, retak awal tersebut dapat merambat. Akibat perambatan tersebut ukuran *crack* dapat mencapai nilai kritis yang mengakibatkan kegagalan struktur.

Oleh karena itu, diperlukan usaha untuk memprediksi berapa lama sebuah struktur dapat bertahan dari terbentuknya *initial crack* hingga struktur mengalami kegagalan (*failure*). Salah satu usahanya ialah analisis umur kelelahan dengan menggunakan *fracture mechanics*.

Pada penelitian tugas akhir ini dilakukan analisis umur kelelahan (*fatigue life*) pada *bottom plate* menggunakan *fracture mechanics*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai *stress intensity factor (SIF)*, serta umur kelelahan pada bagian tersebut. Analisis umur kelelahan ini nantinya akan menggunakan metode *linear elastic fracture mechanics (LEFM)*. Adapun faktor-faktor penyebab struktur rentan dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Faktor penyebab struktur rentan [27]

Gambar 2.6 menjelaskan mengapa faktor-faktor penyebab suatu struktur rentan terhadap kegagalan. antara lain [26]:

a. *Flaw size (a)*

Kegagalan struktur dapat terjadi akibat adanya berbagai macam diskontinuitas (*porosity, lack of fusion to crack*, dan lain-lain).

Diskontinuitas ini dapat terjadi mulai dari *crack* yang sangat kecil pada sambungan las hingga *crack* yang lebih besar. Inspeksi dan reparasi pada sambungan las dapat mengurtangi ukuran *crack* dan jumlah *crack* yang terjadi pada struktur.

b. *Applied stress* (σ)

Tegangan yang terjadi pada struktur yang berhubungan dengan fluktuasi tegangan, konsentrasi tegangan dan pembebanan. Tegangan ini dapat berubah sesuai dengan perubahan pembebanan dan desain struktur. Dengan adanya tegangan yang mengenai struktur, ukuran cacat (*flaw size*) dapat berubah hingga pada batas kritis yang menyebabkan kegagalan struktur.

c. *Fracture toughness* (K)

Fracture toughness merupakan sifat pada material yang memiliki *crack* untuk dapat bertahan dari kegagalan. Apabila suatu material memiliki *fracture toughness* yang tinggi maka material tersebut akan mengalami *ductile fracture*. *Fracture mechanics* merupakan metode untuk menentukan perilaku kepecahan pada suatu struktur menggunakan parameter-parameter seperti tegangan (*stress*) dan ukuran retak (*crack size*). Pada struktur yang kompleks seperti jembatan, Kapal, pesawat terbang dan *pressure vessel* dapat mengalami berbagai macam diskontinuitas. *Fracture mechanics* menggunakan retak awal sebagai salah satu parameter untuk menganalisis umur kelelahan. Retak awal ini apabila terkena beban siklis maka akan merambat dan terjadi perubahan ukuran retak. Bila ukuran retak telah mencapai batas kritis, maka dapat mengakibatkan kegagalan struktur.

2.13 Retak (*crack*) dan Perambatan Retak

Retak merupakan salah satu cacat yang dapat terjadi pada saat pengelasan berlangsung. Retak menjadi faktor utama terjadinya kegagalan

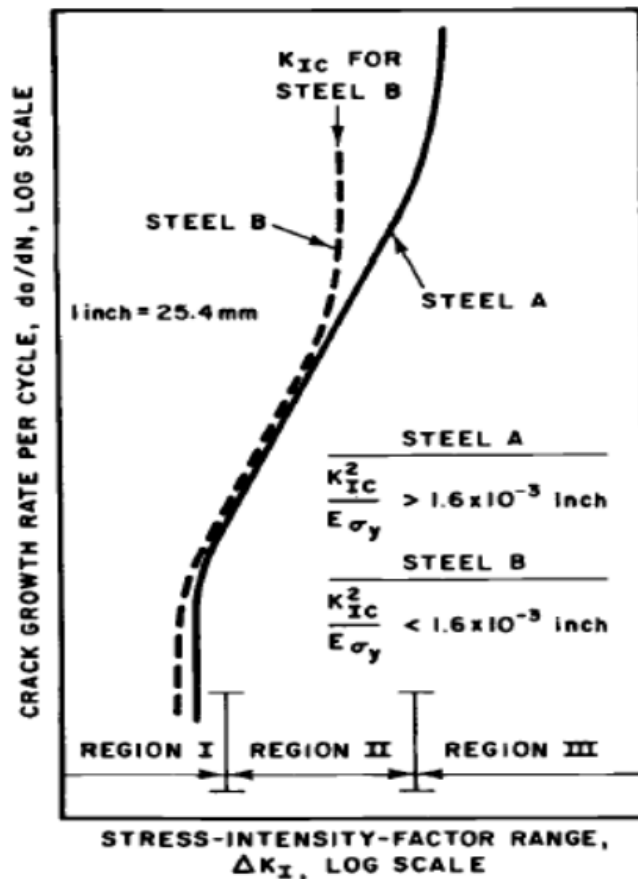
struktur. Retak yang menyebabkan kepecahan terjadi dalam beberapa tahap, antara lain:

1. Retak awal (*initial crack*)

Retak merupakan salah satu cacat yang terjadi pada pengelasan. Cacat pada struktur dapat terjadi pada saat fabrikasi maupun saat masa operasi struktur. Pada saat fabrikasi cacat las dapat disebabkan berbagai macam hal seperti kualitas *welder*, temperature, arus, kualitas material, maupun faktor lingkungan. Sedangkan pada saat masa operasi cacat terjadi karena kelelahan struktur maupun fluktuasi tegangan pada bagian yang telah mengalami korosi.

2. Perambatan retak (*crack propagation*)

Perambatan retak terjadi akibat beban siklis yang dialami struktur. Adapun perambatan retak dibagi menjadi 3 *region*, yang dapat dilihat pada gambar 2.7 sebagai berikut.



Gambar 2.7 Perambatan Retak [30]

Berikut penjelasan mengenai pembagian tiap perambatan retak:

a. Region I

Disebut juga dengan *region fatigue-treshold* (K_{th}). Perambatan terjadi apabila nilai *stress intensity factor* (ΔK) lebih besar dari pada K_{th} . Pada *region* ini tidak terjadi perambatan retak dikarenakan nilai $\Delta K < K_{th}$. Nilai ΔK harus lebih besar dari nilai ΔK_{th} untuk memungkinkan terjadinya perambatan retak. Nilai da/dN antara *region I* dan *region II* adalah:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K + h^m) \quad (2.30)$$

b. Region II

Region II merupakan region yang mengalami perambatan retak yang stabil. Perambatan retak dapat dihitung dengan menggunakan hukum paris-erdogan:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.31)$$

Keterangan:

$$\frac{da}{dN} = \text{kecepatan perambatan retak}$$

C dan m = konstanta material

ΔK = perubahan *stress intensity factor*

c. Region III

Region yang perambatan retaknya tidak stabil dan terjadinya kepecahan. Bila *stress intensity factor* (K_I) sama dengan *stress intensity factor* pada kondisi kritis (K_{IC}) maka struktur akan mengalami kepecahan. Nilai da/dN antara *region I*, *II*, dan *III* (bila efek R diperhitungkan) adalah:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta K^2}{4\pi\sigma_y E} \left\{ \frac{(\Delta K - \Delta K + h)}{(1-R)} \frac{(1-R)}{K_C - \Delta K} \right\}^{1/2} \quad (2.32)$$

Keterangan:

$\frac{da}{dN}$ = kecepatan perambatan retak

ΔK = perubahan stress intensity factor

K = harga kritis K

R = rasio tegangan = $\sigma_{min}/\sigma_{max}$

C dan m = konstanta material

3. Kepecahan (*fracture*)

Kepecahan dibagi menjadi dua antara lain [27]:

- a. *Cleavage* (terbelah), merupakan keretakan yang terjadi tanpa didahului deformasi plastis disebut juga dengan *brittle fracture*.
- b. *Rupture* (runtuh), merupakan keretakan yang didahului deformasi plastis pada material.

Kepecahan terjadi apabila suatu struktur yang terdapat retak mengalami perambatan retak yang tidak stabil dan sangat cepat (*fast fracture*). *Fast fracture* terjadi pada *region III* dengan syarat $K_I = K_{IC}$.

2.14 Stress Intensity Factor (SIF)

Stress Intensity Factor (SIF) merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk melakukan analisa keretakan yang mendeskripsikan tegangan yang terjadi di ujung retak. SIF sering digunakan sebagai parameter desain untuk menentukan sifat dari proses kepecahan dan dapat digunakan untuk menentukan umur sisa dari struktur yang mengalami kerusakan akibat kelelahan. Dengan adanya SIF, nantinya dapat juga diketahui bagaimana tingkat kelelahan perambatan retak. *Stress intensity factor* merupakan perhitungan matematik yang berkaitan dengan beban dan ukuran cacat pada geometri tertentu. *Stress intensity factor* (SIF) digunakan untuk menganalisis medan tegangan didepan ujung retak. Prinsip dasar *fracture mechanics* ialah medan tegangan didepan ujung retak dari sebuah spesimen atau *member* struktur dapat dikarakteristikkan menggunakan satu parameter yaitu *stress intensity factor* (K_I) [28].

Persamaan 2.35 merupakan persamaan umum untuk *stress intensity factor* sebagai berikut:

$$K = \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} f(g) \quad (2.33)$$

Keterangan:

K = *stress intensity factor* ($\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$)

a = kedalaman retak awal

σ_{nom} = tegangan nominal

$f(g)$ = fungsi koreksi terhadap dimensi dan geometri serta posisi retak

2.15 Perambatan Retak Berdasarkan Material

Terdapat 3 jenis material bila ditinjau dari perambatan retaknya. Perambatan ini bergantung pada jenis material dan nilai *yield strength*. Berikut jenis-jenis material yang dimaksud [28]:

a. *Martensitic Steel*

Material yang termasuk dalam kategori martensitic steel adalah material dengan yield strength diatas 80 ksi. Laju perambatan *crack* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\frac{da}{dN} = 0.66 \times 10^{-8} (\Delta K_i)^{2.25} \quad (2.34)$$

Dimana:

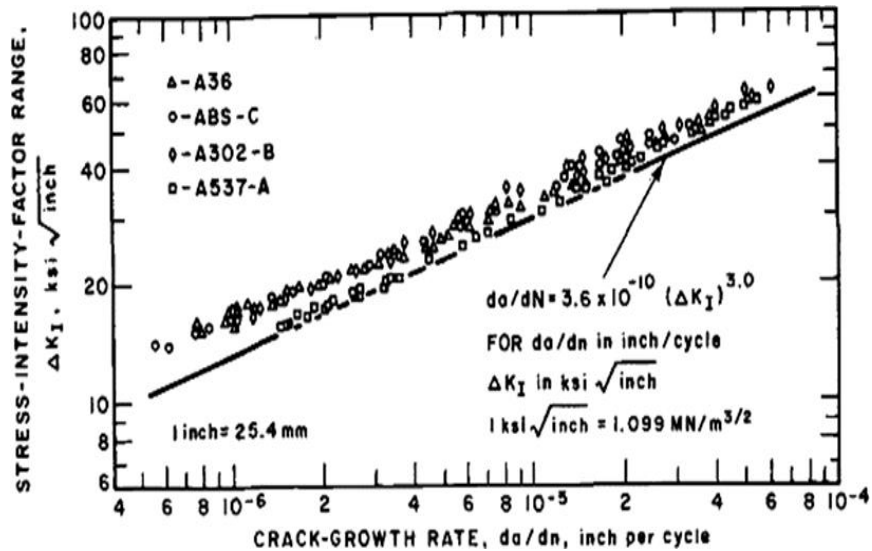
a = kedalaman retak (in)

ΔK = perubahan nilai SIF ($\text{ksi} \sqrt{\text{in}}$)

b. *Ferrite-Pearlite Steel*

Material untuk jenis *ferrite-pearlite steel* adalah material seperti A36, A302, ABS, dan A537. Gambar 2.8 merupakan grafik permbatan retak pada material ferrite pearlite. Perhitungan Laju Perambatan Retaknya dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\frac{da}{dN} = 3.6 \times 10^{-10} (\Delta K)^3 \quad (2.35)$$



Gambar 2.8 Laju Perambatan Retak Untuk Material *Ferrite-Perlite* [29]

c. *Austenitic Stainless Steel*

Contoh material jenis ini adalah stainless A316, stainless A304 dan stainless A305. Untuk formula perambatan retaknya dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\frac{da}{dN} = 3.10 \times 10^{-10} (\Delta K_i)^{3.25} \tag{2.36}$$

2.16 Metode Paris Erdogan

Analisis umur kelelahan diperoleh dengan menggunakan persamaan Paris-Erdogan sebagai berikut :

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \tag{2.37}$$

Dimana:

- a₀ = kedalaman retak awal (*initial crack*)
- a_f = kedalaman retak akhir (*final crack*)
- N = jumlah *cycle*
- ΔK = perubahan *stress intensity factor*
- C/m = konstanta material