

# Pendekatan Sederhana Analisis Prediksi Umur Kapal

MUHAMMAD ZUBAIR MUIS ALIE

RENALDY YUSUF



**PENDEKATAN SEDERHANA  
ANALISIS PREDIKSI UMUR KAPAL**

## UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

### **Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Muhammad Zubair Muis Alie  
Renaldy Yusuf

# **PENDEKATAN SEDERHANA ANALISIS PREDIKSI UMUR KAPAL**



**PENDEKATAN SEDERHANA ANALISIS PREDIKSI UMUR KAPAL**

**Muhammad Zubair Muis Alie & Renaldy Yusuf**

Editor :  
**Muhammad Arpan Rachman**

Desain Cover :  
**Rulie Gunadi**

Sumber :  
www.shutterstock.com

Tata Letak :  
**Amira Dzatina Nabila**

Proofreader :  
**Avinda Yuda Wati**

Ukuran :  
**viii, 47 hlm, Uk: 20x29 cm**

ISBN :  
**978-623-02-1838-5**

Cetakan Pertama :  
**November 2020**

Hak Cipta 2020, Pada Penulis

---

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

**Copyright © 2020 by Deepublish Publisher**  
All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH**  
**(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**  
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581  
Telp/Faks: (0274) 4533427  
Website: www.deepublish.co.id  
www.penerbitdeepublish.com  
E-mail: cs@deepublish.co.id

# PRAKATA

---

Puji syukur kepada Allah *Subhanahu wa taala*, Rabb Semesta Alam, karena atas rahmat dan hidayah diberikan kepada penulis sehingga buku ini dapat diselesaikan. Selawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad, segenap keluarga, para sahabat, dan pengikutnya.

Beragam metode terus dilakukan dan dikembangkan untuk menganalisis struktur kapal selama beroperasi. Analisis prediksi umur kapal menjadi penting untuk mengevaluasi apakah standar desain akan memenuhi kinerja kapal tidak hanya kondisi air tenang tetapi juga kondisi bergelombang.

Tujuan utama buku ini adalah untuk memberikan gambaran tentang prediksi umur kapal dalam perspektif pendekatan sederhana yang dikombinasikan dengan penggunaan solusi numerik. Harapan kami dengan adanya buku ini dapat berkontribusi pada pembelajaran dan pemahaman terkait analisis struktur kapal dipandang dari sudut kelelahan yang mengarah pada prediksi umur dari sebuah struktur.

Buku ini terdiri dari empat bagian, di mana Bab 1 Pendahuluan, memaparkan wawasan riset penelitian, tinjauan kekuatan kapal sebagai alat transportasi, dan analisis berbagai faktor penyebab kapal menjadi rusak disertai uraian beberapa peneliti yang telah melakukan analisis retak dan umur lelah dari struktur kapal.

Bab 2 Analisis Tegangan, yang memaparkan secara ringkas distribusi tegangan dan tampilan nilai tegangan yang diperoleh dari hasil analisis numerik dengan menggunakan metode elemen hingga. Bab 3 Analisis *Fatigue* (Umur Lelah) yang terdiri dari *spectrum* gelombang, *response amplitude operator*, *stress response spectra*, dan umur lelah. Bab 4 Kesimpulan merupakan hasil yang telah diperoleh berdasarkan metode analisis yang digunakan untuk perhitungan *fatigue* (umur lelah) kapal yang dijadikan contoh pada buku ini.

Ucapan terima kasih kepada pihak yang telah membantu dan berkontribusi pada buku ini.

*Penulis*

# DAFTAR ISI

---

PRAKATA .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	vii
GLOSARIUM.....	viii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Umum.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
<b>BAB 2 ANALISIS TEGANGAN.....</b>	<b>4</b>
2.1. Tegangan Kerja .....	4
2.2. Tampilan Nilai Tegangan.....	6
<b>BAB 3 ANALISIS <i>FATIGUE</i>.....</b>	<b>11</b>
3.1. Kurva S-N.....	12
3.2. Metode Palmgren-Miner .....	13
3.3. Spektrum Gelombang .....	14
3.4. <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO) .....	15
3.5. <i>Stress Response Spectra</i> .....	16
3.6. Umur Lelah ( <i>Fatigue</i> ).....	17
<b>BAB 4 KESIMPULAN.....</b>	<b>21</b>
REFERENSI .....	22
LAMPIRAN .....	25
INDEKS .....	44
TENTANG PENULIS.....	47

# DAFTAR GAMBAR

---

Gambar 1.	Kotak Dialog Solution .....	6
Gambar 2.	Kotak <i>Solution Controls</i> .....	6
Gambar 3.	Tab <i>Solution Options</i> .....	7
Gambar 4.	Tab <i>Advanced NL</i> .....	7
Gambar 5.	Kotak Control <i>Nodal Solution Data</i> .....	8
Gambar 6.	Distribusi Tegangan .....	8
Gambar 7.	<i>Time History Variables</i> .....	9
Gambar 8.	<i>Node for Data</i> .....	10
Gambar 9.	Kurva S-N API untuk Analisis Kelelahan.....	12
Gambar 10.	Spektrum Gelombang .....	15
Gambar 11.	<i>Response Amplitude Operator</i> Sekat Membujur Tunggal .....	16
Gambar 12.	<i>Response Amplitude Operator</i> Sekat Membujur Ganda.....	16
Gambar 13.	<i>Stress Response Spectra</i> Sekat Membujur Tunggal .....	17
Gambar 14.	<i>Stress Response Spectra</i> Sekat Membujur Ganda.....	17

# GLOSARIUM

---

$X_p(\omega)$	: Amplitudo Struktur	(mm)
$\eta(\omega)$	: Amplitudo Gelombang	(mm)
$S_R(\omega)$	: Spektrum Gelombang	mm <sup>2</sup> /sec
$S$	: Spektrum Gelombang	mm <sup>2</sup> /sec
$RAO$	: Response Amplitudo Operator	N/mm <sup>2</sup> /mm
$\omega$	: Frekuensi Angular	rad/sec
$H_s$	: Tinggi Gelombang Signifikan	mm
$h$	: Kedalaman Perairan	mm
$A$	: Luas Penampang	mm <sup>2</sup>
$\sigma$	: Tegangan	N/mm <sup>2</sup>
$F$	: Gaya	N
$T_z\sigma$	: Mean Zero Crossing Period	s
$\sigma_{eff}$	: Tegangan Amplitudo Efektif	N <sup>2</sup> /mm <sup>4</sup>
$\sigma_b$	: Tegangan Lentur	N/mm <sup>2</sup>
$M_b$	: Momen Lentur	Nmm
$z$	: Sumbu netral	mm
$I$	: Inersia Penampang	mm <sup>4</sup>

---

# BAB 1

## PENDAHULUAN

---

### 1.1. Umum

Kapal sebagai sarana transportasi tidak hanya mempertimbangkan dari sisi kekuatan. Selain itu, umur kapal juga harus sebisa mungkin dapat 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 terjadi terutama akibat kelelahan (*fatigue*), baik pada komponen struktur utama ataupun struktur sekunder dan tersier. Dalam hal ini beban gelombang yang bekerja secara terus-menerus dan dapat merupakan fungsi periodik merupakan salah satu penyebab terjadinya kelelahan pada elemen-elemen pendukung struktur kapal baik dalam 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 cukup 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.

Pendekatan-pendekatan untuk menganalisis *fatigue* terus dilakukan dan dikembangkan. Analisis *fatigue* dilakukan untuk memastikan umur pada elemen-elemen pendukung struktur kapal yang kritis, yang dikenal sebagai *hot spot*. *Hot spot* adalah lokasi pada suatu sambungan tubular di mana terjadi tegangan tarik/tekan maksimum. *Hot spot* dapat didefinisikan sebagai lokasi yang diidentifikasi sebagai tempat kemungkinan terjadinya kegagalan. Jika kegagalan terjadi pada sebuah elemen pendukung kekuatan kapal, maka cenderung akan merambat ke elemen yang lain, sehingga hal ini mempengaruhi kekuatan struktur secara global.

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian terkait analisis retak dan umur lelah dari struktur kapal. Gracia, *et al.* (2019) memaparkan dua model gelombang statistik berdasarkan data *hindcast* dan pengukuran gelombang satelit dan membandingkannya dengan pengukuran gelombang yang dilakukan oleh radar. Analisis umur lelah pada kapal navigasi dilakukan oleh Kim dan Kim (2019) dengan menggunakan metode numerik untuk menyimulasikan interaksi antara

aliran es dan struktur. Model FE dibuat oleh Gledic, *et al.* (2019) untuk menganalisis kapal utuh dan rusak dengan faktor konsentrasi tegangan. Umur lelah yang disebabkan oleh perbedaan area operasi dianalisis oleh Thomson (2018) dengan menggunakan analisis *fatigue spectral* dari sepuluh kapal. Zhang (2018) mengevaluasi fungsi transfer SIF melalui analisis struktur detail untuk ukuran retak yang berbeda, dan bentuk distribusi SIF diperoleh dari fungsi transfer SIF. Li, *et al.* (2018) memaparkan pengaruh tegangan sisa pengelasan pada umur lelah getaran dari kapal. Babazadeh dan Khedmati (2018) memaparkan *review* detail pada pengaruh dari parameter retak yang berbeda seperti panjang retak, lokasi retak, arah retak dan ukuran gap, tebal pelat, rasio aspek, kondisi batas terhadap kekuatan kapal. Getaran yang disebabkan oleh gelombang dan pengaruhnya terhadap umur lelah dari kapal kontainer dipaparkan oleh Han, *et al.* (2017). Aplikasi mekanika kepecahan berdasarkan evaluasi umur retak dipaparkan oleh Doshi, *et al.* (2017) untuk keandalan berdasarkan rencana inspeksi pada kapal VLCC. Validasi dari analisis *fatigue* spektrum menggunakan pengukuran *full-scale* dilakukan oleh Thomson (2016). SIF dari retak detail kapal dihitung oleh Yan, *et al.* (2016) dengan menggabungkan model elemen hingga PATRAN untuk seluruh kapal. Leheta, *et al.* (2016) mengembangkan sebuah program untuk analisis pertumbuhan *fatigue crack* pada struktur kapal secara detail, propagasi retak pada kapal tanker dianalisis dengan menggunakan program pengembangan berdasarkan mekanika kepecahan *elastic linear* dan metode elemen hingga. Muis Alie (2016) menganalisis efek dari bentuk konfigurasi simetris dan tidak simetris terhadap tekuk dan umur lelah dari struktur *jacket* dengan menggunakan metode elemen hingga. Hasil yang diperoleh dengan menggunakan FEM dibandingkan dengan metode analitis. Prediksi pertumbuhan retak *fatigue nonlinear* stokastik untuk spesimen sederhana terhadap beban *sequence* pada struktur kapal dilakukan oleh Hoddap, *et al.* (2015).

Selanjutnya, Dong dan Frangopol (2015) memaparkan pendekatan probabilistik untuk inspeksi minimum dan rencana perbaikan untuk struktur kapal dengan mempertimbangkan korosi. Sebuah simulasi program (FCG-Sistem) dikembangkan oleh He, *et al.* (2014) menggunakan *software* ABAQUS yang mengarah pada *interface* program untuk menyimulasikan perjalanan umur retak untuk menghitung umur kapal. Studi perbandingan uji umur lelah dari kapal kontainer menggunakan pendekatan perhitungan variasi langsung dilakukan oleh Li, *et al.* (2014). Mahmoud dan Riveros (2014) memaparkan kerangka kerja untuk analisis probabilistik dari tingkat propagasi retak dari panel penegar yang dilas dengan menggunakan simulasi Monte Carlo elemen hingga. Li, *et al.* (2013) mengusulkan prosedur perhitungan langsung untuk analisis umur dari struktur lambung kapal. Suyuthi, *et al.* (2013) mengusulkan prosedur sistematis untuk analisis umur lelah yang berhubungan dengan navigasi kapal. Tasmemir dan Nohut (2012) melakukan analisis umur lelah dari struktur kapal dengan rancangan

geladak tertumpu dengan menggunakan elemen hingga. Garbatov dan Soares (2012) memaparkan pengaruh faktor-faktor variasi yang berhubungan dengan analisis umur lelah dari struktur lambung kapal. Erny, *et al.* (2012) fokus pada pengelasan untuk mengevaluasi umur retak awal dari detail kapal.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Struktur yang terbuat dari baja atau logam yang mengalami beban siklus yang lebih rendah dari desainnya dapat menjadi dasar retak awal hingga mencapai ukuran tertentu, setelah mencapai jumlah siklus tertentu retak menjadi sangat besar dan berujung pada kegagalan struktur. Kegagalan struktur ini disebut dengan *fatigue* (kelelahan). Dengan kata lain kegagalan adalah proses dari akumulasi siklus demi siklus dari kerusakan dalam sebuah struktur yang mengalami tegangan fluktuasi melalui beberapa tahapan mulai dari retak awal hingga terciptanya kegagalan. Pengaruh beban yang paling penting adalah komponen tegangan yang umumnya disebut dengan rentang tegangan. Selanjutnya, *fatigue* dapat terjadi antara siklus tinggi dan rendah, tentunya sangat tergantung pada material yang digunakan. Oleh karena itu, *fatigue* (umur lelah) dari sebuah struktur sangat penting untuk dianalisis sehingga pencegahan yang menuju pada kegagalan struktur dapat dilakukan sedini mungkin.

---

# BAB 2

## ANALISIS TEGANGAN

---

### 2.1. Tegangan Kerja

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

Tegangan dasar ada dua yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal dapat berupa tegangan tarik dan tegangan tekan. Tegangan Tarik (*tensile stress*), apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang, akibatnya batang cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang, maka gaya tersebut disebut gaya tarik. Tegangan tekan (*compressive stress*), apabila sepasang gaya aksial menekan suatu bidang dan akibatnya cenderung untuk memperpendek atau menekan batang tersebut, gaya ini disebut gaya tekan dan menghasilkan tegangan tekan dalam aksial batang di suatu bidang yang tegak lurus atau normal terhadap sumbu.

Tegangan geser (*shear stress*), berbeda dengan tegangan tarik dan tekan di mana tegangan ini umumnya disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja secara transversal pada suatu batang. Hubungan antara tegangan yang dihasilkan oleh suatu gaya  $F$  yang bekerja pada setiap luas satuan  $A$  mengalami tegangan, yaitu:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(1)$$

Di mana:

- $\sigma$  : Tegangan (N/mm<sup>2</sup>)
- $F$  : Gaya luar total beban (N)
- $A$  : Luas penampang batang (mm<sup>2</sup>)

Umumnya teori balok lentur sering digunakan untuk menggambarkan karakteristik/perilaku balok ketika mengalami lenturan yang disebabkan oleh beban/gaya. Berdasarkan teori balok, tegangan lentur ( $\sigma_b$ ) pada penampang balok yang mengalami momen lentur dapat dihitung dengan:

$$\sigma_b = \frac{M_b z}{I} \dots\dots\dots(2)$$

Di mana:

- $M_b$  : Momen lentur                      Nmm

- z : Sumbu netral                    mm  
I : Inersia penampang            mm<sup>4</sup>

Tegangan-tegangan tersebut bekerja di seluruh bagian struktur yang disebabkan oleh beban dan terdistribusi pada bagian atau elemen konstruksi pada struktur. Distribusi tegangan memberi gambaran tentang berapa besar dan ke arah mana tegangan tersebut bekerja yang disebabkan oleh beban pada penampang dari suatu model atau struktur. Data-data beban/gaya yang dimasukkan dan dianalisis menggunakan metode numerik dengan bantuan *software* akan menghasilkan luaran/*output* tegangan-tegangan yang bekerja baik dalam bentuk teks maupun gambar.

Pada buku ini model penampang kapal yang diambil sebagai contoh untuk analisis umur kapal adalah *Double Hull Oil Tanker*. Kapal *Double Hull Oil Tanker* yang dijadikan sebagai contoh analisis adalah kapal *Double Hull Oil Tanker* yang memiliki penampang dengan satu dan dua sekat membujur. Dimensi *stiffener* yang terletak pada sekat, lambung, geladak dan *bottom* berbeda. Selain itu jumlah *stiffener* yang terletak pada lokasi-lokasi tersebut juga berbeda. Hanya ukuran kapal baik panjang, lebar, tinggi serta properti material diasumsikan sama. Penampang dari kapal *Double Hull Oil Tanker* dimodelkan dengan menggunakan metode elemen hingga. Input data penampang *stiffener*, material serta beban dilakukan pada tahap ini.

Kondisi batas atau syarat batas dilakukan dengan menggunakan *Multipoint Constraint* (MPC) yang diletakkan pada kedua sisi dari penampang kapal yang berada pada sumbu netral. Perlu dicatat bahwa perhitungan modulus penampang dilakukan terlebih dahulu untuk mengetahui posisi sumbu netral di mana MPC akan ditempatkan. Gaya putar diterapkan pada MPC pada satu sisi dari penampang kapal *Double Hull Oil Tanker* dan di sisi satunya MPC tersebut dikekang. Dari MPC yang diletakkan di sisi kanan dan kiri dari penampang, selanjutnya akan terhubung jaring-jaring dari MPC ke setiap titik-titik yang ada di sisi kanan dan kiri dari penampang tersebut.

Setelah kondisi batas dan beban yang dihubungkan dengan MPC ini, kemudian dilakukan analisis, maka *output*/luaran yang berupa teks atau gambar ketika selesai analisis dapat diperoleh. *Output*/luaran dari hasil analisis dengan menggunakan metode elemen hingga dapat berupa perpindahan titik, gaya-gaya batang/elemen, reaksi, momen, perubahan bentuk atau deformasi serta tegangan yang bekerja. Untuk menghitung umur kapal, maka *output*/luaran yang digunakan dari hasil analisis dengan menggunakan metode elemen hingga adalah tegangan. Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisis tegangan dengan menggunakan metode elemen hingga dipaparkan pada bagian selanjutnya.

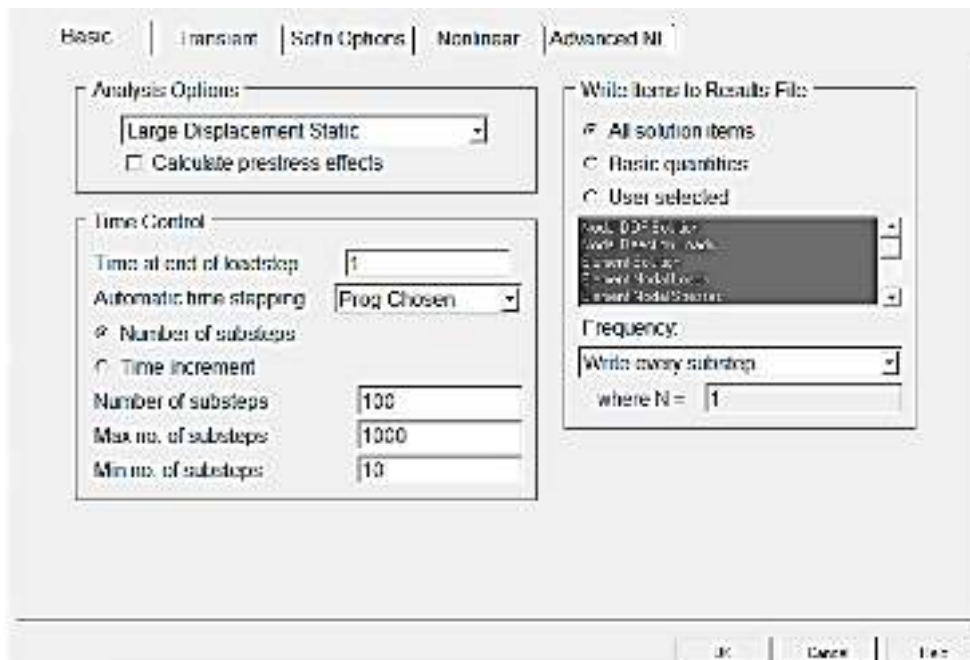
## 2.2. Tampilan Nilai Tegangan

Setelah melakukan pemodelan *Double Hull Oil Tanker* menggunakan metode elemen hingga, maka tahapan selanjutnya adalah *running* model untuk mendapatkan tegangan maksimum dan minimum dari kedua struktur yang akan diteliti.

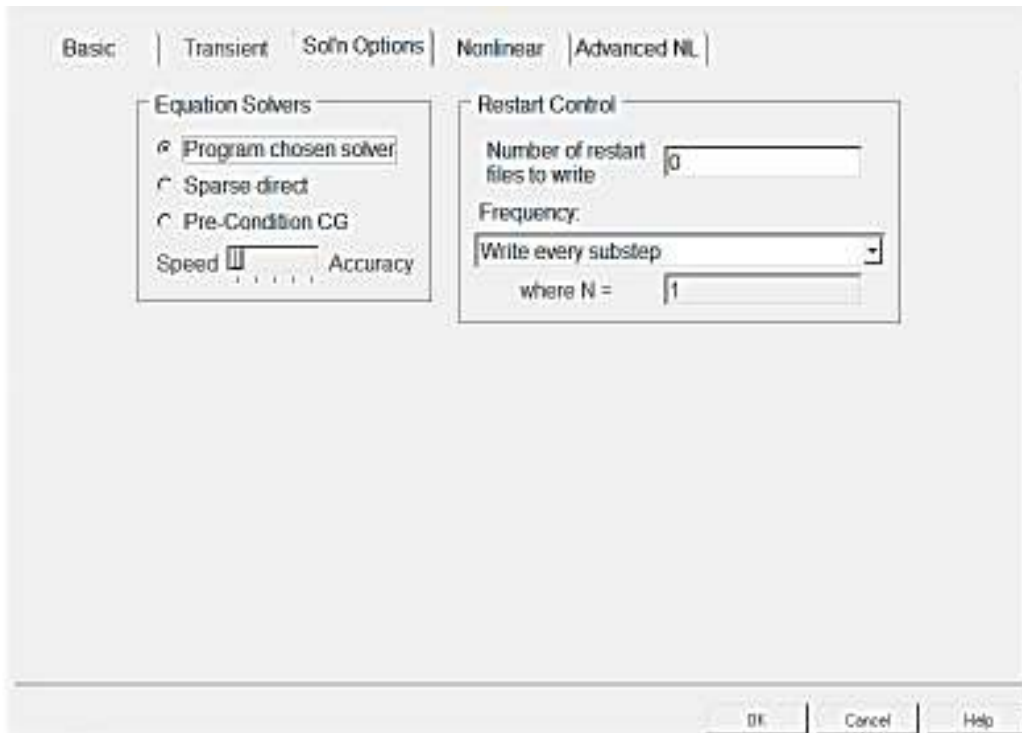


**Gambar 1. Kotak Dialog Solution**

Langkah pertama sesuai dengan Gambar 1 adalah dengan memilih *Solution* lalu *Sol'n Controls*. Lalu akan muncul kotak dialog Gambar 2. Pada tab *basic* untuk *analysis option* pilih *large displacement static*. Pada *time control*, isi *time at end of loadstep* dengan 1, *automatic time stepping* pilih *prog. chosen*. Dan *frequency* kemudian pilih *write every substep*.

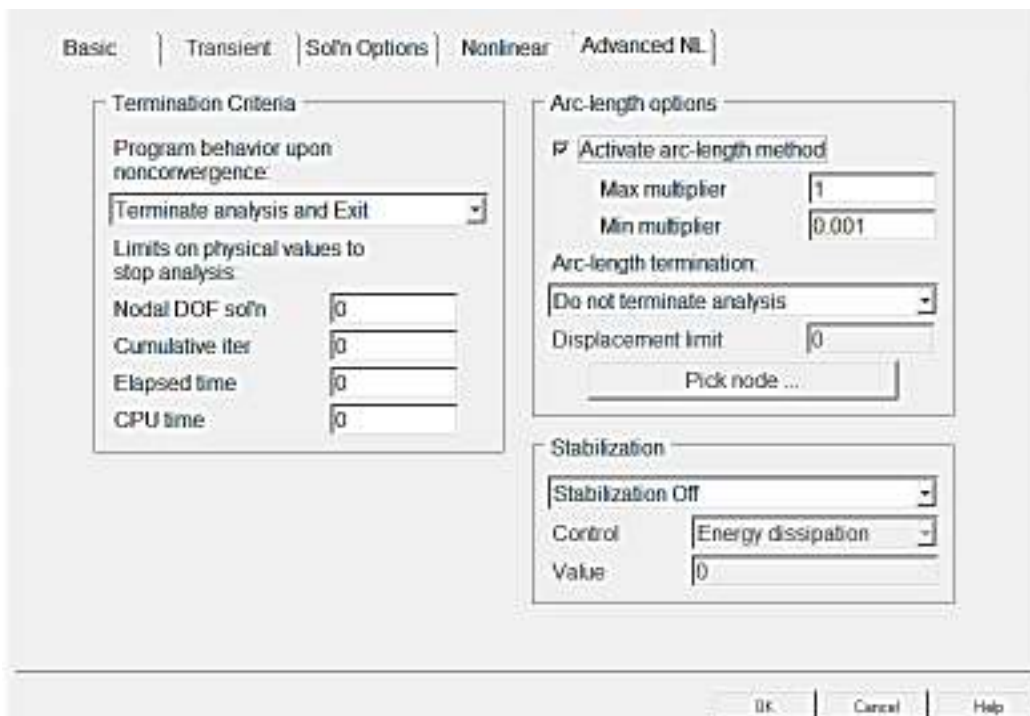


**Gambar 2. Kotak Solution Controls**



**Gambar 3. Tab *Solution Options***

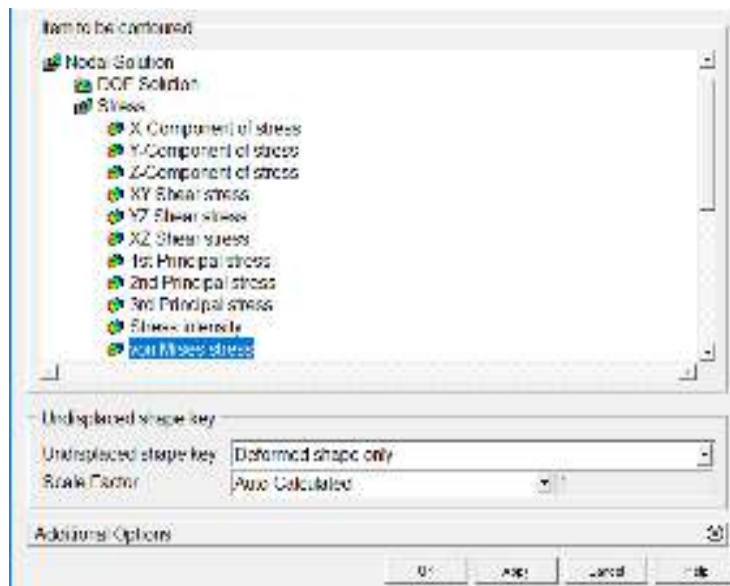
Pada tab *Sol'n Options* pilih sesuai dengan Gambar 3, sedangkan untuk tab *advanced NL* pilih sesuai dengan Gambar 4. Setelah semuanya terisi klik *OK*.



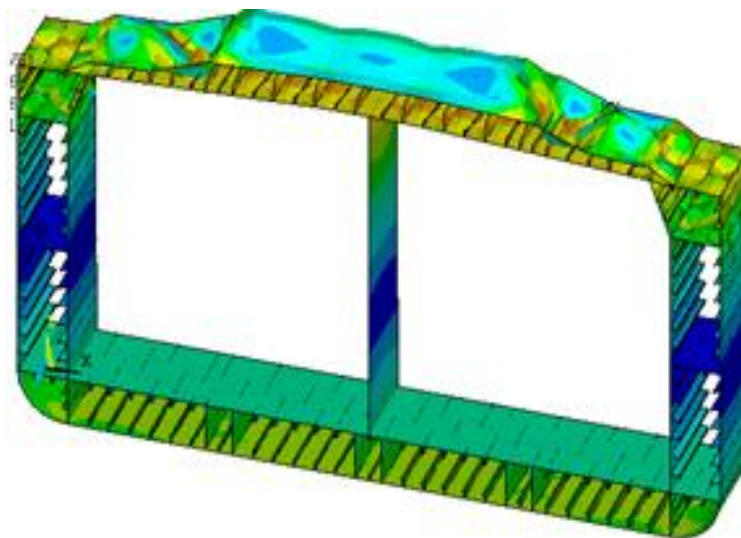
**Gambar 4. Tab *Advanced NL***

Lalu ketik *Solve* dan klik *OK*. Perangkat lunak akan mulai melakukan perhitungan. Tunggu hingga muncul kotak dialog *solution is done*.

Pada *preference* klik *general postproc, read result, last set*. Setelah itu klik *plot result, contour plot*, lalu *nodal solution*. Maka akan muncul kotak dialog *Contour Nodal Solution Data* seperti Gambar 5. Pilih *nodal solution, stress, von mises stress*. Pada *scale factor* pilih *auto calculated* dan untuk *undisplaced shape key* pilih *deformed shape only*, maka akan ditampilkan distribusi tegangan seperti pada Gambar 6. Kriteria tegangan luluh von Mises atau biasa disebut tegangan ekuivalen lebih umum digunakan karena merepresentasikan tegangan-tegangan yang bekerja ke sumbu-sumbu dalam bentuk tiga dimensi.

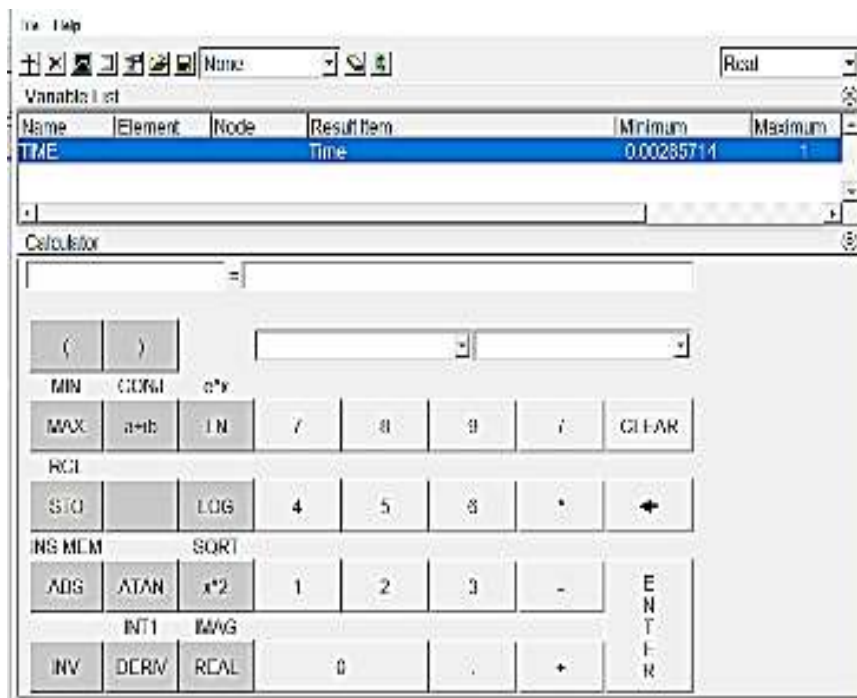


**Gambar 5. Kotak Control *Nodal Solution Data***



**Gambar 6. Distribusi Tegangan**

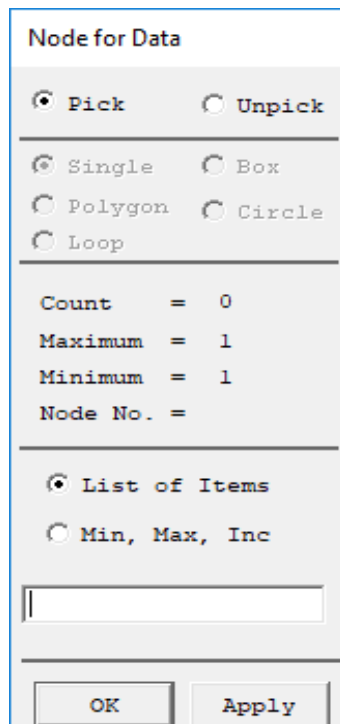
Setelah muncul tampilan distribusi tegangan, selanjutnya *list result, nodal solution* maka akan muncul kotak dialog *list nodal solution*. Pilih *nodal solution, stress, dan von mises stress*. Lalu akan muncul *window PRNSOL command*. Scroll hingga bagian terbawah. Pada *maximum value node* catat angka tertinggi karena *node* yang tertinggi akan dimasukkan untuk mendapatkan *output* tegangan.



**Gambar 7. Time History Variables**

*Time postproc, time history*. Kemudian akan muncul kotak dialog Gambar 7. Kemudian klik tanda *plus*, dan kotak dialog *add time history*. Pilih *von mises stress*. Dan kotak dialog seperti Gambar 8, ketik *node* yang tadi dicatat dan klik *OK*. Akan muncul *window PRVAR command*. Pilih *file* lalu *save* dalam bentuk MsExcel.

Berdasarkan hasil perhitungan numerik dengan bantuan *software*, luaran/*output* yang diperoleh untuk tegangan maksimal sebesar  $59,766 \text{ N/mm}^2$  dan tegangan minimal  $0,4 \text{ N/mm}^2$  untuk konfigurasi sekat membujur tunggal. Sementara untuk konfigurasi dua sekat membujur didapatkan tegangan maksimal sebesar  $58,903 \text{ N/mm}^2$  dan tegangan minimal sebesar  $0,629 \text{ N/mm}^2$ . Dari hasil ini, tegangan maksimal yang terjadi pada konfigurasi satu sekat membujur lebih besar daripada tegangan maksimal yang terjadi pada konfigurasi dua sekat membujur.



**Gambar 8. Node for Data**

Begitu pula rentang tegangan yang terjadi, diperlihatkan bahwa konfigurasi satu sekat membujur memiliki rentang tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi dua sekat membujur. Jumlah sekat membujur yang terpasang pada konstruksi kapal *double hull tanker* memberi pengaruh yang signifikan terhadap tegangan-tegangan yang bekerja. Analisis tegangan metode numerik dengan bantuan *software* umumnya menggunakan tegangan ekuivalen atau yang biasa disebut dengan *von Mises stress*. Tegangan ekuivalen ( $\sigma_e$ ) ini dituliskan dengan bentuk

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \dots\dots\dots (3)$$

Di mana subskrip 1, 2, dan 3 menyatakan arah sumbu di mana tegangan-tegangan 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 kapal *double hull tanker* termasuk besaran tegangan yang dihasilkan.

---

# BAB 3

## ANALISIS FATIGUE

---

Struktur baja yang dilas dan dikenakan beban siklus lebih kecil daripada yang menjadi dasar rancangan dapat 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 *initial "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 (Hughes & Paik, 2010):

1. *Low-cycle fatigue* terjadi untuk jumlah siklus rendah, kurang dari  $5 \times 10^3$ , 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.

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 (Nallayarasu, 2015):

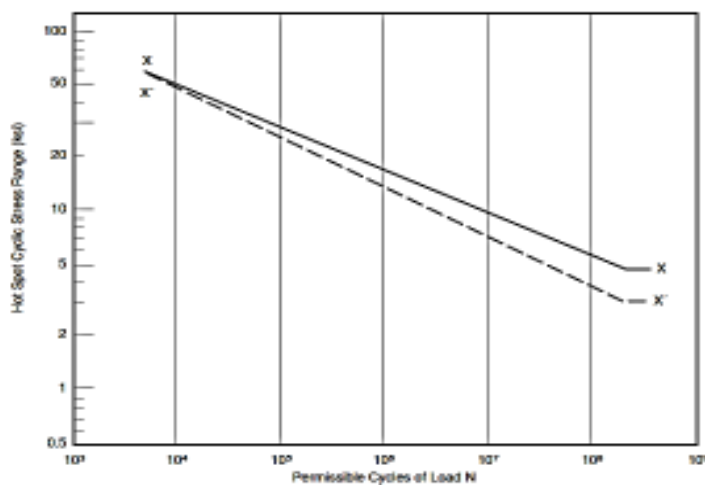
1. Metode Deterministik. Dalam metode ini, energi laut merupakan simulasi menggunakan frekuensi diskret dan gelombang tinggi dengan angka yang sesuai dengan karakteristik lokasi beroperasi. Tekanan struktural dan *hot spot* yang dihasilkan untuk masing-masing gelombang diskret. Penjumlahan

dari kerusakan kelelahan karena ini beban gelombang diskret kasus kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan total kerusakan selama umur struktur.

2. Metode Spektral. Metodologi ini menggunakan energi laut sebagai analisis spektrum kita digunakan terhadap fungsi transfer untuk respons struktural yang telah dikonversi. Fungsi transfer ini kemudian digunakan untuk menghasilkan tekanan *hot spot* pada *joint* tersebut.

### 3.1. Kurva S-N

Kurva S-N digunakan untuk menyatakan karakteristik kelelahan pada material yang mengalami pembebanan yang berulang pada magnitudo konstan. Di mana N adalah jumlah siklus pada tegangan yang mengakibatkan kerusakan pada struktur. Tingkat keyakinan akurasi penentuan kurva S-N dipengaruhi oleh parameter ini mempunyai ketidaktentuan. Kombinasi ketidaktentuan kedua parameter menjadikan ketidaktentuan 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 magnitudo konstan (Bannantine, 1990).



**Gambar 9. Kurva S-N API untuk Analisis Kelelahan**

Gambar 9 dapat dijadikan pendekatan untuk analisis kelelahan. Pada formulasi *fatigue S-N curves American Petroleum Institute Recommended Practice 2A-Working Stress Design* (API RP 2A-WSD 2000) untuk menganalisis umur kelelahan struktur bangunan lepas pantai akibat tegangan kerja yang dialami menggunakan persamaan:

$$N = 2 \times 10^6 \left( \frac{\Delta_{\sigma}}{\Delta_{\sigma ref}} \right)^{-m} \dots\dots\dots (4)$$

Di mana

N : Nilai siklus yang diizinkan untuk penggunaan siklus rentang tegangan  $\Delta_{\sigma}$  (yang sudah diperoleh sebelumnya),  $\Delta_{\sigma ref}$  dan m seperti pada penjelasan Tabel 1

**Tabel 1. Formulasi *Fatigue S-N Curves* (API RP 2A-WSD 2000)**

Curve	$\Delta_{\sigma ref}$ <i>Stress range at 2 million cycles</i>	m inverse log-log slope	Endurance limit at 200 million cycles
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)

Kurva 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 buku ini terfokus dengan menggunakan kurva X di mana semua profil las dalam kondisi terkontrol.

**3.2. 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 (Miner, 1945) sebagai perbandingan jumlah cycle dalam *stress range* itu yang menyebabkan kerusakan (Hsu, 1984). Total kerusakan per tahun yang diberikan oleh jumlah gesekan pada umur pakai (*consume life*) adalah sebagai berikut (Muis Alie, 2016):

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \dots\dots\dots (5)$$

Di mana:

- $n_i$  : Jumlah siklus kolom interval rentangan tegangan dari rentangan distribusi tegangan jangka panjang
- $N_i$  : Jumlah siklus untuk gagal pada perhitungan tegangan yang sama, didapatkan dari kurva S-N
- K : Jumlah total dari interval-interval rentangan tegangan
- D : Rasio kerusakan jumlah kumulatif

### 3.3. Spektrum Gelombang

Spektrum *spektral fatigue analysis* salah satu metode perhitungan umur kelelahan struktur mempertimbangkan dengan lebih rasional faktor-faktor penyebab kelelahan seperti beban-beban dinamis dan beban gelombang. Keutamaan dari metode *spectral fatigue analysis* adalah memodelkan proses-proses acak setiap *sea state* dalam kurun waktu pendek yang didefinisikan sebagai fungsi kerapatan spektrum gelombang (ABS, 2003).

Asumsi dasar dari *spectral fatigue analysis* yaitu analisis struktur global bersifat linier, serta superposisi dari *transfer function* rentang tegangan bergantung pada amplitudo gelombang dan arah gelombang (Farida, 2006). Spektrum gelombang JONSWAP berdasarkan percobaan yang dilakukan di North Sea. Formula atau persamaan untuk spektrum gelombang JONSWAP dapat ditulis sebagai berikut:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[ -1,25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \gamma \exp \left[ \frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right] \right] \dots\dots\dots (6)$$

Di mana:

- $\gamma$  : *peak edness parameter*
- $\tau$  : *shape parameter*
- $\tau_a$  : untuk  $\omega \leq \omega_0$
- $\tau_b$  : untuk  $\omega \geq \omega_0$

Dengan mempertimbangkan angin dengan kecepatan  $U\omega$  dan jarak (*fetch*) =  $x$ , sehingga harga rata-rata adalah sebagai berikut:

$\gamma = 2$  sampai  $3,33$  merupakan variasi dari  $1$  sampai  $7$ , di perairan Indonesia umumnya nilai  $\gamma$  yang dipakai sebesar  $2,5$

$\tau_a = 0,07$

$\tau_b = 0,09$

$\alpha = 0,76 (x_0)^{-0,22}$

$\alpha = 0,0081$  (jika  $x$  tidak diketahui)

$\omega_0^2 = 0,161 \frac{g}{H_s}$

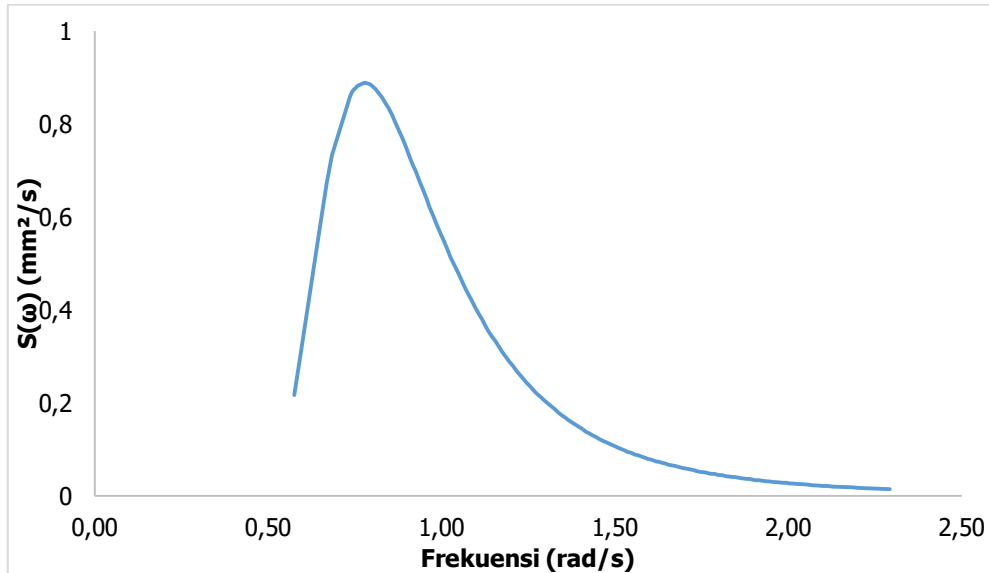
Spektrum gelombang ini dapat berguna untuk mengetahui parameter-parameter gelombang laut di daerah yang diteliti. Selain itu juga dapat diketahui periode, panjang, dan tinggi gelombang pada setiap frekuensi. Untuk mendapatkan nilai periode gelombang dapat menggunakan persamaan berikut

$T = \frac{2\pi}{\omega} \dots\dots\dots (7)$

Sementara untuk menghitung nilai panjang gelombang dapat menggunakan persamaan bilangan gelombang.

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} \dots\dots\dots(8)$$

Dari data gelombang yang ada, maka dilakukan perhitungan spektrum gelombang menggunakan spektrum gelombang JONSWAP. Untuk perhitungan lengkap dapat dilihat pada Lampiran 1. Grafik spektrum gelombang dapat dilihat pada Gambar 10.



**Gambar 10. Spektrum Gelombang**

**3.4. Response Amplitude Operator (RAO)**

Untuk mendapatkan *spectrum* tegangan (*stress r esponse spectra*), yang harus dilakukan terlebih dahulu adalah mencari *Response Amplitude Operator* (RAO) struktur. Namun sebelum menentukan RAO, terlebih dahulu harus diketahui nilai tegangan dari struktur tersebut akibat adanya beban. Tegangan tersebut didapatkan melalui hasil perhitungan numerik dengan bantuan *software*. RAO dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

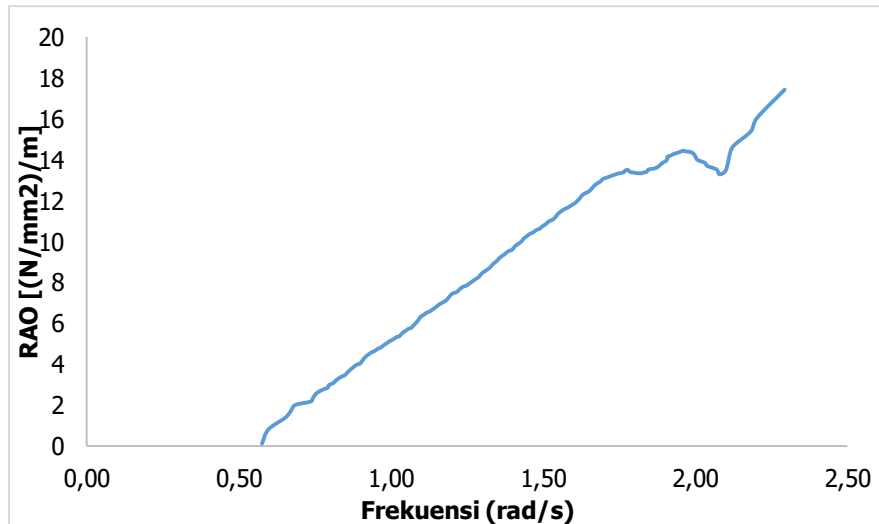
$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \dots\dots\dots(9)$$

Di mana,

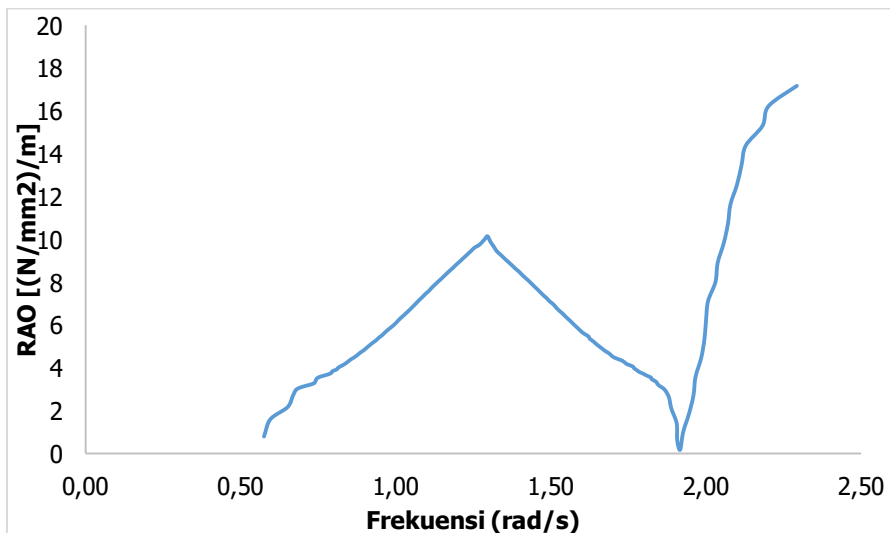
$X_p(\omega)$  : amplitudo struktur (mm)

$\eta(\omega)$  : amplitudo gelombang (mm)

Hasil perhitungan RAO ditampilkan di Lampiran 2. Gambar 11 dan 12 menampilkan hasil perbandingan frekuensi gelombang pada kapal *double hull tanker* sekat tunggal dan ganda dengan *Response Amplitude Operator* (RAO) yang berbeda.



**Gambar 11. Response Amplitude Operator Sekat Membujur Tunggal**



**Gambar 12. Response Amplitude Operator Sekat Membujur Ganda**

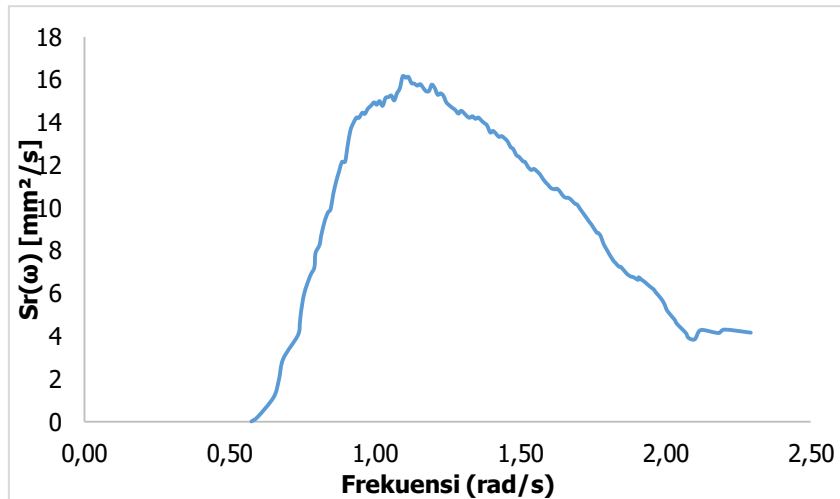
### 3.5. Stress Response Spectra

Setelah mendapatkan nilai dari RAO, selanjutnya menentukan nilai *stress response spectra* dengan menggunakan persamaan di bawah

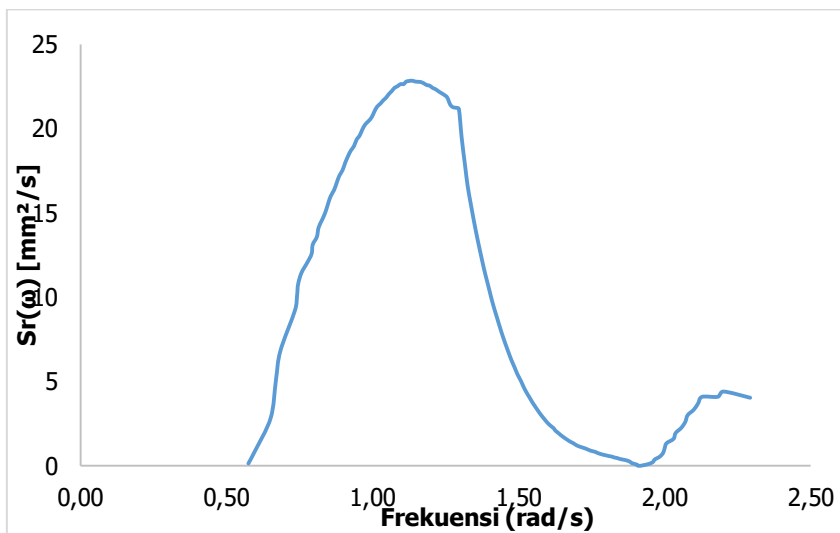
$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)^2] S(\omega) \dots\dots\dots (10)$$

Di mana,

- $S_R(\omega)$  : Spektra gelombang,  $\text{mm}^2/\text{sec}$
- $S$  : Spektrum gelombang,  $\text{mm}^2/\text{sec}$
- $RAO$  : Respons Amplitudo Operator,  $\text{N}/\text{mm}^2/\text{mm}$
- $\omega$  : Frekuensi angular,  $\text{rad}/\text{sec}$



**Gambar 13. Stress Response Spectra Sekat Membujur Tunggal**



**Gambar 14. Stress Response Spectra Sekat Membujur Ganda**

Perhitungan *stress r esponse spectra* dapat dilihat pada lampiran 3. Adapun grafik *stress response spectra* dapat dilihat pada Gambar 13 dan 14.

### 3.6. Umur Lelah (*Fatigue*)

Dari hasil *stress r esponse spectra*, maka akan didapatkan *zero moment* ( $m_0$ ) dan *second moment* ( $m_2$ ). *zero moment* ( $m_0$ ) dan *second moment* ( $m_2$ ) ditentukan dengan persamaan

$$\begin{aligned}
 m_0 &= \int_0^m S_R(\omega) d(\omega) \dots\dots\dots (11) \\
 m_2 &= \omega^2 \int_0^m S_R(\omega) d(\omega)
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan *zero moment* dan *second moment* ditampilkan pada Lampiran 4. Setelah nilai  $m_0$  dan  $m_2$  didapatkan, selanjutnya dapat ditentukan nilai *mean zero crossing period* dengan menggunakan persamaan yang akan diberikan. *Zero moment* dan *second moment* yang merupakan luasan dan momen luasan di bawah kurva didapatkan dengan menggunakan faktor simpson. Selanjutnya untuk perhitungan nilai *mean zero crossing period* digunakan persamaan berikut

$$T_{Z\sigma} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \dots\dots\dots (12)$$

Maka nilai *mean zero crossing period* untuk sekat membujur tunggal adalah sebagai berikut:

$$T_{Z\sigma} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

$$T_{Z\sigma} = 2 \times 3.14 \sqrt{\frac{15.960}{33.980}}$$

$$T_{Z\sigma} = 4.304$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama, dapat dihitung nilai *mean zero crossing period* untuk sekat membujur ganda.

$$T_{Z\sigma} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

$$T_{Z\sigma} = 2 \times 3.14 \sqrt{\frac{15.308}{24.302}}$$

$$T_{Z\sigma} = 4.984$$

Untuk *stress significant* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut

$$\sigma = \sqrt{4m_0} \dots\dots\dots (13)$$

Sehingga nilai *stress significant* untuk sekat membujur tunggal yaitu:

$$\sigma = \sqrt{4m_0}$$

$$\sigma = \sqrt{4 \times 15.960}$$

$$\sigma = 7.990$$

Dan untuk sekat membujur ganda:

$$\sigma = \sqrt{4m_0}$$

$$\sigma = \sqrt{4 \times 15.308}$$

$$\sigma = 7.825$$

Kemudian nilai *number of cycle* ( $n$ ) dapat dihitung dengan cara besarnya waktu (detik) dalam kurun waktu 1 tahun dibagi dengan *mean zero crossing period*. Untuk nilai  $n$  sendiri menggunakan persamaan

$$n = \frac{T}{T_{Z\sigma}} \dots\dots\dots(14)$$

Untuk sekat membujur tunggal:

$$n = \frac{T}{T_{Z\sigma}}$$

$$n = \frac{365 \times 24 \times 3600}{4.304}$$

$$n = 7327137,5465$$

Untuk sekat membujur ganda:

$$n = \frac{T}{T_{Z\sigma}}$$

$$n = \frac{365 \times 24 \times 3600}{4.984}$$

$$n = 6327447,8331$$

Untuk nilai T yaitu besarnya waktu (detik) dalam setahun sehingga nilai T adalah:

$$T = 365 \times 24 \times 3600$$

$$= 31536000$$

Sedangkan besarnya nilai N ditentukan berdasarkan persamaan 4

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

Dengan menggunakan X sebagai parameter utama pada kurva S-N serta menggunakan profil las yang terkontrol, maka untuk sekat membujur tunggal diperoleh:

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

$$N = 2 \times 10^6 \left( \frac{5.728103}{14.5} \right)^{-4.38}$$

$$N = 116878454,3816$$

Untuk sekat membujur ganda:

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

$$N = 2 \times 10^6 \left( \frac{5.699077}{14.5} \right)^{-4.38}$$

$$N = 119508288,561$$

Nilai *fatigue* per tahun (D) dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 5

$$D = \sum \frac{n}{N_i}$$

Sehingga untuk sekat membujur tunggal:

$$D = \sum \frac{n}{N_i}$$

$$D = \frac{7327137,5465}{116878454,3816}$$

$$D = 0.063$$

Untuk sekat membujur ganda:

$$D = \sum \frac{n}{N_i}$$

$$D = \frac{6327447,8331}{119508288,561}$$

$$D = 0.053$$

Setelah nilai D didapatkan, maka umur struktur dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut,

$$Fatigue\ Life\ (FL) = \frac{1}{D} \dots\dots\dots (14)$$

Untuk sekat membujur tunggal:

$$Fatigue\ Life\ (FL) = \frac{1}{D}$$

$$Fatigue\ Life\ (FL) = \frac{1}{0.063}$$

$$Fatigue\ Life\ (FL) = 16\ Tahun$$

Untuk sekat membujur ganda:

$$Fatigue\ Life\ (FL) = \frac{1}{D}$$

$$Fatigue\ Life\ (FL) = \frac{1}{0.053}$$

$$Fatigue\ Life\ (FL) = 19\ Tahun$$

Perhitungan umur kapal pada contoh ini dilakukan dengan pendekatan sederhana yang dianalisis dengan kombinasi perhitungan numerik untuk mendapatkan tegangan dan formula matematis yang sampai pada penentuan *fatigue* (umur) dari struktur. Pendekatan sederhana analisis prediksi umur kapal yang tersaji dalam buku ini mengambil contoh dari penampang kapal *double hull tanker* dengan mempertimbangkan pengaruh dari jumlah sekat membujur yang terdapat pada kapal terhadap umur.

---

# BAB 4

## KESIMPULAN

---

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan nilai umur kelelahan dari struktur *double hull tanker* dengan konfigurasi sekat membujur tunggal adalah 16 tahun dan nilai umur kelelahan untuk konfigurasi sekat membujur ganda adalah 19 tahun.

Kelelahan adalah proses akumulasi kerusakan siklus demi siklus dalam sebuah struktur yang disebabkan oleh tegangan fluktuatif, mengalami tahapan dari *initial "crack-free"* sampai pada tahapan *"failure"*. Berdasarkan hasil perhitungan di atas dapat dilihat bahwa dengan beban siklis yang sama yang bekerja pada kedua struktur, memiliki umur lelah yang berbeda, rentang tegangan memiliki peranan penting dalam perhitungan umur kelelahan sebuah struktur. Ditemukan bahwa hubungan antara rentang tegangan dan umur kelelahan berbanding terbalik. Semakin besar rentang tegangan yang bekerja, maka semakin kecil *fatigue* (umur lelah) sebuah struktur atau semakin cepat sebuah struktur mencapai tahapan *failure*.

Hal ini terjadi di mana rentang tegangan pada konfigurasi sekat membujur tunggal lebih besar ( $59,366 \text{ N/mm}^2$ ) dibandingkan dengan konfigurasi sekat membujur ganda ( $58,274 \text{ N/mm}^2$ ) dan mengakibatkan umur lelah (*fatigue*) yang lebih kecil pula yaitu 16 tahun, dibanding konfigurasi sekat membujur ganda yang memperoleh umur lelah (*fatigue*) sebesar 19 tahun. Sehingga perbandingan dari kedua konfigurasi sekat membujur di atas dapat dilihat bahwa konfigurasi sekat membujur ganda memiliki daya tahan yang lebih besar terhadap beban siklis dibandingkan dengan konfigurasi sekat membujur tunggal yang lebih cepat mencapai tahapan *failure*. Jenis kelelahan yang terjadi pada kedua struktur adalah *high-cycle fatigue*.

## REFERENSI

---

- ABS. 2003. *Floating Production Instalation*. Houston
- API RP2A WSD. 2000. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform 21th Edition Working Stress Design*. America Petroleum Institute.
- Babazadeh, A. and Khedmati, M.R. 2018. "Ultimate Strength of *Cracked* Ship Structural Elements and Systems: A Review". *Engineering Failure Analysis*, 89, 242-257.
- Bannantine A.J., Comer J., Handrock L.J. 1990. *Fundamental of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall. New Jersey.
- Dong, Y. and Frangopol, D.M. 2015. "Risk-Informed Life-Cycle Optimum Inspection and Maintenance of Ship Structures Considering Corrosion and *Fatigue*". *Ocean Engineering*, 101, 161-171.
- Doshi, K., Roy, T. and Parihar, Y. S. 2017. "Reliability Based Inspection Planning Using *Fracture* Mechanics Based *Fatigue* Evaluations for Ship Structural Details". *Marine Structures*, 54, 1-22.
- Erny, C., Thevenet, D., Cognard, J.Y. and Korner, M. 2012. "*Fatigue* Life Prediction of Welded Ship Details". *Marine Structures*, 25, 13-32.
- Farida, L. 2006. Analisis Keandalan Terhadap Kelelahan Pada Struktur Kaki Jack Up Platform. Program Pascasarjana, Jurusan Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Garbatov, Y. and Soares, G.C. 2012. "Uncertainty Assessment of *Fatigue* Damage of Welded Ship Structural Joints". *Engineering Structures*, 44, 322-333.
- Gledic, I., Parunov, J., Prebeg, P. and Corak, M. 2019. "Low-Cycle *Fatigue* of Ship Hull Damaged in Collision". *Engineering Failure Analysis*, 96, 106-161.
- Gracia, L.D., Wang, H., Mao, W., Osawa, N. dan Rychlik, I. 2019. "Comparison of Two Statistical Wave Models for *Fatigue* and *Fracture* Analysis of Ship Structures". *Ocean Engineering*, 187, 106-161.
- Han, F., Wang, C. and Hu, A. 2017. "Numerical Investigation of Wave-Induced Vibrations and Their Effect on the *Fatigue* Damage of Container Ships". *Ocean Engineering*, 142, 245-258.
- He, W., Liu, J. and Xie, D. 2014. "Numerical Study on *Fatigue Crack* Growth at a Web-*Stiffener* of Ship Structural Details by an Objective-Oriented Approach in Conjunction with ABAQUS". *Marine Structures*, 35, 45-69.
- Hoddap, D.P., Collette, M.D. and Troesch, A. W. 2015. "Stochastic Nonlinear *Fatigue Crack* Growth Predictions for Simple Specimens Subject to

- Representative Ship Structural Loading Sequences". *International Journal of Fatigue*, 70, 38-50.
- Hsu, T.T.C. 1984. *Fatigue and Microcracking of Concrete*. Matériaux et Construction, Volume 17.
- Hughes O.F. & Paik J.K. 2010. *Ship Structural Analysis and Design*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers-SNAME, New Jersey.
- Kim, J-H and Kim, Y. 2019. "Numerical Simulation on the Ice-Induced Fatigue Damage of Ship Structural Members in Broken Ice Fields". *Marine Structures*, 66, 83-105.
- Leheta, H.W, Elhewy, A.M.H., and Younes, H.A. 2016. "Analysis of Fatigue Crack Growth in Ship Structural Details". *Polish Maritime Research* 23: 71-82.
- Li, L., Gu, X, Sun, S, Wang, W., Wan, Z. and Qian, P. 2018. "Effects of Welding Residual Stresses on the Vibration *Fatigue* Life of a Ship's Shock Absorption Support". *Ocean Engineering*, 170, 237-245.
- Li, Z., Mao, W, Ringsberg, J.W., Johnson, E and Storhaug, G. 2014. "A Comparative Study of *Fatigue* Assessments of Container Ship Structures Using Various Direct Calculation Approaches". *Ocean Engineering*, 82, 65-74.
- Li, Z., Ringsberg, J.W., and Storhaug, G. 2013. "Time-Domain *Fatigue* Assessment of Ship Side-Shell Structures". *International Journal of Fatigue*, 55, 276-290.
- Mahmoud, H and Riveros, G. 2014. "Fatigue Reliability of a Single Stiffened Ship Hull Panel". *Engineering Structures*, 66, 89-99.
- Miner, M.A. 1945. "Cumulative Damage in Fatigue". *Journal of Applied Mechanics*, 12, A-159-A164.
- Muis Alie, M.Z. 2016. "The Effect of Symmetrical and Asymmetrical Configuration Shapes on Buckling and Fatigue Strength Analysis of Fixed Offshore Platforms". *International Journal of Technology*, 6, 1107-1116.
- Nallayarasu. 2015. *Offshore Structure Analysis and Design*. Indian Institute of Technology.
- Suyuthi, A., Leira, B.J and Riska, K. 2013. "Fatigue Damage of Ship Hulls due to Local Ice-Induced Stresses". *Applied Ocean Research*, 42, 87-104.
- Tasdemir, A. and Nohut, S. 2012. "Fatigue Analysis of Ship Structures with Hinged Deck Design by Finite Element Method. A Case Study: Fatigue Analysis of the Primary Supporting Members of 4900 PCTC". *Marine Structures*, 25, 1-12.
- Thomson, I. 2016. "Validation of Naval Vessel Spectral Fatigue Analysis Using Full-Scale Measurements," *Marine Structures*, 49, 256-268.
- \_\_\_\_\_. 2018. "Fatigue Damage Variation within a Class of Naval Ships". *Ocean Engineering*, 165, 123-130.

- Yan, X., Huang, X., Huang, Y. and Cui, W. 2016. "Prediction of Fatigue Crack Growth in a Ship Detail under Wave-Induced Loading". *Ocean Engineering*, 113, 246-254.
- Zainuri, M. 2008. *Kekuatan Bahan*. Yogyakarta.
- Zhang, Y, Huang, X and Wang, F. 2018. "Fatigue Crack Propagation Prediction for Marine Structures Based on a Spectral Method". *Ocean Engineering*, 163, 706-717.

# LAMPIRAN

---

## LAMPIRAN 1. Perhitungan Spektrum Gelombang JONSWAP

Gravity [m/s <sup>2</sup> ]	Mean wave period [s]	Angular Frequency ( $\omega$ )	Significant Height of Waves [m]	Peak Frequency ( $\omega_p$ )	S( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]
9,81	10,92	0,58	3,429	0,11428064	0,216092351
9,81	10,54	0,60	3,429	0,11428064	0,314016362
9,81	9,64	0,65	3,429	0,11428064	0,595728777
9,81	9,381	0,67	3,429	0,11428064	0,675195615
9,81	9,177	0,68	3,429	0,11428064	0,732359499
9,81	8,548	0,74	3,429	0,11428064	0,858765802
9,81	8,468	0,74	3,429	0,11428064	0,868072462
9,81	8,428	0,75	3,429	0,11428064	0,872087982
9,81	8,3	0,76	3,429	0,11428064	0,882031334
9,81	8,082	0,78	3,429	0,11428064	0,888647878
9,81	7,935	0,79	3,429	0,11428064	0,885803549
9,81	7,897	0,80	3,429	0,11428064	0,884129784
9,81	7,76	0,81	3,429	0,11428064	0,874985244
9,81	7,704	0,82	3,429	0,11428064	0,869882743
9,81	7,593	0,83	3,429	0,11428064	0,857528513
9,81	7,492	0,84	3,429	0,11428064	0,843818376
9,81	7,413	0,85	3,429	0,11428064	0,831550029
9,81	7,334	0,86	3,429	0,11428064	0,818006976
9,81	7,235	0,87	3,429	0,11428064	0,799357113
9,81	7,16	0,88	3,429	0,11428064	0,784078562
9,81	7,087	0,89	3,429	0,11428064	0,768333389
9,81	7	0,90	3,429	0,11428064	0,748540649
9,81	6,933	0,91	3,429	0,11428064	0,732607527
9,81	6,862	0,92	3,429	0,11428064	0,715135523
9,81	6,789	0,93	3,429	0,11428064	0,696609535
9,81	6,708	0,94	3,429	0,11428064	0,675473301
9,81	6,645	0,95	3,429	0,11428064	0,658672524
9,81	6,569	0,96	3,429	0,11428064	0,63805429
9,81	6,507	0,97	3,429	0,11428064	0,62100129
9,81	6,441	0,98	3,429	0,11428064	0,602668341
9,81	6,367	0,99	3,429	0,11428064	0,581952113
9,81	6,299	1,00	3,429	0,11428064	0,562820691
9,81	6,243	1,01	3,429	0,11428064	0,547033755
9,81	6,186	1,02	3,429	0,11428064	0,530965482
9,81	6,121	1,03	3,429	0,11428064	0,512677576
9,81	6,061	1,04	3,429	0,11428064	0,495862422
9,81	6,001	1,05	3,429	0,11428064	0,479140793
9,81	5,947	1,06	3,429	0,11428064	0,464194402

<b>Gravity [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>Mean wave period [s]</b>	<b>Angular Frequency (<math>\omega</math>)</b>	<b>Significant Height of Waves [m]</b>	<b>Peak Frequency (<math>\omega_p</math>)</b>	<b>S(<math>\omega</math>) [mm<sup>2</sup>/s]</b>
9,81	5,892	1,07	3,429	0,11428064	0,449092399
9,81	5,841	1,08	3,429	0,11428064	0,435214844
9,81	5,785	1,09	3,429	0,11428064	0,420134447
9,81	5,734	1,10	3,429	0,11428064	0,406559159
9,81	5,677	1,11	3,429	0,11428064	0,391582281
9,81	5,632	1,12	3,429	0,11428064	0,379914985
9,81	5,582	1,13	3,429	0,11428064	0,367123713
9,81	5,533	1,14	3,429	0,11428064	0,35477368
9,81	5,482	1,15	3,429	0,11428064	0,342124023
9,81	5,435	1,16	3,429	0,11428064	0,33065895
9,81	5,39	1,17	3,429	0,11428064	0,319861014
9,81	5,343	1,18	3,429	0,11428064	0,308776246
9,81	5,296	1,19	3,429	0,11428064	0,297894197
9,81	5,255	1,20	3,429	0,11428064	0,288570825
9,81	5,209	1,21	3,429	0,11428064	0,278302335
9,81	5,168	1,22	3,429	0,11428064	0,269323975
9,81	5,125	1,23	3,429	0,11428064	0,260086543
9,81	5,084	1,24	3,429	0,11428064	0,251451516
9,81	5,044	1,25	3,429	0,11428064	0,24319139
9,81	5,002	1,26	3,429	0,11428064	0,234694479
9,81	4,962	1,27	3,429	0,11428064	0,22677126
9,81	4,925	1,28	3,429	0,11428064	0,219589999
9,81	4,881	1,29	3,429	0,11428064	0,211235745
9,81	4,848	1,30	3,429	0,11428064	0,205102801
9,81	4,812	1,31	3,429	0,11428064	0,198542334
9,81	4,772	1,32	3,429	0,11428064	0,19141217
9,81	4,739	1,33	3,429	0,11428064	0,185655957
9,81	4,704	1,34	3,429	0,11428064	0,179675402
9,81	4,669	1,35	3,429	0,11428064	0,17382279
9,81	4,634	1,36	3,429	0,11428064	0,168097776
9,81	4,599	1,37	3,429	0,11428064	0,162499916
9,81	4,566	1,38	3,429	0,11428064	0,15733791
9,81	4,534	1,39	3,429	0,11428064	0,15243932
9,81	4,498	1,40	3,429	0,11428064	0,14705364
9,81	4,469	1,41	3,429	0,11428064	0,142811042
9,81	4,438	1,42	3,429	0,11428064	0,138369842
9,81	4,404	1,43	3,429	0,11428064	0,133609763
9,81	4,374	1,44	3,429	0,11428064	0,129505337
9,81	4,345	1,45	3,429	0,11428064	0,125622295
9,81	4,314	1,46	3,429	0,11428064	0,12156265
9,81	4,285	1,47	3,429	0,11428064	0,11784951
9,81	4,257	1,48	3,429	0,11428064	0,114341323
9,81	4,225	1,49	3,429	0,11428064	0,110423631
9,81	4,199	1,50	3,429	0,11428064	0,107311826
9,81	4,165	1,51	3,429	0,11428064	0,103338007
9,81	4,142	1,52	3,429	0,11428064	0,10071058

<b>Gravity [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>Mean wave period [s]</b>	<b>Angular Frequency (<math>\omega</math>)</b>	<b>Significant Height of Waves [m]</b>	<b>Peak Frequency (<math>\omega_p</math>)</b>	<b>S(<math>\omega</math>) [mm<sup>2</sup>/s]</b>
9,81	4,116	1,53	3,429	0,11428064	0,097798871
9,81	4,086	1,54	3,429	0,11428064	0,094515475
9,81	4,061	1,55	3,429	0,11428064	0,091841065
9,81	4,034	1,56	3,429	0,11428064	0,089015057
9,81	4,009	1,57	3,429	0,11428064	0,086455494
9,81	3,985	1,58	3,429	0,11428064	0,084049411
9,81	3,96	1,59	3,429	0,11428064	0,081595719
9,81	3,937	1,60	3,429	0,11428064	0,079385249
9,81	3,911	1,61	3,429	0,11428064	0,076939987
9,81	3,877	1,62	3,429	0,11428064	0,073826922
9,81	3,864	1,63	3,429	0,11428064	0,072661665
9,81	3,838	1,64	3,429	0,11428064	0,070372189
9,81	3,817	1,65	3,429	0,11428064	0,068562536
9,81	3,794	1,66	3,429	0,11428064	0,066620584
9,81	3,771	1,67	3,429	0,11428064	0,064720007
9,81	3,749	1,68	3,429	0,11428064	0,062940308
9,81	3,722	1,69	3,429	0,11428064	0,060806565
9,81	3,705	1,70	3,429	0,11428064	0,059491262
9,81	3,682	1,71	3,429	0,11428064	0,057745935
9,81	3,641	1,73	3,429	0,11428064	0,054730726
9,81	3,617	1,74	3,429	0,11428064	0,053021828
9,81	3,598	1,75	3,429	0,11428064	0,051697836
9,81	3,563	1,76	3,429	0,11428064	0,049324664
9,81	3,552	1,77	3,429	0,11428064	0,048596177
9,81	3,535	1,78	3,429	0,11428064	0,047486454
9,81	3,518	1,79	3,429	0,11428064	0,046396117
9,81	3,493	1,80	3,429	0,11428064	0,044827449
9,81	3,473	1,81	3,429	0,11428064	0,04360191
9,81	3,448	1,82	3,429	0,11428064	0,042106162
9,81	3,441	1,83	3,429	0,11428064	0,041694471
9,81	3,416	1,84	3,429	0,11428064	0,04024924
9,81	3,403	1,85	3,429	0,11428064	0,039513054
9,81	3,366	1,87	3,429	0,11428064	0,037474184
9,81	3,341	1,88	3,429	0,11428064	0,03614301
9,81	3,327	1,89	3,429	0,11428064	0,035413614
9,81	3,297	1,91	3,429	0,11428064	0,033888803
9,81	3,294	1,91	3,429	0,11428064	0,033739152
9,81	3,278	1,92	3,429	0,11428064	0,0329496
9,81	3,261	1,93	3,429	0,11428064	0,0321264
9,81	3,23	1,95	3,429	0,11428064	0,030666243
9,81	3,206	1,96	3,429	0,11428064	0,029571475
9,81	3,195	1,97	3,429	0,11428064	0,029079934
9,81	3,166	1,98	3,429	0,11428064	0,027814353
9,81	3,149	2,00	3,429	0,11428064	0,027092579
9,81	3,141	2,00	3,429	0,11428064	0,026757991
9,81	3,131	2,01	3,429	0,11428064	0,026344276

<b>Gravity [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>Mean wave period [s]</b>	<b>Angular Frequency (<math>\omega</math>)</b>	<b>Significant Height of Waves [m]</b>	<b>Peak Frequency (<math>\omega_p</math>)</b>	<b>S(<math>\omega</math>) [mm<sup>2</sup>/s]</b>
9,81	3,094	2,03	3,429	0,11428064	0,02485655
9,81	3,083	2,04	3,429	0,11428064	0,024427106
9,81	3,054	2,06	3,429	0,11428064	0,023322569
9,81	3,034	2,07	3,429	0,11428064	0,022583773
9,81	3,022	2,08	3,429	0,11428064	0,022149332
9,81	2,992	2,10	3,429	0,11428064	0,021091711
9,81	2,971	2,11	3,429	0,11428064	0,020375143
9,81	2,952	2,13	3,429	0,11428064	0,019743338
9,81	2,879	2,18	3,429	0,11428064	0,017456971
9,81	2,853	2,20	3,429	0,11428064	0,016694801
9,81	2,74	2,29	3,429	0,11428064	0,013679955

LAMPIRAN 2. Perhitungan RAO

RAO *Single* Sekat

$\omega$ [rad/s]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Hs [m]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]
0,58	0,399632	3,429	0,116544765
0,60	2,75012	3,429	0,802018081
0,65	4,73625	3,429	1,381233596
0,67	5,82485	3,429	1,698702246
0,68	6,86068	3,429	2,000781569
0,74	7,42654	3,429	2,165803441
0,74	7,90466	3,429	2,305237679
0,75	8,27914	3,429	2,414447361
0,76	8,93574	3,429	2,605931759
0,78	9,49212	3,429	2,768188976
0,79	9,78118	3,429	2,852487606
0,80	10,2288	3,429	2,983027122
0,81	10,5367	3,429	3,072820064
0,82	10,8522	3,429	3,164829396
0,83	11,3396	3,429	3,306969962
0,84	11,6739	3,429	3,404461942
0,85	11,8437	3,429	3,453980752
0,86	12,3637	3,429	3,605628463
0,87	12,8985	3,429	3,761592301
0,88	13,2625	3,429	3,867745698
0,89	13,6318	3,429	3,975444736
0,90	13,8183	3,429	4,029833771
0,91	14,3842	3,429	4,194867308
0,92	14,9578	3,429	4,362146398
0,93	15,3434	3,429	4,474599008
0,94	15,7307	3,429	4,58754739
0,95	15,9247	3,429	4,644123651
0,96	16,3129	3,429	4,75733345
0,97	16,5068	3,429	4,813881598
0,98	16,8937	3,429	4,926713328
0,99	17,2782	3,429	5,038845144
1,00	17,6587	3,429	5,14981044
1,01	17,847	3,429	5,204724409
1,02	18,2188	3,429	5,313152523
1,03	18,4023	3,429	5,366666667
1,04	18,9435	3,429	5,524496938
1,05	19,2989	3,429	5,628142316
1,06	19,6524	3,429	5,731233596
1,07	19,829	3,429	5,782735491
1,08	20,3595	3,429	5,937445319
1,09	20,8929	3,429	6,093000875
1,10	21,6099	3,429	6,302099738
1,11	21,9716	3,429	6,407582386
1,12	22,3363	3,429	6,513939924
1,13	22,5202	3,429	6,56757072

$\omega$ [rad/s]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Hs [m]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]
1,14	22,8867	3,429	6,674453193
1,15	23,2377	3,429	6,776815398
1,16	23,6881	3,429	6,908165646
1,17	23,964	3,429	6,988626422
1,18	24,2542	3,429	7,073257509
1,19	24,7066	3,429	7,205191018
1,20	25,3379	3,429	7,389297171
1,21	25,6658	3,429	7,484922718
1,22	25,8325	3,429	7,533537474
1,23	26,3431	3,429	7,682443861
1,24	26,691	3,429	7,783902012
1,25	26,8669	3,429	7,835199767
1,26	27,2224	3,429	7,938874307
1,27	27,5822	3,429	8,043802858
1,28	27,9458	3,429	8,149839603
1,29	28,3128	3,429	8,256867892
1,30	28,8688	3,429	8,41901429
1,31	29,2428	3,429	8,52808399
1,32	29,619	3,429	8,637795276
1,33	29,9971	3,429	8,748060659
1,34	30,5671	3,429	8,91428988
1,35	30,9477	3,429	9,025284339
1,36	31,5357	3,429	9,196762905
1,37	31,9199	3,429	9,308807232
1,38	32,3031	3,429	9,42055993
1,39	32,6868	3,429	9,532458443
1,40	32,8788	3,429	9,588451444
1,41	33,456	3,429	9,756780402
1,42	33,8422	3,429	9,869407991
1,43	34,23	3,429	9,982502187
1,44	34,8152	3,429	10,15316419
1,45	35,208	3,429	10,26771654
1,46	35,6031	3,429	10,38293963
1,47	35,8015	3,429	10,44079907
1,48	36,199	3,429	10,55672208
1,49	36,4145	3,429	10,61956839
1,50	36,8234	3,429	10,73881598
1,51	37,2303	3,429	10,85748031
1,52	37,6394	3,429	10,97678624
1,53	37,8454	3,429	11,03686206
1,54	38,2605	3,429	11,15791776
1,55	38,8913	3,429	11,3418781
1,56	39,317	3,429	11,46602508
1,57	39,6771	3,429	11,57104112
1,58	39,8949	3,429	11,63455818
1,59	40,1731	3,429	11,71568971
1,60	40,4879	3,429	11,8074949
1,61	40,8352	3,429	11,90877807

$\omega$ [rad/s]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Hs [m]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]
1,62	41,5898	3,429	12,12884223
1,63	41,9836	3,429	12,24368621
1,64	42,3829	3,429	12,36013415
1,65	42,5839	3,429	12,41875182
1,66	42,987	3,429	12,53630796
1,67	43,5914	3,429	12,71256926
1,68	43,9921	3,429	12,82942549
1,69	44,3891	3,429	12,94520268
1,70	44,7805	3,429	13,05934675
1,71	44,9731	3,429	13,11551473
1,73	45,3499	3,429	13,22540099
1,74	45,5327	3,429	13,27871099
1,75	45,7104	3,429	13,33053368
1,76	45,8811	3,429	13,38031496
1,77	46,1843	3,429	13,46873724
1,78	46,2947	3,429	13,50093322
1,79	45,9451	3,429	13,39897929
1,80	45,8372	3,429	13,36751239
1,81	45,7544	3,429	13,34336541
1,82	45,7327	3,429	13,33703704
1,83	45,8185	3,429	13,36205891
1,84	45,9997	3,429	13,4149023
1,85	46,3769	3,429	13,52490522
1,87	46,5685	3,429	13,58078157
1,88	46,9624	3,429	13,69565471
1,89	47,36	3,429	13,81160688
1,91	47,9478	3,429	13,98302712
1,91	48,4957	3,429	14,14281132
1,92	48,6605	3,429	14,19087197
1,93	48,9475	3,429	14,27456985
1,95	49,2423	3,429	14,36054243
1,96	49,5274	3,429	14,44368621
1,97	49,4043	3,429	14,40778653
1,98	49,2973	3,429	14,37658209
2,00	48,9077	3,429	14,26296296
2,00	48,4597	3,429	14,13231263
2,01	47,9806	3,429	13,99259259
2,03	47,4849	3,429	13,8480315
2,04	46,9818	3,429	13,70131234
2,06	46,6457	3,429	13,60329542
2,07	46,3105	3,429	13,50554097
2,08	45,557	3,429	13,28579761
2,10	46,2727	3,429	13,49451735
2,11	49,3466	3,429	14,39095946
2,13	50,51	3,429	14,73024205
2,18	52,7978	3,429	15,39743365
2,20	55,0291	3,429	16,04814815
2,29	59,7659	3,429	17,42954214

RAO *Double* Sekat

$\omega$ [rad/s]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Hs [m]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]
0,58	2,7643	3,429	0,806153397
0,60	5,52915	3,429	1,612467192
0,65	7,48362	3,429	2,182449694
0,67	9,41109	3,429	2,74455818
0,68	10,4474	3,429	3,046777486
0,74	11,2396	3,429	3,277806941
0,74	11,6913	3,429	3,409536308
0,75	12,0455	3,429	3,512831729
0,76	12,3491	3,429	3,601370662
0,78	12,6347	3,429	3,684660251
0,79	12,9178	3,429	3,767220764
0,80	13,2064	3,429	3,851385244
0,81	13,5049	3,429	3,938436862
0,82	13,8151	3,429	4,028900554
0,83	14,1368	3,429	4,122717994
0,84	14,4684	3,429	4,219422572
0,85	14,8078	3,429	4,318401866
0,86	15,153	3,429	4,419072616
0,87	15,5034	3,429	4,521259843
0,88	15,8594	3,429	4,625080198
0,89	16,2221	3,429	4,730854477
0,90	16,5924	3,429	4,838845144
0,91	16,971	3,429	4,949256343
0,92	17,3585	3,429	5,06226305
0,93	17,7551	3,429	5,177923593
0,94	18,161	3,429	5,296296296
0,95	18,576	3,429	5,417322835
0,96	19,0001	3,429	5,541003208
0,97	19,4329	3,429	5,667220764
0,98	19,874	3,429	5,795858851
0,99	20,323	3,429	5,926800817
1,00	20,7794	3,429	6,059900846
1,01	21,2424	3,429	6,194925634
1,02	21,7115	3,429	6,331729367
1,03	22,186	3,429	6,470107903
1,04	22,6649	3,429	6,609769612
1,05	23,1475	3,429	6,750510353
1,06	23,6329	3,429	6,892067658
1,07	24,1201	3,429	7,034149898
1,08	24,6083	3,429	7,176523768
1,09	25,0964	3,429	7,318868475
1,10	25,5838	3,429	7,461009041
1,11	26,0695	3,429	7,602653835
1,12	26,5528	3,429	7,743598717
1,13	27,0333	3,429	7,883727034
1,14	27,5106	3,429	8,022922135

$\omega$ [rad/s]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Hs [m]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]
1,15	27,9844	3,429	8,16109653
1,16	28,4547	3,429	8,298250219
1,17	28,9218	3,429	8,434470691
1,18	29,386	3,429	8,569845436
1,19	29,8478	3,429	8,704520268
1,20	30,3079	3,429	8,838699329
1,21	30,767	3,429	8,97258676
1,22	31,2259	3,429	9,106415865
1,23	31,6854	3,429	9,240419948
1,24	32,1463	3,429	9,374832313
1,25	32,6094	3,429	9,509886264
1,26	33,0749	3,429	9,645640128
1,27	33,3256	3,429	9,718751823
1,28	33,7427	3,429	9,840390784
1,29	34,3741	3,429	10,0245261
1,30	34,8248	3,429	10,15596384
1,31	33,9145	3,429	9,890492855
1,32	33,1301	3,429	9,661738116
1,33	32,4306	3,429	9,457742782
1,34	31,9745	3,429	9,324730242
1,35	31,5053	3,429	9,187897346
1,36	31,0287	3,429	9,048906387
1,37	30,5699	3,429	8,915106445
1,38	30,1105	3,429	8,781131525
1,39	29,6498	3,429	8,646777486
1,40	29,1872	3,429	8,51186935
1,41	28,7219	3,429	8,376173812
1,42	28,2535	3,429	8,23957422
1,43	27,7817	3,429	8,101983085
1,44	27,3065	3,429	7,963400408
1,45	26,8278	3,429	7,823797025
1,46	26,3461	3,429	7,683318752
1,47	25,8617	3,429	7,542053077
1,48	25,3752	3,429	7,400174978
1,49	24,8873	3,429	7,257888597
1,50	24,399	3,429	7,115485564
1,51	23,9111	3,429	6,973199183
1,52	23,4245	3,429	6,831291922
1,53	22,9402	3,429	6,69005541
1,54	22,459	3,429	6,549722951
1,55	21,9819	3,429	6,410586177
1,56	21,5096	3,429	6,272849227
1,57	21,043	3,429	6,13677457
1,58	20,5827	3,429	6,002537183
1,59	20,1294	3,429	5,870341207
1,60	19,6837	3,429	5,740361621
1,61	19,2461	3,429	5,61274424
1,62	18,8169	3,429	5,487576553

$\omega$ [rad/s]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Hs [m]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]
1,63	18,3967	3,429	5,365033537
1,64	17,9855	3,429	5,245115194
1,65	17,5836	3,429	5,127909011
1,66	17,1909	3,429	5,013385827
1,67	16,8073	3,429	4,901516477
1,68	16,4323	3,429	4,792155147
1,69	16,0655	3,429	4,685185185
1,70	15,706	3,429	4,580344124
1,71	15,3529	3,429	4,477369495
1,73	15,0054	3,429	4,376027997
1,74	14,6634	3,429	4,276290464
1,75	14,3275	3,429	4,178331875
1,76	13,9997	3,429	4,082735491
1,77	13,6822	3,429	3,990142899
1,78	13,3764	3,429	3,90096238
1,79	13,0819	3,429	3,815077282
1,80	12,796	3,429	3,731700204
1,81	12,5129	3,429	3,649139691
1,82	12,2223	3,429	3,564391951
1,83	11,906	3,429	3,472149315
1,84	11,5298	3,429	3,362438029
1,85	11,0271	3,429	3,215835521
1,87	10,2714	3,429	2,995450569
1,88	9,06592	3,429	2,64389618
1,89	7,24401	3,429	2,112572178
1,91	4,87541	3,429	1,421816856
1,91	2,17358	3,429	0,633881598
1,92	0,629162	3,429	0,183482648
1,93	3,48096	3,429	1,015153106
1,95	6,38161	3,429	1,861070283
1,96	9,32333	3,429	2,718964713
1,97	12,2974	3,429	3,58629338
1,98	15,298	3,429	4,461358997
2,00	18,3209	3,429	5,342927967
2,00	21,3634	3,429	6,23021289
2,01	24,423	3,429	7,122484689
2,03	27,4979	3,429	8,019218431
2,04	30,5868	3,429	8,920034996
2,06	33,6882	3,429	9,824496938
2,07	36,801	3,429	10,73228346
2,08	39,9243	3,429	11,64313211
2,10	43,0572	3,429	12,5567804
2,11	46,199	3,429	13,47302421
2,13	49,3489	3,429	14,39163021
2,18	52,5024	3,429	15,31128609
2,20	55,6849	3,429	16,23939924
2,29	58,9025	3,429	17,17774861

LAMPIRAN 3. Perhitungan *Stress Response Spectra*  
*Stress Response Spectra* Single Sekat

$\omega$ [rad/s]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]	S( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]	Sr( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]
0,58	0,116544765	0,216092	0,002935
0,60	0,802018081	0,314016	0,201986
0,65	1,381233596	0,595729	1,136535
0,67	1,698702246	0,675196	1,948337
0,68	2,000781569	0,732359	2,931728
0,74	2,165803441	0,858766	4,028217
0,74	2,305237679	0,868072	4,613042
0,75	2,414447361	0,872088	5,083886
0,76	2,605931759	0,882031	5,989769
0,78	2,768188976	0,888648	6,809593
0,79	2,852487606	0,885804	7,207505
0,80	2,983027122	0,88413	7,867385
0,81	3,072820064	0,874985	8,261806
0,82	3,164829396	0,869883	8,712872
0,83	3,306969962	0,857529	9,377975
0,84	3,404461942	0,843818	9,78016
0,85	3,453980752	0,83155	9,920378
0,86	3,605628463	0,818007	10,63455
0,87	3,761592301	0,799357	11,31056
0,88	3,867745698	0,784079	11,72939
0,89	3,975444736	0,768333	12,14286
0,90	4,029833771	0,748541	12,15597
0,91	4,194867308	0,732608	12,89163
0,92	4,362146398	0,715136	13,60783
0,93	4,474599008	0,69661	13,94754
0,94	4,58754739	0,675473	14,21573
0,95	4,644123651	0,658673	14,20617
0,96	4,7573345	0,638054	14,44059
0,97	4,813881598	0,621001	14,39075
0,98	4,926713328	0,602668	14,62827
0,99	5,038845144	0,581952	14,77574
1,00	5,14981044	0,562821	14,92631
1,01	5,204724409	0,547034	14,81868
1,02	5,313152523	0,530965	14,98894
1,03	5,366666667	0,512678	14,76568
1,04	5,524496938	0,495862	15,13375
1,05	5,628142316	0,479141	15,17726
1,06	5,731233596	0,464194	15,24741
1,07	5,782735491	0,449092	15,01766
1,08	5,937445319	0,435215	15,34274
1,09	6,093000875	0,420134	15,59735
1,10	6,302099738	0,406559	16,14709
1,11	6,407582386	0,391582	16,07724
1,12	6,513939924	0,379915	16,12033
1,13	6,56757072	0,367124	15,83514

$\omega$ [rad/s]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]	S( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]	Sr( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]
1,14	6,674453193	0,354774	15,80457
1,15	6,776815398	0,342124	15,71212
1,16	6,908165646	0,330659	15,77996
1,17	6,988626422	0,319861	15,6223
1,18	7,073257509	0,308776	15,44838
1,19	7,205191018	0,297894	15,46511
1,20	7,389297171	0,288571	15,75646
1,21	7,484922718	0,278302	15,59163
1,22	7,533537474	0,269324	15,28526
1,23	7,682443861	0,260087	15,35029
1,24	7,783902012	0,251452	15,23523
1,25	7,835199767	0,243191	14,92961
1,26	7,938874307	0,234694	14,79179
1,27	8,043802858	0,226771	14,67273
1,28	8,149839603	0,21959	14,58514
1,29	8,256867892	0,211236	14,40118
1,30	8,41901429	0,205103	14,53765
1,31	8,52808399	0,198542	14,43963
1,32	8,637795276	0,191412	14,28155
1,33	8,748060659	0,185656	14,20798
1,34	8,91428988	0,179675	14,27783
1,35	9,025284339	0,173823	14,15887
1,36	9,196762905	0,168098	14,21779
1,37	9,308807232	0,1625	14,08125
1,38	9,42055993	0,157338	13,96326
1,39	9,532458443	0,152439	13,85182
1,40	9,588451444	0,147054	13,51988
1,41	9,756780402	0,142811	13,59486
1,42	9,869407991	0,13837	13,47794
1,43	9,982502187	0,13361	13,31426
1,44	10,15316419	0,129505	13,35028
1,45	10,26771654	0,125622	13,24386
1,46	10,38293963	0,121563	13,10511
1,47	10,44079907	0,11785	12,84681
1,48	10,55672208	0,114341	12,7427
1,49	10,61956839	0,110424	12,45305
1,50	10,73881598	0,107312	12,37543
1,51	10,85748031	0,103338	12,18199
1,52	10,97678624	0,100711	12,1346
1,53	11,03686206	0,097799	11,91311
1,54	11,15791776	0,094515	11,76709
1,55	11,3418781	0,091841	11,81427
1,56	11,46602508	0,089015	11,70279
1,57	11,57104112	0,086455	11,57544
1,58	11,63455818	0,084049	11,37718
1,59	11,71568971	0,081596	11,19962
1,60	11,8074949	0,079385	11,06765
1,61	11,90877807	0,07694	10,91155

$\omega$ [rad/s]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]	S( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]	Sr( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]
1,62	12,12884223	0,073827	10,86059
1,63	12,24368621	0,072662	10,89255
1,64	12,36013415	0,070372	10,75096
1,65	12,41875182	0,068563	10,57408
1,66	12,53630796	0,066621	10,47003
1,67	12,71256926	0,06472	10,45936
1,68	12,82942549	0,06294	10,35961
1,69	12,94520268	0,060807	10,18986
1,70	13,05934675	0,059491	10,14603
1,71	13,11551473	0,057746	9,933267
1,73	13,22540099	0,054731	9,573019
1,74	13,27871099	0,053022	9,34903
1,75	13,33053368	0,051698	9,186867
1,76	13,38031496	0,049325	8,830734
1,77	13,46873724	0,048596	8,815681
1,78	13,50093322	0,047486	8,655603
1,79	13,39897929	0,046396	8,329618
1,80	13,36751239	0,044827	8,010234
1,81	13,34336541	0,043602	7,76312
1,82	13,33703704	0,042106	7,489699
1,83	13,36205891	0,041694	7,444323
1,84	13,4149023	0,040249	7,243237
1,85	13,52490522	0,039513	7,227849
1,87	13,58078157	0,037474	6,91165
1,88	13,69565471	0,036143	6,779379
1,89	13,81160688	0,035414	6,755518
1,91	13,98302712	0,033889	6,62611
1,91	14,14281132	0,033739	6,748475
1,92	14,19087197	0,03295	6,635418
1,93	14,27456985	0,032126	6,546183
1,95	14,36054243	0,030666	6,324151
1,96	14,44368621	0,029571	6,169203
1,97	14,40778653	0,02908	6,036538
1,98	14,37658209	0,027814	5,748841
2,00	14,26296296	0,027093	5,511501
2,00	14,13231263	0,026758	5,344166
2,01	13,99259259	0,026344	5,158016
2,03	13,8480315	0,024857	4,76669
2,04	13,70131234	0,024427	4,585602
2,06	13,60329542	0,023323	4,315833
2,07	13,50554097	0,022584	4,119272
2,08	13,28579761	0,022149	3,909632
2,10	13,49451735	0,021092	3,840843
2,11	14,39095946	0,020375	4,219686
2,13	14,73024205	0,019743	4,28391
2,18	15,39743365	0,017457	4,138716
2,20	16,04814815	0,016695	4,29963
2,29	17,42954214	0,01368	4,155819

*Stress Response Spectra Double Sekat*

$\omega$ [rad/s]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]	S( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]	Sr( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]
0,58	0,806153397	0,216092	0,140435
0,60	1,612467192	0,314016	0,816458
0,65	2,182449694	0,595729	2,837508
0,67	2,74455818	0,675196	5,085978
0,68	3,046777486	0,732359	6,798386
0,74	3,277806941	0,858766	9,226596
0,74	3,409536308	0,868072	10,09129
0,75	3,512831729	0,872088	10,76155
0,76	3,601370662	0,882031	11,43983
0,78	3,684660251	0,888648	12,06492
0,79	3,767220764	0,885804	12,57128
0,80	3,851385244	0,88413	13,11445
0,81	3,938436862	0,874985	13,57215
0,82	4,028900554	0,869883	14,11997
0,83	4,122717994	0,857529	14,57524
0,84	4,219422572	0,843818	15,02294
0,85	4,318401866	0,83155	15,50724
0,86	4,419072616	0,818007	15,97421
0,87	4,521259843	0,799357	16,34029
0,88	4,625080198	0,784079	16,77251
0,89	4,730854477	0,768333	17,19606
0,90	4,838845144	0,748541	17,52665
0,91	4,949256343	0,732608	17,94532
0,92	5,06226305	0,715136	18,32643
0,93	5,177923593	0,69661	18,67672
0,94	5,296296296	0,675473	18,94754
0,95	5,417322835	0,658673	19,33032
0,96	5,541003208	0,638054	19,59
0,97	5,667220764	0,621001	19,94494
0,98	5,795858851	0,602668	20,24482
0,99	5,926800817	0,581952	20,44221
1,00	6,059900846	0,562821	20,66813
1,01	6,194925634	0,547034	20,99357
1,02	6,331729367	0,530965	21,28683
1,03	6,470107903	0,512678	21,46186
1,04	6,609769612	0,495862	21,66376
1,05	6,750510353	0,479141	21,83415
1,06	6,892067658	0,464194	22,04951
1,07	7,034149898	0,449092	22,22076
1,08	7,176523768	0,435215	22,41465
1,09	7,318868475	0,420134	22,50485
1,10	7,461009041	0,406559	22,63179
1,11	7,602653835	0,391582	22,63359
1,12	7,743598717	0,379915	22,78096
1,13	7,883727034	0,367124	22,8179
1,14	8,022922135	0,354774	22,83582

$\omega$ [rad/s]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]	S( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]	Sr( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]
1,15	8,16109653	0,342124	22,78666
1,16	8,298250219	0,330659	22,76949
1,17	8,434470691	0,319861	22,75501
1,18	8,569845436	0,308776	22,67722
1,19	8,704520268	0,297894	22,57105
1,20	8,838699329	0,288571	22,5439
1,21	8,97258676	0,278302	22,40537
1,22	9,106415865	0,269324	22,33418
1,23	9,240419948	0,260087	22,20758
1,24	9,374832313	0,251452	22,09944
1,25	9,509886264	0,243191	21,99373
1,26	9,645640128	0,234694	21,83559
1,27	9,718751823	0,226771	21,41948
1,28	9,840390784	0,21959	21,26362
1,29	10,0245261	0,211236	21,22732
1,30	10,15596384	0,205103	21,15504
1,31	9,890492855	0,198542	19,42178
1,32	9,661738116	0,191412	17,86817
1,33	9,457742782	0,185656	16,60672
1,34	9,324730242	0,179675	15,62288
1,35	9,187897346	0,173823	14,67368
1,36	9,048906387	0,168098	13,7643
1,37	8,915106445	0,1625	12,91535
1,38	8,781131525	0,157338	12,13205
1,39	8,646777486	0,152439	11,39739
1,40	8,51186935	0,147054	10,65432
1,41	8,376173812	0,142811	10,01966
1,42	8,23957422	0,13837	9,394009
1,43	8,101983085	0,13361	8,770429
1,44	7,963400408	0,129505	8,212678
1,45	7,823797025	0,125622	7,689567
1,46	7,683318752	0,121563	7,176255
1,47	7,542053077	0,11785	6,703582
1,48	7,400174978	0,114341	6,261627
1,49	7,257888597	0,110424	5,81678
1,50	7,115485564	0,107312	5,433212
1,51	6,973199183	0,103338	5,024863
1,52	6,831291922	0,100711	4,699815
1,53	6,69005541	0,097799	4,377169
1,54	6,549722951	0,094515	4,054607
1,55	6,410586177	0,091841	3,774265
1,56	6,272849227	0,089015	3,502621
1,57	6,13677457	0,086455	3,255914
1,58	6,002537183	0,084049	3,028338
1,59	5,870341207	0,081596	2,811862
1,60	5,740361621	0,079385	2,615883
1,61	5,61274424	0,07694	2,423833
1,62	5,487576553	0,073827	2,223187

$\omega$ [rad/s]	RAO [(N/mm <sup>2</sup> )/m]	S( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]	Sr( $\omega$ ) [mm <sup>2</sup> /s]
1,63	5,365033537	0,072662	2,091463
1,64	5,245115194	0,070372	1,936026
1,65	5,127909011	0,068563	1,802883
1,66	5,013385827	0,066621	1,674444
1,67	4,901516477	0,06472	1,554889
1,68	4,792155147	0,06294	1,445408
1,69	4,685185185	0,060807	1,334762
1,70	4,580344124	0,059491	1,2481
1,71	4,477369495	0,057746	1,157623
1,73	4,376027997	0,054731	1,048073
1,74	4,276290464	0,053022	0,969592
1,75	4,178331875	0,051698	0,902564
1,76	4,082735491	0,049325	0,822179
1,77	3,990142899	0,048596	0,773711
1,78	3,90096238	0,047486	0,722625
1,79	3,815077282	0,046396	0,675287
1,80	3,731700204	0,044827	0,624249
1,81	3,649139691	0,043602	0,580613
1,82	3,564391951	0,042106	0,534954
1,83	3,472149315	0,041694	0,502661
1,84	3,362438029	0,040249	0,455057
1,85	3,215835521	0,039513	0,408628
1,87	2,995450569	0,037474	0,336246
1,88	2,64389618	0,036143	0,252646
1,89	2,112572178	0,035414	0,15805
1,91	1,421816856	0,033889	0,068508
1,91	0,633881598	0,033739	0,013557
1,92	0,183482648	0,03295	0,001109
1,93	1,015153106	0,032126	0,033107
1,95	1,861070283	0,030666	0,106215
1,96	2,718964713	0,029571	0,218615
1,97	3,58629338	0,02908	0,374012
1,98	4,461358997	0,027814	0,553609
2,00	5,342927967	0,027093	0,773409
2,00	6,23021289	0,026758	1,038626
2,01	7,122484689	0,026344	1,33644
2,03	8,019218431	0,024857	1,598472
2,04	8,920034996	0,024427	1,943592
2,06	9,824496938	0,023323	2,251112
2,07	10,73228346	0,022584	2,601242
2,08	11,64313211	0,022149	3,002619
2,10	12,5567804	0,021092	3,325588
2,11	13,47302421	0,020375	3,698545
2,13	14,39163021	0,019743	4,089221
2,18	15,31128609	0,017457	4,092533
2,20	16,23939924	0,016695	4,402721
2,29	17,17774861	0,01368	4,036613

LAMPIRAN 4. Perhitungan *Zero Moment* dan *Second Moment*  
*Zero Moment Single Sekat*

$\omega$ [rad/s]	$Sr(\omega)$ [mm <sup>2</sup> /s]	Faktor Simpson	$Sr(\omega) \times FS$
0	0	1	0
0,1	0	4	0
0,2	0	2	0
0,3	0	4	0
0,4	0	2	0
0,5	0	4	0
0,6	0,002935	2	0,00587
0,7	1,136535	4	4,54614
0,8	5,989769	2	11,97954
0,9	10,63455	4	42,53818
1,0	14,44059	2	28,88118
1,1	15,24741	4	60,98965
1,2	15,77996	2	31,55991
1,3	14,79179	4	59,16716
1,4	14,21779	2	28,43557
1,5	13,10511	4	52,42046
1,6	11,70279	2	23,40557
1,7	10,47003	4	41,8801
1,8	8,830734	2	17,66147
1,9	6,91165	4	27,6466
2,0	6,169203	2	12,33841
2,1	4,315833	4	17,26333
2,20	4,29963	2	8,59926
2,245	4,227725	1,8	7,609904
2,29	4,155819	0,45	1,870119
		$\Sigma$	478,7984
		Luasan	15,95995

*Second Moment Single Sekat*

$\omega$ [rad/s]	$Sr(\omega)$ [mm <sup>2</sup> /s]	$Sr(\omega) \times \omega^2$	Faktor Simpson	$Sr(\omega) \times \omega^2 \times FS$
0	0	0	1	0
0,1	0	0	4	0
0,2	0	0	2	0
0,3	0	0	4	0
0,4	0	0	2	0
0,5	0	0	4	0
0,6	0,002935	0,0010566	2	0,002113282
0,7	1,136535	0,5569022	4	2,227608761
0,8	5,989769	3,8334523	2	7,666904621
0,9	10,63455	8,6139823	4	34,45592907
1,0	14,44059	14,440592	2	28,88118485
1,1	15,24741	18,449368	4	73,79747127
1,2	15,77996	22,723136	2	45,44627109

$\omega$ [rad/s]	$Sr(\omega)$ [mm <sup>2</sup> /s]	$Sr(\omega) \times \omega^2$	Faktor Simpson	$Sr(\omega) \times \omega^2 \times FS$
1,3	14,79179	24,998125	4	99,99249855
1,4	14,21779	27,866859	2	55,73371796
1,5	13,10511	29,486507	4	117,9460293
1,6	11,70279	29,959131	2	59,91826228
1,7	10,47003	30,258374	4	121,0334951
1,8	8,830734	28,611579	2	57,2231571
1,9	6,91165	24,951055	4	99,80421985
2,0	6,169203	24,676813	2	49,35362548
2,1	4,315833	19,032825	4	76,13129819
2,20	4,29963	20,81021	2	41,62041922
2,245	4,227725	21,307837	1,8	38,35410693
2,29	4,155819	21,79353	0,45	9,8070885
			$\Sigma$	1019,395401
			Luasan	33,97984671

*Zero Moment Double Sekat*

$\omega$ [rad/s]	$Sr(\omega)$ [mm <sup>2</sup> /s]	Faktor Simpson	$Sr(\omega) \times FS$
0	0	1	0
0,1	0	4	0
0,2	0	2	0
0,3	0	4	0
0,4	0	2	0
0,5	0	4	0
0,6	0,140435	2	0,28087
0,7	2,837508	4	11,35003
0,8	11,43983	2	22,87966
0,9	15,97421	4	63,89682
1,0	19,59	2	39,18
1,1	22,04951	4	88,19804
1,2	22,76949	2	45,53898
1,3	21,83559	4	87,34237
1,4	13,7643	2	27,5286
1,5	7,176255	4	28,70502
1,6	3,502621	2	7,005242
1,7	1,674444	4	6,697777
1,8	0,822179	2	1,644359
1,9	0,336246	4	1,344982
2,0	0,218615	2	0,43723
2,1	2,251112	4	9,004447
2,20	4,402721	2	8,805442
2,245	4,219667	1,8	7,595401
2,29	4,036613	0,45	1,816476
		$\Sigma$	459,2518
		Luasan	15,30839

Second Moment Double Sekat

$\omega$ [rad/s]	$Sr(\omega)$ [mm <sup>2</sup> /s]	$Sr(\omega) \times \omega^2$	Faktor Simpson	$Sr(\omega) \times \omega^2 \times FS$
0	0	0	1	0
0,1	0	0	4	0
0,2	0	0	2	0
0,3	0	0	4	0
0,4	0	0	2	0
0,5	0	0	4	0
0,6	0,140435	0,0505565	2	0,101113063
0,7	2,837508	1,3903788	4	5,561515278
0,8	11,43983	7,3214927	2	14,64298535
0,9	15,97421	12,939107	4	51,75642781
1,0	19,59	19,59	2	39,18000001
1,1	22,04951	26,679908	4	106,7196335
1,2	22,76949	32,788068	2	65,57613582
1,3	21,83559	36,902151	4	147,6086056
1,4	13,7643	26,97803	2	53,95605957
1,5	7,176255	16,146574	4	64,58629447
1,6	3,502621	8,9667103	2	17,93342055
1,7	1,674444	4,8391439	4	19,3565756
1,8	0,822179	2,6638615	2	5,32772292
1,9	0,336246	1,2138463	4	4,855385201
2,0	0,218615	0,8744603	2	1,748920685
2,1	2,251112	9,9274024	4	39,70960978
2,20	4,402721	21,309169	2	42,61833889
2,245	4,219667	21,267228	1,8	38,28100998
2,29	4,036613	21,168404	0,45	9,525781656
			$\Sigma$	729,0455357
			Luasan	24,30151786

# INDEKS

---

---

## **A**

*Add time history* · 9  
*Advanced NL* · vii, 7  
Analisis *fatigue* spektrum · 2  
Analisis umur lelah · 1, 2, 3  
*Analysis option* · 6  
Arah retak · 2  
Area operasi · 2  
*Auto calculated* · 8  
*Automatic time stepping* · 6

---

## **B**

Babazadeh dan Khedmati (2018) · 2  
Beban *sequence* pada struktur kapal · 2  
Beban siklis · 21  
Beban siklus · 3, 11

---

## **C**

Contour Nodal Solution · 8  
*Contour plot* · 8

---

## **D**

Data *hindcast* · 1  
*Deformed shape only* · 8  
Detail kapal · 2, 3  
Dimensi stiffener · 5  
Distribusi SIF · 2  
Dong dan Frangopol (2015) · 2  
Doshi, et al. (2017) · 2  
Double Hull Oil Tanker · 5, 6

---

## **E**

Elemen hingga · v, 2, 3, 5, 6  
Erny, et al. (2012) · 3  
Evaluasi umur retak · 2

---

## **F**

*Failure* · 11, 21, 22  
Faktor konsentrasi tegangan · 2  
Faktor simpson · 18, 41, 42, 43  
*Fatigue* · v, vi, 1, 2, 3, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24  
*Fatigue crack* · 2, 22, 23, 24  
*Fatigue nonlinear* stokastik · 2  
*Fatigue spectral* · 2  
FCG-Sistem · 2  
FEM · 2  
*Frequency* · 6, 25  
Fungsi periodik · 1  
Fungsi transfer SIF · 2

---

## **G**

Garbatov dan Soares (2012) · 3  
Gelombang statistik · 1  
*General postproc* · 8  
Gracia, et al. (2019) · 1

---

## **H**

Han, et al. (2017) · 2  
He, et al. (2014) · 2  
Hoddap, et al. (2015) · 2  
*Hot spot* · 1, 11, 12

---

**I**

*Initial* · 11, 21  
*Initial "crack-free"* · 11, 21  
Inspeksi minimum · 2  
*Interface program* · 2

---

**K**

Kapal kontainer · 2  
Kapal tanker · 2  
Kapal VLCC · 2  
Kekuatan kapal · v, 1, 2, 47  
Kelelahan (*fatigue*) · 1  
Kim dan Kim (2019) · 1  
*Klik OK* · 7, 8, 9  
Kondisi batas · 2, 5  
Konfigurasi sekat membujur ganda · 21  
Konfigurasi sekat membujur tunggal · 9, 21  
Konfigurasi simetris dan tidak simetris · 2

---

**L**

*Large displacement static* · 6  
*Last set* · 8  
Leheta, et al. (2016) · 2  
Li, et al. (2013) · 2  
Li, et al. (2014) · 2  
Li, et al. (2018) · 2  
*List nodal solution* · 9  
*List result* · 9  
Lokasi retak · 2

---

**M**

Mahmoud dan Riveros (2014) · 2  
*Mean zero crossing period* · viii, 18  
Mekanika kepecahan · 2  
Mekanika kepecahan *elastic linear* · 2

Metode analitis · 2  
Metode elemen hingga · v, 2, 5, 6, 47  
Model elemen hingga PATRAN · 2  
Model FE · 2  
MPC · 5  
MsExcel · 9  
Muis Alie (2016) · 2  
*Multipoint Constraint (MPC)* · 5

---

**N**

Navigasi kapal · 2  
*Nodal solution* · vii, 8, 9  
*Node* · vii, 9, 10  
*Number of cycle (n)* · 18

---

**P**

Panel penegar · 2  
Panjang retak · 2  
Parameter retak · 2  
Pendekatan probabilistik · 2  
Pengukuran *full-scale* · 2  
Pengukuran gelombang satelit · 1  
Pengukuran gelombang yang dilakukan oleh radar · 1  
*Plot result* · 8  
*Preference* · 8  
*Prog. chosen* · 6  
propagasi retak · 2  
Propagasi retak · 2

---

**R**

RAO · vi, 15, 16, 29, 32, 35, 38  
Rasio aspek · 2  
*Read result* · 8  
Rencana inspeksi · 2  
*Response Amplitude Operator (RAO)* · vi, 15  
Retak detail kapal · 2

Review detail · 2  
Running model · 6

---

## **S**

*Scale factor* · 8  
*Second moment* · 17, 18, 41, 43  
*Second moment (m<sub>2</sub>)* · 17  
SIF · 2  
Simulasi Monte Carlo · 2  
Software ABAQUS · 2  
*Sol'n Controls* · 6  
*Sol'n Options* · 7  
*Solution* · vii, 6, 7, 8, 9  
*Solution is done* · 8  
Spektrum gelombang · vi, vii, viii, 14,  
15, 16, 25  
*Stiffener* · 5, 22  
*Stress* · v, vi, vii, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13,  
15, 16, 17, 18, 22, 35, 38  
*Stress response spectra* · vi, vii, 16, 17,  
35, 38  
Struktur *jacket* · 2  
Struktur kapal · v, 1, 2, 11, 47  
Struktur lambung kapal · 2  
Struktur sekunder · 1  
Struktur utama · 1  
Suyuthi, et al. (2013) · 2

---

## **T**

Tasdemir dan Nohut (2012) · 2  
Tebal pelat · 2  
Tegangan fluktuasi · 3  
Tegangan maksimum dan minimum · 6  
Tersier · 1

Thomson (2016) · 2  
Thomson (2018) · 2  
*Time at end of loadstep* · 6  
*Time control* · 6  
*Time history* · vii, 9  
*Time postproc* · 9

---

## **U**

Ukuran gap · 2  
Umur lelah · v, vi, 1, 2, 3, 17, 21  
Umur retak awal · 3  
*Undisplaced shape key* · 8

---

## **V**

von mises stress · 8, 9  
*Von mises stress* · 9

---

## **W**

*Window PRNSOL command* · 9  
*Window PRVAR command* · 9  
*Write every substep* · 6

---

## **Y**

Yan, et al. (2016) · 2

---

## **Z**

*Zero moment* · 17, 18, 41, 42  
*Zero moment (m<sub>0</sub>)* · 17  
Zhang (2018) · 2

## TENTANG PENULIS

---



**Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.**, dilahirkan di Ujung Pandang, Sulawesi Selatan, Juni 1975. Penulis menyelesaikan S1 dan S2 di Universitas Hasanuddin dan menyelesaikan program Doktor (S3) di Ship and Offshore Structural Integrity Subarea Laboratory, Osaka University, Japan dengan bidang keahlian Ship and Offshore Structures.

Sebelumnya penulis adalah Staf Pengajar di Program Magister Teknik Perkapalan dan mengajar mata kuliah Struktur dan Kekuatan Kapal. Saat ini penulis bertugas sebagai Dosen S1 Teknik Kelautan dan Kepala Laboratorium Struktur Ocean Structure Analysis Research Laboratory (OSAREL) Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Mata Kuliah yang diajarkan adalah Fisika Dasar, Mekanika Teknik 1 & 2, Analisa Struktur, Konstruksi Baja, Dinamika Struktur, Metode Elemen Hingga, Mekanika Kelelahan, Analisa Keandalan Struktur, Perencanaan Bangunan Lepas Pantai, Konstruksi Bangunan Lepas Pantai, serta Kekuatan dan Struktur Kapal.



**Renaldy Yusuf, ST.**, dilahirkan di Jakarta, Januari 1998. Penulis menyelesaikan S1 Teknik Kelautan, Ocean Structure Analysis Research Laboratory (OSAREL) di Universitas Hasanuddin dengan judul skripsi Studi Perbandingan Umur Kapal *Double Hull Tanker* Sekat Membujur Tunggal Dan Ganda.  
Email: [alyus81@gmail.com](mailto:alyus81@gmail.com)

# Pendekatan Sederhana Analisis Prediksi Umur Kapal

Struktur kapal dianalisis dengan beragam metode yang diadopsi untuk memeriksa kinerja kapal selama beroperasi. Apakah standar desain yang memenuhi kinerja kapal dapat dievaluasi menurut analisis prediksi umur kapal. Buku 'Pendekatan Sederhana Analisis Prediksi Umur Kapal' ditujukan demi memberikan gambaran untuk memprediksi umur kapal dalam perspektif pendekatan sederhana menggunakan solusi numerik dan analitis.

Sebagai kontribusi pada pembelajaran dan pemahaman terkait analisis struktur kapal dipandang dari sudut kelelahan yang mengarah pada prediksi umur dari sebuah struktur. Pemaparan dimulai dari wawasan riset penelitian, tinjauan kekuatan kapal sebagai alat transportasi, dan analisis berbagai faktor penyebab kapal menjadi rusak yang diperkuat dengan adanya studi pendahulu dari beberapa peneliti yang telah melakukan analisis retak dan umur lelah dari struktur kapal. Uraian secara ringkas berupa distribusi tegangan dan tampilan nilai tegangan yang diperoleh dari hasil analisis numerik dengan menggunakan metode elemen hingga.

*Spectrum gelombang, response amplitude operator, stress response spectra*, dan umur lelah menjadi rangkuman telaah Analisis Fatigue (umur lelah). Hasil yang diperoleh berdasarkan metode yang digunakan untuk perhitungan fatigue (umur lelah) kapal kemudian dijadikan contoh pada buku ini.



**Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)**  
Jl. Rajawali, Gang Elang 6 No.3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581  
Telp/Fax : (0274) 4533427  
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)  
✉ [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id) @penerbitbuku\_deepublish  
📍 Penerbit Deepublish 🌐 [www.penerbitbukudeepublish.com](http://www.penerbitbukudeepublish.com)

Kategori : Teknik Perkapalan

ISBN 978-623-02-1838-5



9 786230 218385