



ISSN 2338-0322

# JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

## Analisa Fatigue Pada Kapal Tanker 6500 DWT Berdasarkan *Common Structural Rules (CSR)* berbasis *Finite Element Analysis (FEA)*

Rizki Fadillah<sup>1)</sup>, Ahmad Fauzan Zakki<sup>1)</sup>, Kiryanto<sup>1)</sup>,

<sup>1)</sup>Laboratorium Struktur dan Konstruksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

\*)e-mail : rizkifadillah@students.undip.ac.id, ahmadfzakki@gmail.com, kiryantodst@yahoo.com

### Abstrak

Kapal merupakan moda transportasi laut yang paling sering digunakan. Namun, berdasarkan investigasi KNKT angka kecelakaan kapal masih tinggi. Beberapa kecelakaan terjadi karena adanya faktor kelelahan (*fatigue*) pada struktur. Sehingga dalam proses perencanaan pembuatan kapal disyaratkan untuk dilakukan *fatigue assessment*, utamanya pada tanker ship agar tidak menimbulkan potensi kerugian lain. Dalam *fatigue assessment tanker ship*, prosedur yang digunakan adalah *Common Structural Rules (CSR)* yang berbasis *Finite Element Analysis (FEA)*. Analisa ini bertujuan untuk mengetahui tegangan maksimum, lokasi hotspot, usia *fatigue* dan *assessment kelayakan konstruksi tanker ship*. Tanker ship 6500 DWT digunakan dalam penelitian ini, yang mana pada daerah *midshipnya* dikenai beban- beban yaitu ; beban internal (*static & dynamic liquid pressure*), beban external (*hydrostatic & hydrodynamic pressure*) dan *Pressure Sloshing*. Beban dihitung dalam 3 kondisi variasi operasional muatan ( $h_{filling}$ ,  $0.5h_{filling}$  dan *ballast*). Pada setiap variasi operasional muatan, dikenakan 3 variasi arah kapal terhadap gelombang (*head sea, following sea dan beam sea*). Penelitian ini dibantu oleh software design berbasis NURB dan software analisa berbasis FEA. Hasil dari penelitian, hotspot berlokasi di daerah *man hole web frame sisi atas* untuk kondisi  $h_{filling}$ , daerah sambungan *corrugated bulkhead & innershell* untuk kondisi  $0.5 h_{filling}$  dan daerah *bracket bawah longitudinal bulkhead pada lobus kanan ruang muat* untuk kondisi *ballast*. Hot spot stress tertinggi terjadi pada kondisi *ballast beam sea* dengan nilai tegangan sebesar 92.3263 Mpa dan usia *fatigue* 20.15129 tahun. Berdasarkan hasil penelitian, kapal masih memenuhi kriteria kelayakan yaitu minimal 17 tahun.

Kata Kunci : *Common Structural Rules, FEA, Tanker Ship, Fatigue*

### 1. PENDAHULUAN

Kapal merupakan moda transportasi laut yang paling sering digunakan, baik sebagai angkutan manusia maupun angkutan barang. Selain sebagai sarana angkutan laut, kapal juga digunakan sebagai sarana rekreasi atau pariwisata. Namun, berdasarkan investigasi KNKT angka kecelakaan kapal masih tinggi yang disebabkan oleh beberapa faktor[1].

Salah satu faktor penyebab kecelakaan adalah terjadinya *fatigue* terhadap struktur. *Fatigue* terhadap struktur ini biasanya dialami oleh *tanker*

*ship* dan *Bulk Carrier*. Dalam kasus yang paling ekstrim di mana retakan dibiarkan tanpa inspeksi atau perbaikan dapat menyebabkan kebocoran minyak atau cairan berbahaya ke laut yang berakibat terjadinya masalah dan lingkungan. Masalah lingkungan akibat kebocoran atau tumpahan minyak ini juga berpotensi menimbulkan kerugian terhadap ekologi ekonomi sumber daya perikanan[2]. Untuk itu perlu dilakukannya perhitungan *fatigue* terhadap *tanker ship* sebagai pertimbangan untuk melakukan penjadwalan pengawasan/ inspeksi dan prediksi

lokasi rawan terjadi *fatigue*, sehingga kerusakan terhadap struktur rawan dapat dihindari agar nantinya tidak menimbulkan potensi kerugian - kerugian lainnya, utamanya ekonomi dan lingkungan[3].

Perhitungan *fatigue* untuk *tanker ship* ini sudah diatur dalam *Common Structural Rules (CSR)* terbitan IACS (*International Association of Classification Societies*). Regulasi ini terbagi dua yaitu untuk kapal tanker dan muatan curah. Pada regulasi *Common Structural Rules (CSR)* ini mengaplikasikan pembebanan yang lebih ekstrim daripada regulasi konvensional yang ada. Aturan baru ini juga diperketat dengan diterapkannya perhitungan *life time* kapal hingga 25 tahun dan penerapan *Finite Element Analysis* sebagai syarat dalam analisa kekuatan konstruksi kapal, karena secara praktis FEA dapat memprediksi kerusakan fraktur terhadap material [4]. Selain itu juga direkomendasikan pula untuk melakukan *fatigue assessment* terhadap kondisi *ballast*[5].

Sebagai pemecahan masalah diatas, penulis mengambil studi kasus yang berjudul "Analisa *Fatigue* Pada Kapal Tanker 6500 DWT Berdasarkan *Common Structural Rules (CSR)* berbasis *Finite Element Analysis (FEA)*".

Berdasarkan penjelasan latar belakang diatas, tujuan pokok bahasan pada penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan nilai *hot spot stress* yang terjadi pada struktur
2. Memperoleh detail posisi *hot spot area*
3. Mendapatkan nilai *fatigue life* pada *hot spot area*
4. Mengetahui apakah desain konstruksi layak sesuai aturan *Common Structural Rules (CSR)*

## 2. METODE

### 2.1. Objek Penelitian

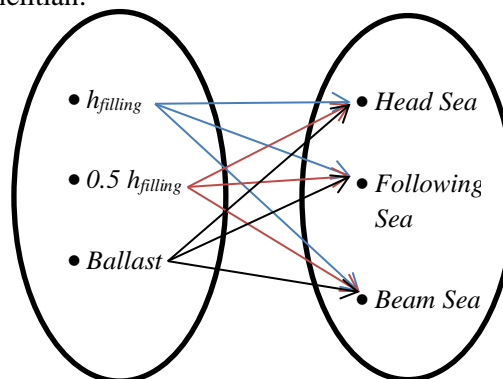
Penelitian ini menggunakan *tanker ship* 6500 DWT, yang merupakan jenis *oil tanker*. Kapal ini memiliki dua lobus ruang muat dengan jenis *bulkhead* yang dipakai dalam ruang muat adalah jenis *corrugated bulkhead*. Analisa dilakukan pada daerah 0.25 L Kapal, yaitu pada daerah *Parrarel Middle Body* sepanjang 17 m. *Tanker ship* tersebut memiliki Ukuran utama sebagai berikut:

$L_{OA}$	=108 m	H	=9,3 m
$L_{WL}$	=103,8 m	T	=6 m
$L_{BP}$	=102 m	B	=19,2 m

### 2.2. Variasi Perlakuan

Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi pembebanan terhadap operasional muatan yaitu  $h_{filling}$ ,  $0.5h_{filling}$  dan *ballast*. Kemudian

untuk setiap kondisi operasional muatan, dikombinasikan dengan perhitungan pembebanan akibat arah kapal terhadap arus gelombang yaitu *head sea*, *following sea* dan *beam sea*. Berikut adalah diagram relasi dalam variasi perlakuan penelitian:



Gambar 3. Diagram Relasi Variasi KondisiPembaban

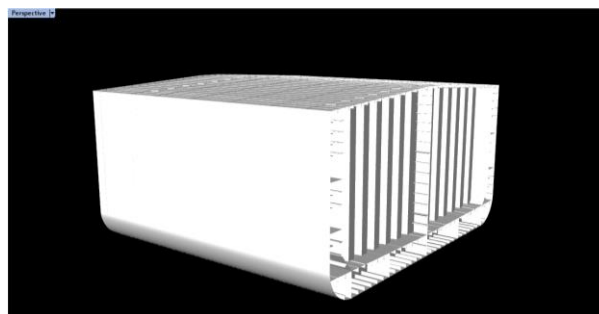
Sehingga nantinya akan ada 9 variasi perlakuan pembebanan yang akan dilakukan Analisa dalam penelitian ini, yaitu:

1.  $h_{filling}$  -head sea
2.  $h_{filling}$  -following sea
3.  $h_{filling}$  -beam sea
4.  $0.5h_{filling}$  -head sea
5.  $0.5h_{filling}$  -following sea
6.  $0.5h_{filling}$  -beam sea
7. *Ballast* -head sea
8. *Ballast* -following sea
9. *Ballast* -beam sea

### 2.3. Pembuatan Model

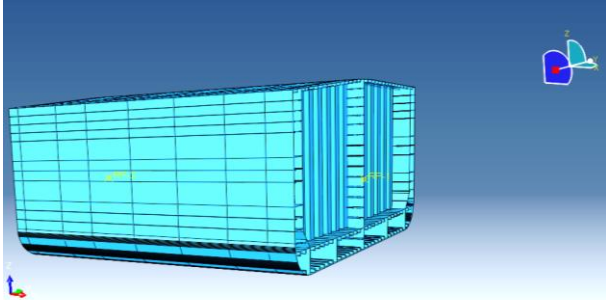
Dalam proses modeling ini, langkah pertama yang dilakukan adalah dengan melakukan konversi secara manual dari PDF menjadi gambar 2D yang berformat CAD . Kemudian dilakukan modeling 3D dengan *software 3D modelling* yang berbasis NURB. Keuntungan NURB, geometri model yang dihasilkan lebih halus[6] .

Desain konstruksi yang akan dimodelkan mencakup *bottom plate*, *side plate*, *deck plate*, *side long*, *webframe*, *wrang floor*, *corrugated bulkhead* dan *Longitudinal bulkhead* seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Modeling 3D Melalui Software NURB

Model 3D yang akan dianalisa kemudian dikonversi dalam bentuk .ACIS untuk nantinya akan dilakukan impor pada *software* analisa FEA yaitu ABAQUS CAE. Hasil impor ke software FEA dapat dilihat pada Gambar 5.

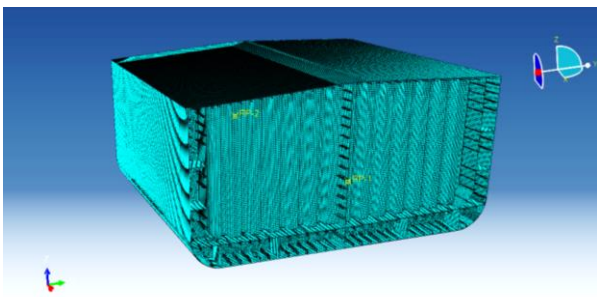


Gambar 5. Model Hasil ekspor ke ABAQUS

## 2.4. Proses Meshing

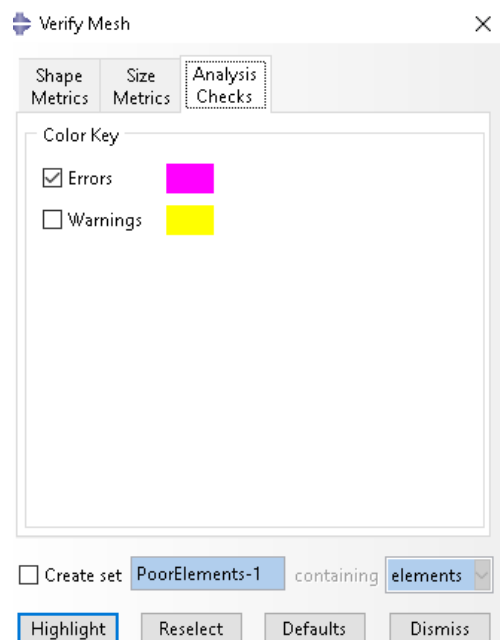
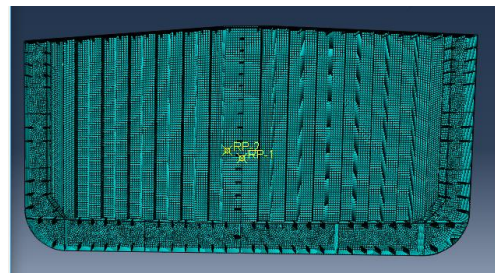
FEA merupakan metode numerik yang sering digunakan karena keefektifan dan keefisienannya. Dalam analisa FEA ini erat kaitannya dengan *meshing*. *Meshing* merupakan langkah dalam mendiskritisasi model menjadi diskrit-diskrit elemen yang lebih kecil agar dapat dilakukan perhitungan numerikal. *Meshing* geometri ini merupakan hasil dari diskritisasi. Hasil *meshing* ini tidak terbatas pada geometri saja namun juga massa, muatan dan *restrain*[7].

Dalam penelitian ini ukuran elemen *meshing* yang digunakan adalah 0,1 unit, dengan jenis elemen *meshing* adalah quadrilateral. Elemen jenis ini efektif dalam segi konvergensi disbanding dengan elemen triangular[8]. Hasil *meshing* pada model dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Model Hasil Meshing

Setelah model selesai di *meshing* maka model harus dilakukan pemeriksaan *error*, agar model bisa dilakukan analisa secara tepat.



Gambar 7. Hasil Verifikasi Meshing

## 2.5. Pendefinisian Material

Material yang digunakan dalam analisa ini adalah baja *steel* kelas KI-A36. Kemudian property material diinput ke dalam *material properties* SIMULIA ABAQUS CAE. Adapun data-data properti material tersebut sebagai berikut[9]:

Rasio Poisson	=	0,3
Modulus Elastisitas	=	200.000.000 Pa
Massa Jenis	=	7850 kg/m <sup>3</sup>

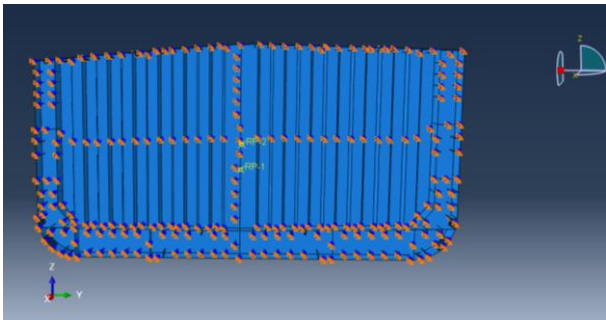
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Setup Boundary

Setelah mendapatkan model 3D, langkah yang harus dilakukan adalah dengan membuat kondisi batas (*Boundary Condition*). Kondisi batas ini terdiri dari perpindahan dan beban. Perpindahan merupakan kondisi batas esensial, sedangkan beban merupakan kondisi batas alami[10]. *Boundary Conditions* yang digunakan dalam analisa ini mengacu pada penelitian sebelumnya, yang mana sesuai pada *CSR*.

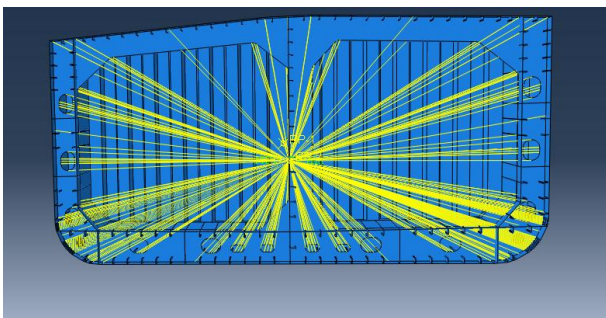
Tabel 1. *Boundary Constrain*

Lokasi	Translasi			Rotasi		
	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
Ujung belakang	RL	-	-	-	RL	RL
Independent point ujung belakang	-	FIX	FIX	FIX	-	-
Ujung depan	RL	-	-	-	RL	RL
Independent point ujung depan	-	-	-	-	-	-



Gambar 9. *Boundary Condition* Pada Independent Point Ujung Belakang

Kemudian untuk membuat *rigid Link* pada semua element ujung belakang dan ujung depan dalam software analisa ABAQUS ini memiliki padanan lain yaitu menggunakan *MPC-Constrain Beam*[11].



Gambar 10. *Boundary Constrain* Pada Ujung Depan dan Belakang.

### 3.2. Setup Beban

Beban yang bekerja pada struktur ini merupakan beban eksternal (tekanan hidrostatis & hidrodinamis), internal (tekanan cairan statis & dinamis) dan *sloshing* (tekanan *sloshing* pada sekat melintang, *web frame*, sekat memanjang dan girder). Beban – beban tersebut dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$P_{In} = P_{IS} + P_{ID} \quad (1)$$

$$P_{Ex} = P_S + P_w \quad (2)$$

$$P_{slh-Ing} = \rho_{slh-Ing} g l_{slh} f_{slh} [0.4 - (0.39 \frac{1.7 l_{slh}}{LBP}) \frac{L}{350}] \quad (3)$$

$$P_{slh-wf} = \rho_{slh-Ing} (1 - \frac{Swf}{l_{slh}})^2 \quad (4)$$

$$P_{slh-t} = 7 \rho_{slh} g f_{slh} (\frac{b_{slh}}{B} - 0.3) GM^{0.75} \quad (5)$$

$$P_{slh-grd} = \rho_{slh-t} (1 - \frac{S_{grd}}{b_{slh}})^2 \quad (6)$$

Persamaan (1),(2),(3),(4),(5) dan (6) kemudian diaplikasikan untuk menghitung *pressure*. *Pressure* dihitung berdasarkan variasi pada sub bab 2.2. Hasil perhitungan tersaji dalam Tabel 2, Tabel 4 dan Tabel 5. *Pressure* yang tersaji pada Tabel 2 merupakan hasil perhitungan pada kondisi operasional muatan  $h_{filling}$  dan dipadukan dengan 3 variasi arah kapal terhadap arah arus gelombang. Demikian pula pada Tabel 3 dan 4, merupakan *Pressure* pada kondisi  $0.5h_{filling}$  dan Ballast yang dipadukan dengan 3 variasi arah kapal terhadap arus gelombang.

Tabel 2. *Pressure* Pada Kondisi  $h_{filling}$

	<i>Pressure</i> (N/m <sup>2</sup> )		
	<i>Head Sea</i>	<i>Following Sea</i>	<i>Head Sea</i>
<b>P<sub>in</sub></b>	18318,234	18345,566	18299,909
<b>P<sub>ex</sub></b>	68250,875	68250,875	68250,875
<b>P<sub>slh-Ing</sub></b>	72,833	72,833	72,833
<b>P<sub>slsh-wf</sub></b>	0,000659	0,000659	0,000659
<b>P<sub>slh-t</sub></b>	-28531,004	-28531,004	-28531,004
<b>P<sub>slh-grd</sub></b>	-8162,737	-8162,737	-8162,737

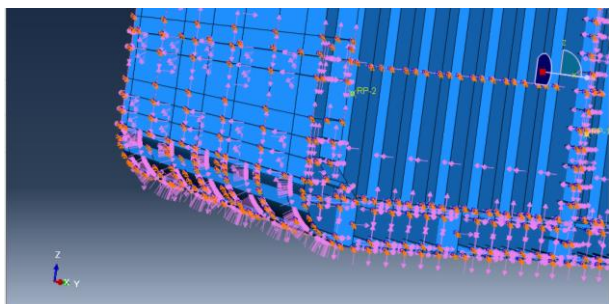
Tabel 3. *Pressure* Pada Kondisi  $0.5h_{filling}$

	<i>Pressure</i> (N/m <sup>2</sup> )		
	<i>Head Sea</i>	<i>Following Sea</i>	<i>Head Sea</i>
<b>P<sub>in</sub></b>	19793,614	18347,991	21319,552
<b>P<sub>ex</sub></b>	8771,153	10167,790	12519,677
<b>P<sub>slh-Ing</sub></b>	73,745	73,745	73,745
<b>P<sub>slsh-wf</sub></b>	0,000667	0,000667	0,000659
<b>P<sub>slh-t</sub></b>	-48584,484	-48584,484	-48584,484
<b>P<sub>slh-grd</sub></b>	-13900,050	-13900,050	-13900,050

Tabel 4. *Pressure* Pada Kondisi *Ballast*

	<i>Pressure</i> (N/m <sup>2</sup> )		
	<i>Head Sea</i>	<i>Following Sea</i>	<i>Head Sea</i>
<b>P<sub>in</sub></b>	19576,540	18348,044	21235,314
<b>P<sub>ex</sub></b>	56117,250	56117,250	56117,250
<b>P<sub>slh-Ing</sub></b>	93,868	93,868	93,868
<b>P<sub>slsh-wf</sub></b>	0,000850	0,000849	0,000849
<b>P<sub>slh-t</sub></b>	-36478,706	-36478,706	-36478,706
<b>P<sub>slh-grd</sub></b>	-5369,141	-5369,141	-5369,141

Beban hasil perhitungan sesuai pada tabel ,kemudian diaplikasikan pada ABAQUS CAE agar mendapatkan nilai tegangan maksimum yang mana nilai tegangan ini akan digunakan sebagai acuan dalam pemilihan diagram S-N. Selain tegangan maksimum, perhitungan dengan software ABAQUS CAE ini juga berfungsi untuk mengetahui posisi letak *hotspot area* kapal sesuai kondisi pembebanan.



Gambar 11. Pengaturan *Load* Pada Abaqus CAE

### 3.3. Validasi

Validasi dilakukan untuk mengetahui keakuratan suatu model dalam analisa. Salah satu cara yang dilakukan dalam validasi ini adalah dengan membandingkan perhitungan manual dan perhitungan *software*.

#### 3.3.1. Perhitungan Manual

Perhitungan manual ini menggunakan persamaan *defleksi* pada balok akibat beban merata. Adapun persamaan dari *defleksi* tersebut adalah:

$$Defleksi = (5PL^4) / 384EI \quad (7)$$

Pada perhitungan manual ini menggunakan *pressure* sebesar 175 Mpa. Momen inersia dihitung secara manual didapatkan nilai sebesar 510605027675mm<sup>4</sup>.

Sehingga didapatkan nilai sebagai tegangan sebagai berikut:

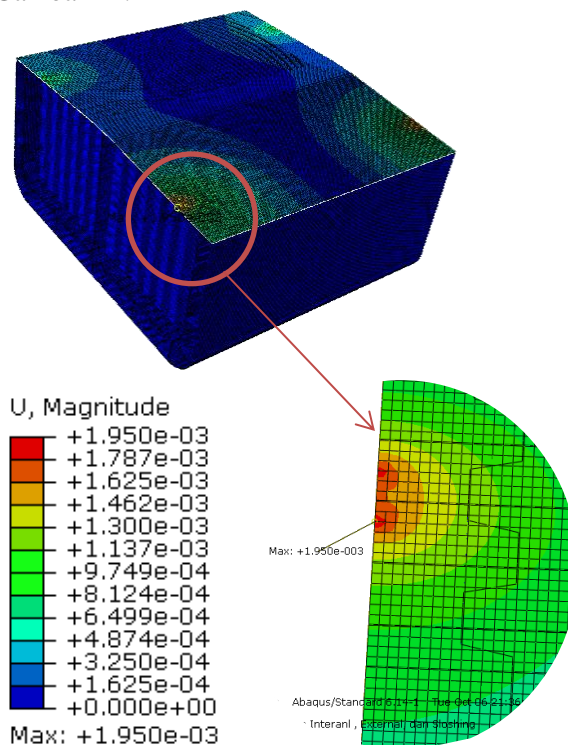
$$Defleksi = \frac{5 \times 175 \times 17000^2}{384 \times 200000 \times 510605027675} = 1,86 \text{ mm}$$

Berdasarkan perhitungan manual diatas, defleksi yang terjadi sebesar 1,86mm.

#### 3.3.2. Perhitungan Dengan Software

Untuk perhitungan *software* ini satuan input *pressure* yang digunakan adalah N/m<sup>2</sup>. Sehingga 175 Mpa dikonversi menjadi 175000000N/m<sup>2</sup>. Kemudian *Pressure* diinput pada

*software* . Didapatkan nilai *defleksi* seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Hasil Perhitungan *Software*

Perhitungan secara numerik menggunakan ABAQUS CAE didapatkan nilai defleksi sebesar 1,95 x10<sup>-3</sup>m atau sebesar 1,95 mm. Kemudian komparasi antara perhitungan manual dan *software* tersaji pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Validasi

Hasil Perhitungan Manual	Hasil Perhitungan Software	Error
1,86 mm	1,95 mm	4,442%

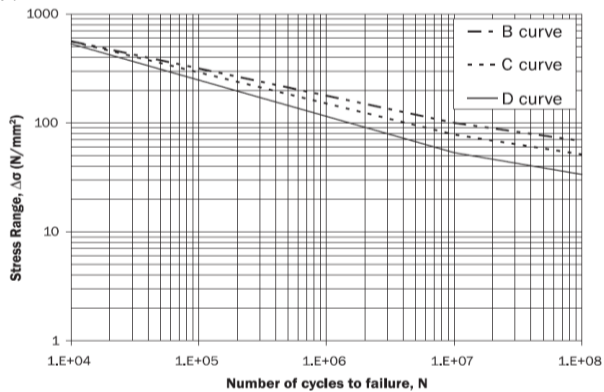
Berdasarkan perbandingan antara perhitungan manual dan *software* pada tabel 11, didapatkan nilai *error* sebesar 4,442%. *Margin of error* masih berada dibawah 5% sehingga model Valid.

### 3.4. S-N Diagram

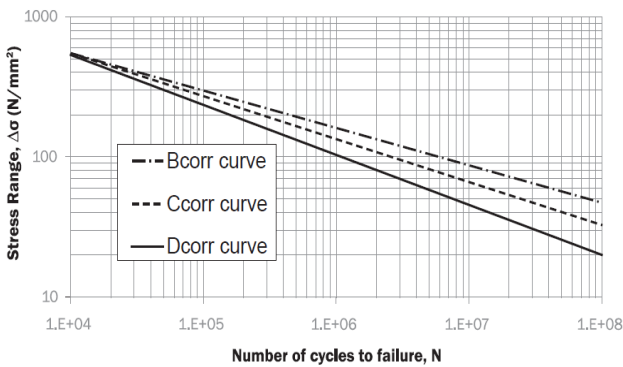
S-N diagram adalah Konsep *Stress vs Life* merupakan konsep yang digunakan sebagai pendekatan dalam analisa kelelahan. Grafik ini merupakan hubungan antara rentang tegangan dengan siklus sehingga nantinya dapat digunakan sebagai dasar penentuan umur *fatigue*. S-N Diagram ini dapat digunakan secara efektif pada analisa *fatigue* bersiklus tinggi. Kurva S-N ini sangat penting karena menyediakan data- data hasil eksperimental[12]. Rentang tegangan didapatkan dari persamaan berikut ini:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (8)$$

Pada Penelitian ini menggunakan S-N diagram yang tertera pada Gambar 13 dan Gambar 14. Pada setiap S-N diagram ini memiliki *Basic Data*, yang mana disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7.



Gambar 13. Grafik S-N Baja Sambungan Las Pada Kondisi Lingkungan Normal



Gambar 14. Grafik S-N Baja Sambungan Las Pada Kondisi Lingkungan Korosif

Tabel 6. *Basic Data* Diagram S-N Kondisi Air

Class	$K_2$	$m$
B	$1.01 \times 10^{15}$	4.0
C	$4.23 \times 10^{13}$	3.5
D	$1.52 \times 10^{12}$	3.0

Tabel 7. *Basic Data* Diagram S-N Kondisi Korosif

Class	$K_2$	$m$
B <sub>Corr</sub>	$5.05 \times 10^{14}$	4.0
C <sub>Corr</sub>	$2.12 \times 10^{13}$	3.5
D <sub>Corr</sub>	$7.60 \times 10^{11}$	3.0

Adapun persamaan linier antara Log ( $\Delta\sigma$ ) dan Log (N) adalah sebagai berikut[9]:  
 $\log(N) = \log(K_2) - m \cdot \log(\Delta\sigma)$  (9)

Persamaan (9) ini digunakan dalam perhitungan penentuan jumlah siklus *fatigue*, yang mana setiap koefisiennya dapat dilihat pada masing - masing *basic data* yang ada pada Tabel 6 dan Tabel 7.

### 3.5. Cumulative Damage Ratio

Perhitungan usia *fatigue* menerapkan aturan *cumulative damage ratio*. *Cumulative Damage Ratio* ini berkaitan dengan histori dari pemuatan quasi statis. Untuk menilai kegagalan ini *cumulative damage* diperkenalkan sebagai disipasi energi[13].

Pada penelitian ini, *cumulative damage ratio* dihitung berdasarkan persamaan[9]:

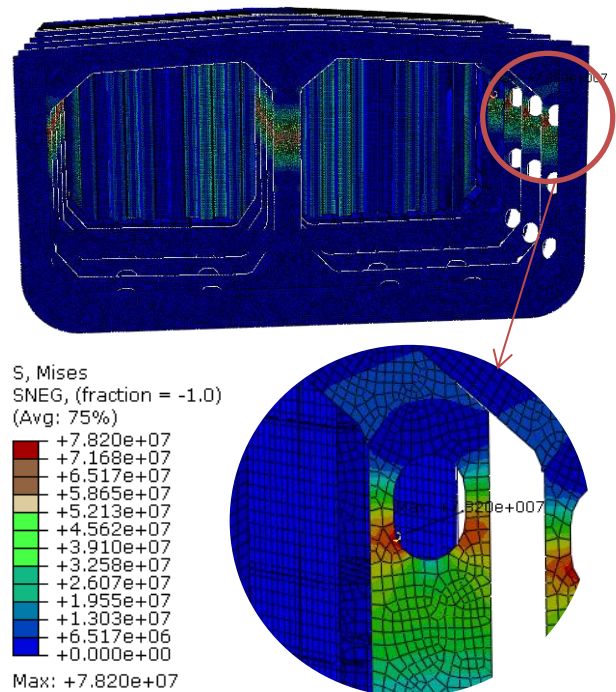
$$D_{E(j)} = \frac{\alpha(j)N_D}{K_2} \frac{\Delta\sigma_{FS}^m}{(\ln N_R)^{\frac{m}{\xi}}} u(j) \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \quad (10)$$

Dari Penentuan nilai *cumulative damage ratio* dapat diprediksi pula umur konstruksi kapal. Adapun persamaan tersebut adalah sebagai berikut[9]:

$$T_F = T_D - T_{C+} \left( \frac{T_D}{D_{air}} - T_D + T_C \right) \frac{D_{air}}{D_{corr}} \quad (11)$$

### 3.6. Hasil Analisa

#### 3.6.1. Hasil Analisa Kondisi $h_{filling}$ -Head Sea



Gambar 15. Hasil Perhitungan *Hot Spot Stress* dan Detail *Hot Spot Area* Pada Kondisi  $h_{filling}$ -Head Sea

Tegangan maksimum pada kondisi  $h_{filling}$ -Head Sea adalah 78.1991 MPa. Karena tegangan minimum yang terjadi adalah 0 Mpa. Maka berdasarkan persamaan (8) rentang tegangan didapatkan :

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 78,1991 - 0$$

$$\Delta\sigma = 78,1991 \text{ Mpa.}$$

Sesuai Gambar 15, tegangan maksimum tersebut terletak pada *man hole web frame* bagian atas pada sisi *port*, maka daerah tersebut disebut *hot spot stress area*. *Hot spot stress area* ini tidak terjadi pada daerah sambung las, maka dari itu untuk *fatigue assessment* menggunakan kurva S-N Class C untuk lingkungan normal dan Class C<sub>Corr</sub> untuk lingkungan korosif.

Kemudian untuk perhitungan jumlah siklus menggunakan persamaan (9). Koefisien pada Tabel 6 dan Tabel 7 digunakan untuk melengkapi persamaan (9), sehingga nantinya didapatkan jumlah siklus pada lingkungan normal (N<sub>Air</sub>) dan jumlah siklus pada lingkungan korosif (N<sub>Corr</sub>). Hasil dari perhitungan didapatkan nilai sebagai berikut:

Untuk N<sub>Air</sub>,

$$\begin{aligned} \log(N_{Air}) &= \text{Log}(K_2) - m \cdot \text{Log}(\Delta\sigma) \\ &= \text{Log}(4,23 \times 10^{13}) - 3,5 \text{Log}(78,1991) \end{aligned}$$

$$N_{Air} = 1,00031 \times 10^7 \text{ siklus}$$

Untuk N<sub>Corr</sub>,

$$\begin{aligned} \log(N_{Corr}) &= \text{Log}(K_2) - m \cdot \text{Log}(\Delta\sigma) \\ &= \text{Log}(2,12 \times 10^{13}) - 3,5 \text{Log}(78,1991) \end{aligned}$$

$$N_{Corr} = 5,01337 \times 10^6 \text{ siklus}$$

Untuk menilai kerusakan, maka dilakukan perhitungan *cummulative damage ratio*. Perhitungan ini menggunakan persamaan (10), yang mana menghasilkan D<sub>Air</sub> dan D<sub>Corr</sub>. Dari Hasil perhitungan didapatkan:

Nilai D<sub>Air</sub>,

$$\begin{aligned} D_{Air} &= \frac{\alpha_{(j)} N_D}{K_2} \frac{\Delta\sigma_{FS}^m}{(\ln N_R)^\xi} u_{(j)} \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \\ &= \frac{0,5 \times 8,345 \times 10^7}{4,23 \times 10^{13}} \frac{78,1 \times 10^{3,5}}{(\ln 100)^1} 0,702 \Gamma\left(1 + \frac{3,5}{1}\right) \end{aligned}$$

$$D_{Air} = 0,162$$

Nilai D<sub>Corr</sub>,

$$\begin{aligned} D_{Corr} &= \frac{\alpha_{(j)} N_D}{K_2} \frac{\Delta\sigma_{FS}^m}{(\ln N_R)^\xi} u_{(j)} \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \\ &= \frac{0,5 \times 8,345 \times 10^7}{2,12 \times 10^{13}} \frac{101,6 \times 10^{3,5}}{(\ln 100)^1} 1 \Gamma\left(1 + \frac{3,5}{1}\right) \end{aligned}$$

$$D_{Corr} = 0,462$$

Maka langkah terakhir dalam *fatigue assessment* ini adalah dengan menghitung umur usia *fatigue* atau T<sub>F</sub>. Hasil perhitungan nilai *fatigue* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_F &= T_D - T_{C+} \left( \frac{TD}{D_{air}} - TD + TC \right) \frac{D_{air}}{D_{corr}} \\ &= 25 - 5 + \left( \frac{25}{0,16} - 25 + 5 \right) \frac{0,16}{0,462} \\ &= 67,0803 \text{ Tahun} \end{aligned}$$

$$T_F = 67 \text{ Tahun 1 Bulan}$$

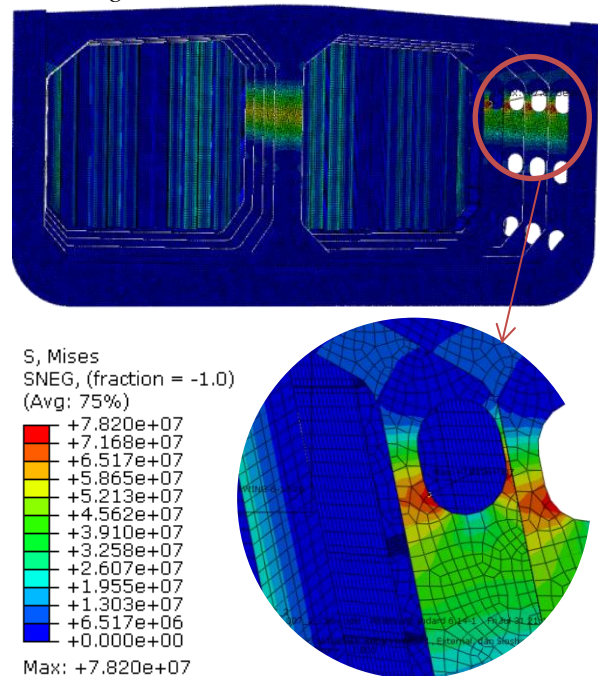
Dengan cara dan runtutan perhitungan yang sama pada sub bab ini, maka kedelapan variasi kondisi pembebanan kapal lainnya didapatkan hasil perhitungan *fatigue assessment*-nya. Berikut adalah Tabel 8 yang merupakan hasil dari perhitungan *fatigue* pada kondisi *h<sub>filling-head sea</sub>*.

Tabel 8. Hasil Perhitungan *Fatigue h<sub>filling-Head Sea</sub>*

	Nilai
N <sub>Air</sub>	1,00031 x 10 <sup>7</sup> Siklus
N <sub>Corr</sub>	5,01337 x 10 <sup>6</sup> Siklus
D <sub>Air</sub>	0,162
D <sub>Corr</sub>	0,462
T <sub>F</sub>	67 Tahun 1 Bulan

### 3.6.2. Hasil Analisa Kondisi *h<sub>filling-Following Sea</sub>*

Tegangan maksimum pada kondisi *h<sub>filling-following sea</sub>* adalah 78.1989 Mpa. Pada kondisi ini *hotspot* terletak pada *man hole-web frame* bagian atas pada sisi *port*. Gambar 16 merupakan *hot spot stress* dan *hotspot area* hasil dari perhtiungan software pada kondisi *h<sub>filling-Following Sea</sub>*.



Gambar 16. Hasil Perhitungan *Hot Spot Stress* dan *Detail Hot Spot Area* Pada Kondisi *h<sub>filling-Following Sea</sub>*

Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi C, sehingga untuk perhitungan *cummulative damage ratio* menggunakan S-N Diagram Class C. Class C untuk keadaan lingkungan normal dan Class C<sub>corr</sub>

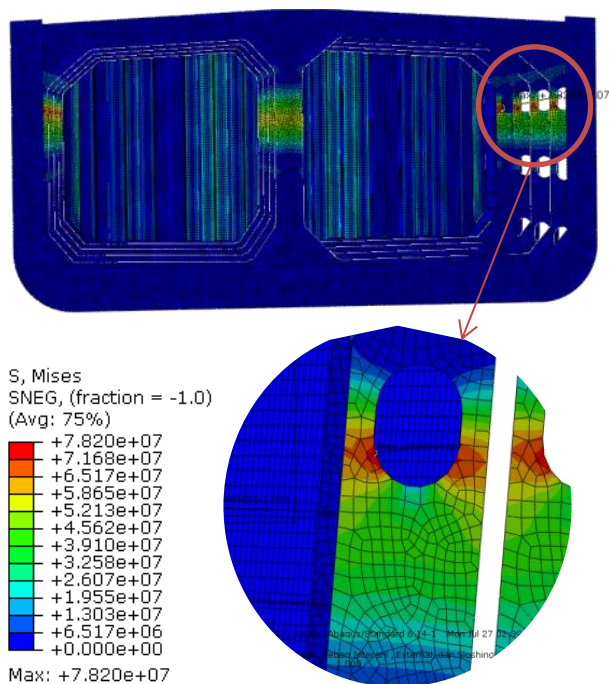
untuk keadaan lingkungan korosif. Hasil perhitungan *fatigue* sebagai berikut:

Tabel 9. Hasil Perhitungan *Fatigue h<sub>filling</sub>-Following Sea*

	Nilai
N <sub>Air</sub>	1,00032x10 <sup>7</sup> Siklus
N <sub>Corr</sub>	5,01341x10 <sup>6</sup> Siklus
D <sub>Air</sub>	0,162
D <sub>Corr</sub>	0,462
T <sub>F</sub>	67 Tahun 1 Bulan

### 3.6.3. Hasil Analisa Kondisi *h<sub>filling</sub>-Beam Sea*

Tegangan maksimum pada kondisi *h<sub>filling</sub>-Beam Sea* adalah 78.1992 Mpa. Pada kondisi ini *hotspot* terletak pada *man hole-web frame* bagian atas pada sisi *port*. Gambar 17 merupakan *hot spot stress* dan *hotspot area* hasil dari perhtiuangan software pada kondisi *h<sub>filling</sub>-Beam Sea*.



Gambar 17. Hasil Perhitungan *Hot Spot Stress* dan Detail *Hot Spot Area* Pada Kondisi *h<sub>filling</sub>-Beam Sea*

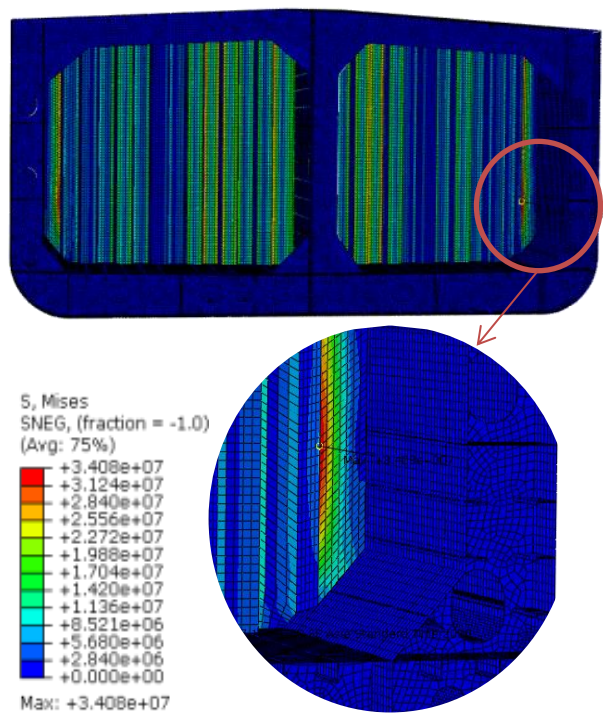
Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi C, sehingga untuk perhitungan *cumulative damage ratio* menggunakan S-N Diagram Class C. Class C untuk keadaan lingkungan normal dan Class C<sub>corr</sub> untuk keadaan lingkungan korosif. Hasil perhitungan *fatigue* tersebut tersaji dalam Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Perhitungan *Fatigue h<sub>filling</sub>-Beam Sea*

	Nilai
N <sub>Air</sub>	1,00030 x10 <sup>7</sup> Siklus
N <sub>Corr</sub>	5,01335 x10 <sup>6</sup>
D <sub>Air</sub>	0,163
D <sub>Corr</sub>	0,462
T <sub>F</sub>	67 Tahun 1 Bulan

### 3.6.4. Hasil Analisa Kondisi *0.5h<sub>filling</sub>-Head Sea*

Tegangan maksimum pada kondisi *0.5h<sub>filling</sub>-Head Sea* adalah 34.082 Mpa. Pada kondisi ini *hotspot* terletak pada sisi sudut bawah sambungan *corrugated bulkhead* dengan *inner sheel* pada lobus kanan ruang muat. Gambar 18 merupakan *hot spot stress* dan *hotspot area* hasil dari perhtiuangan software pada kondisi *0.5 h<sub>filling</sub>-Head Sea*.



Gambar 18. Hasil Perhitungan *Hot Spot Stress* dan Detail *Hot Spot Area* Pada Kondisi *0.5h<sub>filling</sub>-Head Sea*

Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi D, sehingga untuk perhitungan *cumulative damage ratio* menggunakan S-N Diagram Class D. Class D untuk keadaan lingkungan normal dan Class D<sub>corr</sub> untuk keadaan lingkungan korosif. Hasil perhitungan pada kondisi *0.5h<sub>filling</sub>-Head Sea* disajikan dalam Tabel 11.

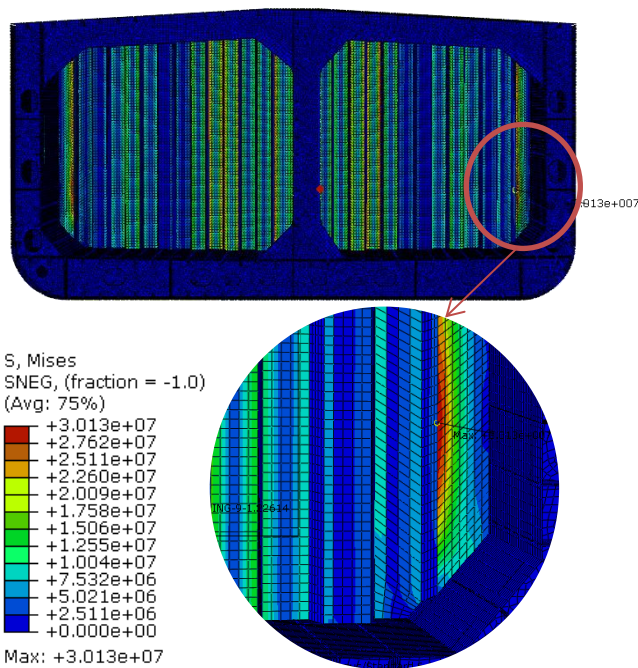


Tabel 11. Hasil Perhitungan *Fatigue* Pada Kondisi  $0.5h_{filling}$  -Head Sea

	Nilai
$N_{Air}$	$3,833 \times 10^7$ Siklus
$N_{Corr}$	$3,282 \times 10^6$
$D_{Air}$	0,0234
$D_{Corr}$	0,364
$T_F$	87 Tahun 4 Bulan 22 Hari

### 3.6.5. Hasil Analisa Kondisi $0.5h_{filling}$ - Following Sea

Tegangan maksimum pada kondisi  $0.5h_{filling}$  -Following Sea adalah 30.13 Mpa. Pada kondisi ini *hotspot* terletak pada sisi sudut bawah sambungan *corrugated bulkhead* dengan *inner sheel* pada lobus kanan ruang muat . Gambar 19 merupakan *hot spot stress* dan *hotspot area* hasil dari perhtiungan software pada kondisi  $0.5 h_{filling}$ -Following Sea.



Gambar 19. Hasil Perhitungan *Hot Spot Stress* dan Detail *Hot Spot Area* Pada Kondisi  $0.5h_{filling}$  -Following Sea

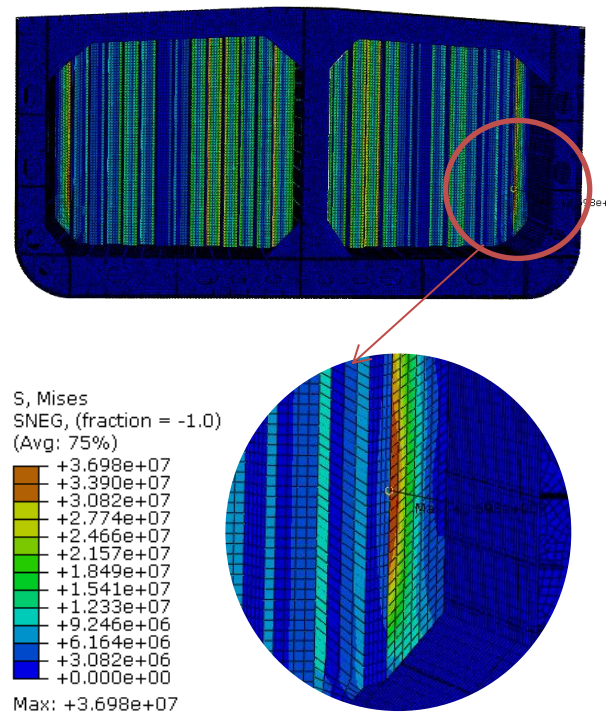
Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi D, sehingga untuk perhitungan *cumulative damage ratio* menggunakan S-N Diagram Class D. Class D untuk keadaan lingkungan normal dan Class  $D_{corr}$  untuk keadaan lingkungan korosif. Hasil perhitungan pada kondisi  $0.5h_{filling}$  -Following Sea disajikan dalam Tabel 12.

Tabel 12. Hasil Perhitungan *Fatigue* Pada Kondisi  $0.5h_{filling}$  -Following Sea

	Nilai
$N_{Air}$	$5,546 \times 10^7$ Siklus
$N_{Corr}$	$5,050 \times 10^7$
$D_{Air}$	0,013
$D_{Corr}$	0,237
$T_F$	124 Tahun 6 Bulan 22 Hari

### 3.6.6. Hasil Analisa Kondisi $0.5h_{filling}$ -Beam Sea

Tegangan maksimum pada kondisi  $0.5h_{filling}$  -Beam Sea adalah 36.99 Mpa. Pada kondisi ini *hotspot* terletak pada sisi sudut bawah sambungan *corrugated bulkhead* dengan *inner sheel* pada lobus kanan ruang muat . Gambar 20 merupakan *hot spot stress* dan *hotspot area* hasil dari perhtiungan software pada kondisi  $0.5h_{filling}$ -Beam Sea.



Gambar 20. Hasil Perhitungan *Hot Spot Stress* dan Detail *Hot Spot Area* Pada Kondisi  $0.5 h_{filling}$ -Beam Sea

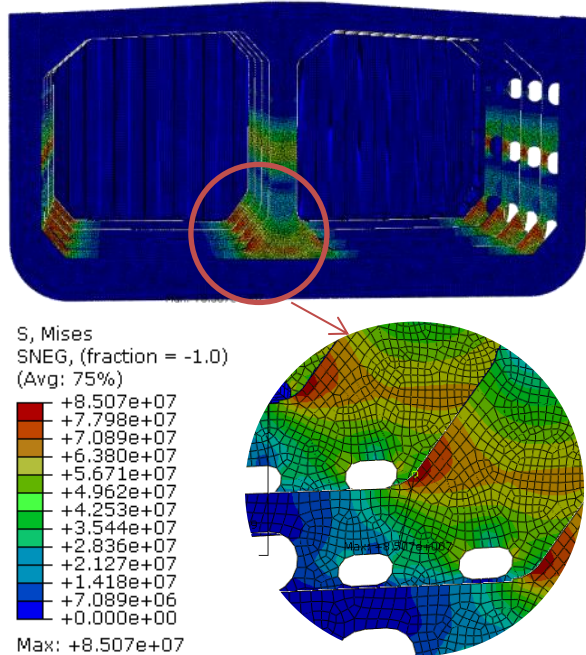
Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi D, sehingga untuk perhitungan *cumulative damage ratio* menggunakan S-N Diagram Class D. Class D untuk keadaan lingkungan normal dan Class  $D_{corr}$  untuk keadaan lingkungan korosif. Hasil perhitungan pada kondisi  $0.5h_{filling}$  -Beam Sea disajikan dalam Tabel 13.

Tabel 13. Hasil Perhitungan *Fatigue* Pada Kondisi  $0.5 h_{filling}$ -*Beam Sea*

	Nilai
$N_{Air}$	$3,00324 \times 10^7$ Siklus
$N_{Corr}$	$2,46898 \times 10^6$
$D_{Air}$	0,034
$D_{Corr}$	0,484
$T_F$	70 Tahun 3 Bulan 4 Hari

### 3.6.7. Hasil Analisa Kondisi *Ballast -Head Sea*

Tegangan maksimum pada kondisi *Ballast -Head Sea* adalah 85.0651Mpa. Pada kondisi ini *hotspot* terletak pada *bracket* bawah sambungan *Longitudinal bulkhead* pada lobus kanan ruang muat . Gambar 21 merupakan *hot spot stress* dan *hot spot area* hasil dari perhtiongan software pada kondisi *Ballast-Head Sea*.



Gambar 21. Hasil Perhitungan *Hot Spot Stress* dan Detail *Hot Spot Area* Pada Kondisi *Ballast -Head Sea*

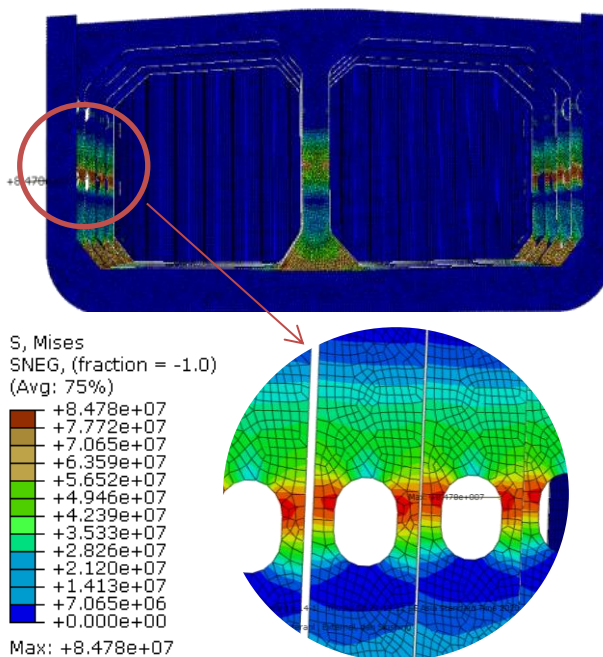
Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi D, sehingga untuk perhitungan *cumulative damage ratio* menggunakan S-N Diagram Class D. Class D untuk keadaan lingkungan normal dan Class  $D_{corr}$  untuk keadaan lingkungan korosif. Hasil perhitungan pada kondisi *Ballast - Head Sea* disajikan dalam Tabel 14.

Tabel 14. Hasil Perhitungan *Fatigue* Pada Kondisi *Ballast - Head Sea*

	Nilai
$N_{Air}$	$2,469 \times 10^6$ Siklus
$N_{Corr}$	$1,338 \times 10^5$
$D_{Air}$	0,880
$D_{Corr}$	8,924
$T_F$	20 Tahun 9 Bulan 29 Hari

### 3.6.8. Hasil Analisa Kondisi *Ballast -Following Sea*

Tegangan maksimum pada kondisi *Ballast -Following Sea* adalah 84.7833Mpa. Pada kondisi ini *hotspot* terletak pada *Man Hole* tengah *web framre* sisi *starboard*. Gambar 22 merupakan *hot spot stress* dan *hot spot area* hasil dari perhtiongan software pada kondisi *Ballast-Following Sea*.



Gambar 22. Hasil Perhitungan *Hot Spot Stress* dan Detail *Hot Spot Area* Pada Kondisi *Ballast-Following Sea*

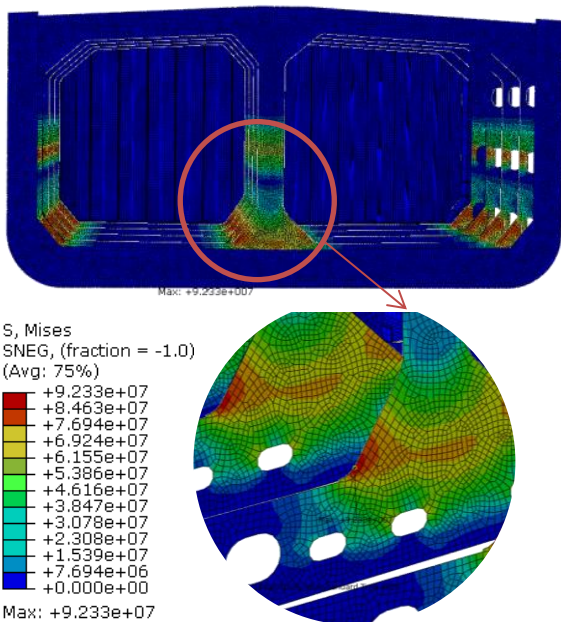
Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi C, sehingga untuk perhitungan *cumulative damage ratio* menggunakan S-N Diagram Class C. Class c untuk keadaan lingkungan normal dan Class  $D_{corr}$  untuk keadaan lingkungan korosif. Hasil perhitungan pada kondisi *Ballast - Following Sea* disajikan dalam Tabel 15.

Tabel 15. Hasil Perhitungan *Fatigue* Kondisi *Ballast- Following Sea*

	Nilai
$N_{Air}$	$7,538 \times 10^6$ Siklus
$N_{Corr}$	$3,778 \times 10^6$ Siklus
$D_{Air}$	0,229
$D_{Corr}$	0,613
$T_F$	53 Tahun 3 Bulan 28 Hari

### 3.6.9. Hasil Analisa Kondisi *Ballast Beam Sea*

Tegangan maksimum pada kondisi *Ballast - Beam Sea* adalah 92.3263Mpa. Pada kondisi ini *hotspot* terletak pada *bracket* bawah sambungan *Longitudinal bulkhead* pada lobus kanan ruang muat . Gambar 23 merupakan *hot spot stress* dan *hot spot area* hasil dari perhtiungan software pada kondisi *Ballast-Beam Sea*.



Gambar 23. Hasil Perhitungan *Hot Spot Stress* dan Detail *Hot Spot Area* Pada Kondisi *Ballast- Beam Sea*

Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi D, sehingga untuk perhitungan *cumulative damage ratio* menggunakan S-N Diagram Class D. Class D untuk keadaan lingkungan normal dan Class  $D_{corr}$  untuk keadaan lingkungan korosif. Hasil perhitungan pada kondisi *Ballast - Beam Sea* disajikan dalam Tabel 16.

Tabel 16. Hasil Perhitungan *Fatigue* Pada Kondisi *Ballast- Beam Sea*

	Nilai
$N_{Air}$	$4,673 \times 10^9$ Siklus
$N_{Corr}$	$8,910 \times 10^8$ Siklus
$D_{Air}$	1,160
$D_{Corr}$	11,887
$T_F$	20,15129

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis konstuksi pada *tanker ship* 6500 DWT maka dapat disimpulkan bahwa *Hot spot stress* tertinggi terjadi pada kondisi *Ballast-Beam Sea* dengan nilai tegangan 92.3263 MPa. Usia *Fatigue* paling muda terjadi pada kondisi *Ballast-Beam Sea*, yaitu 20.15129 tahun. Hal ini terjadi karena tingginya nilai *hot spot stress* dan *hot spot area* yang terletak pada area korosif yaitu pada *bracket* bawah sambungan *Longitudinal bulkhead*. Posisi *Hotspot* pada masing masing kondisi memiliki kecenderungan tertentu. Pada kondisi *hfilling, hotspot* berlokasi di daerah *man hole* pada sisi atas *web frame*. Pada kondisi 0.5 *hfilling*, *hotspot* berlokasi di daerah sambungan *corrugated bulkhead* dan *innershell* . Kemudian pada kondisi *Full Ballast*, *hotspot* berlokasi pada *bracket* bawah sambungan *Longitudinal bulkhead* pada lobus kanan ruang muat. Usia konstuksi masih memenuhi standar kriteria usia minimum yaitu 17-25 tahun.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih penulis sampaikan kepada Orang Tua yang telah memberi dukungan selama penelitian ini berlangsung. Kemudian, tidak lupa penulis sampaikan terimakasih kepada dosen pembimbing yang telah membimbing penulis sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Hasugian, A. A. I. S. Wahyuni, and M. Rahmawati, "Pemetaan Karakteristik Kecelakaan Kapal di Perairan Indonesia Berdasarkan Investigasi KNKT," *War. Penelit. Perhub.*, vol. 20, no. 2, pp. 229–240, 2017.
- [2] N. P. Suci Meinarni, "Dampak Pencemaran Lingkungan Laut Terhadap Indonesia Akibat Tumpahan Minyak Montara Di Laut Timor," *J. Komun. Huk.*, vol. 2, no. 2, pp. 228–235, 2016, doi: 10.23887/jkh.v2i2.8415.
- [3] H. W. Leheta, A. M. H. Elhewy, and H. A. Younes, "Analysis of fatigue crack growth in ship structural details," *Polish Marit. Res.*, vol. 23, no. 2, pp. 71–82, 2016, doi: 10.1515/pomr-2016-0023.
- [4] V. N. Van Do, "The behavior of ductile damage model on steel structure failure," in *Procedia Engineering*, 2016, vol. 142, pp. 26–33, doi: 10.1016/j.proeng.2016.02.009.
- [5] M. Ningrum, M. Ari, and Sumardiono, "Fatigue Life Ship Construction Analysis of

- 17500 LTDW Crude Oil Tanker,” *Proc. - 2018 Int. Conf. Appl. Sci. Technol. iCAST 2018*, pp. 205–209, 2018, doi: 10.1109/iCAST1.2018.8751517.
- [6] G. Costa, M. Montemurro, and J. Pailhès, “NURBS hyper-surfaces for 3D topology optimization problems,” *Mech. Adv. Mater. Struct.*, no. May, 2019, doi: 10.1080/15376494.2019.1582826.
- [7] J. S. Dokken, S. W. Funke, A. Johansson, and S. Schmidt, “Shape optimization using the finite element method on multiple meshes with nitsche coupling,” *SIAM J. Sci. Comput.*, vol. 41, no. 3, pp. A1923–A1948, 2019, doi: 10.1137/18M1189208.
- [8] G. Yu, B. Yu, S. Sun, and W. Q. Tao, “Comparative study on triangular and quadrilateral meshes by a finite-volume method with a central difference scheme,” *Numer. Heat Transf. Part B Fundam.*, vol. 62, no. 4, pp. 243–263, 2012, doi: 10.1080/10407790.2012.709416.
- [9] Biro Kasifikasi Indonesia, *Rules for bulk carrier and oil tanker 2018*, vol. XVII. Biro Kasifikasi Indonesia, 2018.
- [10] P. M. Kurowski, *Finite Element Analysis for Design Engineers, Second Edition*. 2016.
- [11] S. Abaqus, “Rigid elements.” [Online]. Available: <https://abaqusdocs.mit.edu/2017/English/SI MACAEELMRefMap/simaelm-c-rigid.htm>. [Accessed: 16-Aug-2020].
- [12] A. B. Julie, J. C. Jess, and L. H. James, “Fundamentals of metal fatigue analysis,” *Prentice Hall*, pp. 178–193, 1990.
- [13] C. A. Castiglioni and R. Pucinotti, “Failure criteria and cumulative damage models for steel components under cyclic loading,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, no. 4. Elsevier Ltd, pp. 751–765, 2009, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.12.007.