



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Kekuatan Modifikasi *Bracket* Pada Ruang Muat Kapal Tanker 6500 DWT Akibat *Internal Load* Berbasis *Finite Element Analysis (FEA)*

Artha Deri Putra¹⁾, Ari Wibawa Budi S.¹⁾, Untung Budiarto¹⁾

¹⁾Laboratorium Konstruksi

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
^{*)}e-mail : arthaderi1@gmail.com

Abstrak

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. Beberapa kecelakaan kapal terjadi karena adanya faktor kelelahan (*fatigue*) pada struktur. Oleh karena itu diperlukan adanya perhitungan umur kelelahan pada kapal, salah satunya menggunakan acuan *Common Structural Rules (CSR)* yang berbasis *Finite Element Analysis (FEA)*. Analisa *Fatigue* dilakukan pada daerah *midship* kapal akibat pengaruh dari beban internal (*static & dynamic liquid pressure*), beban external (*hydrostatic & hydrodynamic pressure*) dan *Pressure Sloshing* yang mana beban tersebut dihitung berdasarkan rumus yang ada pada *Common Structural Rules (CSR)*. Penelitian ini dilakukan pada kapal Tanker dengan mengaplikasikan 2 variasi geometri (*solid dan berlubang*). Proses Analisa dalam penelitian ini dibantu oleh software design berbasis *NURB* dan software Analisa berbasis *FEA*. Tegangan terbesar untuk kondisi *solid* yaitu 51.2729 MPa. Kondisi berlubang, yaitu 51.2753 MPa. Hasil perhitungan *fatigue* dari masing-masing *load case* adalah 67.07984 tahun dan 67.08034 tahun

Kata Kunci : *CSR, FEA, Kapal Tanker, 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. Kecelakaan tersebut diakibatkan oleh beberapa faktor[1].

Beberapa kecelakaan kapal terjadi karena adanya faktor kelelahan (*fatigue*) pada struktur. Sebagai contoh, kasus *MT. Prestige* menjadi dua bagian di *Galacia, Spanyol*. Kejadian ini mengakibatkan pencemaran lingkungan oleh minyak dari kapal tersebut sejauh 1700 kilometer garis pantai Atlantik termasuk Portugal, Spanyol dan Perancis[2].

Untuk itu perlu adanya pengawasan terhadap struktur yang rawan mengalami kelelahan (*fatigue*) dan tentunya perhitungan umur konstruksi kapal sebagai pertimbangan dalam pembelian kapal baik *new building* maupun *secondhand*, agar tetap mumpuni dalam segi ekonomi maupun dari segi keselamatan.. Perhitungan *fatigue* 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 *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 Method Analysis* sebagai syarat dalam analisa kekuatan konstruksi kapal[3].

Sebagai pemecahan masalah diatas, penulis akan melakukan penelitian tentang "Analisa

Modifikasi Kekuatan Bracket Pada Ruang Muat Kapal Tanker 6500 DWT Akibat Internal Load Berbasis Finite Element Analysis (FEA)". Dengan harapan penelitian ini dapat menghasilkan prediksi usia pada kapal tersebut sebagai acuan dalam penggunaan dan keselamatanya.

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

1. Mendapatkan nilai tegangan maksimal pada konstruksi kapal untuk setiap kondisi pembebanan
2. Memperoleh detail posisi Hot Spot Area
3. Mendapatkan nilai Fatigue Life pada Hot Spot Area
4. Memperoleh hasil analisa apakah desain konstruksi layak sesuai aturan CSR

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Kapal tanker 6500 DWT digunakan dalam penelitian ini. Kapal tanker ini merupakan kapal tanker dengan 2 lobus ruang muat yang mana jenis *bulkhead* yang dipakai dalam strukturnya adalah jenis *corrugated bulkhead*.

Analisa dilakukan pada daerah 0.25 L Kapal, yaitu pada daerah *Parrarel Middle Body*. Sepanjang 17 m, dengan dua ruang muat. Namun untuk penelitian ini berfokus pada *bracket* ruang muat.

Kapal Tanker tersebut memiliki Ukuran utama sebagai Berikut:

<i>Length overall</i>	(LOA)	108	m
<i>Length of waterline</i>	(LWL)	103,8	m
<i>Length,BP</i>	(LBP)	102	m
<i>Breadth (B)</i>		19,2	m
<i>Depth (h)</i>		9,3	m
<i>Draft (t)</i>		6	m

2.2. Variasi Perlakuan

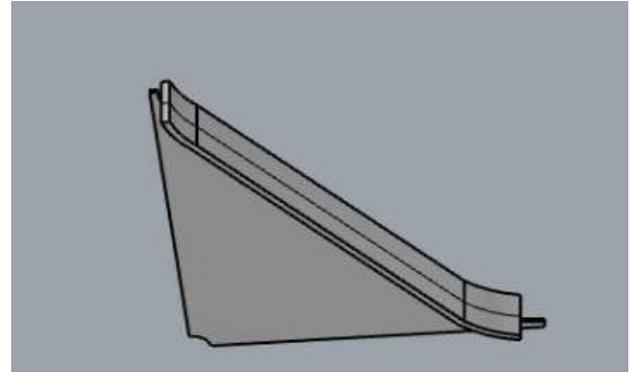
Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi pembebanan terhadap operasional pembebanan yaitu Kondisi muatan penuh *sloshing* dan terhadap gelombang *Beam Sea*. Serta diberikan Segitiga lubang untuk memperingan konstruksi.

2.3. Pembuatan Model

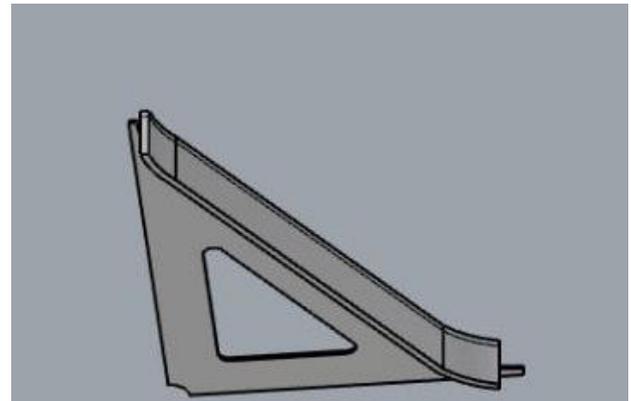
Desain konstruksi yang akan dimodelkan mencakup *Bracket* pada ruang muat.

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 agar mendapatkan gemetri sesuai dengan kebutuhan model analisa. Keuntungan NURB geometri model yang dihasilkan lebih halus[4].

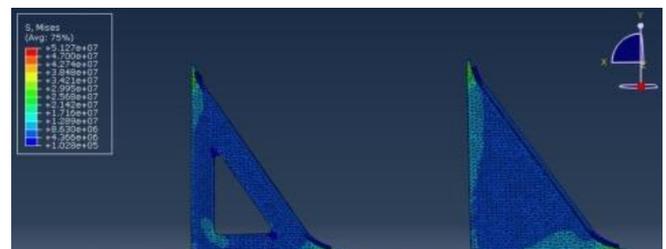


Gambar 1. 3D Geometri Desain Awal



Gambar 2. 3D Geometri Desain Sesudah Dimodifikasi dengan Segitiga Lubang

Geometri yang akan dianalisa kemudian dikonversi dalam bentuk *.ACIS* untuk nantinya akan dilakukan *import* pada *software* analisa FEA yaitu ABAQUS CAE.



Gambar 3. Model Hasil ekspor ke ABAQUS

2.4. Proses Meshing

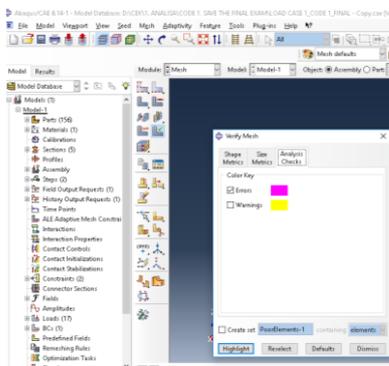
FEA merupakan metode dalam berbagai analisa, yang mana FEA ini efisien dan mudah

dalam numeriknya. Dalam analisa FEA ini erat kaitannya dengan *meshing*[5].

Meshing ini merupakan langkah dalam mendiskritisasi model menjadi diskrit-diskrit elemen yang lebih kecil agar dapat dilakukan perhitungan numerikal. *Meshing Geometry* ini merupakan hasil dari diskritisasi. Hasil *meshing* ini tidak terbatas pada geometri saja namun juga massa, muatan dan *restrain*[6].

Ukuran elemen sebesar 0,1 unit . dengan jenis *element meshing* adalah *quadrilateral*.

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

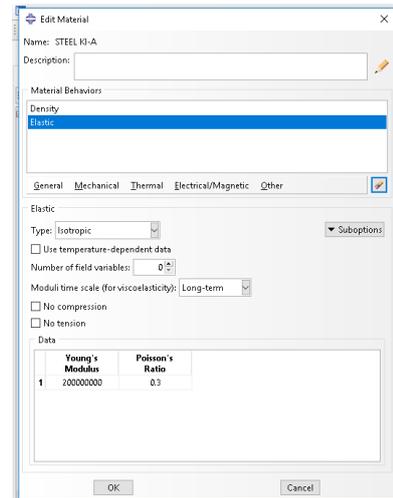


Gambar 4. Hasil Verifikasi *Meshing*

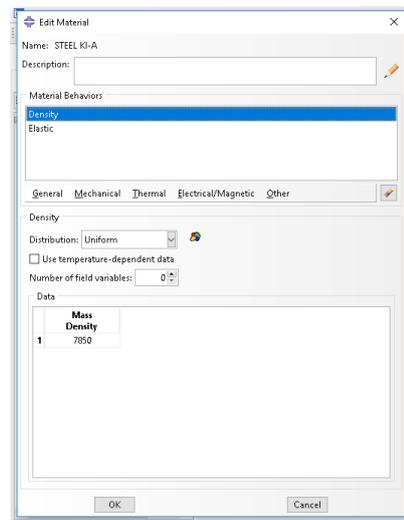
2.5. Pendefinisian Material

Pendefinisian material pada analisa ini adalah menggunakan material Baja *Stell* Kelas KI-A36 dengan data data *property* material sebagai berikut[7]:

<i>Poisson Number</i>	0,3
<i>Modulus Elasticity</i>	200.000.000 Pa
<i>Density</i>	7850 kg/m ³



Gambar 5. *Input Elastic Material Properties*



Gambar 6. *Input Density Material Properties*

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[8]. *Boundary Conditions* yang digunakan dalam analisa ini mengacu pada penelitian sebelumnya, yang mana sesuai pada CSR [9].

Tabel 1. *Boundary Conditions*

Tabel Justifikasi <i>Boundary Conditions</i>							
N	Lokasi	Tranlasi			Rotasi		
		U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3

1	Ujung belakang (semua elemen memanjang)	RL	-	-	-	RL	RL
2	Independent point ujung belakang	FI X	-	-	-	-	-
3	Ujung depan (semua elemen memanjang)	RL	-	-	-	RL	RL
4	Independent point ujung depan	-	-	-	-	-	-

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*[10].

3.2. Setup Beban

Beban yang bekerja pada struktur ini merupakan beban eksternal, internal dan sloshing. Beban – beban tersebut dihitung berdasarkan persamaan berikut[7]:

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

$$P_{IS} = \rho_L g (z_{Top} - z) \quad (2)$$

$$P_{ID} = f \beta f_{CD} \rho_L [a_z(z_0 - z) + f_{ull-1} a_x(x_0 - x) + f_{ull-t} a_y(y_0 - y)] \quad (3)$$

$$P_{Ex} = P_s + P_w \quad (4)$$

$$P_s = \rho g (T_{LC} - z) \quad (5)$$

$$P_w = P_{w,wl} - \rho g (z - T_{LC}) \quad (6)$$

$$P_{slh-Ing} = \rho_{slh-Ing} g l_{slh} f_{slh} [0.4 - (0.39 - \frac{1.7 l_{slh}}{L}) \frac{L}{350}] \quad (7)$$

Besarnya beban tersebut diasumsikan berdasarkan kondisi – kondisi yang sudah ditentukan dalam 2 variasi sesuai 2.2. Tabel 1-9 merupakan hasil dari perhitungan beban.

Tabel 2. *Pressure* Pada Kondisi *hfilling Beam Sea*

Tabel <i>Pressure</i> Pada Kondisi <i>hfilling Beam Sea</i>

	<i>Pressure (N/m²)</i>
P_{in}	18299.90923
P_{ex}	68250.875
P_{slh-Ing}	72.83258626
P_{slh-wf}	0.000658783
P_{slh-t}	-28531.00368
P_{slh-grd}	-8162.737128

Beban hasil perhitungan 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.

3.3. Validasi

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

a. Perhitungan Analitik

Perhitungan secara analitik yaitu dengan menggunakan pendekatan rumus *simplified stress analysis* sesuai CSR, adapun rumus perhitungan tersebut adalah yaitu sebagai berikut .

$$\sigma_{LD, ik(j)} = \frac{K_b K_n S \ell_{bag}^2 (\eta_w f_{NL} P_{w, ik(j)} + \eta_{id} P_{id, ik(j)} + \eta_{bd} P_{bd, ik(j)}) \left(1 - \frac{6X_z}{\ell_{bag}} + \frac{6X_z^2}{\ell_{bag}^2}\right)}{12 Z_{eff-n50}} \quad (11)$$

F yaitu *Force* (N), L adalah Panjang model (mm), E adalah Modulus Elastisitas (Mpa) dan I adalah Inersia (mm⁴).

$$\sigma = \frac{1.28 \times 0.8675 \times 600 \times 7600^2 \times 56.5108 \times 0.985268}{12 \times 1022.953485} = 53.10983 \text{ N/mm}^2$$

Berdasarkan perhitungan manual diatas, tegangan yang terjadi sebesar 53.10983 N/mm².

b. Perhitungan Numerik

Perhitungan secara numerik menggunakan ABAQUS CAE didapatkan nilai tegangan sebesar 51.2729 MPa.

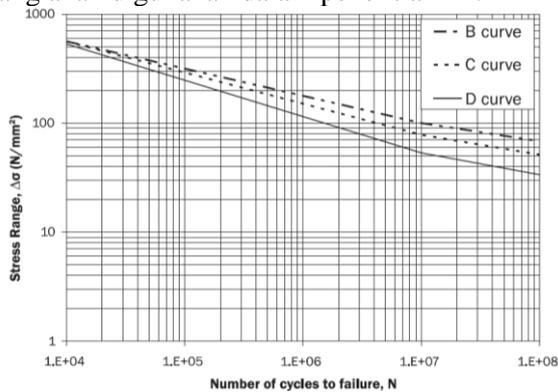
Tabel 3. Hasil Validasi

Hasil Analitik	Hasil Numerik	Error
53.10983 N/mm ²	51.2729 MPa	3.582651%

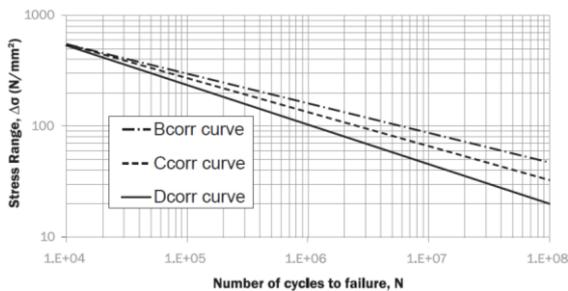
Bedasarkan perbandingan antara perhitungan analitik dan numerik pada tabel 11, didapatkan nilai *error* sebesar 3.582651%. *Margin error* masih berada dibawah 5% sehingga model Valid.

3.4. S-N Diagram

S-N diagram adalah Konsep *Stress vs Life* merupakan konsep yang digunakan sebagai pendekatan dalam analisa kelelahan logam. Grafik ini merupakan hubungan antara tegangan dengan siklus sehingga nantinya dapat digunakan sebagai dasar penentuan umur *fatigue*. Kurva S-N ini sangat penting karena menyediakan data- data hasil eksperimental[11]. Berikut adalah S-N diagram yang akan digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 7. Grafik S-N Kondisi Air



Gambar 8. Grafik S-N Kondisi Korosif

Tabel 4. *Basic Data* Diagram S-N Kondisi Air

Class	K ₂	m
B	1.01x10 ¹⁵	4.0
C	4.23x10 ¹³	3.5
D	1.52x10 ¹²	3.0

Tabel 5. *Basic Data* Diagram S-N Kondisi Korosif

Class	K ₂	m
-------	----------------	---

B _{Corr}	5.05 x 10 ¹⁴	4.0
C _{Corr}	2.12 x 10 ¹³	3.5
D _{Corr}	7.60 x 10 ¹¹	3.0

Adapun persamaan linier antara Log (Δσ) dan Log (N) adalah sebagai berikut[7]:

$$\log (N) = \log (K_2) - m \cdot \log (\Delta \sigma) \quad (12)$$

Persamaan diatas dapat pula digunakan sebagai penentuan jumlah siklus yang terjadi selain dengan cara membaca diagram S-N.

Untuk mencari rentang tegangan yang terjadi maka dapat menggunakan nilai rumus dibawah ini:

$$\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (13)$$

3.5. Hasil Analisa

Dalam penyajian hasil analisa, hasil disajikan kedalam beberapa kondisi yang mewakili tiap tiap perlakuan sesuai pada Tabel 11.

Tabel 6. Penyajian Hasil Analisa

No	Kondisi	Keterangan
1	Kondisi 1	Kondisi 1 <i>Bracket</i> dengan kondisi normal, Analisa Terhadap beban muatan penuh, <i>Sloshing</i> dan arah kapal 90 derajat terhadap direksi gelombang .
2	Kondisi 2	Kondisi 2 <i>Bracket</i> dengan kondisi segitiga lubang, Analisa Terhadap beban muatan penuh, <i>Sloshing</i> dan arah kapal 90 derajat terhadap direksi gelombang .

3.6. *Cummulative Damage Rasio*

Perhitungan usia *fatigue* sendiri dapat dilakukan dengan cara penerapan aturan *cumulative damage ratio* (CDM). *Cumulative Damage Ratio* yang memiliki nilai lebih dari satu maka dapat disimpulkan bahwa umur stuktur tersebut kurang baik. *Cumulative Damage Ratio* ini berkaitan dengan histori dari pemuatan *quasi statis*. Untuk menilai kegagalan ini *cumulative damage* diperkenalkan sebagai disipasi energi [12].

Pada penelitian ini, *cumulative damage* dihitung berdasarkan rumus [7] :

$$D_{E(j)} = \frac{\alpha_{(j)} \cdot N_D}{K_2} \frac{\Delta \sigma_{FS, (j)}^m}{(\ln N_s)^{m/\xi}} \cdot \mu_{(j)} \cdot \Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right) \quad (14)$$

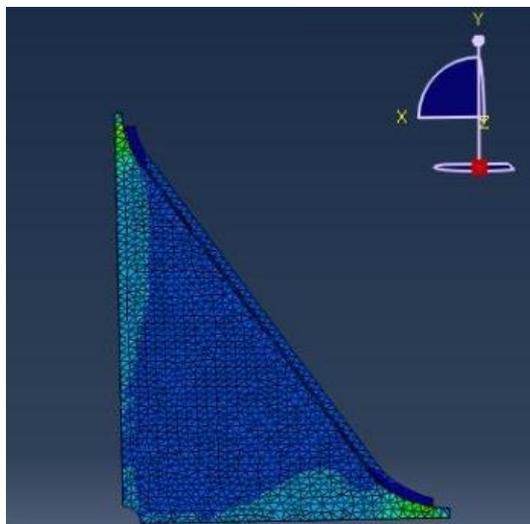
Dari Penentuan nilai *cumulative damage* dapat diprediksi pula umur konstruksi kapal. Adapun persamaan tersebut adalah sebagai berikut[7]:

$$T_F = T_D - T_{C+} \left(\frac{TD}{D_{air}} - TD + TC \right) \frac{D_{air}}{D_{corr}} \quad (15)$$

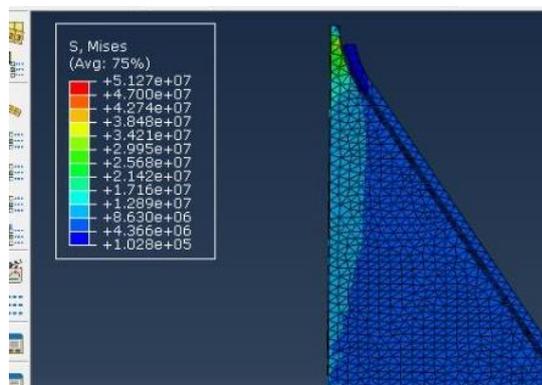
3.7. Hasil Analisa Kondisi 1

Tegangan maksimum pada kondisi 1A adalah 51.2729 MPa. Tegangan maksimum tersebut terletak pada *Ujung atas bracket*.

Rentang tegangan maksimum dan minimum ini digunakan dalam penentuan siklus menggunakan diagram S-N, sedangkan lokasi *hotspot* digunakan dalam penentuan tipe diagram S-N yang akan dipakai .



Gambar 9. Respon Struktur Pada Kondisi 1



Gambar 10. Detail *Hotspot* Pada Kondisi 1

Data yang didapat dari analisa menggunakan *FEA* kemudian dilakukan pengolahan menggunakan diagram S-N atau menggunakan fungsi logaritma dari diagram S-N. Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi C, sehingga untuk perhitungan *cumulative*

damage ratio menggunakan S-N Diagram tipe C untuk keadaan air *damage* dan C_{corr} untuk penambahan faktor korosif.

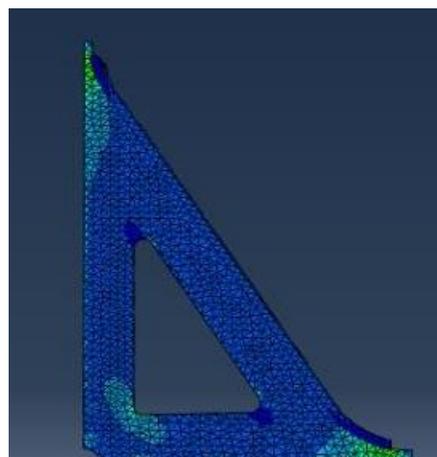
Persamaan (12) digunakan untuk menghitung jumlah siklus (N), persamaan (14) digunakan untuk estimasi *damage* (D) dan persamaan (15) digunakan untuk perhitungan usia, sehingga didapatkan nilai komponen perhitungan fatigue sebagai berikut:

Tabel 7. Komponen Perhitungan *Fatigue*

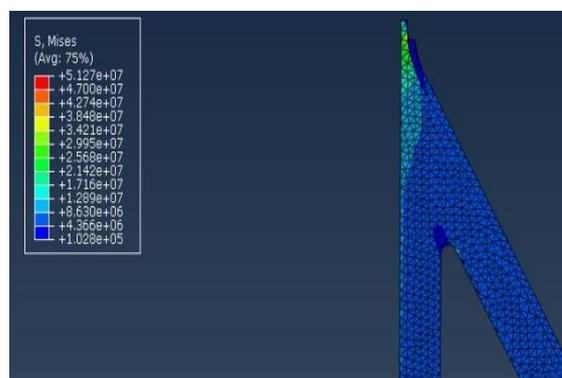
	Nilai
N_{Air} (Cycle)	1.00031E+07
N_{Corr} (Cycle)	5.01337E+06
D_{Air}	1.62496E-01
D_{Corr}	4.61983E-01
$D_{Combine}$	2.22394E-01
T(Tahun)	67.07984

3.8. Hasil Analisa Kondisi 2

Tegangan maksimum pada kondisi IB adalah 51.2753 Mpa. Pada kondisi ini *hotspot* terletak pada *Ujung atas bracket*.



Gambar 11. Respon Struktur Pada Kondisi 2



Gambar 12. Detail *Hotspot* Pada Kondisi 2

Berdasarkan data, lokasi *Hotspot* tersebut termasuk dalam kondisi C, sehingga untuk perhitungan *cumulative damage ratio* menggunakan S-N Diagram tipe C untuk keadaan air *damage* dan C_{corr} untuk penambahan faktor korosif. Berikut nilai komponen perhitungan fatigue sebagai berikut:

Tabel 8. Komponen Perhitungan *Fatigue*

	Nilai
N_{Air} (Cycle)	1.00032.E+07
N_{Corr} (Cycle)	5.01341.E+06
D_{Air}	1.62494.E-01
D_{Corr}	4.61979.E-01
$D_{Combine}$	2.22391.E-01
T(Tahun)	67.08034

3.9 Rangkuman Analisa Hasil Struktur

Tabel 9. Rangkuman Hasil Analisa

No	Jenis Kondisi	σ_{maks} (MPa)
1	Kondisi 1	51.2729
2	Kondisi 2	51.2753

Tabel 10. Rangkuman Perhitungan $D_{Combine}$ dan Usia Fatigue

No	Jenis Kondisi	$D_{Combine}$	Usia Fatigue[T] (Tahun)
1	Kondisi 1	2.22394E-01	67.07984
2	Kondisi 2	2.22391E-01	67.08034

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis konstruksi *Bracket* pada Kapal Tanker 6500 DWT maka dapat disimpulkan bahwa:

- 1) Tegangan tertinggi sama antara *bracket* lubang segitiga dan *bracket* normal
- 2) Posisi *Hotspot* terletak di daerah yang sama walaupun kondisi *bracket* berlubang
- 3) Usia konstruksi masih memenuhi standar kriteria usia minimum yaitu 17-25 tahun.
- 4) Pelubangan segitiga dapat diterapkan pada *bracket* karena tidak mengubah nilai kekuatan. Bahkan justru akan memperingan konstruksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih penulis sampaikan kepada Rektor dan Jajaran Universitas Diponegoro, Bapak Dr.Eng. Hartono Yudo, ST, MT selaku Ketua Departemen Teknik Perkapalan, Bapak Ari Wibawa Budi Santosa. ST, MSi selaku Sekertaris Departemen Teknik Perkapalan dan dosen pembimbing 1, Bapak Untung Budiarto ST, MT selaku dosen pembimbing 2, Seluruh dosen Departemen Teknik Perkapalan. Kemudian, tidak lupa penulis sampaikan terimakasih kepada Orang Tua, kakak, dan adik yang telah memberi dukungan selama penelitian ini berlangsung sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

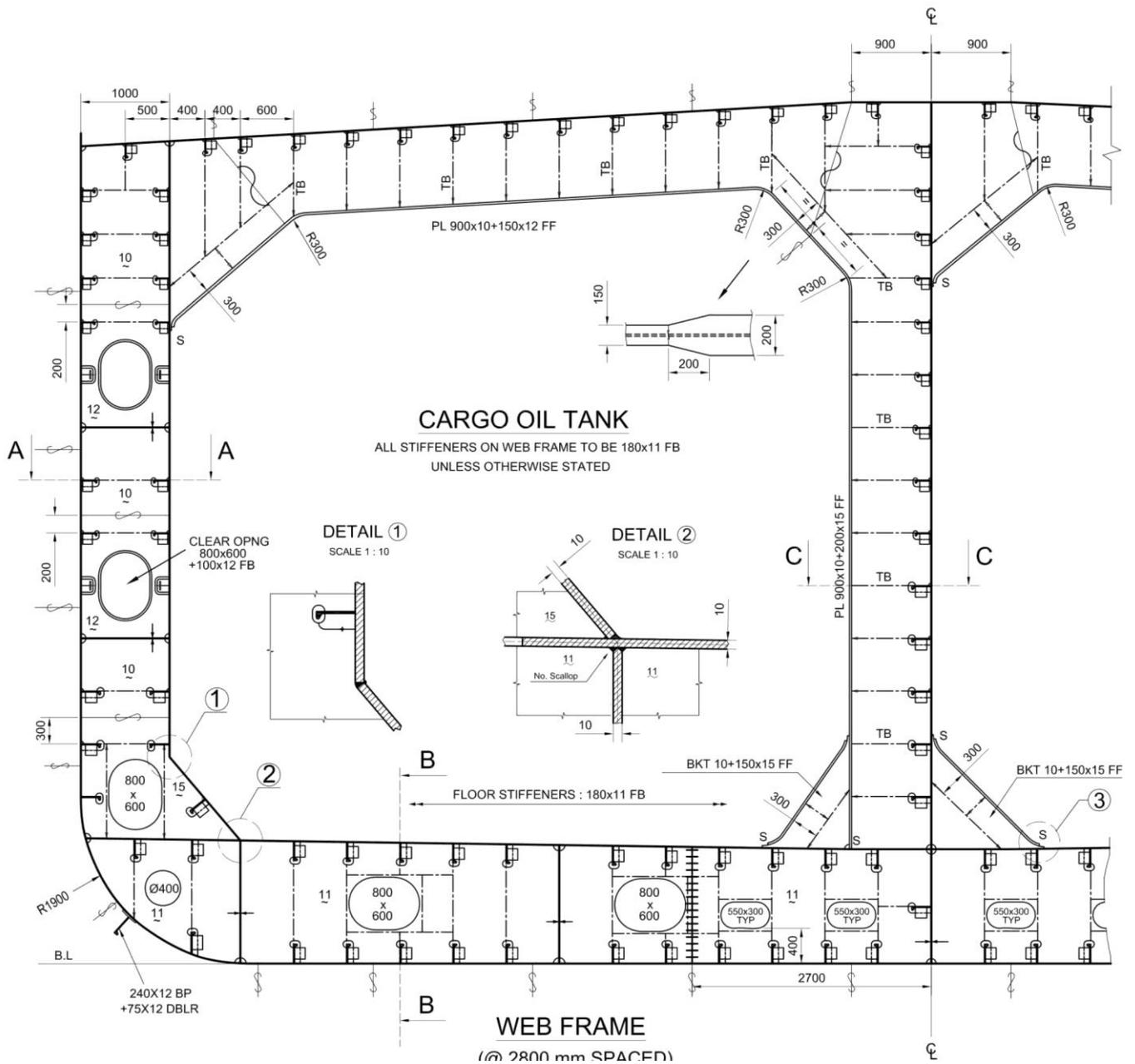
DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Hasugian, A. A. I. S. Wahyuni, and M. Rahmawati, "Pemetaan Karakteristik Kecelakaan Kapal di Perairan Indonesia Berdasarkan Investigasi KNKT Mapping of Vessel Accident Characteristics in Indonesia Based on," 2017.
- [2] D. Single, H. Ke, D. Hull, D. Metode, and E. Hingga, "Jurnal teknik perkapalan," vol. 5, no. 1, pp. 79–87, 2017.
- [3] D. Septiana and A. Imron, "Perkiraan Fatigue Life pada Bracket Kapal Tanker Berdasarkan Common Structural Rules," vol. 1, no. 1, 2012.
- [4] G. Costa, "NURBS hyper-surfaces for 3D topology optimization problems NURBS Hyper-surfaces for 3D Topology Optimisation Problems," no. May, 2019, doi: 10.1080/15376494.2019.1582826.
- [5] M. Okereke and S. Keates, "Finite element applications," *Cham Springer Int. Publ. AG*, 2018.
- [6] S. W. Funke and A. Johansson, "Shape optimization using the finite element method on multiple meshes with nitsche coupling *."
- [7] "Rules for bulk carrier and oil tanker 2018," vol. XVII, 2018.
- [8] P. M. Kurowski, *Finite Element Analysis for Design Engineers.* .
- [9] D. W. T. Menggunakan, M. Simplified, and A. Fatigue, "Analisis Fatigue Life Konstruksi Kapal Tanker Fatigue Analysis," vol. 8, no. 1, 2019.
- [10] "Rigid elements." [Online]. Available: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-c-rigid.htm>. [Accessed: 16-Aug-2020].
- [11] A. B. Julie, J. C. Jess, and L. H. James,

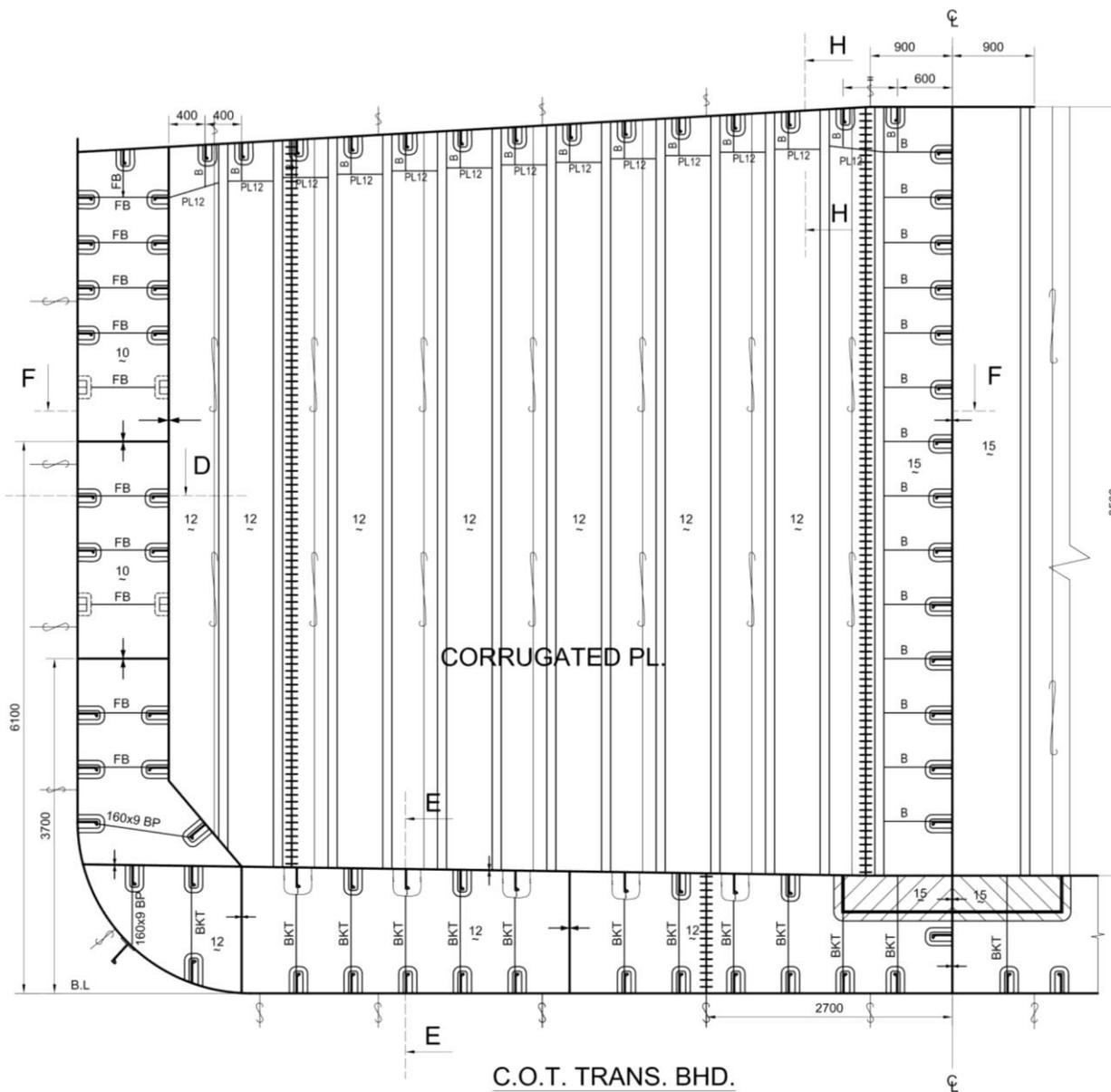
“Fundamentals of metal fatigue analysis,”
Preitice Hall, pp. 178–193, 1990.

- [12] C. A. Castiglioni and R. Pucinotti, “Failure criteria and cumulative damage models for steel components under cyclic loading,” *J.*

Constr. Steel Res., vol. 65, no. 4, pp. 751–765, 2009, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.12.007.



Gambar 15. Detail Web Frame



Gambar 16. Detail Corrugated Bulkhead