



TUGAS AKHIR - MN 184802

**PERKIRAAN SISA UMUR KONSTRUKSI PADA FPSO
100.000 DWT DENGAN METODE *SIMPLIFIED FATIGUE***

**Khadijah Namira Putri Salamun
NRP 0411154000077**

**Dosen Pembimbing
Mohamad Nurul Misbah, S.T., M.T.
Totok Yulianto, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



TUGAS AKHIR - MN 184802

**PERKIRAAN SISA UMUR KONSTRUKSI PADA FPSO
100.000 DWT DENGAN METODE *SIMPLIFIED FATIGUE***

**Khadijah Namira Putri Salamun
NRP 0411154000077**

**Dosen Pembimbing
Mohamad Nurul Misbah, S.T., M.T.
Totok Yulianto, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



FINAL PROJECT - MN 184802

**FATIGUE LIFE ESTIMATION OF CONSTRUCTION ON
100.000 DWT's FPSO WITH SIMPLIFIED FATIGUE
METHOD**

**Khadijah Namira Putri Salamun
NRP 0411154000077**

**Supervisor
Mohamad Nurul Misbah, S.T., M.T.
Totok Yulianto, S.T., M.T.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020**

LEMBAR PENGESAHAN

PERKIRAAN SISA UMUR KONSTRUKSI PADA FPSO 100.000 DWT DENGAN METODE *SIMPLIFIED FATIGUE*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

KHADIJAH NAMIRA PUTRI SALAMUN
NRP 0411154000077

Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing II



Totok Yulianto, S.T., M.T.
NIP 19700731 199512 1 001

Dosen Pembimbing I



Mohamad Nurul Misbah, S.T., M.T.
NIP 19730404 199702 1 001

Mengetahui,



Kepala Departemen Teknik Perkapalan

Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D.
NIP 19640210 198903 1 001

SURABAYA, 14 JANUARI 2020

LEMBAR REVISI

PERKIRAAN SISA UMUR KONSTRUSI PADA FPSO 100.000 DWT DENGAN METODE *SIMPLIFIED FATIGUE*

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 9 Januari 2020

Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

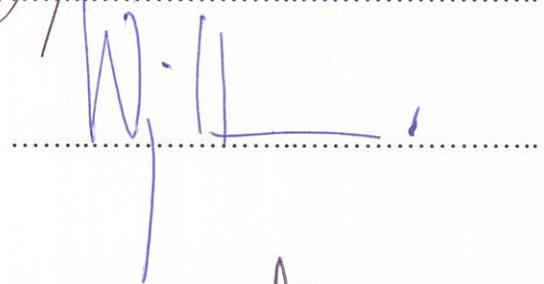
KHADIJAH NAMIRA PUTRI SALAMUN
NRP 0411154000077

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Danu Utama, S.T., M.T.



2. Wing Hendropasetyo A. P., S.T., M.Eng.

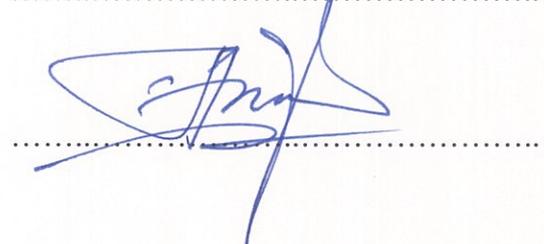


Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Mohamad Nurul Misbah, S.T., M.T.



2. Totok Yulianto, S.T., M.T.



SURABAYA, 14 JANUARI 2020

Dipersembahkan kepada kedua orang tua atas segala dukungan dan doanya

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunianya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Bapak M. Nurul Misbah, S.T., M.T., dan Bapak Totok Yulianto, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
2. Bapak Danu Utama, S.T., M.T., Bapak Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D., serta Bapak Wing Hendroprasetyo A. P., S.T., M.Eng selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan sarannya untuk perbaikan Laporan Tugas Akhir ini;
3. Bapak Totok Yulianto, S.T., M.T., selaku Kepala Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS atas bantuannya selama pengerjaan Tugas Akhir ini dan atas izin pemakaian fasilitas laboratorium;
4. Capt. Candra Bustami serta pihak Husky-CNOOC Madura Limited yang telah memberikan data FPSO serta memberikan ijin penggunaannya untuk Tugas Akhir ini;
5. Ayah, Ibu, dan Abang penulis yang telah memberikan dukungan secara moral dan materiil, serta doa kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini;
6. Ibel, Feima, Prisheila, Astari, Dian, Dinda, Noveesra, Gita, dan Quinsha yang telah memberikan semangat, *support*, serta doa dalam penyelesaian Tugas Akhir ini;

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 14 Januari 2020

Khadijah Namira Putri Salamun

PERKIRAAN SISA UMUR KONSTRUKSI PADA FPSO 100.000 DWT DENGAN METODE *SIMPLIFIED FATIGUE*

Nama Mahasiswa : Khadijah Namira Putri Salamun
NRP : 0411154000077
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : 1. Mohamad Nurul Misbah, S.T., M.T.
2. Totok Yulianto, S.T., M.T.

ABSTRAK

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan minyak dan gas, sekarang ini banyak digunakan *floating structure* untuk menjangkau pengeksploitasian di laut dalam. Salah satu *floating structure* yang digunakan adalah *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO). FPSO sendiri merupakan bangunan terapung yang berbentuk kapal tanker. Kapal tanker sendiri memiliki resiko kecelakaan yang sangat tinggi, bukan hanya dikarenakan isi muatan yang dibawa sangat berbahaya namun ada faktor lain berupa beban dari lingkungan. Kerusakan struktur bangunan laut umumnya diakibatkan oleh kelelahan (*fatigue*). Kelelahan sendiri terjadi akibat struktur mendapatkan beban berulang. Umur kelelahan (*fatigue life*) pada struktur kapal tanker dapat dianalisis dengan menggunakan pendekatan-pendekatan pada *Common Structural Rules*.

Tiga ruang muat pada bagian *midship* FPSO dimodelkan dengan bantuan *software finite element* sesuai dengan ketentuan *Common Structural Rules* (2014) yang kemudian dilakukan *meshing* dan pemberian beban pada daerah-daerah tertentu dalam 2 kondisi, yaitu ketika tinggi muatan setengah penuh (0.5h) dan saat ruang muat diberi muatan penuh (h). Analisis yang dilakukan adalah dengan memperhatikan beban *sloshing* dan momen lentur *vertical*. Kedua kondisi tersebut kemudian diberikan variasi *roll angle motion* yang dihitung sesuai dengan persamaan dalam CSR. Dan juga analisis ini dilakukan pada dua kondisi gelombang yaitu *hogging* dan *sagging*. Tegangan yang memiliki nilai paling besar dari setiap sambungan adalah tegangan yang akan dianalisis *fatigue lifenya*.

Hasil analisis menunjukkan bahwa setiap masing-masing variasi pembebanan dan arah *roll* memiliki nilai tegangan yang berbeda-beda serta lokasi tegangan kritis yang rata-rata terjadi pada *bracket ke-17* dengan *longitudinal bulkhead*. Umur kelelahan pada masing masing kondisi adalah 105 tahun pada Kondisi 1 (0.5h) dan 78 tahun pada Kondisi 2 (h). Perkiraan sisa umur konstruksi pada ruang muat FPSO ini yaitu sebesar 74 tahun, dikarenakan FPSO sudah mulai beroperasi setelah di konversi pada tahun 2016, yaitu 4 tahun yang lalu.

Kata kunci: FPSO, *fatigue life*, momen lentur.

FATIGUE LIFE ESTIMATION OF CONSTRUCTION ON 100.000 DWT's FPSO WITH SIMPLIFIED FATIGUE METHOD

Author : Khadijah Namira Putri Salamun
Student Number : 0411154000077
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology
Supervisor : 1. Mohamad Nurul Misbah, S.T., M.T.
2. Totok Yulianto, S.T., M.T.

ABSTRACT

Along with the increasing demand for oil and gas, now a widely used of the floating structure to reach exploitation in the deep sea. One of the floating structure used is Floating Production Storage and Offloading (FPSO). The FPSO itself is a tanker-shaped floating construction. The tanker itself has a very high risk of accidents, not only because the contents of the cargo carried are very dangerous, but there are other factors in the form of loads from the environment. Damage to the floating structure is generally caused by fatigue. Fatigue itself occurs due to structures getting repetitive loads. Fatigue life in the tanker structure can be analyzed using approaches to the Common Structural Rules.

Three cargo rooms in midhsip's FPSO is modeled with the help of software finite element in accordance with the provisions of the Common Structural Rules (2014) which is then done meshing and giving load in certain areas in 2 conditions, when the filling height is half-full (0.5h) and when the cargo rooms are given a full charge (h). The analysis is carried out by pay attention to the internal sloshing pressure and bending moments. Both conditions are then given a variety of roll angle motion which is calculated based on Common Structural Rules. And also this analysis is carried out on two wave conditions, hogging and sagging. The stress value that has the highest value of each connection is the stress that will be analyzed for its fatigue life.

The results of the analysis, show that each variation of the loading condition and direction of the roll has a different value and a different location of the critical stress. The fatigue life in each condition is 105 years on 1st condition (0.5 h) and 78 years on 2nd condition (h). The fatigue life estimation of the construction on this FPSO is 74 years because FPSO has been operated after being converted in 2016, which is 4 years ago.

Keywords: FPSO, fatigue life, bending moment.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR REVISI.....	iv
HALAMAN PERUNTUKAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xxii
DAFTAR TABEL	xxiii
DAFTAR SIMBOL	xxv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Manfaat	3
1.6. Hipotesis	3
BAB 2 STUDI LITERATUR.....	5
2.1. Dasar Teori	5
2.1.1. <i>Floating Production Storage and Offloading</i>	5
2.1.2. Kekuatan Kelelahan	8
2.1.3. Perhitungan Kelelahan	9
2.1.4. Beban dan Tegangan Kelelahan.....	9
2.1.5. Kondisi Pembebanan	10
2.1.6. Momen Lengkung	12
2.1.7. <i>Hot Spot Area</i>	14
2.1.8. Desain Kurva S-N	14
2.1.9. Faktor Konsentrasi Tegangan (<i>Stress Concentration Factor</i>)	16
2.1.10. Konsep Perhitungan <i>Fatigue</i>	17
2.2. Tinjauan Pustaka.....	19
BAB 3 METODOLOGI	21
3.1. Bagan Alir.....	21
3.2. Studi Literatur.....	21
3.3. Pengumpulan Data.....	22
3.4. Proses Pemodelan dengan <i>Software Finite Element</i>	25
3.4.1. Pemilihan dan Penentuan Tipe Elemen	25
3.4.2. <i>Material Properties</i>	26
3.4.3. <i>Section</i>	27
3.4.4. <i>Modelling</i>	28
3.4.5. <i>Meshing</i>	30
3.4.6. Kondisi Batas	32
3.4.7. Konvergensi	32

3.4.8. Pembebanan	32
3.5. Perhitungan Umur Kelelahan	37
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1. Analisis Tegangan	39
4.2. Kondisi Pembebanan 1	39
4.3. Kondisi Pembebanan 2	43
4.4. Faktor Konsentrasi Tegangan	46
4.5. Kurva S-N.....	47
4.6. <i>Cumulative Fatigue Damage</i>	47
4.7. <i>Fatigue Life</i>	49
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	51
5.1. Kesimpulan	51
5.2. Saran	51
DAFTAR PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN	
LAMPIRAN A HASIL PERHITUNGAN BEBAN <i>SLOSHING</i>	
LAMPIRAN B HASIL PERHITUNGAN <i>ROLL MOTION</i>	
LAMPIRAN C HASIL PERHITUNGAN <i>BENDING MOMENT</i>	
LAMPIRAN D TIPE SAMBUNGAN	
LAMPIRAN E HASIL PERHITUNGAN <i>CUMULATIVE FATIGUE DAMAGE</i> DAN <i>FATIGUE LIFE</i>	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Layout</i> Aliran Gas.....	6
Gambar 2.2 <i>Single Buoy Mooring System</i>	6
Gambar 2.3 <i>Spread Mooring System</i>	6
Gambar 2.4 <i>Offloading System</i> FPSO KAS III.....	7
Gambar 2.5 Momen Lengkung Vertikal.....	12
Gambar 2.6 Momen Lengkung Horizontal.....	12
Gambar 2.7 Faktor Distribusi f_m	13
Gambar 2.8 <i>Hot Spot Area</i>	14
Gambar 2.9 Kurva S-N Sambungan Las.....	16
Gambar 3.1 Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	21
Gambar 3.2 <i>Layout</i> FPSO 107160 DWT.....	23
Gambar 3.3 Rencana Umum FPSO 107160 DWT.....	24
Gambar 3.4 <i>Midship Section</i> FPSO 107160 DWT.....	24
Gambar 3.5 <i>Element Library</i> untuk <i>Shell Element</i>	25
Gambar 3.6 <i>Element Library</i> untuk <i>Beam Element</i>	25
Gambar 3.7 <i>Material Properties</i> Model.....	26
Gambar 3.8 Pendefinisian <i>Density</i>	26
Gambar 3.9 Kolom Dialog <i>Section</i> untuk <i>Beam Element</i>	27
Gambar 3.10 Kolom Dialog <i>Section</i> untuk <i>Shell Element</i>	27
Gambar 3.11 <i>Keypoints</i>	28
Gambar 3.12 <i>Lines</i>	29
Gambar 3.13 Model Ruang Muat dalam Plot Area.....	29
Gambar 3.14 Model Bagian Dalam.....	26
Gambar 3.15 <i>Mesh Tools</i>	26
Gambar 3.16 Tampilan Model Setelah <i>Meshing</i>	26
Gambar 3.17 Detil <i>Meshing</i> Bagian Dalam Model.....	26
Gambar 3.18 Grafik Tekanan <i>Slohing</i> Tanki.....	33
Gambar 3.19 Kondisi Pembebanan 2 Tanpa <i>Rolling</i>	34
Gambar 3.20 Kondisi Pembebanan 2 <i>Roll</i> Kanan (<i>Front View</i>).....	35
Gambar 3.21 Pemberian Gaya Tarik dan Tekan (<i>Front View</i>).....	36
Gambar 3.22 Pemberian Gaya Tarik dan Tekan (<i>Left View</i>).....	36
Gambar 4.1 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 1 Tanpa <i>Rolling - Hogging</i>	39
Gambar 4.2 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 1 Tanpa <i>Rolling - Sagging</i>	40
Gambar 4.3 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 1 <i>Rolling</i> Kanan - <i>Hogging</i>	40
Gambar 4.4 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 1 <i>Rolling</i> Kanan - <i>Sagging</i>	41
Gambar 4.5 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 1 <i>Rolling</i> Kiri - <i>Hogging</i>	41
Gambar 4.6 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 1 <i>Rolling</i> Kiri - <i>Sagging</i>	42
Gambar 4.7 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 2 Tanpa <i>Rolling - Hogging</i>	43
Gambar 4.8 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 2 Tanpa <i>Rolling - Sagging</i>	43
Gambar 4.9 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 2 <i>Rolling</i> Kanan - <i>Hogging</i>	44
Gambar 4.10 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 2 <i>Rolling</i> Kanan - <i>Sagging</i>	44
Gambar 4.11 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 2 <i>Rolling</i> Kiri - <i>Hogging</i>	45
Gambar 4.12 <i>Hot Spot Area</i> Kondisi Pembebanan 2 <i>Rolling</i> Kiri - <i>Sagging</i>	45

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tipe Sambungan.....	15
Tabel 2.2 Faktor Konsentrasi Tegangan pada Sambungan <i>Stiffeners</i>	17
Tabel 3.1 Ukuran Utama FPSO	22
Tabel 3.2 <i>Rigid Link</i> Kedua Ujung Model	32
Tabel 3.3 Perhitungan Tekanan <i>Sloshing</i>	33
Tabel 3.4 Perhitungan <i>Bending Moment</i>	35
Tabel 4.1 Tegangan pada Kondisi Pembebanan 1.....	42
Tabel 4.2 Tegangan Pada Kondisi Pembebanan 2	46
Tabel 4.3 Tipe Sambungan untuk Menentukan SCF.....	46
Tabel 4.4 Nilai m , K_2 , dan S_q pada Kurva S-N	47
Tabel 4.5 Nilai Rentang Tegangan S_{Ri} (Kondisi Pembebanan 1).....	48
Tabel 4.6 Nilai untuk Menghitung <i>Cumulative Fatigue Damage</i>	48
Tabel 4.7 Perhitungan <i>Cumulative Fatigue Damage</i> (Kondisi Pembebanan 1).....	49
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan <i>Cumulative Fatigue Damage</i>	49
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan <i>Fatigue Life</i>	49

DAFTAR SIMBOL

ρ	= <i>density</i> muatan dalam ton/m ² , nilainya tidak boleh kurang dari 1.025
GM	= 0.24B, tinggi metacenter untuk perhitungan <i>sloshing</i> di cargo tank
B	= lebar <i>moulded</i>
h_{fill}	= tinggi pengisian sesuai CSR
h_{max}	= tinggi ruang muat dihitung dari <i>inner bottom</i>
g	= 9.81 m/s ²
b_{slh}	= lebar efektif <i>sloshing</i> sesuai CSR
GM	= tinggi metacenter
$r_{roll- gyr}$	= kisaran radius roll (<i>roll radius of gyration</i>)
f_{bk}	= 1.2 untuk kapal tanpa <i>bilge keel</i> = 1.0 untuk kapal dengan <i>bilge keel</i>
B	= lebar <i>moulded</i>
U_{roll}	= <i>roll period</i>
$M_{wv-h-mid}$	= M_{wv-h}
$M_{wv-s-mid}$	= M_{wv-s}
f_{nl-vh}	= 1.0 untuk perhitungan <i>fatigue</i>
f_{nl-vs}	= 1.0 untuk perhitungan <i>fatigue</i>
f_p	= $0.9[0.27 - (6 + 4f_T) L \times 10^{-5}]$ untuk perhitungan <i>fatigue</i>
f_m	= 0.0 untuk $x \leq 0$ = 1.0 untuk $0.4L \leq x \leq 0.65L$ = 0.0 untuk $x \geq L$, jika nilai f_m berada ditengah, maka harus dilakukan interpolasi
S	= Rentang tegangan
N	= Nilai prediksi dari <i>cycles</i> untuk gagal pada rentang tegangan S
m	= <i>Slope inverse negative</i> dari kurva S-N
log K	= Intersep dari log N-axis pada kurva S-N = $\log a - 2_{std}$, a dan std adalah konstan yang berhubungan dengan rata-rata kurva S-N dan standar deviasi dari log N.
S	= Rentang Tegangan
N	= Perkiraan jumlah siklus untuk gagal dibawah rentang tegangan S
m	= Konstanta yang bergantung pada jenis material dan las-lasan, jenis pembebanan, konfigurasi geometri dan kondisi lingkungan (udara atau air laut)
K_2	= Konstanta yang bergantung pada jenis material dan las-lasan, jenis pembebanan, konfigurasi geometri dan kondisi lingkungan (udara atau air laut)
R_{al}	= <i>Allowable stress</i>
K_g	= Faktor konsentrasi tegangan akibat bentuk kasar dari detil struktur
K_{tc}	= Faktor konsentrasi tegangan tambahan karena toleransi keanehan bentuk (biasanya hanya untuk sambungan pelat)
K_{ta}	= Faktor konsentrasi tegangan tambahan karena ketidaktepatan sudut
K_n	= Faktor konsentrasi tegangan tambahan untuk penguat yang tidak simetris
K_a	= Faktor konsentrasi tegangan akibat beban axial
K_b	= Faktor konsentrasi tegangan akibat <i>bending moment</i>
n_i	= jumlah <i>cycle</i> pada rentang tegangan S_i
N_i	= jumlah <i>cycle</i> menuju kegagalan pada rentang tegangan S_i
n_{tot}	= total jumlah rentang tegangan

DM_i	= <i>cumulative fatigue damage</i> untuk diterapkan pada kondisi pembebanan
i	= 1 untuk kondisi <i>full load</i> = 2 untuk kondisi <i>normal ballast</i>
N_L	= Jumlah <i>cycle</i> , pada umumnya memiliki nilai 0.6×10^8 dan 0.8×10^8 <i>cycles</i> untuk design life 25 tahun
f_0	= 0.85, faktor yang diambil dari perhitungan <i>non sailing time for operations</i> seperti saat <i>loading</i> dan <i>unloading</i> , perbaikan, dan lain-lain
U	= 0.788×10^9 , <i>design life</i> dalam detik untuk <i>design life</i> 25 tahun
L	= panjang konstruksi dalam meter
m	= parameter kurva S-N
K_2	= parameter kurva S-N
α_1	= 0.5 untuk kondisi <i>full load</i>
α_2	= 0.5 untuk kondisi <i>normal ballast</i>
S_{Ri}	= <i>stress range</i> pada probabilitas level dalam N/mm^2
N_R	= jumlah <i>cycle</i> berdasarkan probabilitas level
ξ	= <i>weibull probability distribution parameter</i>
Γ	= <i>gamma function</i>
μ_i	= koefisien diambil dari kurva S-N
S_q	= nilai tegangan pada <i>intersection</i> kurva S-N dalam N/mm^2
Δm	= slope dari kurva S-N
$\Upsilon(a,x)$	= <i>incomplete gamma function</i>
σ_{yd}	= <i>yield stress</i>
DM	= <i>cumulative fatigue damage</i> yang dihitung pada persamaan
Design life	= 25 tahun sesuai prosedur CSR

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Indonesia memiliki potensi yang besar pada pemanfaatan minyak mentah dunia. Saat ini Indonesia masih menduduki peringkat ke-24 dalam produksi minyak dunia, dengan angka produksi sebesar 825.000 *barrels per day* (BP,2016). Meningkatnya kebutuhan minyak dan gas sekarang ini berdampak pada pesatnya pencarian sumber minyak pada laut dalam, dikarenakan jumlah minyak di laut dangkal sudah mulai habis. Seiring dengan habisnya persediaan minyak di laut dangkal, sekarang ini banyak digunakan *floating structure* untuk menjangkau laut dalam. Salah satunya adalah pemanfaatan FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). FPSO merupakan fasilitas terapung berbentuk sebuah kapal, baik itu bangunan baru maupun hasil konversi dari kapal tanker. Kapal-kapal tanker sendiri memiliki resiko kecelakaan yang sangat tinggi, bukan hanya karena muatan yang berbahaya dan mudah terbakar, tapi juga akibat dari faktor lain yaitu berupa beban lingkungan.

Kerusakan struktur bangunan laut umumnya diakibatkan oleh kelelahan (*fatigue*). Kelelahan sendiri adalah kecenderungan suatu struktur untuk mengalami kerusakan bahkan patah akibat mendapat beban berulang. Disamping itu faktor-faktor operasi lain pada tingkat tertentu juga dapat menambah beban siklis, sehingga keadaan struktur bertambah kritis (Djatkiko, 2003). Kerusakan pada FPSO akan mengganggu masa operasi yang mengakibatkan FPSO tidak berfungsi sebagaimana mestinya yang akan menimbulkan kerugian, selain itu kerusakan yang diakibatkan oleh kelelahan akan memakan biaya reparasi dan perawatan yang relatif besar. Pada tugas akhir ini FPSO yang dianalisis merupakan konversi kapal tanker yang pertama kali beroperasi pada tahun 1999, dan dikonversi menjadi FPSO pada tahun 2016 yang akhirnya beroperasi di perairan Selat Madura sejak tahun 2016 sampai sekarang.

Oleh karena itu analisis kelelahan dan perhitungan sisa umur pada suatu struktur merupakan cara yang efisien untuk menghindari kegagalan akibat kelelahan selama masa pengoperasian. Analisis tersebut difokuskan pada bagian dengan kemungkinan besar terjadinya kelelahan. Salah satu detail struktur yang harus diperiksa adalah bagian sambungan *bracket*

pada gading besar di ruang muat. Perhitungan kelelahan pada FPSO ini mengacu pada *Common Structural Rules*, dikarenakan FPSO tersebut merupakan hasil konversi dari kapal tanker.

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah:

- 1) Seberapa besar beban-beban yang terjadi pada FPSO yang menyebabkan kelelahan pada konstruksi ruang muat FPSO?
- 2) Bagaimana cara melakukan analisis kelelahan menggunakan *software finite element*?
- 3) Bagaimana cara menghitung umur kelelahan dari konstruksi ruang muat FPSO?
- 4) Berapakan perkiraan sisa umur dari FPSO 100.000 DWT?

1.3. Tujuan

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah:

- 1) Mengetahui besar beban-beban yang mempengaruhi FPSO sehingga menyebabkan kelelahan pada konstruksi ruang muat FPSO,
- 2) Mendapatkan tegangan kritis yang kemudian digunakan untuk analisis *fatigue*,
- 3) Menghitung *fatigue life* dari konstruksi ruang muat FPSO sesuai dengan persyaratan pada *Common Structural Rules* (CSR),
- 4) Mengetahui sisa umur dari konstruksi ruang muat FPSO.

1.4. Batasan Masalah

Dalam pengerjaan tugas akhir ini difokuskan pada:

- 1) Analisis kelelahan dilakukan pada FPSO hasil konversi dari kapal tanker,
- 2) Beban-beban yang digunakan:
 - a. Beban Muatan
 - b. Beban *Vertical Bending Moment*
- 3) Kondisi pembebanan:
 - a. Kondisi muatan pada setengah tinggi ruang muat (0.5h)
 - b. Kondisi muatan penuh (h)
- 4) Pemodelan dilakukan dengan bantuan *software finite element*,
- 5) Bagian FPSO yang dimodelkan adalah tiga ruang muat di *midship*,
- 6) Faktor korosi diabaikan.

1.5. Manfaat

Manfaat pengerjaan tugas akhir ini adalah:

- 1) Memberikan pemahaman tentang perhitungan beban-beban siklis yang terjadi pada FPSO
- 2) Dari hasil analisis kelelahan akan diperoleh data-data dan informasi yang diperlukan untuk strategi perencanaan pemeriksaan berkala.

1.6. Hipotesis

Umur konstruksi FPSO lebih dari *design life* yaitu 25 tahun. Mengingat FPSO ini sudah dibangun dan beroperasi sejak tahun 1999 kemudian dikonversi pada tahun 2016, dan FPSO tersebut dikontrak selama 10 tahun untuk beroperasi diperairan selat Madura, sehingga setidaknya FPSO akan memiliki kekuatan umur yang cukup untuk menjalani masa operasinya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

STUDI LITERATUR

2.1. Dasar Teori

Dalam tugas akhir ini, penelitian dilakukan menggunakan dasar teori perhitungan pembebanan berdasarkan pendekatan-pendekatan perhitungan yang dijelaskan dalam *Common Structural Rules for Double Oil Tanker 2014*. Dalam bab ini juga akan dijelaskan teori-teori yang berhubungan dengan penelitian tugas akhir ini dan persamaan dari tinjauan pustaka yang menjadi acuan dalam penelitian ini.

2.1.1. *Floating Production Storage and Offloading*

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) merupakan sebuah kapal yang dirancang khusus untuk melakukan proses produksi, menyimpan, serta melakukan proses *offloading* minyak mentah. Minyak mentah ini berasal dari *platform* yang dipindahkan atau disalurkan ke FPSO melalui *flexible hoses*. Secara fisik FPSO merupakan kapal tanker, karena tidak sedikit FPSO merupakan hasil konversi dari kapal tanker, hanya fungsinya yang membedakan dengan kapal tanker pada umumnya. Untuk pemilihan kapal yang akan di konversi tentunya ada beberapa pertimbangan, salah satunya adalah umur kapal lebih baik sudah di atas 15 tahun. Kapal tanker yang berumur kurang dari 15 tahun dianggap masih berada pada umur yang produktif dalam masa pengoperasiannya dan menguntungkan suatu perusahaan.

Keberadaan FPSO sendiri sangatlah menguntungkan dalam industri *oil and gas*, dikarenakan bisa ditempatkan sedekat mungkin dengan area sumur pengeboran yang sekarang ini banyak terdapat di lepas pantai. Umumnya *offshore* yang menggunakan FPSO merupakan lapangan yang baru mulai beroperasi sehingga belum memiliki fasilitas produksi yang terpisah.

Dalam tugas akhir ini FPSO yang digunakan merupakan FPSO 107160 DWT yang beroperasi pada perairan di Selat Madura.

Pada Gambar 2.1 ini merupakan *layout* aliran gas, dari mulai diambil pada *platform* kemudian diproses diatas FPSO sampai ke *Gas Metering Station* yang terletak di Pasuruan, Jawa Timur.



Gambar 2.1 *Layout Aliran Gas*

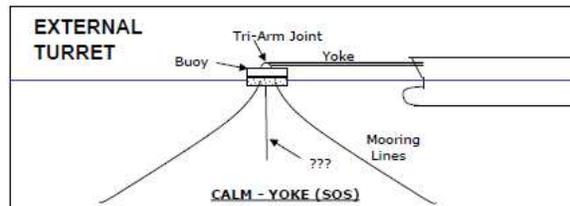
FPSO memiliki beberapa komponen penunjang, yaitu:

1) *Mooring System*

Mooring system atau sistem tambat merupakan sistem yang dipasang pada FPSO untuk menahan gerakan yang diakibatkan oleh gaya dari lingkungan. Ada beberapa jenis sistem tambat yang dapat digunakan, yaitu:

a. *Single Buoy Mooring / Single Point System*

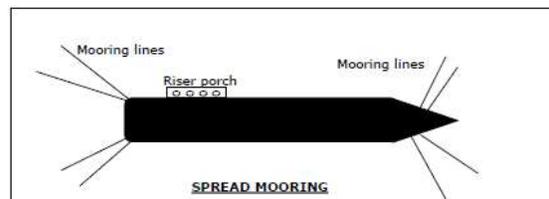
Pada Gambar 2.2 menunjukkan sistem SBM, dimana kapal akan ditambatkan pada suatu *bow hawser* dan memungkinkan kapal untuk berputar 360 sesuai dengan arah arus dan gelombang air laut.



Gambar 2.2 *Single Buoy Mooring System*

b. *Spread Mooring System*

Sistem ini lebih membatasi gerak kapal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, dikarenakan tali tambat yang disebar pada beberapa bagian kapal.



Gambar 2.3 *Spread Mooring System*

2) *Riser*

Riser berfungsi untuk mengalirkan fluida dari *Well Head Platform* (WHP) menuju tempat proses atau tempat penyimpanan sementara. Pada FPSO ini digunakan sistem *flexible riser*.

3) *Offloading System*

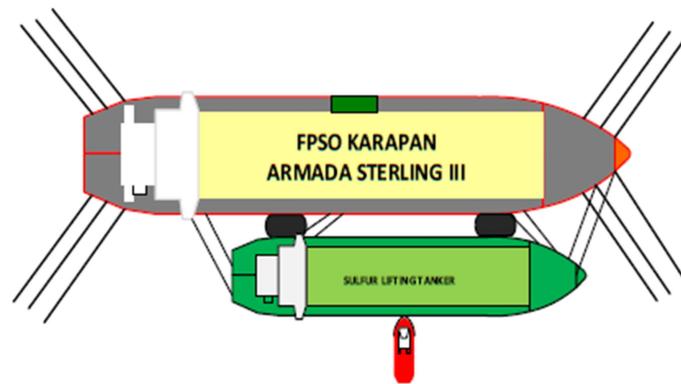
Setelah gas di proses, gas akan diambil oleh kapal tanker. Dalam proses pemindahan gas dari FPSO ke kapal tanker digunakan beberapa sistem *offloading* atau pemindahan. Dalam proses ini dapat dilakukan secara langsung (*direct*) atau tidak langsung (*indirect*).

a. *Direct*

Pada proses pemindahan secara langsung ada dua cara yang digunakan, yaitu secara *side by side* dan *tandem*.

i. *Side by side*

Proses *offloading* seperti pada Gambar 2.4 ini dilakukan dengan cara objek kapal yang akan membawa hasil proses akan berada bersebalahan dengan FPSO.



Gambar 2.4 *Offloading System FPSO KAS III*
Sumber: *Husky-CNOOC Madura Limited*

ii. *Tandem*

Proses *offloading* secara tandem, akan memosisikan objek kapal pengangkut berada sejajar pada satu garis dengan FPSO pada jarak tertentu. Posisi objek kapal dengan FPSO bisa *stern to bow* atau *bow to bow*.

b. *Indirect*

Proses *offloading* dengan cara *indirect* ini menggunakan *offloading station* yang biasa dipasang dekat dengan FPSO. *Offloading station* ini biasanya berupa SBM (*Single Buoy Mooring*).

2.1.2. Kekuatan Kelelahan

Kelelahan (*fatigue*) merupakan akumulasi dari kerusakan material yang disebabkan oleh beban siklis (Bai, 2003). Bagian-bagian struktur konstruksi kapal harus mampu menahan tegangan akibat beban yang diterimanya selama masa operasi. Pada struktur bangunan laut salah satunya adalah perubahan tegangan yang diakibatkan oleh gelombang, getaran, dan beban lingkungan lainnya. Proses kelelahan dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1) *Initial Crack*

Tahap *initial crack* ditandai pada kondisi cacat las tertentu, baik dalam *base metal* atau *filler metal* maupun dipermukaan las. Cacat las ini dapat memicu perambatan retak.

2) *Crack Growth*

Teori *Fracture Mechanics* (mekanika kepecahan) biasanya dijadikan acuan untuk memodelkan perambatan retak (*crack growth*). Parameter utama dalam perambatan retak ini adalah rentang tegangan pada detail struktur yang dianalisis. Bentuk geometri dari las-lasan serta ukuran dari *initial crack* berdampak besar pada umur kelelahan dari detail struktur. Pada struktur las-lasan, *fatigue cracks* selalu berawal dari cacat las.

3) *Final Fracture Failure*

Pada tahap ini, kegagalan terjadi apabila ukuran retak telah mencapai ukuran kritisnya. Pada analisis kelelahan, fase kegagalan tersebut didefinisikan dalam hasil pengujian dalam bentuk diagram kurva S-N. Berdasarkan jumlah siklus kegagalan yang dibutuhkan, kelelahan dibagi kedalam dua jenis, yaitu:

a. *High-cycle (low stress) fatigue*

b. *Low-cycle (high stress) fatigue*

Kegagalan kelelahan didefinisikan sebagai *low-cycle fatigue* apabila jumlah siklus yang menyebabkan kegagalan besarnya kurang dari 10^4 siklus. Pada *high-cycle fatigue*, jumlah yang dibutuhkan untuk mencapai kegagalan dapat

mencapai jutaan kali. Pada struktur bangunan laut, *high-cycle fatigue* menjadi perhatian utama.

2.1.3. Perhitungan Kelelahan

Secara umum ada dua metode yang dapat digunakan untuk analisis kelelahan, yaitu pendekatan kurva S-N (*S-N curve approach*) yang dibuat berdasarkan tes kelelahan dan pendekatan mekanika kepecahan (*fracture mechanics approach*). Untuk tujuan desain kelelahan, pendekatan kurva S-N lebih banyak digunakan dan dianggap sebagai metode yang lebih cocok. Sedangkan untuk metode pendekatan mekanika kepecahan digunakan untuk menentukan ukuran cacat, menentukan perambatan retak, merencanakan inspeksi dan strategi untuk memperbaiki.

Perhitungan kelelahan harus dilakukan pada setiap lokasi yang berpotensi terjadi keretakan. Menurut *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker* (2014), lokasi yang harus ditinjau untuk dianalisis kelelahannya dapat dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu:

1) *Longitudinal Structure*

Analisis kelelahan harus dilakukan pada akhir sambungan antara penegar memanjang (*longitudinal stiffeners*) dengan sekat melintang, termasuk *swash bulkhead* dan gading besar pada daerah ruang muat, pada alas, *inner bottom*, sisi, sekat memanjang dan geladak.

2) *Transverse Structure*

Analisis kelelahan harus dilakukan pada akhir sambungan antara *inner bottom plate* dengan *hopper plate*.

2.1.4. Beban dan Tegangan Kelelahan

Selama masa operasinya, struktur konstruksi bangunan apung akan mendapatkan beban yang beragam. Besar serta arah beban-beban yang beragam yang didapat oleh struktur konstruksi tersebut akan berakibat pada timbulnya tegangan yang bervariasi yang kemudian nantinya mengarah pada kerusakan kelelahan. Beban kelelahan merupakan salah satu parameter yang di analisis dalam perhitungan kelelahan (*fatigue*). Beban yang dimaksud adalah beban jangka panjang selama proses kerusakan akibat kelelahan yang terjadi. Beban-beban yang harus dipertimbangkan diantaranya adalah:

1) Beban mati (*dead load*)

Beban mati merupakan beban dari semua komponen kering serta peralatan, perlengkapan, dan permesinan yang tidak berubah dari mode operasi pada satu struktur.

2) Beban hidup (*live load*)

Beban hidup adalah beban yang terjadi pada struktur selama digunakan dan berubah dari mode operasi satu ke mode operasi yang lain.

3) Beban akibat kecelakaan (*accidental load*)

Beban kecelakaan merupakan beban yang tidak dapat diduga sebelumnya yang terjadi pada struktur.

4) Beban lingkungan (*environmental load*)

Beban lingkungan merupakan beban yang terjadi karena dipengaruhi oleh lingkungan dimana struktur bangunan laut tersebut dioperasikan. Beberapa beban lingkungan yang berpengaruh adalah beban angin, beban gelombang, dan beban arus.

2.1.5. Kondisi Pembebanan

Menurut *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker*, beban dibagi menjadi 4 macam, yaitu beban statis, beban dinamis, beban *sloshing*, dan beban *impact*. Dalam tugas akhir ini, penulis menggunakan beban *sloshing* muatan dengan variasi muatan dan pengaruh akibat gerak *rolling* kapal serta beban statis dari momen lengkung akibat gelombang air laut.

1) Beban *Sloshing*

Beban *sloshing* diakibatkan oleh pergerakan bebas cairan pada tangki akibat gerakan kapal baik secara memanjang maupun secara melintang. Dalam tugas akhir ini, penulis menggunakan beban *sloshing* akibat pergerakan kapal searah memanjang atau gerak *rolling* kapal. Berdasarkan *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker Section 7*, beban *sloshing* sendiri dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{slh-t} = 7 \rho g f_{slh} \left(\frac{b_{slh}}{B} - 0.3 \right) GM^{0.75} \quad \text{kN/m}^2 \quad (2.1)$$

Dimana:

ρ = *density* muatan dalam ton/m², nilainya tidak boleh kurang dari 1.025

GM = 0.24B, tinggi *metacenter* untuk perhitungan *sloshing* di *cargo tank*

$$f_{slh} = 1 - 2 \left(0.7 - \frac{h_{fill}}{h_{max}} \right)^2 \quad (2.2)$$

B = lebar *moulded*

h_{fill} = tinggi pengisian sesuai CSR

h_{max} = tinggi ruang muat dihitung dari *inner bottom*

g = 9.81 m/s²

b_{slh} = lebar efektif *sloshing* sesuai CSR

Beban *sloshing* akibat gerakan muatan searah melintang merupakan nilai yang konstan untuk tiap tinggi pengisian. (CSR Section 7, 2014)

2) Roll Motion

Untuk mengetahui *roll angle* atau sudut derakan *roll* berdasarkan periode natural *roll* kapal, digunakan perhitungan *roll motion* dengan rumus pendekatan sesuai CSR for Double Hull Oil Tanker Section 7 sebagai berikut:

$$U_{roll} = \frac{2.30 r_{roll-gyr}}{\sqrt{GM}} \quad \text{secs} \quad (2.3)$$

Dimana:

GM = tinggi metacenter

$r_{roll-gyr}$ = kisaran radius *roll (roll radius of gyration)*

selanjutnya perhitungan *roll angle* menggunakan rumus pendekatan sebagai berikut:

$$\theta = \frac{50}{B + 75} (1.25 - 0.025 U_{roll}) f_{bk} \quad \text{rads} \quad (2.4)$$

Dimana:

f_{bk} = 1.2 untuk kapal tanpa *bilge keel*

= 1.0 untuk kapal dengan *bilge keel*

B = lebar *moulded*

U_{roll} = *roll period*

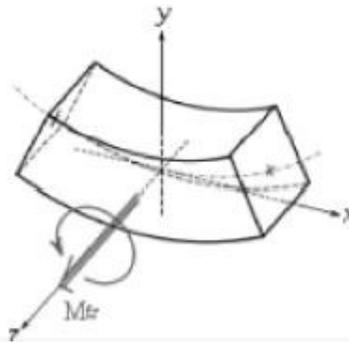
Dalam tugas akhir ini variasi kondisi tinggi pengisian muatan yang digunakan dibagi menjadi 2 kondisi yaitu, saat muatan terisi setengah penuh dari tinggi ruang muat (0.5h) dan saat ketinggian muatan penuh (h). Sedangkan untuk sudut *roll* θ (*roll angle*) dari *natural roll period* kapal yang telah dihitung berdasarkan pendekatan pada CSR, *roll angle* yang digunakan adalah sebesar 30°. Perhitungan beban *sloshing* dan *roll motion* lebih jelasnya dapat dilihat pada bab lampiran.

2.1.6. Momen Lengkung

Pada saat pengoperasiannya, sebuah kapal akan mengalami berbagai macam kondisi gelombang laut. Gerakan kapal terhadap arah gerak gelombang dikelompokkan menjadi tiga arah utama, yaitu *head seas*, *quartering seas*, dan *beam seas* (Santosa&Setyawan, 2013). Akibat dari olah gerak kapal tersebut, beban yang terjadi akan mengakibatkan beban lengkung atau beban momen.

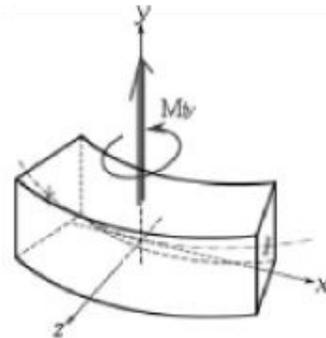
Momen lengkung tersebut mengacu pada dua sumbu, untuk lengkungan horizontal mengacu pada *centerline* dan untuk lengkungan vertikal mengacu pada *neutral axis*. Tentunya besar dari momen lengkung tersebut bergantung pada persebaran berat dari kapal.

Pada Gambar 2.5 momen lengkung vertikal merupakan beban pada kapal yang diakibatkan oleh pembebanan yang distribusinya bervariasi terhadap memanjang kapal dan mengakibatkan momen lengkung terhadap sumbu y.



Gambar 2.5 Momen Lengkung Vertikal

Pada Gambar 2.6 momen lengkung horizontal merupakan beban pada kapal yang diakibatkan oleh pembebanan bervariasi dari sisi kapal. Distribusi beban tersebut mengakibatkan gaya lintang pada kapal dan mengakibatkan momen lengkung terhadap sumbu z (Santosa&Setyawan, 2013)



Gambar 2.6 Momen Lengkung Horizontal

Dalam tugas akhir ini, momen lengkung yang akan digunakan adalah momen lengkung secara vertikal. Momen lengkung vertikal sendiri terdiri dari dua jenis kondisi gelombang, yaitu kondisi *hogging* dan kondisi *sagging*. Persamaan untuk menghitung momen lengkung secara vertikal terdapat pada *CSR for Double Hull Oil Tanker Chapter 4 Section 4*, yaitu sebagai berikut:

Kondisi *hogging*:

$$M_{sw-h-min} = f_{sw} (171C_w L^2 B(C_B + 0.7)10^{-3} - M_{wv-h-mid}) \quad (2.5)$$

$$M_{wv-h} = 0.19 f_{nl-vh} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad (2.6)$$

Kondisi *sagging*:

$$M_{sw-s-min} = -0.85 f_{sw} (171C_w L^2 B(C_B + 0.7)10^{-3} + M_{wv-s-mid}) \quad (2.7)$$

$$M_{wv-s} = -0.19 f_{nl-vs} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad (2.8)$$

Dimana:

$$M_{wv-h-mid} = M_{wv-h}$$

$$M_{wv-s-mid} = M_{wv-s}$$

$$f_{nl-vh} = 1.0 \text{ untuk perhitungan } \textit{fatigue}$$

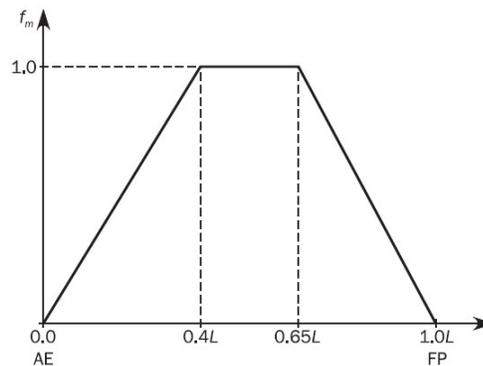
$$f_{nl-vs} = 1.0 \text{ untuk perhitungan } \textit{fatigue}$$

$$f_p = 0.9[0.27 - (6 + 4f_T) L \times 10^{-5}] \text{ untuk perhitungan } \textit{fatigue}$$

$$f_m = 0.0 \text{ untuk } x \leq 0$$

$$= 1.0 \text{ untuk } 0.4L \leq x \leq 0.65L$$

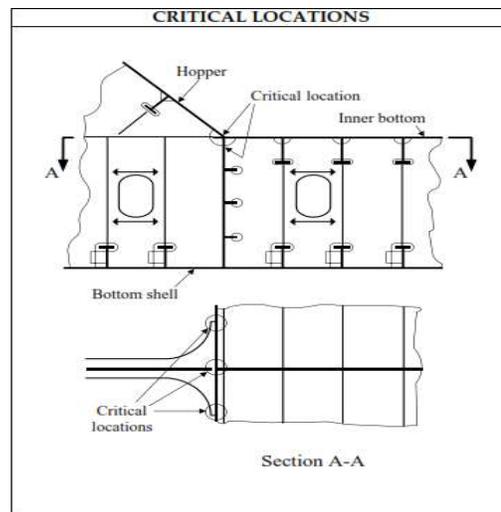
= 0.0 untuk $x \geq L$, jika nilai f_m berada ditengah, maka harus dilakukan interpolasi, dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Faktor Distribusi f_m
Sumber: *CSR for Double Hull Oil Tanker*

2.1.7. Hot Spot Area

Dalam *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker (2014) Appendix C* ditentukan bahwa area yang dinyatakan sebagai area kritis (*hot spot area*) ada 4, yaitu sambungan *inner bottom* dengan *hopper tank* (tanpa *bracket*), sambungan antara *inner bottom* dengan *hopper tank* (dengan *bracket*), sambungan antara *inner bottom* dengan *hopper tank* (pelat dibengkokkan), dan sambungan antara *horizontal girder* dengan *inner hull*. Dijelaskan juga bahwa tiap detail konstruksi yang berpotensi terjadi *fatigue crack* termasuk kedalam area kritis. Salah satu contoh area kritis sambungan *inner bottom* dengan *hopper tank* (tanpa *bracket*) dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Hot Spot Area

Sumber: *CSR for Double Hull Oil Tanker, 2014*

2.1.8. Desain Kurva S-N

Untuk analisis kelelahan berdasarkan pendekatan tegangan nominal, sambungan las dibagi menjadi beberapa *class*. Tiap *class* memiliki desain kurva S-N masing-masing yang berbeda. Pada struktur sambungan las, kurva S-N merupakan cara paling umum yang digunakan dalam menentukan kapasitas kelelahan. Kurva S-N menunjukkan hubungan antara rentang tegangan (S) dari tegangan nominal terhadap jumlah siklus yang dialami untuk mencapai kegagalannya (N). Jumlah siklus kegagalan diperoleh berdasarkan pengujian beban amplitudo konstan terhadap material yang diujikan hingga terjadi kegagalan (Owen & Jeom, 2010).

Setiap detail konstruksi yang berpotensi terjadi *fatigue crack* harus ditempatkan pada *class* sambungan yang tepat berdasarkan kriteria yang telah disebutkan dalam *codes*. *Basic design* dari kurva S-N dalam CSR dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\log N = \log K_2 - m \log S \quad (2.9)$$

Dimana:

S = Rentang tegangan

N = Nilai prediksi dari *cycles* untuk gagal pada rentang tegangan S

m = *Slope inverse negative* dari kurva S-N

log K = Intersep dari log N-axis pada kurva S-N = $\log a - 2\text{std}$, a dan std adalah konstan yang berhubungan dengan rata-rata kurva S-N dan standar deviasi dari log N.

Untuk detail struktur kapal, kurva S-N digambarkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S^m \cdot N = K_2 \quad (2.10)$$

Dimana:

S = Rentang Tegangan

N = Perkiraan jumlah siklus untuk gagal dibawah rentang tegangan S

m = Konstanta yang bergantung pada jenis material dan las-lasan, jenis pembebanan, konfigurasi geometri dan kondisi lingkungan (udara atau air laut)

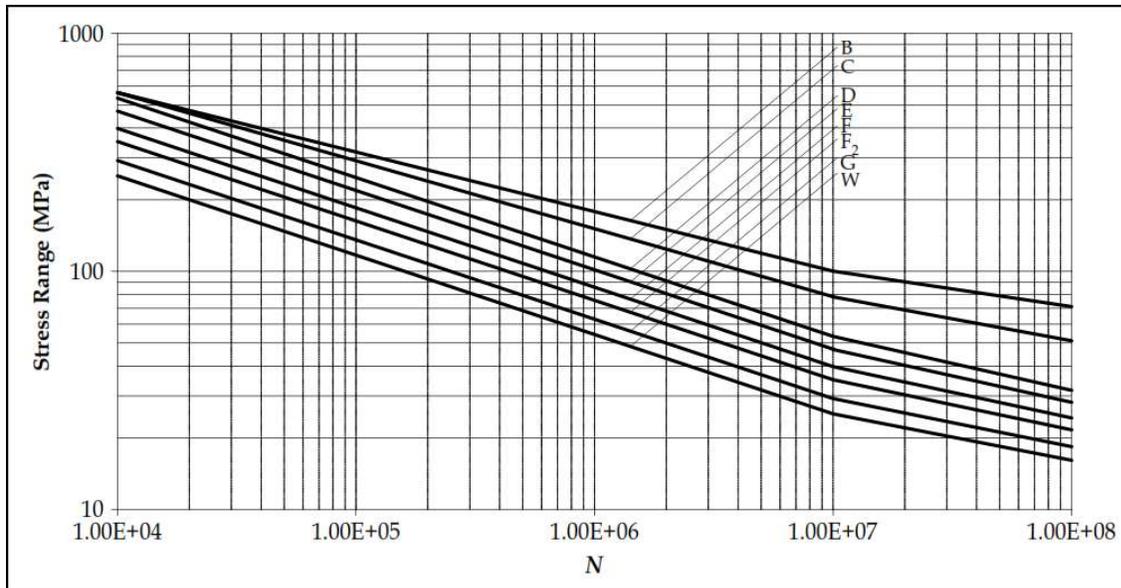
K_2 = Konstanta yang bergantung pada jenis material dan las-lasan, jenis pembebanan, konfigurasi geometri dan kondisi lingkungan (udara atau air laut)

Nilai K_2 dan m berbeda untuk tiap jenis sambungan, nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tipe Sambungan (*CSR for Double Hull Oil Tanker, 2014*)

Class	K_1			m	Standard Deviation		K_2	S_q N/mm ²
		\log_{10}	\log_e		\log_{10}	\log_e		
B	2.343 E15	15.3697	35.3900	4.0	0.1821	0.4194	1.01E15	100.2
C	1.082 E14	14.0342	32.3153	3.5	0.2041	0.4700	4.23E13	78.2
D	3.988 E12	12.6007	29.0144	3.0	0.2095	0.4824	1.52E12	53.4
E	3.289 E12	12.5169	28.8216	3.0	0.2509	0.5777	1.04E12	47.0
F	1.726 E12	12.2370	28.1770	3.0	0.2183	0.5027	0.63E12	39.8
F ₂	1.231 E12	12.0900	27.8387	3.0	0.2279	0.5248	0.43E12	35.0
G	0.566E12	11.7525	27.0614	3.0	0.1793	0.4129	0.25E12	29.2
W	0.368 E12	11.5662	26.6324	3.0	0.1846	0.4251	0.16E12	25.2

Kurva S-N merepresentasikan batas bawah dari sebaran data sebesar 95% dari semua hasil uji yang dilakukan. Gambar 2.9 dibawah ini adalah bentuk kurva S-N untuk sambungan las.



Gambar 2.9 Kurva S-N Sambungan Las
 Sumber: *CSR for Double Hull Oil Tanker*, 2014

Pada umumnya, struktur kapal memiliki detail sambungan las yang cocok dengan *class* F dan F2. Berdasarkan *Common Structural Rules Appendix C 1.5.1*, tipe *class* yang cocok digunakan untuk analisis titik kritis sambungan las dalam tugas akhir ini adalah *class* F. Untuk pemilihan tipe sambungan dapat dilihat di bagian pembahasan. Dan untuk tegangan ijin yang telah ditetapkan oleh CSR untuk *class* F adalah sebagai berikut:

$$R_{al} = 0.17L + 86 \quad (2.11)$$

2.1.9. Faktor Konsentrasi Tegangan (*Stress Concentration Factor*)

Stress Concentration Factor atau Faktor Konsentrasi Tegangan adalah konsentrasi tegangan yang terjadi pada detail struktur akibat adanya diskontinuitas. Tujuan dari dilakukannya analisis ini adalah untuk menghitung rentang tegangan pada kaki las (*hot spot*) $\sigma_{hotspot}$. Perhitungan *Stress Concentration Factor* dinyatakan sebagai berikut:

$$K = \frac{\sigma_{hotspot}}{\sigma_{nominal}} \quad (2.12)$$

Dari persamaan diatas dapat dinyatakan bahwa *stress concentration factor* adalah rasio perbandingan antara rentang tegangan *hotspot* dengan rentang tegangan nominal. Semua tegangan yang naik harus diperhatikan saat mengevaluasi *stress concentration factor* (*SCF*). Hasil akhir dari persamaan *SCF* adalah sebagai berikut:

$$K = K_g \cdot K_{te} \cdot K_{ta} \cdot K_n \quad (2.13)$$

Dimana:

K_g = Faktor konsentrasi tegangan akibat bentuk kasar dari detil struktur

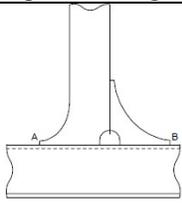
K_{te} = Faktor konsentrasi tegangan tambahan karena toleransi keanehan bentuk (biasanya hanya untuk sambungan pelat)

K_{ta} = Faktor konsentrasi tegangan tambahan karena ketidaktepatan sudut

K_n = Faktor konsentrasi tegangan tambahan untuk penguat yang tidak simetris pada panel yang mendapat beban dari samping, dapat dipakai saat tegangan nominal didapat dari analisis balok sederhana

CSR (2014) telah membuat tabulasi untuk menentukan faktor konsentrasi tegangan pada sambungan *stiffeners*, dan untuk faktor konsentrasi tegangan yang digunakan untuk tugas akhir ini berdasarkan tipe sambungannya adalah seperti pada Tabel 2.2. Untuk daftar tipe sambungan selengkapnya dapat dilihat pada bagian lampiran.

Tabel 2.2 Faktor Konsentrasi Tegangan pada Sambungan *Stiffeners*

Tipe Sambungan	SCF				K	
	Point "A"		Point "B"		Point "A"	Point "B"
	K_a	K_b	K_a	K_b		
	1.28	1.34	1.28	1.34	1.7152	1.7152

Dimana:

K_a = Faktor konsentrasi tegangan akibat beban axial

K_b = Faktor konsentrasi tegangan akibat *bending moment*

2.1.10. Konsep Perhitungan *Fatigue*

Secara umum terdapat dua metode pendekatan yang dipakai dalam analisis kelelahan (*fatigue*), yaitu metode pendekatan *stress life* dan metode pendekatan *fracture mechanics*.

Menurut Paik dan Thayambali (2007) analisis *fatigue* dengan menggunakan pendekatan *stress life* (S-N Curve) dapat dilakukan dengan tiga langkah sebagai berikut:

- 1) Mendefinisikan siklus rentang tegangan
- 2) Memilih kurva S-N yang sesuai dengan karakteristik material
- 3) Menghitung kumulatif kerusakan *fatigue* (*cummulative fatigue damage*)

Perhitungan *fatigue* dari struktur kapal tanker ini berdasarkan penerapan aturan *Palmgren-Miner Cumulative Damage* dimana ketika *fatigue damage ratio*, DM memiliki nilai

lebih dari 1 maka dapat dipastikan bahwa struktur tersebut tidak diterima atau mengalami kegagalan (*CSR Chapter 9 Section 3*). Nilai DM dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$DM = \sum_{i=1}^{i=n_{tot}} \frac{n_i}{N_i} \quad (2.14)$$

Dimana:

n_i = jumlah *cycle* pada rentang tegangan S_i

N_i = jumlah *cycle* menuju kegagalan pada rentang tegangan S_i

n_{tot} = total jumlah rentang tegangan

Perhitungan kekuatan kelelahan dari sambungan las dibagi menjadi 3 tahapan, yaitu:

1. Perhitungan *stress range*
2. Pemilihan desain kurva S-N yang sesuai
3. Perhitungan *cumulative damage*

Nilai total dari *fatigue damage ratio* DM harus memiliki nilai kurang dari 1 untuk umur kapal yang didesain dan memiliki nilai umur tidak kurang dari 25 tahun.

Untuk mencari nilai *cumulative damage* pada kondisi pembebanan digunakan persamaan sebagai berikut:

$$DM = \sum_{i=1}^2 DM_i \quad (2.15)$$

Dimana:

DM_i = *cumulative fatigue damage* untuk diterapkan pada kondisi pembebanan

i = 1 untuk kondisi *full load*

= 2 untuk kondisi *normal ballast*

Dalam tugas akhir ini *cumulative fatigue damage* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$DM_i = \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \quad (2.16)$$

Dimana:

$$N_L = \frac{f_0 U}{4 \log L} \quad (2.17)$$

jumlah *cycle*, pada umumnya memiliki nilai 0.6×10^8 dan 0.8×10^8 *cycles* untuk *design life* 25 tahun

- f_0 = 0.85, faktor yang diambil dari perhitungan *non sailing time for operations* seperti saat *loading* dan *unloading*, perbaikan, dan lain-lain
 U = 0.788×10^9 , *design life* dalam detik untuk *design life* 25 tahun
 L = panjang konstruksi dalam meter
 m = parameter kurva S-N
 K_2 = parameter kurva S-N
 α_1 = 0.5 untuk kondisi *full load*
 α_2 = 0.5 untuk kondisi *normal ballast*
 S_{Ri} = *stress range* pada probabilitas *level* dalam N/mm^2
 N_R = 10^4 , jumlah *cycle* berdasarkan probabilitas *level*
 ξ = *weibull probability distribution parameter*
 Γ = *gamma function*
 μ_i = koefisien diambil dari kurva S-N

$$\mu_i = 1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)} \quad (2.18)$$

$$\nu_i = \left(\frac{S_q}{S_{Ri}} \right)^\xi \ln N_R \quad (2.19)$$

- S_q = nilai tegangan pada *intersection* kurva S-N dalam N/mm^2
 Δm = *slope* dari kurva S-N
 $\gamma(a,x)$ = *incomplete gamma function*

Nilai DM dari persamaan diatas akan digunakan untuk menentukan umur kelelahan struktur sambungan dengan perhitungan umur kelelahan (*fatigue life*) yaitu:

$$Fatigue\ life = \frac{Design\ life}{DM} \quad years \quad (2.20)$$

Dimana:

- DM = *cumulative fatigue damage* yang dihitung pada persamaan
 $Design\ life$ = 25 tahun sesuai prosedur *CSR*

2.2. Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka dilakukan sebagai acuan dari penelitian sebelumnya. Dengan meninjau pada beberapa penelitian yang pernah dilakukan, diharapkan dapat diperoleh

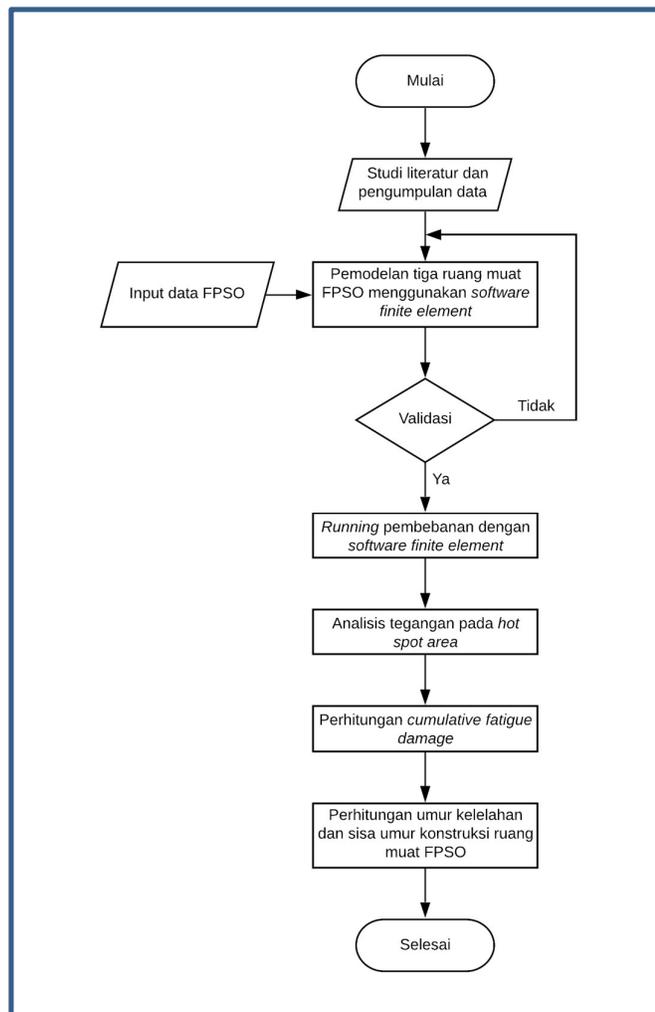
informasi serta data yang berguna pada penelitian kali ini. Beberapa literatur yang ditinjau untuk dijadikan acuan pada penelitian kali ini, yaitu:

1. (Septiana, 2012) melakukan analisis umur kelelahan pada *bracket* kapal tanker *single hull* menggunakan *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker*. Analisis dilakukan pada lokasi *bracket*. Beban yang digunakan dalam penelitian yang dilakukan merupakan beban statis tangki serta beban dinamis gelombang dengan enam kondisi pembebanan. Hasil menunjukkan bahwa umur kelelahan terendah yaitu 26 tahun pada kondisi kedua.
2. Pada penelitian (Rusdi, 2018) melakukan analisis umur kelelahan pada *bracket* kapal tanker *double hull* menggunakan *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker*. Beban yang digunakan adalah beban *sloshing* dari muatan tangki. Pembebanan dilakukan dengan variasi tinggi pengisian muatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa umur kelelahan terendah terjadi ketika pengisian muatan setinggi 0.7h.

BAB 3 METODOLOGI

3.1. Bagan Alir

Secara umum metodologi penelitian dalam pengerjaan Tugas Akhir ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir

3.2. Studi Literatur

Studi literatur dalam tugas akhir ini dilakukan untuk memahami permasalahan yang ada. Studi literatur pada tugas akhir ini berkaitan dengan pemahaman cara menghitung *fatigue life* menggunakan pemodelan *software finite element*. Selain itu, studi literatur dilakukan untuk

memahami teori-teori yang berkaitan dengan *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO), beban *sloshing*, momen lengkung, tegangan, dan kurva S-N. Studi literatur dilakukan dengan menggunakan buku-buku referensi, internet *browsing*, dan regulasi yang digunakan, dalam hal ini adalah *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker* (2014). Kemudian literatur-literatur tersebut digunakan sebagai acuan dalam tugas akhir ini.

3.3. Pengumpulan Data

Selanjutnya yang diperlukan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah melakukan pengumpulan data. Hal ini dilakukan guna untuk memperoleh data primer dan/atau data sekunder yang berkaitan dengan kasus yang akan dikaji dalam tugas akhir ini. Data yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah ukuran utama FPSO, data-data konstruksi FPSO, serta data lingkungan tempat FPSO beroperasi.

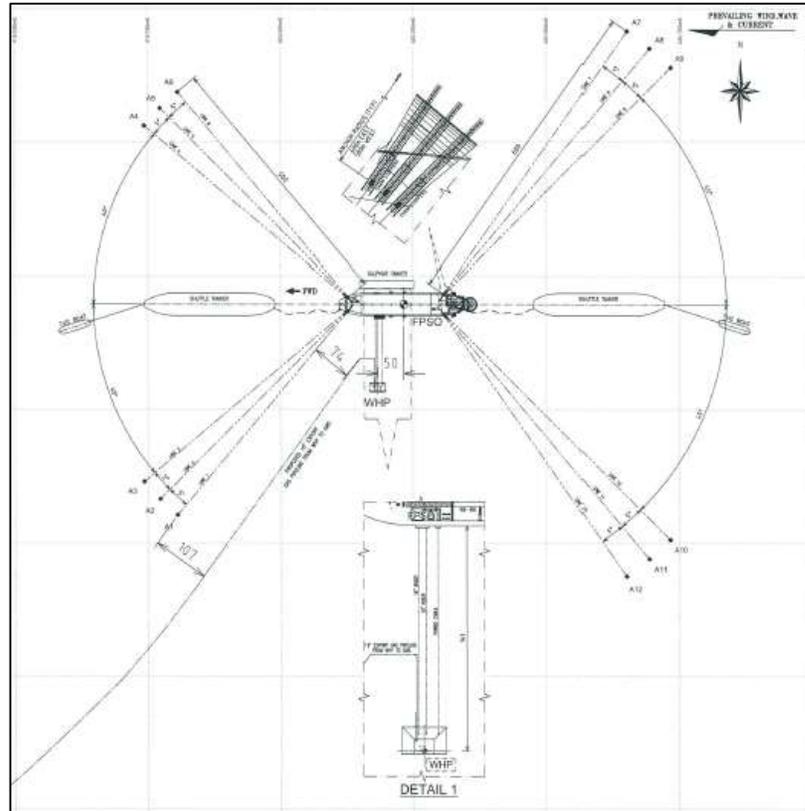
1. Ukuran Utama dan Layout FPSO

FPSO yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah FPSO 107160 DWT yang beroperasi di selat Madura. Data ukuran utama kapal tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Ukuran Utama FPSO

UKURAN UTAMA	
<i>Length Overall</i>	246.8 m
<i>Length Between Perpendicular</i>	235.0 m
<i>Breadth</i>	42.0 m
<i>Depth</i>	21.3 m
<i>Height</i>	92.05 m
<i>Draft</i>	14.78 m
<i>Dead Weight</i>	107160 ton
<i>Displacement</i>	123877 ton

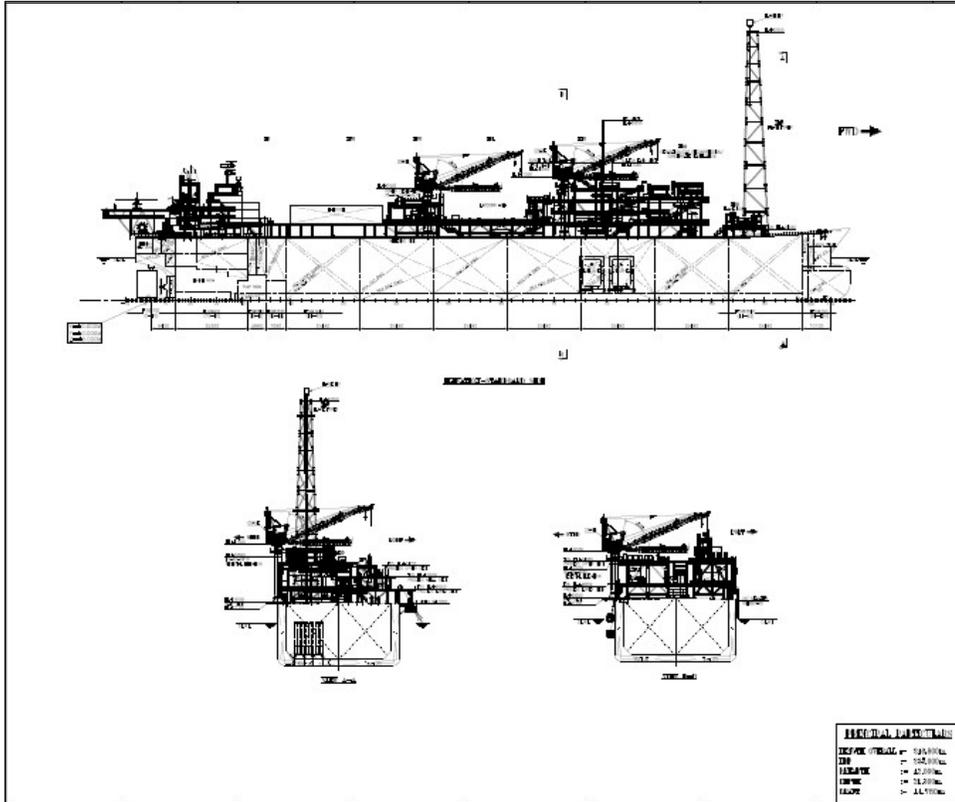
FPSO ini beroperasi di lapangan gas blok BD, dengan lokasi 11.5 *nautical miles* dari Sampang, Madura, Jawa Timur dengan kedalaman rata-rata 55.4 m. *Layout* FPSO ditunjukkan pada Gambar 3.2.



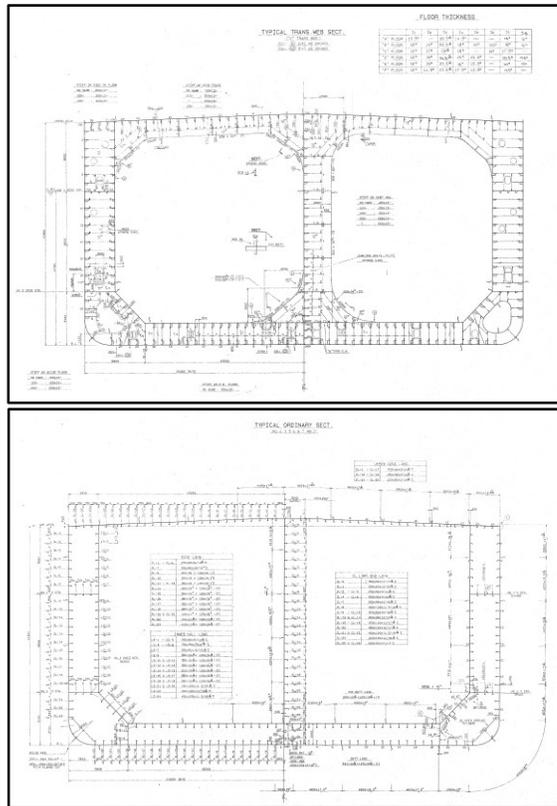
Gambar 3.2 *Layout* FPSO 107160 DWT

2. Data Struktur FPSO

Data struktur FPSO meliputi gambar rencana umum pada Gambar 3.3 dan gambar *midship section* pada Gambar 3.4. Kedua gambar tersebut diperlukan untuk menentukan Panjang tiga ruang muat di *midship* yang nantinya akan analisis pada tugas akhir ini. Dari Gambar 3.3 dapat diketahui bahwa Panjang untuk satu konstruksi ruang muat pada FPSO ini adalah 25.480 meter, sehingga pemodelan tiga ruang muat pada tugas akhir ini adalah 76.440 meter.



Gambar 3.3 Rencana Umum FPSO 107160 DWT



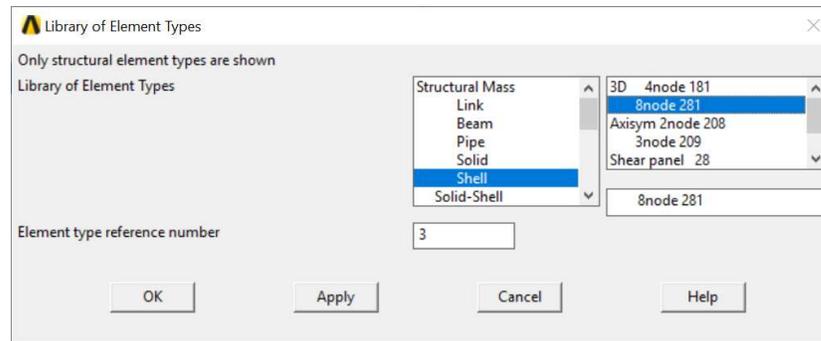
Gambar 3.4 Midship Section FPSO 107160 DWT

3.4. Proses Pemodelan dengan *Software Finite Element*

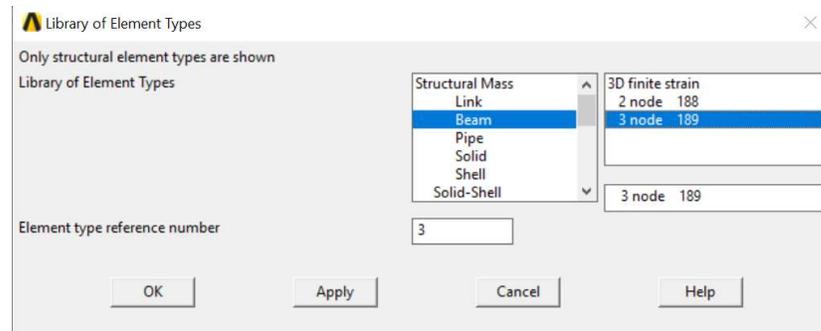
Pemodelan konstruksi pada tugas akhir ini menggunakan *software finite element*. Pemodelan suatu konstruksi harus dibuat sedemikian rupa sehingga model dapat mewakili kondisi yang sebenarnya. Menurut CSR, pemodelan dilakukan pada tiga ruang muat yang berada ditengah beserta sekat melintang, *web frame*, dan semua konstruksi yang ada pada bagian tersebut.

3.4.1. Pemilihan dan Penentuan Tipe Elemen

Elemen pada *finite element software* dapat dikategorikan ke dalam dua jenis yaitu elemen 2D dan 3D. Elemen tersebut terdiri dari elemen titik, elemen garis, elemen area, dan elemen solid. Elemen-elemen ini dapat dikombinasikan sesuai dengan kebutuhan pemodelan. Pemilihan tipe elemen terdapat pada **Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete**.



Gambar 3.5 *Element Library* untuk *Shell Element*

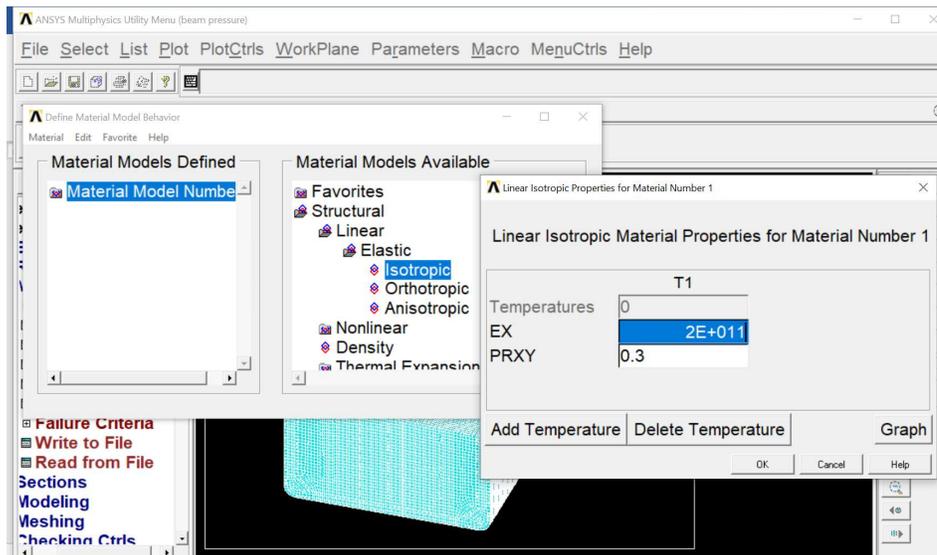


Gambar 3.6 *Element Library* untuk *Beam Element*

Pada Gambar 3.5 dapat dilihat kolom pemilihan tipe elemen untuk *shell element* dan pada Gambar 3.6 dapat dilihat kolom pemilihan tipe elemen untuk *beam element*. Tipe elemen yang digunakan dalam memodelkan konstruksi ruang muat pada tugas akhir ini adalah tipe *Shell 281 8 node* dan *Beam 189 3 node*. Tipe elemen ini dipilih karena memudahkan proses pemodelan 3D.

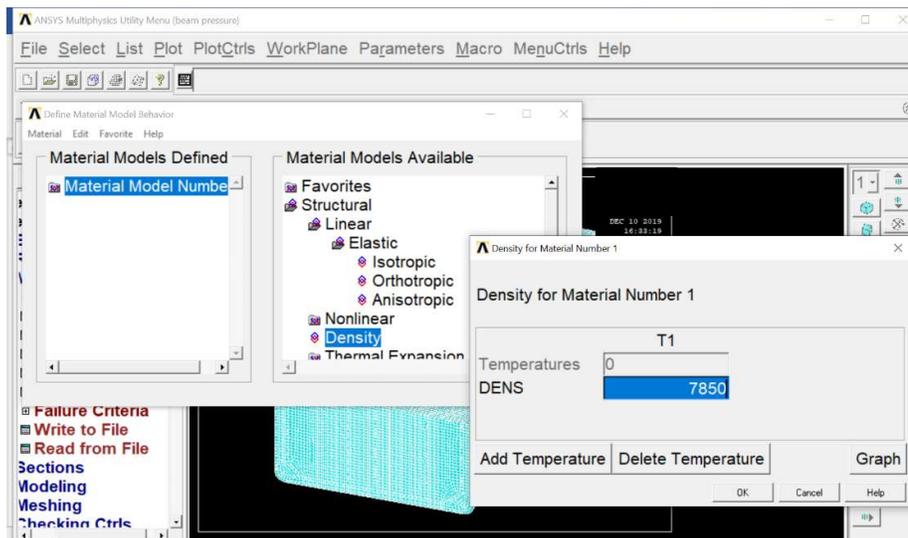
3.4.2. Material Properties

Pada tahap ini dilakukan pendefinisian sifat-sifat mekanis dan sifat-sifat fisika material yang akan dimodelkan. Sifat material yang dipilih pada simulasi ini adalah isotropik dimana material dianggap seragam di seluruh arah dan bagian. *Material properties* ini digunakan sebagai acuan apakah tegangan yang terjadi melebihi tegangan *yield* material. Pemilihan *material properties* terdapat pada **Main Menu** > **Preprocessor** > **Material Props** > **Material Models**. Pada pemodelan konstruksi tiga ruang muat ini material yang digunakan adalah baja A36 dengan *Modulus Young* 200 Gpa dan *Poison Ratio* 0.3 seperti pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Material Properties Model

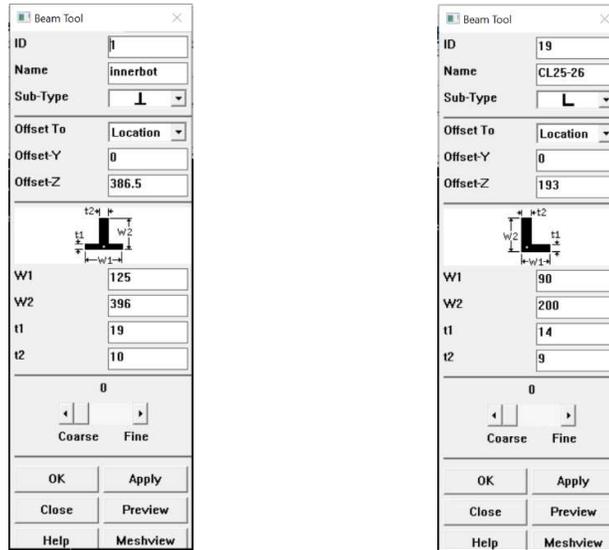
Kemudian dilakukan pendefinisian berat jenis atau *density* model. *Density* yang digunakan berdasarkan spesifikasi baja A36 sebesar 7850 Kg/m³ seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Pendefinisian Density

3.4.3. Section

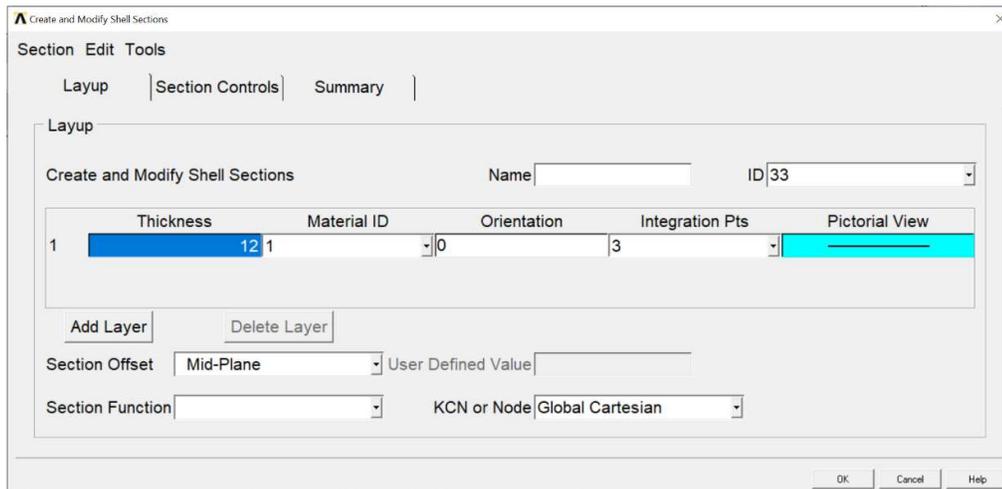
Dalam pemodelan struktur ruang muat perlu dimasukkan ukuran dari komponen *beam* dan *shell* yang digunakan. Untuk input ukuran *beam* terdapat pada menu **Section** > **Beam** > **Common Sections**.



Gambar 3.9 Kolom Dialog *Section* untuk *Beam Element*

Pada kolom dialog Gambar 3.9 kita dapat memilih bentuk *beam* serta menentukan ukuran *beam* yang nantinya akan kita definisikan sebagai profil L maupun profil T. Dan juga dapat diisikan nama untuk memudahkan pengelompokkan bagian-bagian konstruksi pada saat proses *meshing*.

Sedangkan untuk *input* ukuran *shell* terdapat pada menu **Section** > **Shell** > **Lay-up** > **Add/Edit**



Gambar 3.10 Kolom Dialog *Section* untuk *Shell Element*

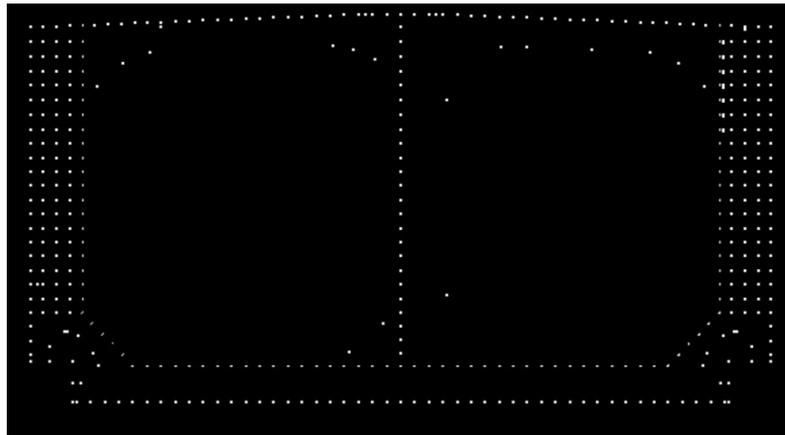
Pada kolom dialog Gambar 3.10 diisikan ketebalan pelat di kolom *thickness* dan juga dapat diisikan nama untuk memudahkan pengelompokkan bagian-bagian konstruksi pada saat proses *meshing*.

3.4.4. *Modelling*

Kapal dapat dikatakan sebagai pelat berpenegar. Agar analisis yang dilakukan diharapkan dapat memiliki hasil yang akurat, maka dari itu pemodelan yang dilakukan diupayakan mendekati kondisi yang sesungguhnya. *Command* yang diperlukan untuk pembuatan model terdapat pada **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Create**. Pembuatan model konstruksi ruang muat ini meliputi pembuatan *keypoint*, *line*, dan *area*. Tahapan-tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. *Keypoint*

Untuk membuat *line* terlebih dahulu harus membuat *keypoint*. *Keypoint* dapat dibuat dengan memasukkan koordinat sesuai yang diinginkan atau langsung pada lembar kerja tanpa koordinat.

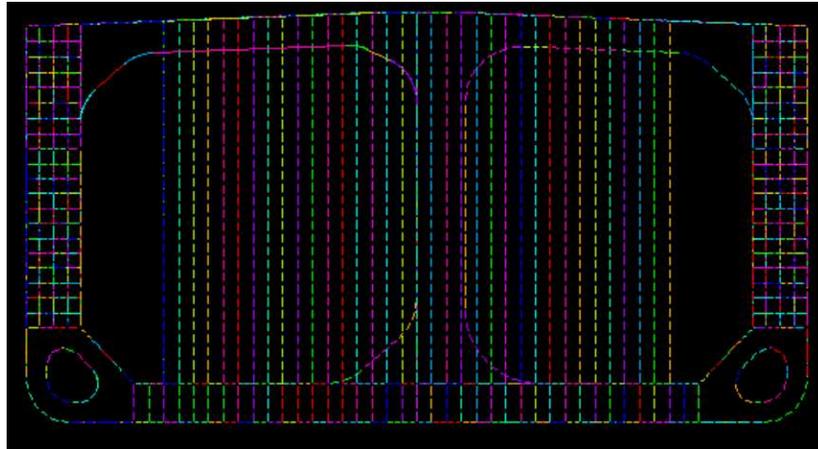


Gambar 3.11 *Keypoints*

Gambar 3.11 diatas adalah contoh pembuatan *keypoint* untuk tiga ruang muat kapal dalam tugas akhir ini. *Keypoint-keypoint* tersebut akan dibuat menjadi *line* pada tahap selanjutnya.

2. *Line*

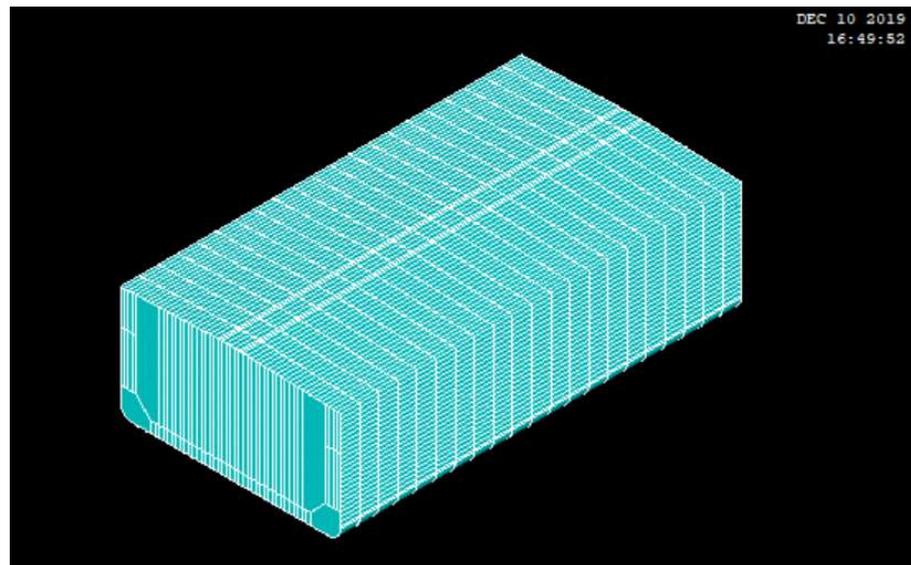
Line dapat dibentuk dengan setidaknya menggunakan 2 *keypoint*. Untuk membuat garis lurus digunakan *command straight line* sedangkan untuk membuat garis lengkung digunakan *command splines*. Gambar 3.12 menunjukkan *line* yang dibentuk dari *keypoint* pada Gambar 3.11 sebelumnya.



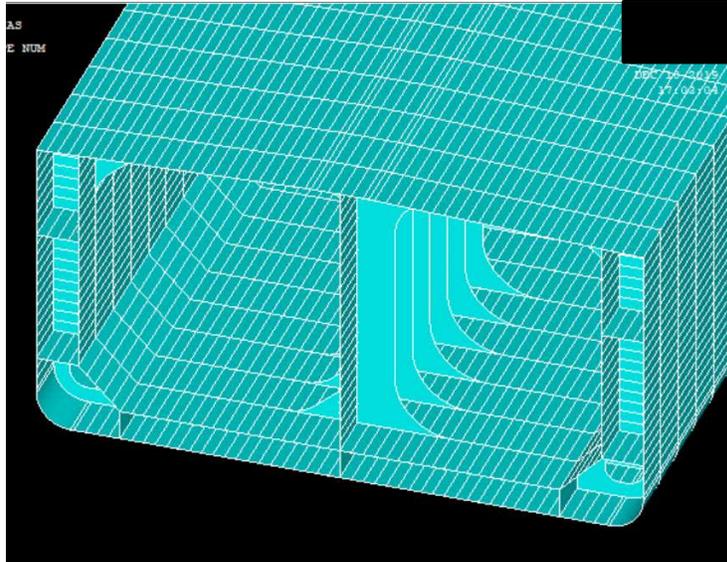
Gambar 3.12 *Lines*

3. *Area*

Untuk membuat luasan atau *area*, yang dibutuhkan adalah minimal 3 garis untuk luasan yang datar. Jika luasan berbentuk kompleks dengan adanya lengkungan-lengkungan seperti dalam tugas akhir ini, maka *area* harus dibuat dengan 4 garis. Jika lebih dari 4 garis *software* tidak dapat membuat luasan tersebut. Gambar 3.13 menunjukkan *area* model tiga ruang muat yang terbentuk dari *lines* pada Gambar 3.12 sebelumnya. Dan Gambar 3.14 menunjukkan *area* model ruang muat bagian dalam. Model ini merupakan gabungan dari beberapa *area*.



Gambar 3.13 Model Tiga Ruang Muat dalam Plot Area



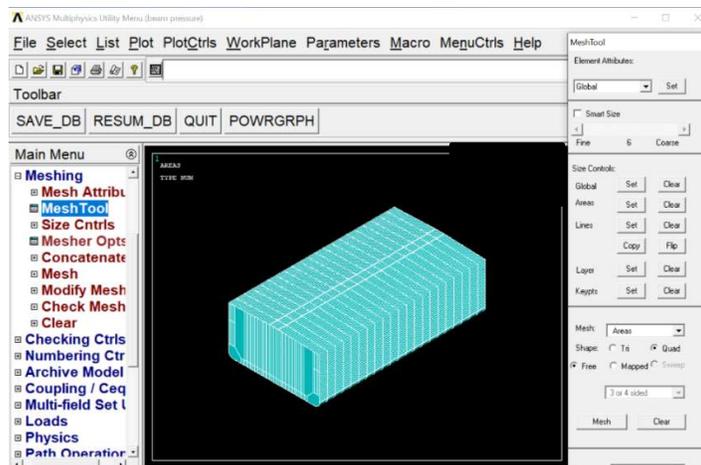
Gambar 3.14 Model Bagian Dalam

3.4.5. Meshing

Proses *meshing* ini akan menentukan akurat atau tidaknya suatu hasil perhitungan. Semakin kecil ukuran *meshing* maka perhitungan akan semakin akurat. Namun ukuran *meshing* yang kecil membutuhkan spesifikasi komputer yang semakin baik, karena jumlah *node* menjadi semakin banyak. Oleh sebab itu pemilihan ukuran *meshing* sangat penting.

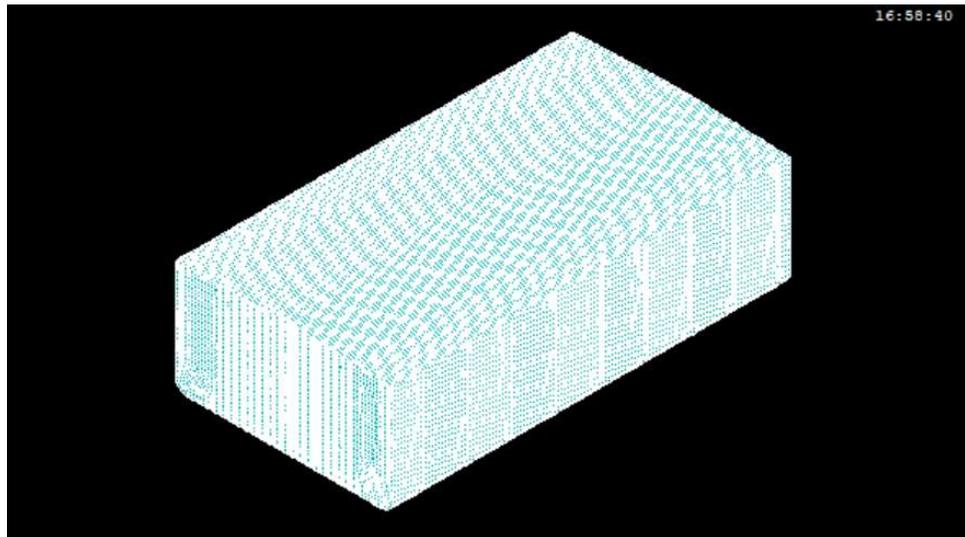
Secara umum *meshing* merupakan tahapan mendiskritkan model geometri menjadi elemen-elemen hingga dan titik titik nodal yang dianalisis. Pada penentuan ukuran elemen, keselarasan ukuran elemen harus diperhatikan agar hasil yang diperoleh seragam. Tahapan *meshing* adalah sebagai berikut:

1. Pada menu *meshing* pilih sub menu *mesh tool*. Kotak dialog *mesh tool* dapat dilihat pada Gambar 3.15.

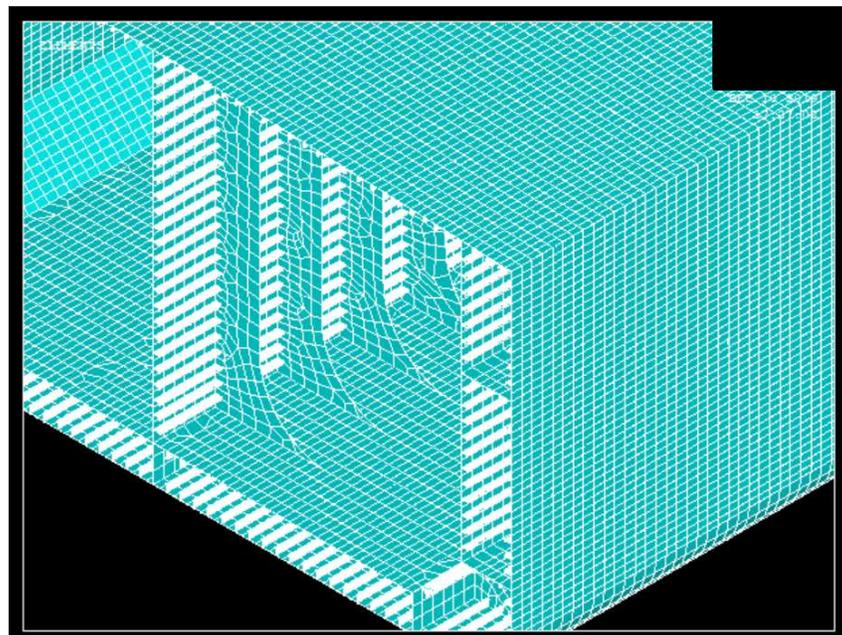


Gambar 3.15 Mesh Tools

2. Pada *mesh attribute* pilih jenis model yang akan di *mesh* seperti *keypoint*, *line*, *area*, atau volume.
3. Pada *size control* pilih ukuran elemen yang diinginkan.
4. Tahap terakhir adalah *meshing model*. *Meshing* dibagi berdasarkan jenis elemen dan model, diantaranya *keypoint*, *line*, *area*, dan volume. Gambar 3.13 pada subbab *modelling* sebelumnya adalah tampilan model sebelum dilakukan *meshing* dan Gambar 3.16 adalah tampilan model setelah dilakukan *meshing*. Kemudian Gambar 3.17 menunjukkan detail *meshing* pada bagian dalam model ruang muat tersebut



Gambar 3.16 Tampilan Model Setelah *Meshing*



Gambar 3.17 Detil *Meshing* Bagian Dalam Model

3.4.6. Kondisi Batas

Berdasarkan CSR untuk kondisi batas diberikan pada *independent point* di kedua ujung model. *Independent point* adalah titik *neutral axis* dari model pada daerah tersebut. Untuk *node* pada sekeliling *independent point* didefinisikan sebagai *rigid link* (IACS, 2014).

Tabel 3.2 *Rigid Link* Kedua Ujung Model (IACS, 2014)

Node pada bagian <i>Longitudinal</i> kedua ujung model	Translasi			Rotasi		
	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Semua Bagian <i>Longitudinal</i>	RL	RL	RL	-	-	-
RL adalah bagian yang kaku						

Yang dimaksud *rigid* adalah penampang dibuat kaku sehingga beban yang diaplikasikan pada penampang dapat disalurkan ke seluruh model. Penampang *rigid* dibuat dengan **Main Menu > Preprocessor > Coupling > Rigid Region**. Selanjutnya memilih *node* sebagian *independent point* dan *rigid link*. Kondisi batas *node rigid link* adalah arah UXYZ seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.

3.4.7. Konvergensi

Dalam tugas akhir ini tidak dilakukan konvergensi karena ukuran elemen telah ditentukan oleh CSR. Apabila elemen *orthotropic* tidak digunakan, maka ukuran elemen adalah sama dengan atau lebih kecil dari jarak *stiffener* atau gading (CSR, 2014). FPSO ini memiliki jarak *stiffener* 0.7 dan 0.75 meter pada bagian *deck*, 0.8, 0.7, 0.75, dan 0.65 pada bagian *bottom*, 0.7, 0.75, 0.8, dan 0.825 pada bagian *side* dan 0.8 serta 0.825 pada bagian *longitudinal bulkhead*. Sehingga ukuran elemen *meshing* yang diinputkan 0.65.

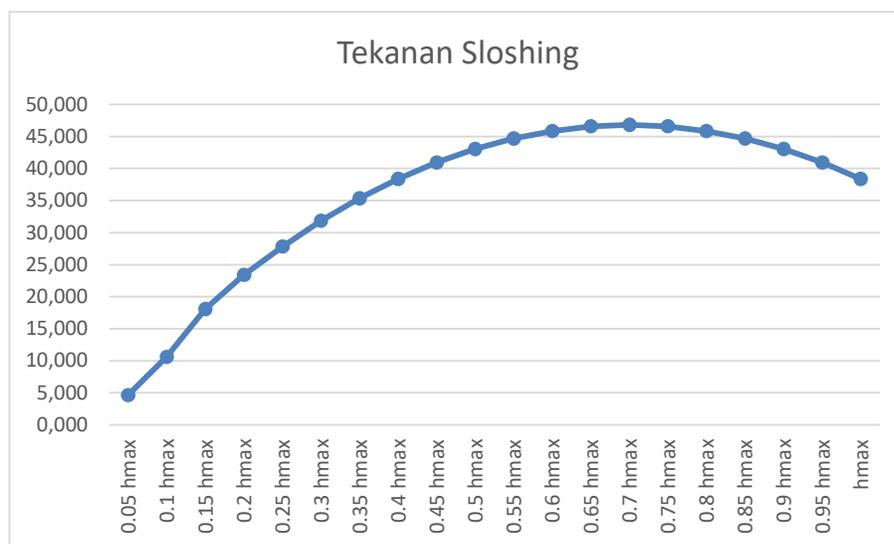
3.4.8. Pembebanan

Dalam tugas akhir ini, beban yang akan diaplikasikan pada model adalah beban *sloshing* pada tangki serta momen lengkung. Tekanan *sloshing* dalam tangki sesuai perhitungan dari CSR ditunjukkan pada Tabel 3.3 dibawah ini:

Tabel 3.3 Perhitungan Tekanan *Sloshing*

ketinggian	h_{fill}	f_{slh}	b_{tk-h}	b_{slh}	P_{slh-t} (kN/m ²)
0.05 hmax	0.960	0.155	16.128	16.128	4.653
0.1 hmax	1.920	0.28	17.056	17.056	10.617
0.15 hmax	2.880	0.395	17.984	17.984	18.097
0.2 hmax	3.840	0.5	18.1	18.1	23.401
0.25 hmax	4.800	0.595	18.1	18.1	27.847
0.3 hmax	5.760	0.68	18.1	18.1	31.825
0.35 hmax	6.720	0.755	18.1	18.1	35.335
0.4 hmax	7.680	0.82	18.1	18.1	38.378
0.45 hmax	8.640	0.875	18.1	18.1	40.952
0.5 hmax	9.600	0.92	18.1	18.1	43.058
0.55 hmax	10.560	0.955	18.1	18.1	44.696
0.6 hmax	11.520	0.98	18.1	18.1	45.866
0.65 hmax	12.480	0.995	18.1	18.1	46.568
0.7 hmax	13.440	1	18.1	18.1	46.802
0.75 hmax	14.400	0.995	18.1	18.1	46.568
0.8 hmax	15.360	0.980	18.1	18.1	45.866
0.85 hmax	16.320	0.955	18.1	18.1	44.696
0.9 hmax	17.280	0.92	18.1	18.1	43.058
0.95 hmax	18.240	0.875	18.1	18.1	40.952
hmax	19.200	0.820	18.1	18.1	38.378

Dari hasil perhitungan nilai tekanan *sloshing* dalam tangki pada Tabel 3.3, dapat dibuat menjadi grafik seperti pada Gambar 3.18 untuk menunjukkan bahwa hasil tekanan terendah yaitu pada ketinggian 0.05hmax dan tekanan tertinggi pada ketinggian 0.7hmax.



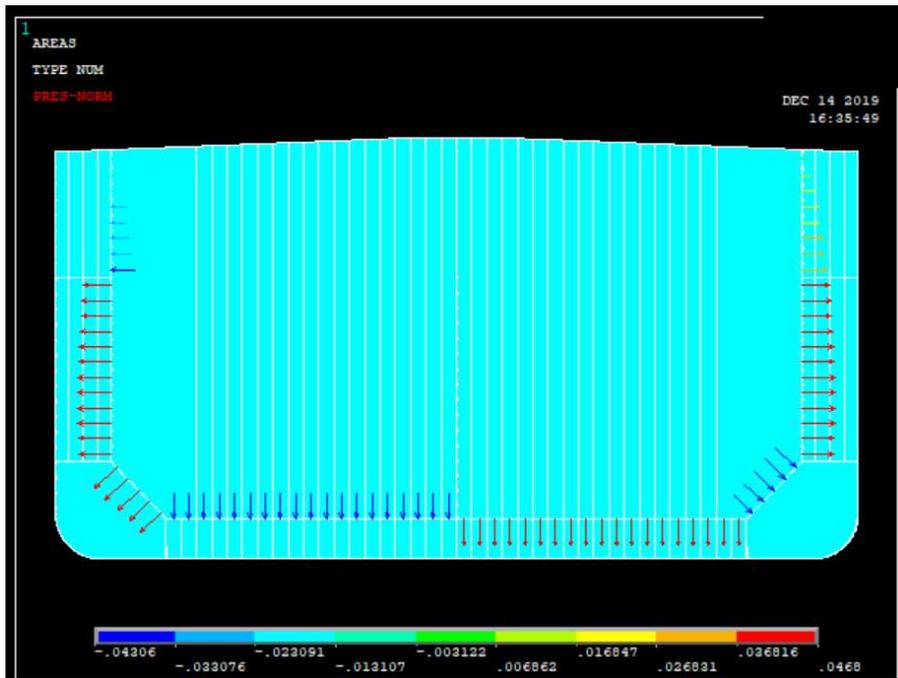
Gambar 3.18 Grafik Tekanan *Sloshing* Tangki

Kemudian dipilih dua kondisi tinggi muatan yang akan digunakan sebagai input *pressure* untuk simulasi *running* pada model. Dua kondisi tinggi muatan tersebut, yaitu:

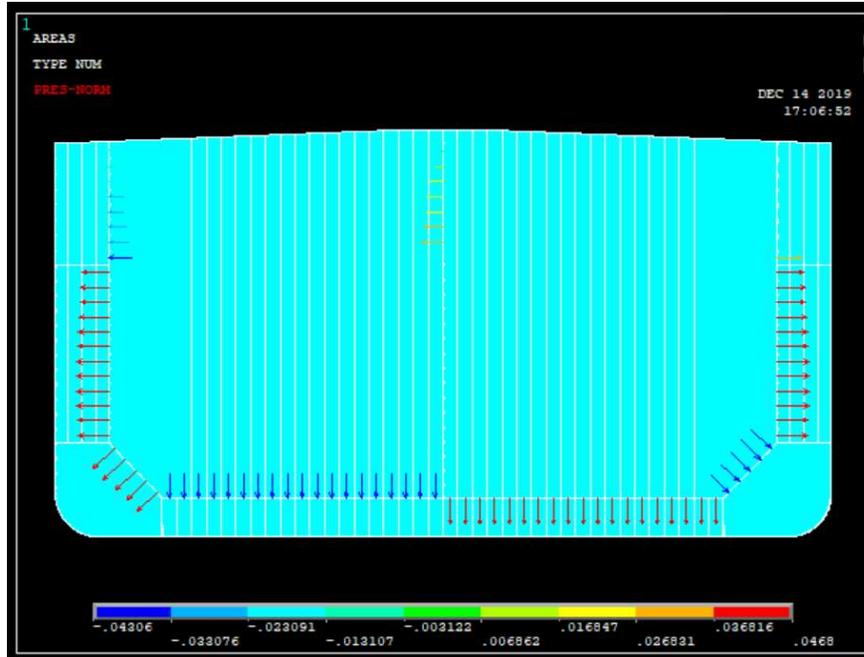
1. Kondisi Pembebanan 1 = Tinggi muatan 0.5h, *roll* 30° kanan, *roll* 30° kiri, dan kondisi *hogging* dan *sagging*
2. Kondisi Pembebanan 2 = Tinggi muatan h, *roll* 30° kanan, *roll* 30° kiri, dan kondisi *hogging* dan *sagging*

Dalam tugas akhir ini input beban *sloshing* dilakukan dalam satuan N/mm^2 , dikarenakan menyesuaikan ukuran pemodelan *midhsip* yang dilakukan dalam satuan mm.

Input beban dilakukan melalui perintah **Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply** setelah itu masukkan jenis beban yang akan digunakan. Dalam tugas akhir ini menggunakan beban *sloshing*, maka jenis beban yang digunakan adalah beban *pressure on area*. Pada *software*, arah beban akan tegak lurus dengan *area* yang menjadi inputan.



Gambar 3.19 Kondisi Pembebanan 2 tanpa *Rolling*



Gambar 3.20 Kondisi Pembebanan 2 Roll Kanan (*Front View*)

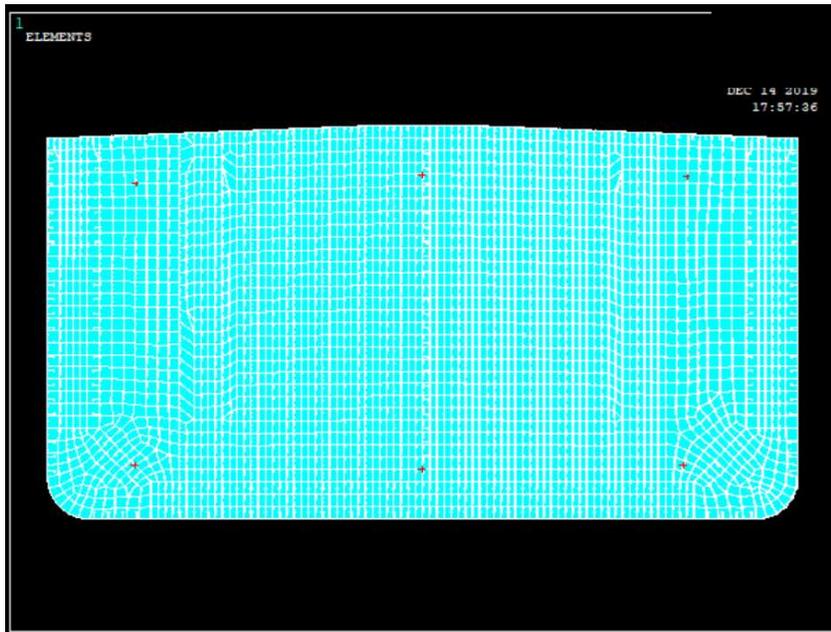
Pada Gambar 3.19 yang menunjukkan contoh kondisi pembebanan ke-2 yaitu ketika dilakukan *input* beban setinggi h . Sedangkan Gambar 3.20 adalah kondisi pembebanan ke-2 dengan sudut *rolling* 30° ke kanan. Untuk menentukan area yang terkena beban *sloshing* ketika kondisi *rolling*, *rolling* dilakukan dengan pusat rotasi setinggi sarat.

Beban yang dimasukkan selanjutnya merupakan beban momen lengkung yang sudah diubah menjadi gaya tekan dan tarik. Besar momen lengkung yang terjadi pada titik $0.414L$ dan $0.74L$ (dari AP) sesuai perhitungan yang ditentukan oleh CSR ditunjukkan oleh Tabel 3.4.

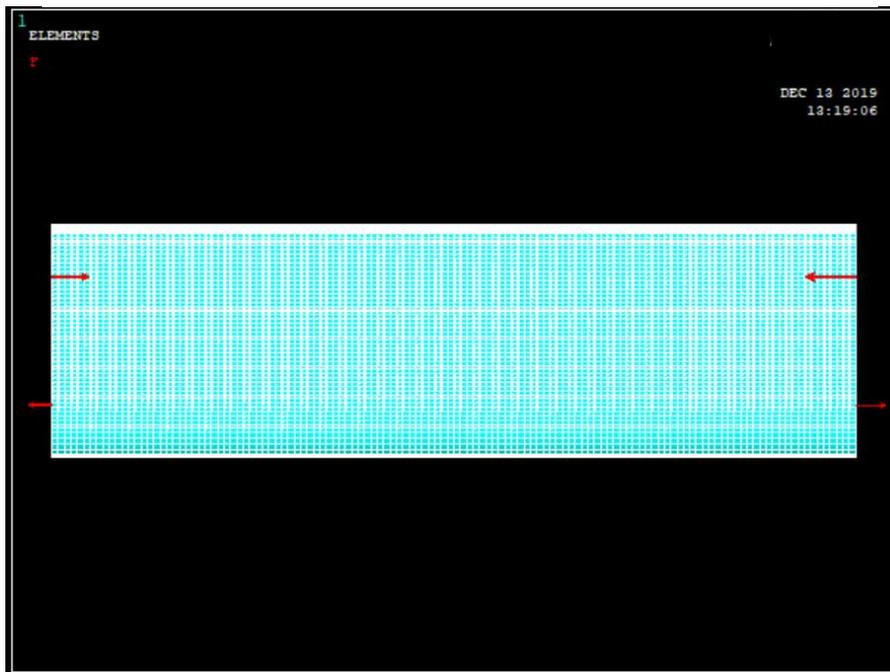
Tabel 3.4 Perhitungan *Bending Moment*

Muatan Setinggi h (Penuh)				
<i>bending moment</i> posisi 97.5 dari AP (0.414L)				
$M_h =$	828279.8	kNm	$8.2828E+11$	Nmm
$M_s =$	-828279.8	kNm	$-8.2828E+11$	Nmm
<i>bending moment</i> posisi 173.94 dari AP (0.74L)				
$M_h =$	615246.2	kNm	$6.15246E+11$	Nmm
$M_s =$	-615246.2	kNm	$-6.1525E+11$	Nmm
Muatan Setinggi 0.5 h				
<i>bending moment</i> posisi 97.5 dari AP (0.414L)				
$M_h =$	729440.8	kNm	$7.29441E+11$	Nmm
$M_s =$	-729441	kNm	$-7.2944E+11$	Nmm
<i>bending moment</i> posisi 173.94 dari AP (0.74L)				
$M_h =$	541828.6	kNm	$5.41829E+11$	Nmm
$M_s =$	-541829	kNm	$-5.4183E+11$	Nmm

Kemudian *bending moment* tersebut diubah menjadi gaya tarik dan tekan. Untuk selengkapnya dapat dilihat pada bagian lampiran.



Gambar 3.21 Pemberian Gaya Tarik dan Tekan (*Front View*)



Gambar 3.22 Pemberian Gaya Tarik dan Tekan (*Left View*)

Jenis beban yang digunakan untuk input gaya tekan dan Tarik yaitu beban *force on nodes*. Untuk *nodes* sendiri letaknya tergantung oleh jarak *neutral axis* yang kemudian disebarakan merata secara tegak lurus dengan penampang.

Pada Gambar 3.21 dan Gambar 3.22 menunjukkan kondisi *sagging* pada FPSO, ketika gaya tarik dan tekan dilakukan. Kemudian semua kondisi pembebanan dan kondisi *rollingnya* dijalankan dengan cara yang sama untuk melihat hasil tegangan *von mises* yang akan digunakan sebagai input tegangan dalam perhitungan *cumulative fatigue damage*.

3.5. Perhitungan Umur Kelelahan

Perhitungan *cumulative fatigue damage* dilakukan untuk mengetahui besar akumulasi kerusakan kelelahan akibat masing-masing kondisi pembebanan. Perhitungan *cumulative fatigue damage* sesuai *CSR* adalah sebagai berikut:

$$DM_i = \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \quad (3.21)$$

S_{Ri} dihitung dari hasil pengurangan tegangan maksimum terbesar dan tegangan maksimum terkecil, kemudian dikalikan dengan faktor konsentrasi tegangan K untuk mendapat rentang tegangannya. Setelah mendapat nilai S_{Ri} kemudian nilai tersebut digunakan untuk menghitung *cumulative fatigue damage* DM_i . Setelah itu umur kelelahan dari suatu struktur sambungan las-lasan pada bagian yang memiliki tegangan kritis paling besar dapat dihitung nilainya dari persamaan *fatigue life* berikut:

$$Fatigue\ life = \frac{Design\ life}{DM} \quad \text{years} \quad (3.22)$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

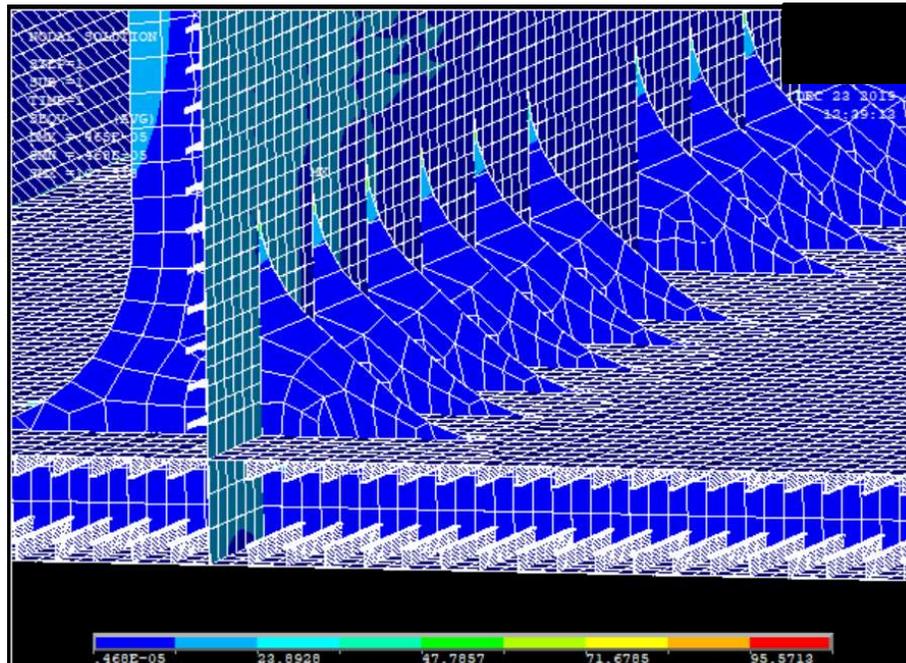
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Tegangan

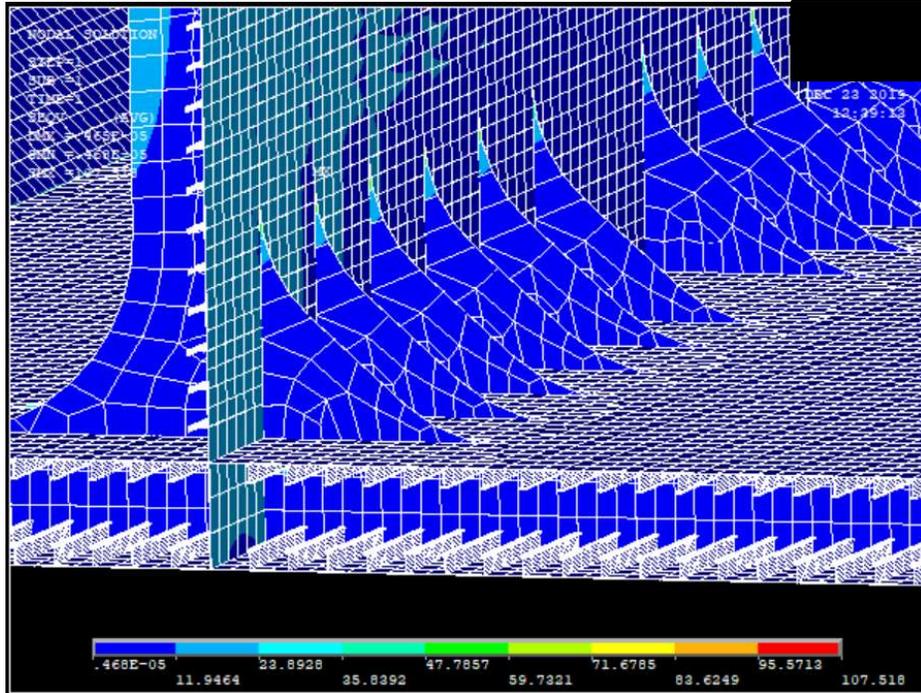
Setelah *input* beban pada model yang telah dibuat, maka akan diperoleh hasil berupa nilai tegangan yang terjadi pada titik kritis atau disebut tegangan *hot spot*. Bagian yang disebut sebagai *hot spot area* merupakan bagian pada sambungan konstruksi yang dimana *fatigue crack* akan terjadi. Dalam tugas akhir ini, sambungan konstruksi yang berada pada *hot spot area* merupakan konstruksi *bracket*.

4.2. Kondisi Pembebanan 1

Kondisi pembebanan pertama yaitu ketika FPSO diberi muatan setinggi 0.5h, dengan dilakukan *roll* 30° kanan dan *roll* 30° kiri, serta kondisi *hogging* dan *sagging*. Berdasarkan hasil *solving* pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 dapat dilihat nilai atau harga tegangan maksimum pada kondisi 1 tinggi muatan 0.5h tanpa dilakukan *roll* dengan kondisi *hogging* dan *sagging* memiliki nilai yang sama yaitu sebesar 107.518 N/mm². Lokasi terjadinya tegangan maksimum berada pada sambungan *bracket* dengan *longitudinal bulkhead* 17 bagian *starboard*.

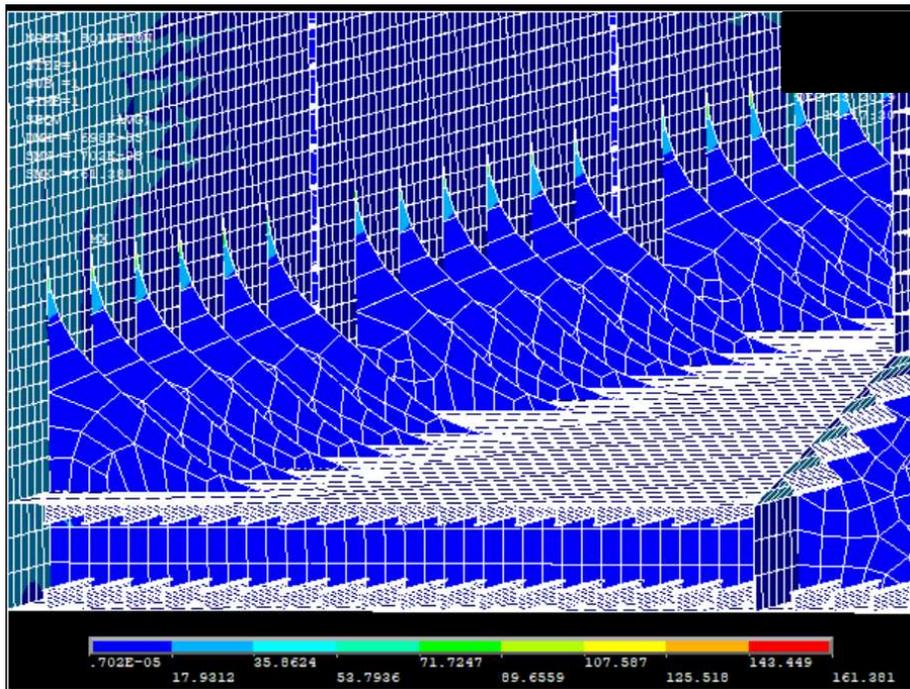


Gambar 4.1 *Hot Spot Area* Kondisi Pembebanan 1 Tanpa *Rolling* - *Hogging*

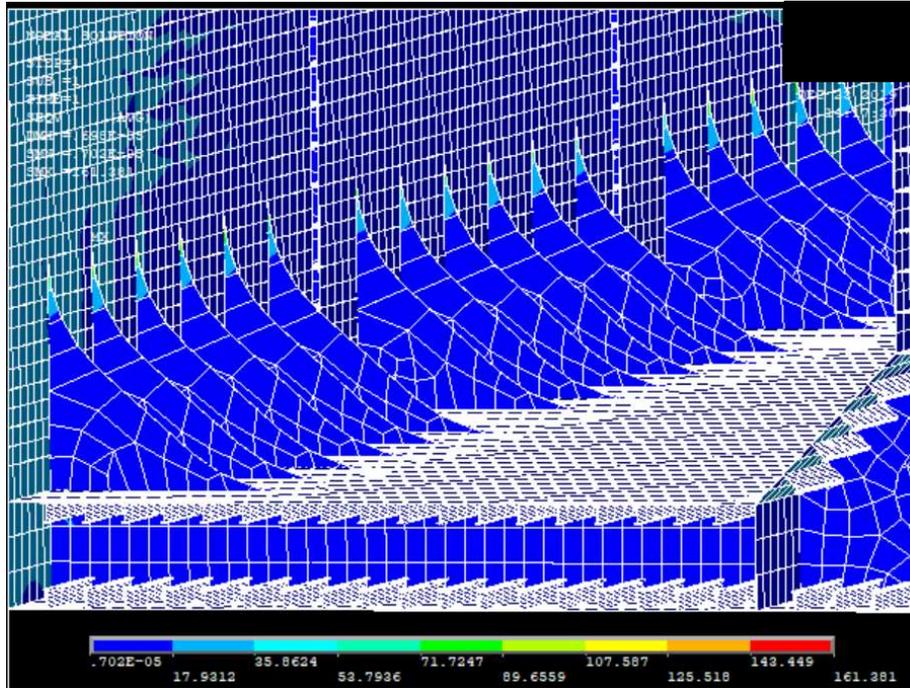


Gambar 4.2 Hot Spot Area Kondisi Pembebanan 1 Tanpa Rolling - Sagging

Kemudian pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 di lokasi yang sama yaitu sambungan *bracket* dengan *longitudinal bulkhead* 17 bagian *starboard*, memiliki harga tegangan maksimum pada kondisi 1 tinggi muatan 0.5h dengan *roll angle* 30° kanan pada kondisi *hogging* dan *sagging* adalah 161.381 N/mm².

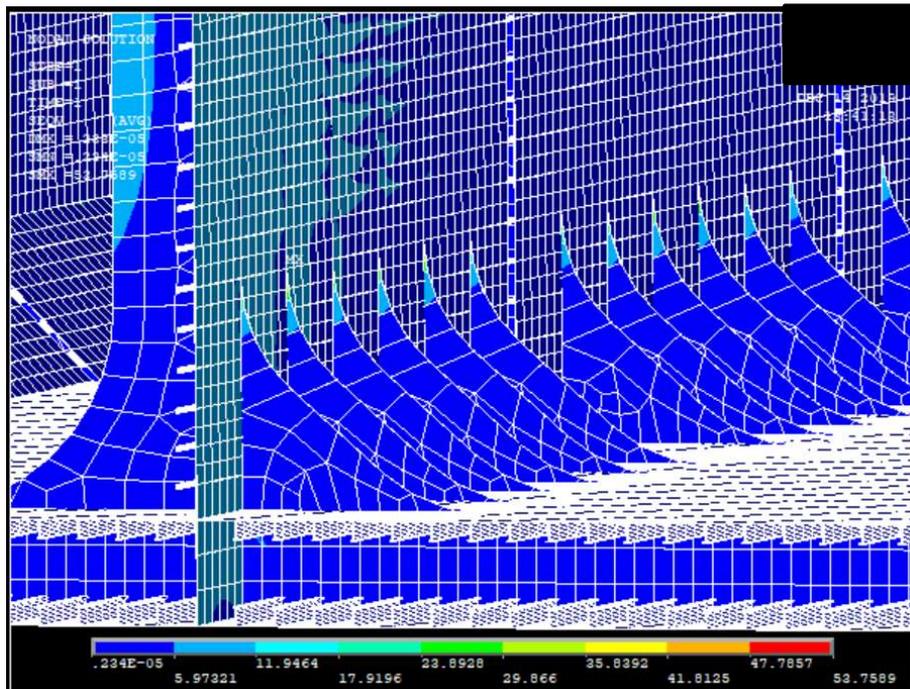


Gambar 4.3 Hot Spot Area Kondisi Pembebanan 1 Rolling Kanan - Hogging

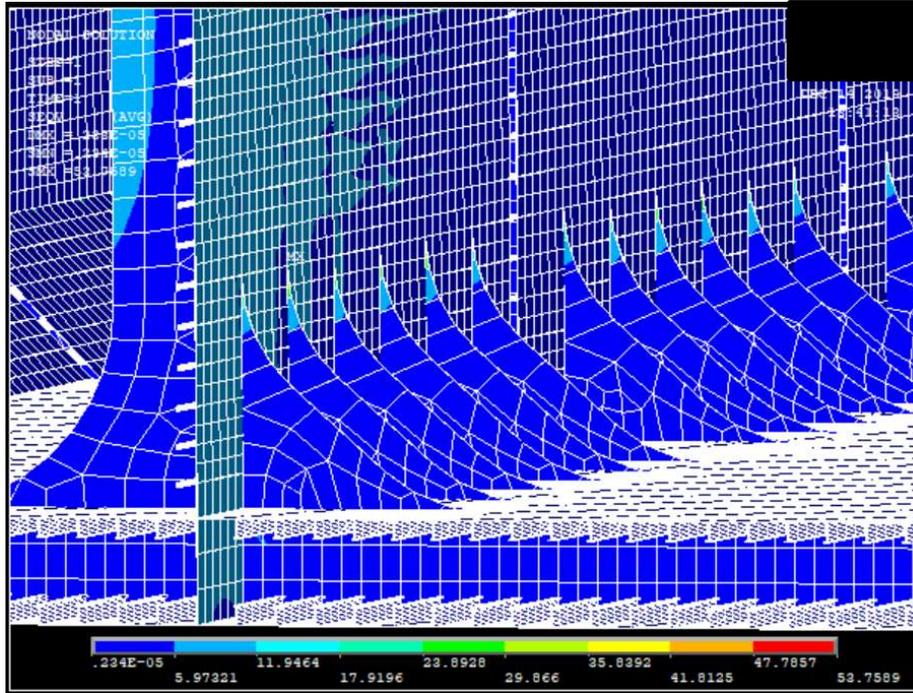


Gambar 4.4 *Hot Spot Area* Kondisi Pembebanan 1 *Rolling* Kanan - *Sagging*

Sedangkan untuk kondisi 1 tinggi muatan 0.5h dengan *roll angle* 30° kiri, pada saat kondisi *hogging* dan *sagging*, dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6, *hot spot area* terletak pada sambungan *bracket* dengan *longitudinal bulkhead* 17 bagian *starboard* memiliki tegangan maksimum sebesar 53.7589 N/mm².



Gambar 4.5 *Hot Spot Area* Kondisi Pembebanan 1 *Rolling* Kiri - *Hogging*



Gambar 4.6 Hot Spot Area Kondisi Pembebanan 1 Rolling Kiri - Sagging

Pada Tabel 4.1 ditunjukkan rekapitulasi hasil tegangan untuk kondisi pembebanan 1 pada ketinggian pengisian muatan setinggi 0.5h.

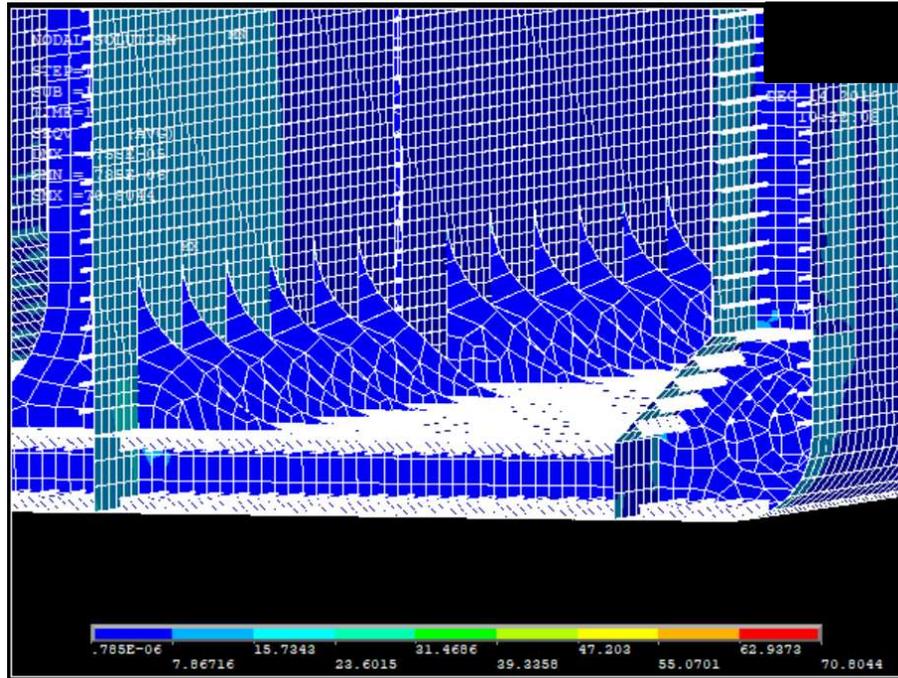
Tabel 4.1 Tegangan pada Kondisi Pembebanan 1

Kondisi Muatan	Sambungan	Frame	σ (N/mm ²)	σ_{yd} (N/mm ²)	R_{al} (N/mm ²)
tanpa roll angle - hogging	bracket dengan longitudinal bulkhead	17	107.518	235	125.95
tanpa roll angle - sagging	bracket dengan longitudinal bulkhead	17	107.518	235	125.95
roll angle θ 30° kanan - hogging	bracket dengan longitudinal bulkhead	17	161.381	235	125.95
roll angle θ 30° kanan - sagging	bracket dengan longitudinal bulkhead	17	161.381	235	125.95
roll angle θ 30° kiri - hogging	bracket dengan longitudinal bulkhead	17	53.758	235	125.95
roll angle θ 30° kiri - sagging	bracket dengan longitudinal bulkhead	17	53.758	235	125.95

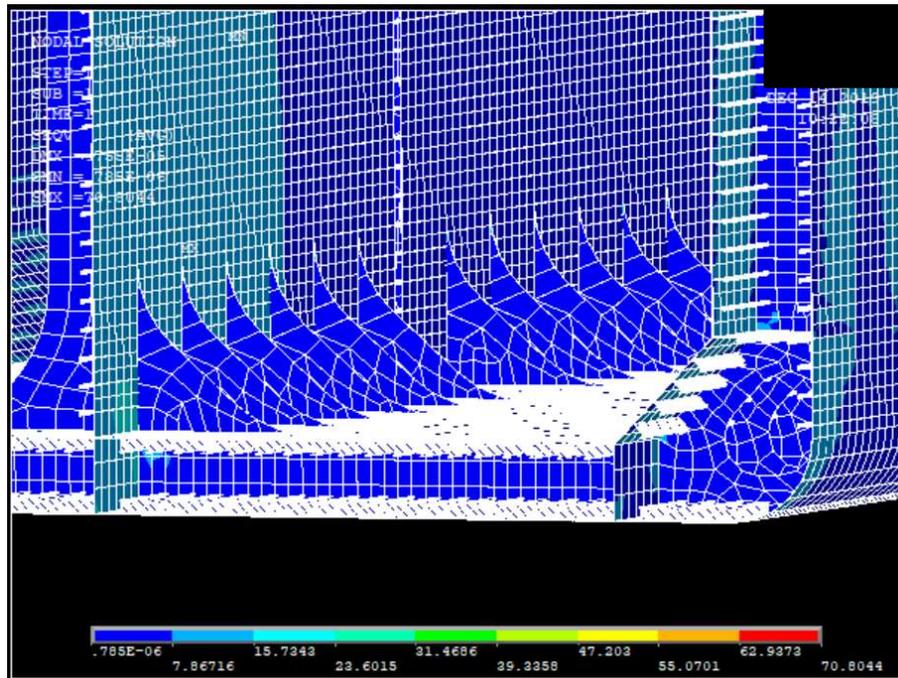
Hasil analisis tegangan pada Tabel 4.1 diatas menunjukkan bahwa nilai tegangan kritis yang dihasilkan pada kondisi saat dilakukan roll 30° ke kanan melebihi tegangan ijin yang didapatkan dari rumus (2.11) yaitu sebesar 125.95 Mpa.

4.3. Kondisi Pembebanan 2

Kondisi pembebanan kedua yaitu ketika FPSO diberi muatan penuh. Berdasarkan hasil *solving* pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 dapat dilihat nilai tegangan maksimum pada kondisi 2 dengan tinggi muatan h tanpa dilakukan *roll* dengan kondisi *hogging* dan *sagging* memiliki nilai yang sama yaitu sebesar 70.8044 N/mm².

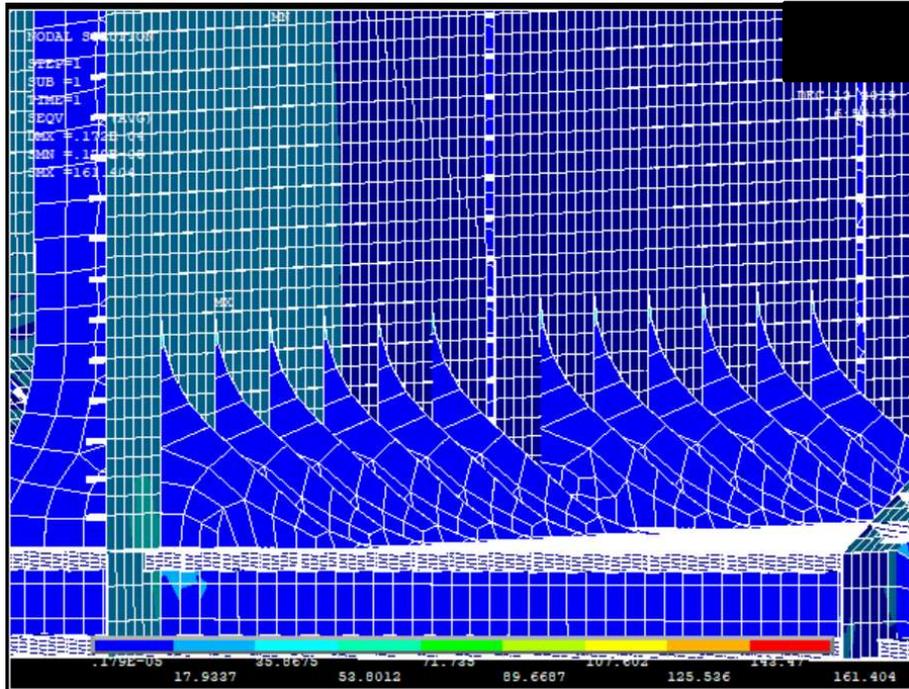


Gambar 4.7 Hot Spot Area Kondisi Pembebanan 2 Tanpa Rolling - Hogging

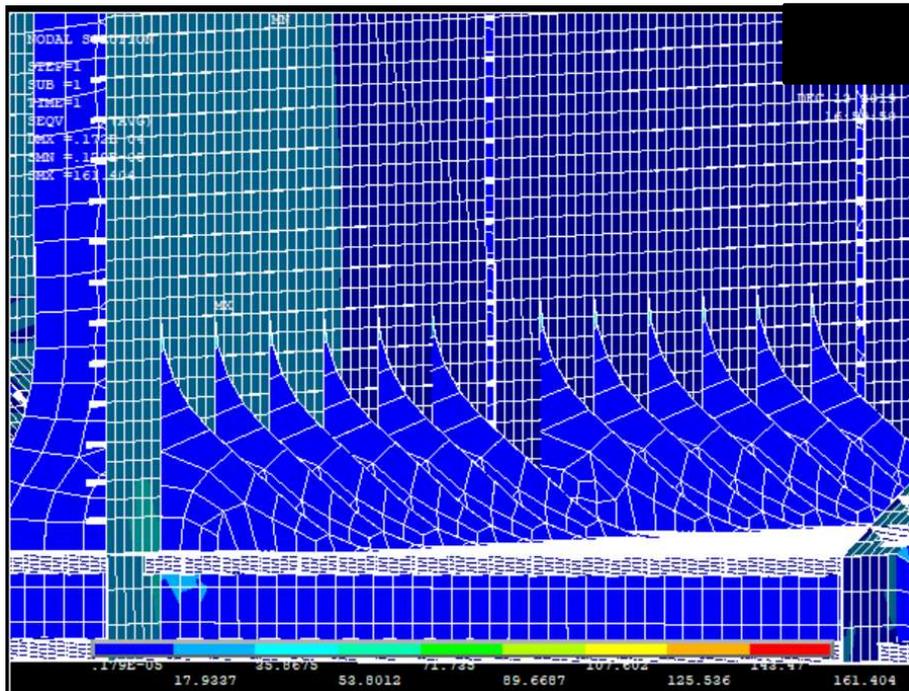


Gambar 4.8 Hot Spot Area Kondisi Pembebanan 2 Tanpa Rolling - Sagging

Kemudian pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 di lokasi yang sama yaitu sambungan *bracket* dengan *longitudinal bulkhead* 17 bagian *starboard*, memiliki harga tegangan maksimum pada kondisi 2 tinggi muatan h dengan *roll angle* 30° kanan pada kondisi *hogging* dan *sagging* adalah 161.404 N/mm².

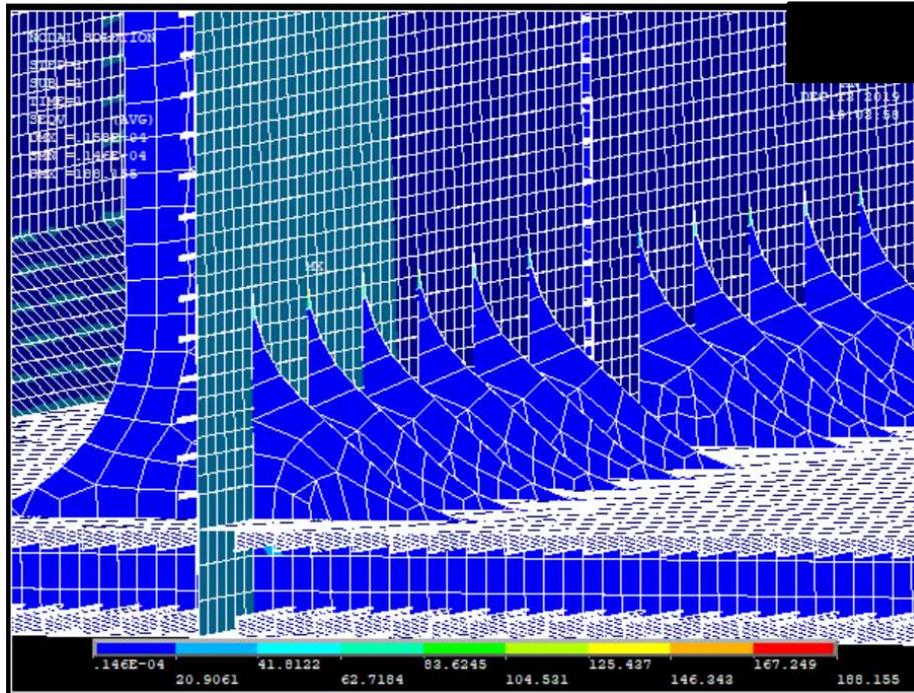


Gambar 4.9 Hot Spot Area Kondisi Pembebanan 2 Rolling Kanan - Hogging

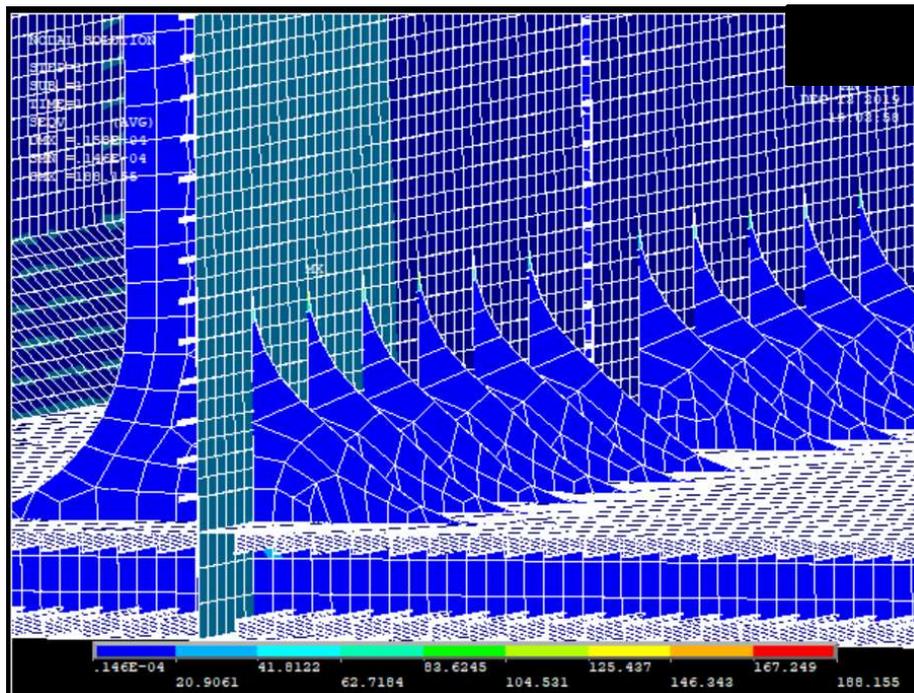


Gambar 4.10 Hot Spot Area Kondisi Pembebanan 2 Rolling Kanan - Sagging

Sedangkan untuk kondisi 2 tinggi muatan h dengan *roll angle* 30° kiri, pada saat kondisi *hogging* dan *sagging*, pada Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan *hot spot area* terletak pada sambungan *bracket* dengan *longitudinal bulkhead* 17 bagian *starboard* memiliki tegangan maksimum sebesar 188.155 N/mm².



Gambar 4.11 *Hot Spot Area* Kondisi Pembebanan 2 Rolling Kiri - Hogging



Gambar 4.12 *Hot Spot Area* Kondisi Pembebanan 2 Rolling Kiri - Sagging

Pada Tabel 4.2 ditunjukkan rekapitulasi hasil tegangan untuk kondisi pembebanan 2 pada ketinggian pengisian muatan setinggi h.

Tabel 4.2 Tegangan Pada Kondisi Pembebanan 2

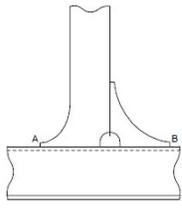
Kondisi Muatan	Sambungan	Frame	σ (N/mm ²)	σ_{yd} (N/mm ²)	R_{al} (N/mm ²)
tanpa <i>roll angle</i> - <i>hogging</i>	<i>bracket</i> dengan <i>longitudinal bulkhead</i>	17	70.804	235	125.95
tanpa <i>roll angle</i> - <i>sagging</i>	<i>bracket</i> dengan <i>longitudinal bulkhead</i>	17	70.804	235	125.95
<i>roll angle</i> θ 30° kanan - <i>hogging</i>	<i>bracket</i> dengan <i>longitudinal bulkhead</i>	17	161.404	235	125.95
<i>roll angle</i> θ 30° kanan - <i>sagging</i>	<i>bracket</i> dengan <i>longitudinal bulkhead</i>	17	161.404	235	125.95
<i>roll angle</i> θ 30° kiri - <i>hogging</i>	<i>bracket</i> dengan <i>longitudinal bulkhead</i>	17	188.155	235	125.95
<i>roll angle</i> θ 30° kiri - <i>sagging</i>	<i>bracket</i> dengan <i>longitudinal bulkhead</i>	17	188.155	235	125.95

Hasil analisis tegangan pada Tabel 4.2 diatas menunjukkan bahwa nilai tegangan kritis yang dihasilkan pada kondisi saat dilakukan *roll* 30° ke kanan dan *roll* 30° ke kiri melebihi tegangan ijin yang didapatkan dari rumus (2.11) yaitu sebesar 125.95 Mpa.

4.4. Faktor Konsentrasi Tegangan

Faktor konsentrasi tegangan terjadi pada detail struktur akibat adanya diskontinuitas seperti lubang atau retakan. Semua faktor konsentrasi tegangan yang akan berpengaruh pada kondisi sambungan harus diperhatikan dan dimasukkan ke dalam perhitungan. Berdasarkan *Common Structural Rules for Oil Tanker*, ada dua faktor konsentrasi tegangan yang mempengaruhi nilai faktor konsentrasi tegangan total K, yaitu K_a yang merupakan faktor akibat beban axial dan K_b yang merupakan faktor akibat *bending moment*. Untuk tipe sambungan yang digunakan pada FPSO ini adalah seperti pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Tipe Sambungan untuk Menentukan SCF

Tipe Sambungan	Class		SCF				K	
	Point "A"	Point "B"	Point "A"		Point "B"		Point "A"	Point "B"
			K_a	K_b	K_a	K_b		
	F	F	1.28	1.34	1.28	1.34	1.715	1.715

Faktor konsentrasi tegangan sendiri merupakan faktor pengali terhadap tiap tegangan maksimum di semua kondisi pembebanan untuk mendapatkan rentang tegangan (S_{Ri}) yang nantinya akan digunakan dalam menghitung *cumulative fatigue damage*.

Pada tugas akhir ini dikarenakan tegangan kritis berada pada area point "B" maka nilai K_a yang digunakan adalah sebesar 1.28 dan untuk K_b sebesar 1.34. Sehingga nilai nilai K sendiri merupakan perkalian antara K_a dan K_b yaitu sebesar 1.715.

4.5. Kurva S-N

Berdasarkan tabel kurva S-N yang terdapat dalam CSR 2014, nilai K_2 bergantung pada *class* sambungan struktur yang digunakan. Nilai K_2 akan digunakan dalam perhitungan nilai *cumulative fatigue damage* DM_i . Pada Tabel 4.4 berdasarkan CSR 2014 nilai m , K_2 , dan S_q ditunjukkan untuk masing-masing *class* sambungan struktur.

Tabel 4.4 Nilai m , K_2 , dan S_q pada Kurva S-N

<i>Class</i>	m	K_2	S_q
B	4	1.01E+15	100.2
C	3.5	4.23E+13	78.2
D	3	1.50E+12	53.2
E	3	1.04E+12	47.0
F	3	6.30E+11	39.8
F2	3	4.30E+11	35.0
G	3	2.50E+11	29.2
W	3	1.60E+11	25.2

Pada tugas akhir ini, sambungan yang di analisis termasuk dalam *class* F, maka nilai m , K_2 , dan S_q yang di tunjukkan oleh Tabel 4.4 masing-masing adalah sebesar 3, 6.3×10^{11} , dan 39.8.

4.6. *Cumulative Fatigue Damage*

Setelah melakukan analisis tegangan yang kemudian setiap rentang tegangan yang di dapat dikalikan dengan faktor konsentrasi tegangan K, tahap selanjutnya adalah melakukan perhitungan akumulasi kerusakan akibat kelelahan (*cumulative fatigue damage*). Nilai DM_i sendiri tidak boleh lebih dari 1, jika nilai tersebut lebih dari 1 maka struktur dapat dikatakan gagal. Perhitungan *cumulative fatigue damage* DM_i dihitung dengan rumus pendekatan berdasarkan CSR 2014 sebagai berikut:

$$DM_i = \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \quad (4.23)$$

Persamaan tersebut merupakan fungsi dari rentang tegangan yang didapat dari hasil perkalian setiap hasil pengurangan nilai tegangan maksimum terbesar dengan nilai tegangan maksimum terkecil melalui analisis *finite element method* dengan faktor konsentrasi tegangan K. Selain itu, persamaan diatas juga merupakan fungsi dari kurva S-N berdasarkan *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker Appendix C*.

Setelah pada subbab 4.4 sebelumnya didapatkan nilai faktor konsentrasi tegangan, selanjutnya nilai tersebut digunakan sebagai pengali tegangan kritis untuk mendapat nilai rentang tegangan (S_{Ri}) yang dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Nilai Rentang Tegangan S_{Ri} (Kondisi Pembebanan 1)

$\Delta\sigma$	107.622 Mpa
$K*\Delta\sigma$	184.593

Dengan menggunakan pendekatan yang ada pada CSR maka akan didapat nilai-nilai untuk menghitung *cumulative fatigue damage* yang dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Nilai untuk Menghitung *Cumulative Fatigue Damage*

N_L	70622188
f_0	0.85
U (sec)	7.88E+08
α_1	0.5
m	3
K_2	4.3E+11
N_R	10000
Δm	2
S_q (N/mm ²)	39.8
L	235

Untuk nilai N_L sendiri didapat dari pendekatan pada CSR yaitu sebagai berikut:

$$\frac{f_0 U}{4 \log L} \quad (4.24)$$

Nilai-nilai yang didapatkan di atas selanjutnya digunakan untuk menghitung *cumulative fatigue damage* DM_i pada setiap kondisi pembebanan, Tabel 4.7 menunjukkan perhitungan untuk kondisi pembebanan 1. Kemudian didapatkan hasil nilai DM_i untuk masing-masing pembebanan seperti pada Tabel 4.8. Untuk perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada bagian lampiran.

Tabel 4.7 Perhitungan *Cumulative Fatigue Damage* (Konndisi Pembebanan 1)

	S_{RI}	v_i	Υ ($1+m/\xi, v_i$)	Υ ($1+(m+\Delta m)/\xi, v_i$)	μ_i	DM	<i>fatigue life</i>
Muatan setinggi 0.5h	184.593	1.876	5.035	0.205	0.0539	0.237	
						0.237	105.275

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan *Cumulative Fatigue Damage*

Kondisi Pembebanan	DM _i
Kondisi 1	0.237471720
Kondisi 2	0.320387908

4.7. *Fatigue Life*

Berdasarkan *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker 2014*, rasio dari *cumulative fatigue damage* dapat di gunakan sebagai faktor untuk mencari umur kelelahan, dengan persamaan sebagai berikut:

$$Fatigue\ life = \frac{Design\ life}{DM} \quad \text{years} \quad (4.25)$$

Kriteria *design life* untuk konstruksi sebuah kapal adalah 25 tahun. Umur kelelahan yang di dapat dari hasil perhitungan harus lebih atau mendekati dari *design life* yang telah di tentukan oleh CSR. Pada Tabel 4.9 dapat dilihat umur kelelahan setiap sambungan struktur pada masing-masing kondisi pembebanan yang merupakan hasil dari perhitungan menggunakan persamaan tersebut.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan *Fatigue Life*

Kondisi Pembebanan	DM _i	<i>Fatigue Life</i> (tahun)
Kondisi 1	0.237471720	105
Kondisi 2	0.320387908	78

Dari hasil perhitungan umur kelelahan pada Tabel 4.9 dapat diketahui bahwa umur sambungan konstruksi yang paling kecil terdapat pada kondisi pembebanan 2 yaitu dengan umur kelelahan 78 tahun. Umur kelelahan tersebut masih memenuhi kriteria yang disyaratkan oleh CSR yaitu lebih dari 25 tahun.

Setelah semua perhitungan dilakukan, mulai dari analisis pembebanan sampai perhitungan umur kelelahan, dapat diketahui sisa umur yang dimiliki oleh konstruksi FPSO

107160 DWT, mengingat FPSO tersebut beroperasi sejak tahun 1999 namun kemudian dikonversi dari kapal tanker pada tahun 2016 dan kembali beroperasi pada tahun 2016 sampai sekarang, sehingga sisa umur yang dimiliki FPSO 107160 DWT ini adalah 74 tahun.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis dari kedua kondisi pembebanan model maka kesimpulan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Beban-beban yang menyebabkan kelelahan pada FPSO ini yaitu beban *sloshing* dan *vertical bending moment*.
2. Lokasi dari struktur *midship* FPSO 107160 DWT yang memiliki nilai tegangan paling tinggi yaitu berada di sambungan antara *bracket* dengan *longitudinal bulkhead*. Hal tersebut dikarenakan bentuk dari sambungan itu sendiri.
3. Nilai umur kelelahan (*fatigue life*) pada sambungan struktur masing-masing kondisi pembebanan, yaitu:
 - a. Pada kondisi 1 dengan tinggi pengisian muatan 0.5h memiliki umur kelelahan 105 tahun.
 - b. Pada kondisi 2 dengan tinggi pengisian muatan h memiliki umur kelelahan 78 tahun.
4. Sisa umur konstruksi pada bagian *midship* FPSO 107160 DWT adalah 74 tahun karena sebelumnya FPSO ini telah selesai dikonversi dan kembali beroperasi pada tahun 2016.

5.2. Saran

Dari hasil penelitian tugas akhir ini, maka ada beberapa saran yang dapat disajikan, yaitu sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini umur kelelahan FPSO 107160 DWT dianalisis menggunakan metode *simplified*, untuk mendapat hasil yang lebih valid dan akurat penelitian ini dapat dikembangkan lagi menggunakan metode *spectral* yang dimana lebih baik jika digunakan mengingat kondisi di lapangan tempat FPSO beroperasi yaitu di perairan lepas pantai.
2. Penelitian dapat dikembangkan dengan menambahkan beban-beban lingkungan seperti pada kondisi di lapangan tempat FPSO beroperasi.

3. Penelitian ini dapat dikembangkan lagi untuk mendapat hasil yang lebih akurat juga dengan memperhitungkan pengurangan ketebalan dari faktor korosinya.

DAFTAR PUSTAKA

- Bai, Y. (2003). *Marine Structural Design*. Oxford: Elsevier
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2016). *Rules for The Classification and Construction of Sea Going Steel Ship Volume II: Rules for Hull*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia.
- DNV-GL. (2015). *Class Guideline – Finite Element Analisis*. DNV-GL.
- IACS. (2014). *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers*. Italy: RINA.
- IACS. (2014). *Common Structural Rules for Bulk Carriers*. Italy: RINA.
- Kurnianto, P. (2012). *Perkiraan Umur Konstruksi FPSO Konversi dari Tanker dengan Analisis Fatigue*, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Lessen, T., & Recho, N. (2006). *Fatigue Life Analysis of Welded Structures*. Antony Rowe Ltd.
- Logan, D. L. (2007). *A First Course in the Finite Element Method, Fourth Edition*.
- Maddox, S. J. (1991). *Fatigue Strength of Welded Structures*. England: Abington Publishing
- Owen, F. H., & Jeom, K. P. (2010). *Ship Structural Analysis and Design*. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Rusdi, M. Gifari. (2018). *Analisis Fatigue Life pada Oil Tanker dengan Beban Sloshing*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sadat, Anwar. (2012). *Analisa Umur Kelelahan (Fatigue Life) Scantling Support Structure Module FSO Cinta Natomas*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Septiana, Dita. (2012). *Perkiraan Fatigue Life pada Bracket Kapal Tanker Berdasarkan Common Structural Rules*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Syaiful, M. Anwar. (2013). *Simulasi Sloshing pada Dinding Tanki Tipe Membran Kapal LNG Akibat Gerakan Heaving dan Pitching di Gelombang Reguler*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Yogiarto, A. (2014). *Perhitungan Fatigue Life Kapal Hull Diatas 20.000 DWT Yang Beroperasi Di Indonesia Usia Lebih Dari 15 Tahun Pada Tahun 2012*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

LAMPIRAN

Lampiran A Hasil Perhitungan Beban *Sloshing*

Lampiran B Hasil Perhitungan *Roll Motion*

Lampiran C Hasil Perhitungan *Bending Moment*

Lampiran D Tipe Sambungan

Lampiran E Hasil Perhitungan *Cumulative Fatigue Damage* dan *Fatigue Life*

LAMPIRAN A
HASIL PERHITUNGAN BEBAN *SLOSHING*

Perhitungan beban *sloshing* menggunakan persamaan:

$$P_{slh-t} = 7 \rho g f_{slh} \left(\frac{b_{slh}}{B} - 0.3 \right) GM^{0.75} \quad \text{kN/m}^2$$

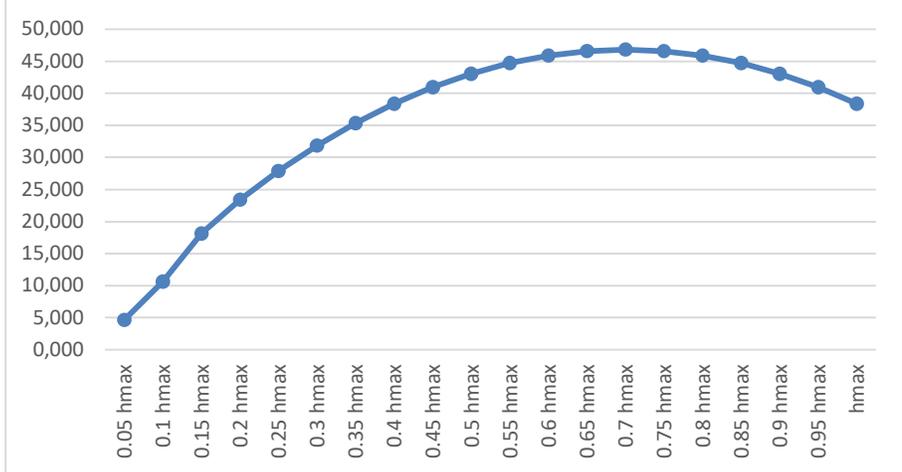
Dimana:

$$f_{slh} = 1 - 2 \left(0.7 - \frac{h_{fill}}{h_{max}} \right)^2$$

h_{max}	19.2	m
B	42	m
GM	0.24 B	
	10.08	m
g	9.81	m/s ²
ρ	0.92	ton/m ³

ketinggian	h _{fill}	f _{slh}	b _{tk-h}	b _{slh}	P _{slh-t}
0.05 hmax	0.960	0.155	16.128	16.128	4.653
0.1 hmax	1.920	0.28	17.056	17.056	10.617
0.15 hmax	2.880	0.395	17.984	17.984	18.097
0.2 hmax	3.840	0.5	18.1	18.1	23.401
0.25 hmax	4.800	0.595	18.1	18.1	27.847
0.3 hmax	5.760	0.68	18.1	18.1	31.825
0.35 hmax	6.720	0.755	18.1	18.1	35.335
0.4 hmax	7.680	0.82	18.1	18.1	38.378
0.45 hmax	8.640	0.875	18.1	18.1	40.952
0.5 hmax	9.600	0.92	18.1	18.1	43.058
0.55 hmax	10.560	0.955	18.1	18.1	44.696
0.6 hmax	11.520	0.98	18.1	18.1	45.866
0.65 hmax	12.480	0.995	18.1	18.1	46.568
0.7 hmax	13.440	1	18.1	18.1	46.802
0.75 hmax	14.400	0.995	18.1	18.1	46.568
0.8 hmax	15.360	0.980	18.1	18.1	45.866
0.85 hmax	16.320	0.955	18.1	18.1	44.696
0.9 hmax	17.280	0.92	18.1	18.1	43.058
0.95 hmax	18.240	0.875	18.1	18.1	40.952
hmax	19.200	0.820	18.1	18.1	38.378

Tekanan Sloshing



LAMPIRAN B
HASIL PERHITUNGAN *ROLL MOTION*

Perhitungan *roll motion* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$U_{roll} = \frac{2.30r_{roll-gyr}}{\sqrt{GM}} \quad \text{secs}$$

$$\theta = \frac{50}{B + 75} (1.25 - 0.025U_{roll}) f_{bk} \quad \text{rads}$$

Loading condition ⁽¹⁾⁽²⁾	T_{LC}	k_r	GM
Full load condition	T_{SC}	$0.35B$	$0.12B$
Optional conditions that have a draught greater than $0.9T_{SC}$	Actual draught but $\geq 0.9T_{SC}$	$0.35B$	$0.12B$
Partial load condition	$\leq 0.6T_{SC}$	$0.40B$	$0.24B$
Ballast condition	T_{BAL}	$0.45B$	$0.33B$
<p>(1) For optional loading conditions or gale/emergency ballast conditions with draught between $0.6T_{SC}$ and $0.9T_{SC}$, the values of k_r and GM, unless provided in the loading manual, are to be obtained by linear interpolation between the optional condition at $0.9T_{SC}$ and the partial load condition at $0.6T_{SC}$ based on the actual draught.</p> <p>(2) For flooded loading conditions, the values of k_r and GM, unless provided in the loading manual, are to be taken as those for the full load condition.</p>			

	T_{SC}	$T_{LC} \leq 0.6 T_{SC}$
L	235	235
B	42	42
GM	5.04	10.08
r_{roll-gyr}	14.7	16.8
U_{roll}	3.354166667	1.916666667
f_{bk}	1.2	1.2
θ (rad)	0.598023504	0.616452991
arc tan θ	30.8°	31.65°

Sudut *roll* yang digunakan pada variasi kondisi pembebanan adalah 30°

LAMPIRAN C
HASIL PERHITUNGAN *BENDING MOMENT*

Perhitungan *bending moment* dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

1. Untuk kondisi *hogging*

$$M_{sw-h-min} = f_{sw} (171C_w L^2 B(C_B + 0.7) 10^{-3} - M_{wv-h-mid})$$

$$M_{wv-h} = 0.19 f_{nl-vh} f_m f_p C_w L^2 B C_B$$

2. Untuk kondisi *sagging*

$$M_{sw-s-min} = -0.85 f_{sw} (171C_w L^2 B(C_B + 0.7) 10^{-3} + M_{wv-s-mid})$$

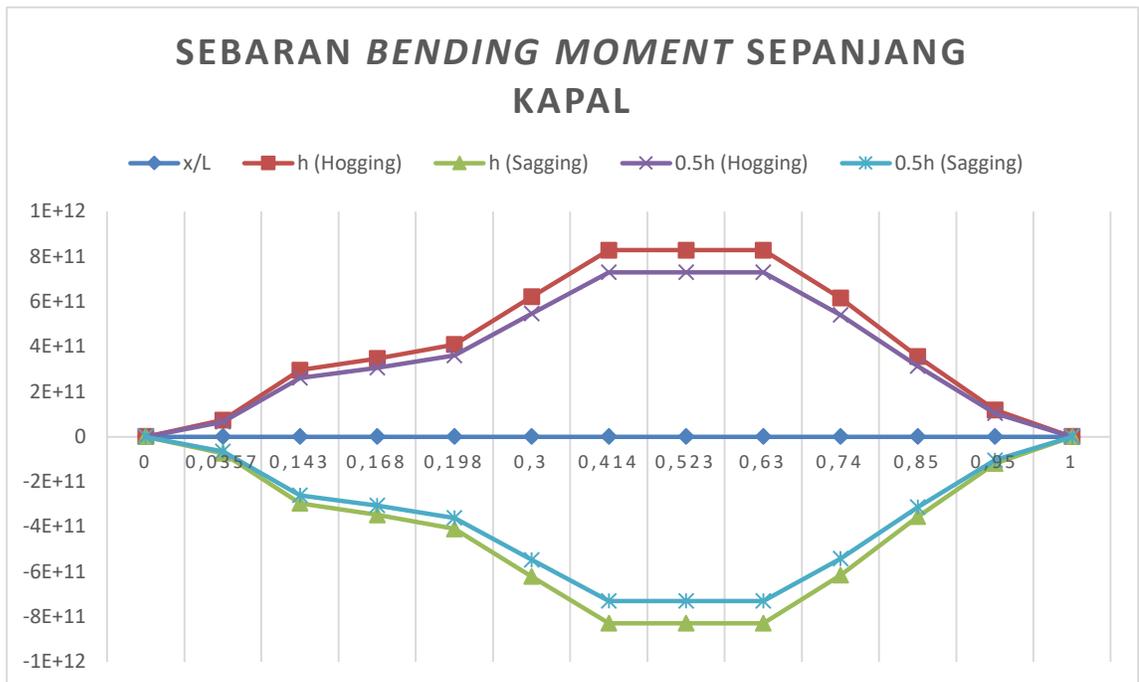
$$M_{wv-s} = -0.19 f_{nl-vs} f_m f_p C_w L^2 B C_B$$

L	235	m
B	42	m
f_{sw}	1	
f_{nl-vh}	1	
f_{nl-vs}	1	
f_m	1	untuk 0.414L
	0.7428	untuk 0.74L
f_T	1	
f_p	0.22185	
C_w	10.22595	
C_B	0.729606	untuk T _{LC}
	0.828467	untuk T _{SC}

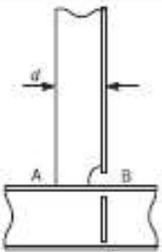
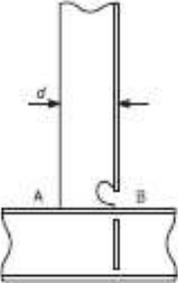
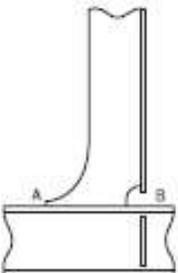
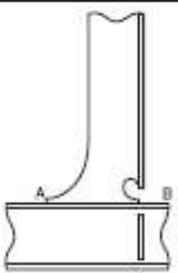
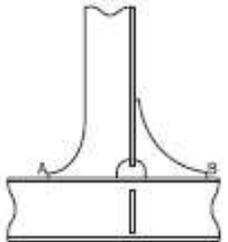
Muatan Setinggi h (Penuh)				
<i>bending moment</i> posisi 97.5 dari AP (0.414L)				
M _h	828279.82	kNm	8.2828E+11	Nmm
M _s	-828279.8	kNm	-8.2828E+11	Nmm
<i>bending moment</i> posisi 173.94 dari AP (0.74L)				
M _h	615246.25	kNm	6.15246E+11	Nmm
M _s	-615246.2	kNm	-6.15246E+11	Nmm
Muatan Setinggi 0.5 h				
<i>bending moment</i> posisi 97.5 dari AP (0.414L)				
M _h	729440.83	kNm	7.29441E+11	Nmm
M _s	-729440.8	kNm	-7.29441E+11	Nmm
<i>bending moment</i> posisi 173.94 dari AP (0.74L)				
M _h	541828.65	kNm	5.41829E+11	Nmm
M _s	-541828.6	kNm	-5.41829E+11	Nmm

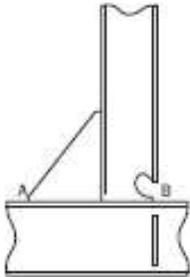
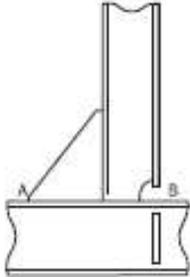
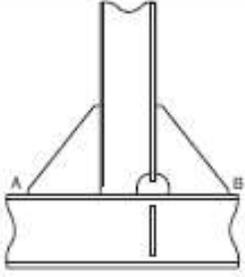
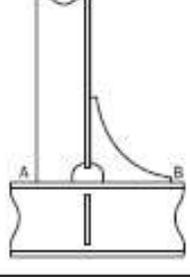
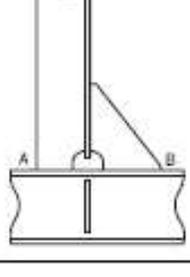
neutral axis -F1	13.2	m
neutral axis -F2	8.1	m
titik berat F1	8.8	m
titik berat F2	5.4	m

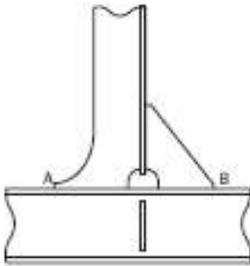
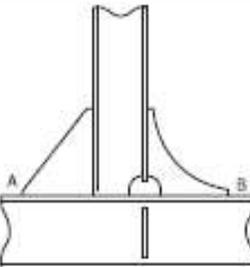
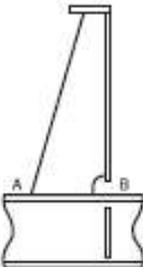
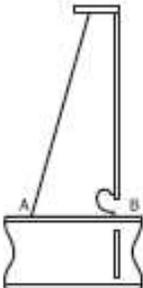
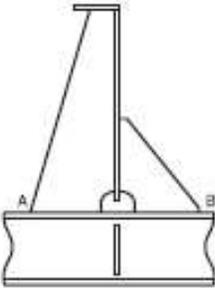
M = (F₁ x l₁)+(F₂ x l₂)				
Muatan Penuh			Muatan 0.5h	
1	615246200000 = (F ₁ x 8.8)+(F ₂ x 5.4)		3	541828600000 = (F ₁ x 8.8)+(F ₂ x 5.4)
	615246200000 = (1.63F ₂ x 8.8)+(F ₂ x 5.4)			541828600000 = (1.63F ₂ x 8.8)+(F ₂ x 5.4)
	615246200000 = 19.744 F ₂			541828600000 = 19.744 F ₂
	F ₂ = 31161173014.586	0.74L	F ₂ = 27442696515.397	0.74L
	F ₁ = 50792712013.776		F ₁ = 44731595320.097	
2	828279800000 = (F ₁ x 8.8)+(F ₂ x 5.4)		4	729440800000 = (F ₁ x 8.8)+(F ₂ x 5.4)
	828279800000 = (1.63F ₂ x 8.8)+(F ₂ x 5.4)			729440800000 = (1.63F ₂ x 8.8)+(F ₂ x 5.4)
	828279800000 = 19.744 F ₂			729440800000 = 19.744 F ₂
	F ₂ = 41950962317.666	0.414L	F ₂ = 36944935170.178	0.414L
	F ₁ = 68380068577.795		F ₁ = 60220244327.390	

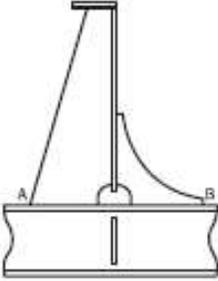
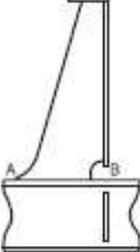
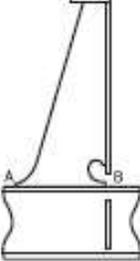
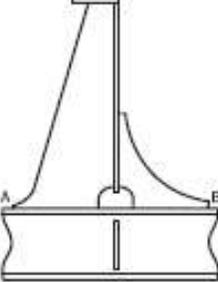
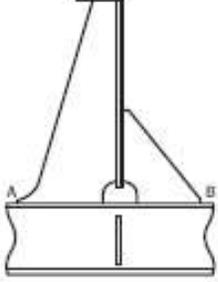


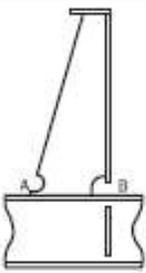
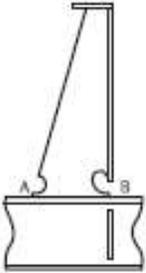
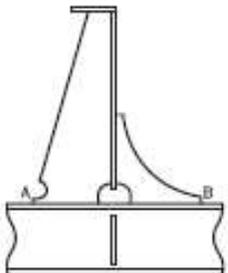
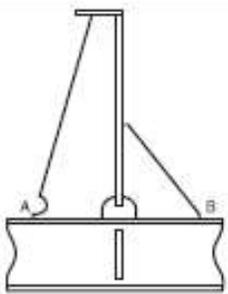
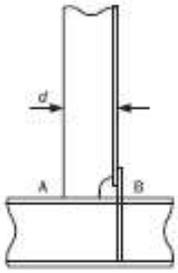
LAMPIRAN D
TIPE SAMBUNGAN

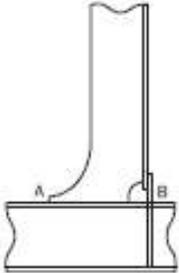
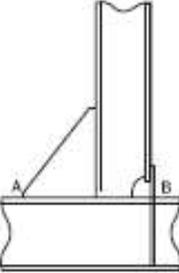
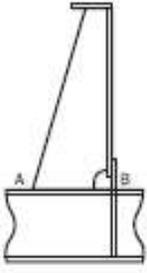
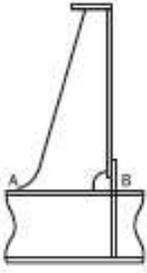
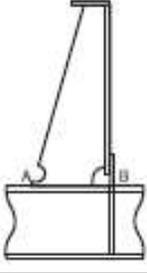
ID	Connection type ^(a) ^(b)	Point 'A'		Point 'B'	
		K_a	K_b	K_a	K_b
1 ^(a)		1.28 for $d \leq 150$ 1.36 for $150 < d \leq 250$ 1.45 for $d > 250$	1.40 for $d \leq 150$ 1.50 for $150 < d \leq 250$ 1.60 for $d > 250$	1.28 for $d \leq 150$ 1.36 for $150 < d \leq 250$ 1.45 for $d > 250$	1.60
2 ^(a)		1.28 for $d \leq 150$ 1.36 for $150 < d \leq 250$ 1.45 for $d > 250$	1.40 for $d \leq 150$ 1.50 for $150 < d \leq 250$ 1.60 for $d > 250$	1.14 for $d \leq 150$ 1.24 for $150 < d \leq 250$ 1.34 for $d > 250$	1.27
3		1.28	1.34	1.52	1.67
4		1.28	1.34	1.34	1.34
5		1.28	1.34	1.28	1.34

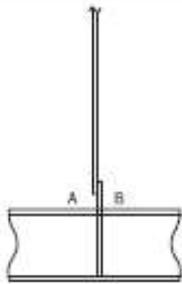
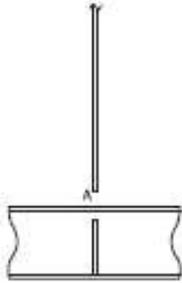
ID	Connection type ⁽²⁾ (3)	Point 'A'		Point 'B'	
		K_a	K_b	K_a	K_b
6		1.52	1.67	1.34	1.34
7		1.52	1.67	1.52	1.67
8		1.52	1.67	1.52	1.67
9		1.52	1.67	1.28	1.34
10		1.52	1.67	1.52	1.67

ID	connection type ⁽²⁾ (a)	Point 'A'		Point 'B'	
		K_a	K_b	K_a	K_b
11		1.28	1.34	1.52	1.67
12		1.52	1.67	1.28	1.34
13		1.52	1.67	1.52	1.67
14		1.52	1.67	1.34	1.34
15		1.52	1.67	1.52	1.67

ID	Connection type ⁽²⁾ ⁽³⁾	Point 'A'		Point 'B'	
		K_a	K_b	K_a	K_b
16		1.52	1.67	1.28	1.34
17		1.34	1.34	1.52	1.67
18		1.34	1.34	1.34	1.34
19		1.34	1.34	1.28	1.34
20		1.34	1.34	1.52	1.67

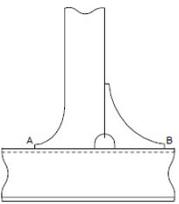
ID	Connection type ⁽²⁾ (3)	Point 'A'		Point 'B'	
		K_a	K_b	K_a	K_b
21		1.34	1.34	1.52	1.67
22		1.34	1.34	1.34	1.34
23		1.34	1.34	1.28	1.34
24		1.34	1.34	1.52	1.67
25 (4)		1.28 for $d \leq 150$ 1.36 for $150 < d \leq 250$ 1.45 for $d > 250$	1.40 for $d \leq 150$ 1.50 for $150 < d \leq 250$ 1.60 for $d > 250$	1.14 for $d \leq 150$ 1.24 for $150 < d \leq 250$ 1.34 for $d > 250$	1.25 for $d \leq 150$ 1.36 for $150 < d \leq 250$ 1.47 for $d > 250$

ID	connection type ⁽²⁾ (3)	Point 'A'		Point 'B'	
		K_a	K_b	K_a	K_b
26		1.28	1.34	1.34	1.47
27		1.52	1.67	1.34	1.47
28		1.52	1.67	1.34	1.47
29		1.34	1.34	1.34	1.47
30		1.34	1.34	1.34	1.47

ID	Connection type ⁽²⁾⁽³⁾	Point 'A'		Point 'B'	
		K_a	K_b	K_a	K_b
31 ⁽⁴⁾		1.13	1.20	1.13	1.20
32 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾		1.13	1.14	N/A	N/A
<p>(1) The attachment length d, in mm, is defined as the length of the welded attachment on the longitudinal stiffener flange without deduction of scallop.</p> <p>(2) Where the longitudinal stiffener is a flat bar and there is a web stiffener/bracket welded to the flat bar stiffener, the stress concentration factor listed in the table is to be multiplied by a factor of 1.12 when the thickness of attachment is thicker than the 0.7 times thickness of flat bar stiffener. This also applies to unsymmetrical profiles where there is less than 8 mm clearance between the edge of the stiffener flange and the attachment, e.g. bulb or angle profiles where the clearance of 8 mm cannot be achieved.</p> <p>(3) Designs with overlapped connection / attachments, see [5.2.3].</p> <p>(4) ID. 31 and 32 refer to details where web stiffeners are omitted or not connected to the longitudinal stiffener flange. See [5.2.4]</p> <p>(5) For connection type ID. 32 with no collar and/or web plate welded to the flange, the stress concentration factors provided in this table are to be used irrespective of slot configuration.</p> <p>(6) The fatigue assessment point 'A' is located at the connection between the stiffener web and the transverse web frame or lug plate.</p>					
[URCNI to 01 JAN 2014]					

LAMPIRAN E
HASIL PERHITUNGAN *CUMULATIVE FATIGUE DAMAGE*
DAN *FATIGUE LIFE*

Kondisi pembebanan 1

	Class		SCF				K	
	Point "A"	Point "B"	Point "A"		Point "B"		Point "A"	Point "B"
			K _a	K _b	K _a	K _b		
F	F	1.28	1.34	1.28	1.34	1.7152	1.7152	

N _L	70622188
f ₀	0.85
U (sec)	7.88E+08
α ₁	0.5
m	3
K ₂	4.3E+11
N _R	10000
Δm	2
S _q (N/mm ²)	39.8
L	235

f _{weibull} (CL bulkhead)	1.1
f _{weibull} (inner bottom)	1
ξ ₁	1.03675
ξ ₂	0.9425
1+m/ξ ₁	3.893658066
1+m/ξ ₂	4.183023873
1+(m+Δm)/ξ ₁	5.822763443
1+(m+Δm)/ξ ₂	6.305039788
Γ (1+m/ξ ₁)	5.258272727
Γ (1+m/ξ ₂)	7.586216276

Tegangan pada *hot spot area* di kondisi pembebanan 1

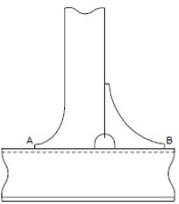
σ (MPa)	K*σ
107.518	184.4149
107.518	184.4149
161.381	276.8007
161.381	276.8007
53.7589	92.20727
53.7589	92.20727

$$\Delta\sigma = 107.6221 \text{ Mpa}$$

$$K*\Delta\sigma = 184.5934$$

	S _{RI}	v _i	Y (1+m/ξ ₂ ,v _i)	Y (1+(m+Δm)/ξ ₂ ,v _i)	μ _i	DM	fatigue life
Muatan setinggi 0.5h	184.593	1.876	5.035	0.205	0.0539	0.237	
						0.237	105.275

Kondisi pembebanan 2

Tipe Sambungan	Class		SCF				K	
	Point "A"	Point "B"	Point "A"		Point "B"		Point "A"	Point "B"
			Ka	Kb	Ka	Kb		
	F	F	1.28	1.34	1.28	1.34	1.7152	1.7152

N _L	70622188
f ₀	0.85
U (sec)	7.88E+08
α ₁	0.5
m	3
K ₂	4.3E+11
N _R	10000
Δm	2
S _q (N/mm ²)	39.8
L	235

f _{weibull} (CL bulkhead)	1.1
f _{weibull} (inner bottom)	1
ξ ₁	1.03675
ξ ₂	0.9425
1+m/ξ ₁	3.893658066
1+m/ξ ₂	4.183023873
1+(m+Δm)/ξ ₁	5.822763443
1+(m+Δm)/ξ ₂	6.305039788
Γ (1+m/ξ ₁)	5.258272727
Γ (1+m/ξ ₂)	7.586216276

Tegangan pada *hot spot area* di kondisi pembebanan 2

σ (MPa)	K*σ
70.804	121.443
70.804	121.443
161.404	276.8401
161.404	276.8401
188.155	322.7235
188.155	322.7235

$$\Delta\sigma = 117.3506 \text{ Mpa}$$

$$K*\Delta\sigma = 201.297491$$

	S _{RI}	v _i	Y (1+m/ξ ₂ ,v _i)	Y (1+(m+Δm)/ξ ₂ ,v _i)	μ _i	DM	fatigue life
Muatan setinggi h	201.279	1.715	5.035	0.205	0.056	0.320	
						0.320	78.030

BIODATA PENULIS



Khadijah Namira Putri Salamun, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Jakarta pada 16 April 1997 silam, Penulis merupakan anak kedua dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Al-Huda, kemudian melanjutkan ke SD Islam Al-Azhar 9, SMP Islam Al-Azhar 8 dan SMA Islam Al-Azhar 4. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2015 melalui jalur mandiri.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Konstruksi Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi *staff* Departemen Esternal DPM ITS 2016/2017, *staff* Departemen PSDM HIMATEKPAL ITS 2017/2018 serta Kepala Divisi Eksternal Departemen *Student Development* NACE-SC ITS 2017/2018. Selan itu, Penulis juga pernah menjadi koordinator *liaison officer* bidang lomba *paper* pada acara Petrolida tahun 2017.

Email: namira15@mhs.na.its.ac.id/namiraps16@gmail.com