



TUGAS AKHIR - MN 184802

**ANALISIS UMUR KELELAHAN SAMBUNGAN *BRACKET*
TOPSIDE MODULE FPSO MENGGUNAKAN *FRACTURE*
*MECHANICS***

**Tyo Dwiki Prakoso
NRP 0411154000034**

**Dosen Pembimbing
M. Nurul Misbah, S.T., M.T**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**



TUGAS AKHIR - MN 184802

**ANALISIS UMUR KELELAHAN SAMBUNGAN *BRACKET*
TOPSIDE MODULE FPSO MENGGUNAKAN *FRACTURE*
*MECHANICS***

**Tyo Dwiki Prakoso
NRP 0411154000034**

**Dosen Pembimbing
M. Nurul Misbah, S.T., M.T**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**



FINAL PROJECT - MN 184802

**FATIGUE LIFE ANALYSIS ON THE BRACKET
CONNECTION OF TOPSIDE MODULE FPSO USING
FRACTURE MECHANICS**

**Tyo Dwiki Prakoso
NRP 0411154000034**

**Supervisor
M. Nurul Misbah, S.T., M.T.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2019**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS UMUR KELELAHAN SAMBUNGAN *BRACKET* *TOPSIDE MODULE FPSO MENGGUNAKAN FRACTURE* *MECHANICS*

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:

TYO DWIKI PRAKOSO
NRP 0411154000034

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing


M. 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, 19 JULI 2019

LEMBAR REVISI

ANALISIS UMUR KELELAHAN SAMBUNGAN *BRACKET* *TOPSIDE MODULE FPSO MENGGUNAKAN FRACTURE* *MECHANICS*

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 19 Juli 2019

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

Oleh:

TYO DWIKI PRAKOSO
NRP 0411154000034

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T.



2. Dony Setyawan, S.T., M.Eng.



3. Totok Yulianto, S.T., M.T.



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

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



SURABAYA, 19 JULI 2019

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. Tuhan Yang Maha Esa yang dengan segala bantuan-Nya telah memberi Rahmat, Karunia dan kesehatan sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini;
2. Keluarga yang senantiasa memberikan dukungan moril untuk dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini;
3. M. Nurul Misbah, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
4. Prof. Ir. IKAP Utama, Ph.D. selaku Dosen Wali atas bimbingan selama perkuliahan di Departemen Teknik Perkapalan FTK-ITS;
5. Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Perkapalan FTK-ITS;
6. Dosen dan Tendik Departemen Teknik Perkapalan FTK-ITS;
7. 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 ijin pemakaian fasilitas laboratorium;
8. Astried Maulidya yang selalu memberikan inspirasi dan motivasi untuk dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini;
9. Teman – teman yang mengerjakan di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal yang selalu menjadi teman berdiskusi, memberikan bantuan dan motivasi untuk dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini;
10. Khadijah Namira dan Shindi Regitasyali yang telah memberikan bantuan berupa data dan peminjaman laptop selama pengerjaan Tugas Akhir ini;
11. P55 SAMUDRARAKSA selaku teman dan keluarga kedua selama perkuliahan di Departemen Teknik Perkapalan FTK-ITS;
12. Semua pihak yang telah membantu penulis yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

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, 19 Juli 2019

Tyo Dwiki Prakoso

ANALISIS UMUR KELELAHAN SAMBUNGAN *BRACKET TOPSIDE MODULE FPSO* MENGGUNAKAN *FRACTURE MECHANICS*

Nama Mahasiswa : Tyo Dwiki Prakoso
NRP : 04111540000034
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : M. Nurul Misbah, S.T., M.T.

ABSTRAK

Salah satu tantangan dalam mendesain struktur FPSO adalah struktur antara *topside structure* dan *hull structure*. Struktur tersebut harus mempunyai kekuatan yang cukup akibat beban siklis seperti *topside inertia loads* dan *hull girder bending moment* akibat beban gelombang pada kondisi lingkungan dan *sea states*. Beban siklis tersebut menyebabkan terjadinya kelelahan yang memicu terjadinya *fatigue cracking* sehingga dapat mempengaruhi *production integrity*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui umur kelelahan *topside interface structure* menggunakan dua pendekatan yaitu metode *cumulative fatigue damage* untuk menganalisis umur kelelahan akibat inisiasi retak dan metode pendekatan *fracture mechanics* untuk menganalisis perambatan retak dan pengaruh perambatan retak terhadap umur kelelahan *topside interface structure*. Pemodelan struktur dilakukan dengan pemodelan elemen hingga secara global dan lokal. Dari analisis tegangan global didapatkan lokasi kritis yaitu sambungan TS10 untuk selanjutnya ditinjau dalam analisis tegangan lokal. Hasil tegangan normal (sumbu Z) yaitu 29,489 MPa. Setelah itu nilai tegangan tersebut diaplikasikan pada pemodelan retak untuk menentukan nilai *stress intensity factor* (SIF), laju perambatan retak, jumlah siklus dan umur kelelahan struktur. Dengan itu didapatkan nilai *stress intensity factor* (SIF) retak awal dari *topside interface structure* yaitu $1,469 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ dan laju perambatan retak awal yaitu $2,2 \times 10^{-11} \text{ m/cycle}$. Setelah itu didapatkan jumlah siklus dari retak awal sampai retak kritis yaitu $2,3 \times 10^5 \text{ cycle}$. Umur kelelahan *topside interface structure* menggunakan pendekatan *fracture mechanics* yaitu 101,028 tahun dengan nilai *safety factor* adalah 5,05. Sedangkan dengan menggunakan metode *SN Cuve* didapatkan umur yaitu 151,72 tahun.

Kata kunci: *cummulative fatigue damage*, *fracture mechanics*, *stress intensity factor*, perambatan retak dan *topside interface structure*,

FATIGUE LIFE ANALYSIS ON THE BRACKET CONNECTION OF TOPSIDE MODULE FPSO USING FRACTURE MECHANICS

Author : Tyo Dwiki Prakoso
Student Number : 0411154000034
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology
Supervisor : M. Nurul Misbah, S.T., M.T.

ABSTRACT

One of the challenges in a FPSO project is to design the structure between the topside structure and the hull structure. The structure should have structural adequacy for the cyclic loads like the inertia loads and the hull girder bending moment induced by the wave load in environmental condition and sea states. The cyclic loads cause the fatigue cracking that can affect the production integrity. This research is done to know the fatigue life of topside interface structure using two different approaches, which are cumulative fatigue damage to analysis of fatigue crack initiation and fracture mechanics to analysis of fatigue crack propagation and the effect of crack propagation to fatigue life of topside interface structure. Structure modelling using finite element methods in global and local model. From the global structure analysis, it is obtained critical location which is at TS10 joint and next it is reviewed using local structure analysis. The normal stress range (Z axis) is 29,489 MPa. Afterwards the value of the maximum stress is applied to the crack modelling to determine the value of stress intensity factor (SIF), crack propagation rate, total cycle and fatigue life. With that it is obtained stress intensity factor (SIF) value of initial crack is 1,469 MPa \sqrt{m} and initial crack propagation rate is $2,2 \times 10^{-11}$ m/cycle. Next obtained total cycle of initial crack to critical crack is yaitu $2,3 \times 10^5$ cycle. Fatigue life of topside interface structure using fracture mechanic approach is 101,028 years with safety factor value is 5,05. While using the cumulative fatigue damage methods, the fatigue life is 151,72 years.

Keywords: cumulative fatigue damage, fracture mechanics, stress intensity factor, perambatan retak and topside interface structure

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR REVISI.....	iv
HALAMAN PERUNTUKAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
Bab I PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang Masalah.....	1
I.2. Perumusan Masalah.....	2
I.3. Tujuan.....	2
I.4. Batasan Masalah.....	2
I.5. Manfaat.....	3
I.6. Hipotesis.....	3
Bab II STUDI LITERATUR	5
II.1. Dasar Teori.....	5
II.1.1. <i>Floating Production Storage Offloading (FPSO)</i>	5
II.1.2. <i>Topside Module Support</i>	10
II.1.3. Konsep Pembebanan	12
II.1.4. Beban Gelombang	13
II.1.5. Konsep Metode Elemen Hingga.....	16
II.1.6. Konsep Perhitungan Fatigue.....	18
II.1.7. Siklus Rentang Tegangan	19
II.1.8. Kurva S-N.....	21
II.1.9. <i>Cummulative Fatigue Damage</i>	22
II.1.10. Mekanisme Kepecahan	25
II.1.11. Metode <i>Fracture Mechanics</i>	27
II.1.12. <i>Stress Intensity Factor</i>	28
II.1.13. Kedalaman Retak Kritis	30
II.1.14. Perambatan Retak	30
II.1.15. Perbandingan antara Pendekatan <i>Fracture Mechanics</i> dan <i>SN Curve</i>	30
II.2. Tinjauan Pustaka	31
II.2.1. Analisis Kelelahan Berdasarkan <i>Fracture Mechanics</i>	31
II.2.2. Analisis Kelelahan Berdasarkan Rasio Kerusakan Kumulatif	32
Bab III METODOLOGI	35
III.1. Studi Literatur	35
III.2. Pengumpulan Data	35
III.2.1. Ukuran Utama dan Layout FPSO	35
III.2.2. <i>Topside Module FPSO</i>	36

III.2.3.	Data Struktur FPSO	38
III.2.4.	Data Lingkungan.....	40
III.2.5.	Data <i>Mooring</i>	42
III.3.	Pemodelan Hidrodinamis	43
III.4.	Perhitungan Beban dan Variasi Pembebanan.....	46
III.5.	Pemodelan Global	47
III.6.	Kondisi Batas dan Pembebanan	50
III.7.	Pemodelan Lokal.....	51
III.8.	Perhitungan Umur Kelelahan	54
III.9.	Bagan Alir	56
Bab IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		59
IV.1.	Analisis Hidrodinamis.....	59
IV.1.1.	Validasi Model.....	59
IV.1.2.	<i>Acceleration Motion</i>	59
IV.1.3.	Perhitungan Beban dan Variasi Pembebanan	63
IV.2.	Analisis Global.....	66
IV.2.1.	Lokasi Tinjauan Struktur	66
IV.2.2.	Analisis Tegangan Global.....	67
IV.3.	Analisis Lokal	68
IV.3.1.	Validasi Model Sederhana	68
IV.3.2.	Analisis Tegangan Lokal	71
IV.3.3.	Skenario Retak.....	76
IV.3.4.	Perhitungan <i>Stress Intensity Factor</i>	78
IV.3.5.	Analisis Perambatan Retak	80
IV.4.	Perhitungan Umur Kelelahan	81
IV.4.1.	Umur Kelelahan Berdasarkan <i>Fracture Mechanics</i>	81
IV.4.2.	Umur Kelelahan Berdasarkan Rasio Kerusakan Kumulatif	82
Bab V KESIMPULAN DAN SARAN.....		85
V.1.	Kesimpulan.....	85
V.2.	Saran.....	86
DAFTAR PUSTAKA.....		87

LAMPIRAN

LAMPIRAN A HASIL RUNNING ANALISIS HIDRODINAMIS
LAMPIRAN B <i>ACCELERATION MOTION</i> DAN PERHITUNGAN BEBAN
LAMPIRAN C TEGANGAN GLOBAL
LAMPIRAN D REAKSI TUMPUAN
LAMPIRAN E PERHITUNGAN MODEL SEDERHANA
LAMPIRAN F PEMODELAN RETAK DAN HASIL SIF
LAMPIRAN G PERHITUNGAN PERAMBATAN RETAK DAN UMUR KELELAHAN
BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar II-1 Contoh <i>Design Technology</i> FPSO	5
Gambar II-2 Contoh <i>Tank Layout</i>	6
Gambar II-3 Konfigurasi Tangki	6
Gambar II-4 <i>Topside Module Layout</i>	6
Gambar II-5 <i>Spread Mooring Systems</i>	7
Gambar II-6 <i>External Turret</i>	7
Gambar II-7 <i>Internal Turret</i>	8
Gambar II-8 <i>Side by Side Offloading</i>	9
Gambar II-9 <i>Stern to Bow Offloading</i>	9
Gambar II-10 Skema Sambungan.....	11
Gambar II-11 Gelombang Regular dan Gelombang Irregular	13
Gambar II-12 <i>6 Degree of Freedoms FPSO</i>	15
Gambar II-13 Siklus Rentang Tegangan	19
Gambar II-14 Jenis Rentang Tegangan	20
Gambar II-15 <i>SN Curve</i>	22
Gambar II-16 Distribusi tegangan yang diterima selama 10^8 siklus.....	24
Gambar II-17 Tahapan Perambatan Retak	26
Gambar II-18 Tiga Mode Deformasi Retak	28
Gambar III-1 Layout FPSO di perairan Selat Madura	36
Gambar III-2 <i>Topside Module FPSO Arrangement</i>	37
Gambar III-3 <i>Topside Module M70</i>	38
Gambar III-4 Konfigurasi Struktur Kaki <i>Topside Module M70</i>	38
Gambar III-5 Rencana Umum FPSO	39
Gambar III-6 <i>Midship Section</i>	40
Gambar III-7 Posisi Anchor	42
Gambar III-8 Model FPSO pada Maxsurf Pro	43
Gambar III-9 Pendefinisian Letak Sarat dan <i>Point Mass</i>	44
Gambar III-10 Model FPSO dengan <i>Mooring</i>	44
Gambar III-11 Meshing Geometri	45
Gambar III-12 Simulasi <i>Independence Grid</i>	45
Gambar III-13 Posisi Topside Module dari COG FPSO	46
Gambar III-14 Geometri Struktur.....	48
Gambar III-15 Pemodelan Lambung FPSO	48
Gambar III-16 Konvergensi Elemen	49
Gambar III-17 Ukuran <i>Meshing</i> 0.06 m	49
Gambar III-18 <i>Fixed Support</i>	50
Gambar III-19 Momen Gaya (Mx, My dan Mz)	51
Gambar III-20 Gaya (Fx, Fy dan Fz).....	51
Gambar III-21 Pemodelan Lokal	53
Gambar III-22 <i>Submodelling technique</i>	54
Gambar III-23 Diagram Alir Tugas Akhir	57
Gambar IV-1 <i>Acceleration Translational Motion</i>	60
Gambar IV-2 <i>Acceleration Rotational Motion</i>	60

Gambar IV-3 Lokasi Tinjauan Struktur.....	66
Gambar IV-4 Distribusi Tegangan	68
Gambar IV-5 Lokasi Kritis.....	68
Gambar IV-6 Model Spesimen.....	69
Gambar IV-7 Hasil Tegangan Model Spesimen.....	70
Gambar IV-8 Model Retak	70
Gambar IV-9 Hasil SIF Numerik	71
Gambar IV-10 Bracket yang ditinjau	72
Gambar IV-11 Tegangan Pada <i>Bracket 1</i>	73
Gambar IV-12 Tegangan Pada <i>Bracket 2</i>	74
Gambar IV-13 Tegangan Pada <i>Bracket 3</i>	75
Gambar IV-14 Tegangan Pada <i>Bracket 4</i>	76
Gambar IV-15 Skenario Retak	76
Gambar IV-16 Pemodelan Retak pada Kedalaman Kritis.....	78
Gambar IV-17 Nilai <i>Stress Intensity Factor</i> Kedalaman Kritis Pada Simulasi Numerik	79
Gambar IV-18 Nilai <i>Stress Intensity Factor</i>	79
Gambar IV-19 Laju Perambatan Retak	80
Gambar IV-20 Grafik Hubungan antara Umur Kelelahan dan Kedalaman Retak	82

DAFTAR TABEL

Tabel II-1 Tipe Desain <i>Deck Stool</i>	10
Tabel II-2 Detail critical struktur untuk analisis kelelahan	12
Tabel II-3 Tipe Sambungan (Sumber : DNV, 2011)	22
Tabel II-4 Nilai <i>Gamma Function</i> (Sumber : DNV, 2011)	24
Tabel II-5 SIF untuk beberapa geometri.....	29
Tabel II-6 Perbandingan antara <i>Fracture Mechanics</i> dan <i>S-N Curve</i>	31
Tabel III-1 Ukuran Utama FPSO.....	35
Tabel III-2 Lokasi Lapangan	36
Tabel III-3 Data <i>Topside Module FPSO</i>	37
Tabel III-4 Persentase Gelombang setiap Arah.....	41
Tabel III-5 <i>Joint Probability</i> Gelombang 100 Tahun – <i>W Direction</i>	41
Tabel III-6 Posisi Anchor	42
Tabel III-7 Karakteristik <i>Chain Mooring</i>	43
Tabel III-8 Simulasi <i>Independence Grid</i>	45
Tabel III-9 Konvergensi Elemen	49
Tabel IV-1 Validasi Model Global.....	59
Tabel IV-2 <i>Acceleration Surge Motion</i> (m/s ²)	61
Tabel IV-3 <i>Acceleration Sway Motion</i> (m/s ²)	61
Tabel IV-4 <i>Acceleration Heave Motion</i> (m/s ²).....	61
Tabel IV-5 <i>Acceleration Roll Motion</i> (rad/s ²)	62
Tabel IV-6 <i>Acceleration Pitch Motion</i> (rad/s ²)	62
Tabel IV-7 <i>Acceleration Yaw Motion</i> (rad/s ²).....	62
Tabel IV-8 Beban Pada Arah X (kN)	63
Tabel IV-9 Beban Pada Arah Y (kN)	63
Tabel IV-10 Beban Pada Arah Z (kN).....	64
Tabel IV-11 Momen Gaya Pada Arah X (kN.m)	64
Tabel IV-12 Momen Gaya Pada Arah Y (kN.m)	65
Tabel IV-13 Momen Gaya Pada Arah Z (kN.m).....	65
Tabel IV-14 <i>Load Case</i>	66
Tabel IV-15 Distribusi Tegangan pada LC5	67
Tabel IV-16 Validasi Model.....	71
Tabel IV-17 Hasil Tegangan	73
Tabel IV-18 Nilai <i>Stress Intensity Factor</i>	79
Tabel IV-19 Laju Perambatan Retak	80
Tabel IV-20 Umur Kelelahan Setiap Tahap Perambatan Retak.....	81
Tabel IV-21 Perbandingan Hasil Umur Kelelahan.....	82

DAFTAR SIMBOL

m	: massa (kg)
a	: percepatan (m/s^2)
m	: massa (kg)
r	: jari-jari girasi (m)
I	: momen inersia ($kg.m^2$)
α	: percepatan putar (rad/s^2)
σ_{max}	: tegangan maksimum (MPa)
σ_{min}	: tegangan minimum (MPa)
σ_{ys}	: tegangan yield (MPa)
$S_{i(hotspot)}$: rentang tegangan hotspot (MPa)
$S_{i(nominal)}$: rentang tegangan nominal (MPa)
R	: rasio tegangan ($\sigma_{min} / \sigma_{max}$)
$\Delta\sigma$: rentang tegangan (MPa)
N	: nilai prediksi dari cycles untuk gagal pada rentang tegangan dS
m	: slope inverse negative dari kurva S-N
$\log \bar{a}$: intersep dari log N-axis pada kurva S-N
$\log a$: intersep dari mean kurva SN dengan log N axis
$^s\log N$: standar debiasi dari log N.
D	: kerusakan fatigue kumulatif
ni	: jumlah siklus rentang tegangan (S_i) akibat pembebanan gelombang yang sebenarnya terjadi
Ni	: jumlah siklus rentang tegangan (S_i) yang mengakibatkan kegagalan pada sambungan
Q	: probabilitas untuk melebihi rentang tegangan
Td	: umur desain dalam detik.
h	: parameter bentuk distribusi rentang tegangan Weibull
q	: parameter skala distribusi rentang tegangan Weibull
v_o	: frekuensi <i>zero-crossing</i> rata-rata
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$: gamma function.
da/dN	: kecepatan perambatan retak ($MPa\sqrt{m}$)
ΔK	: range faktor intensitas tegangan ($MPa\sqrt{m}$)
K	: faktor intensitas tegangan ($MPa\sqrt{m}$)
K_{IC}	: material fracture toughness ($MPa\sqrt{m}$)
C	: parameter perambatan retak
a_{cr}	: kedalaman retak kritis (m)
ao	: <i>initial crack</i> , panjang retak pada waktu permulaan (m)
Hs	: tinggi gelombang (m)
Tp	: periode gelombang (s)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Masalah

Indonesia masih mempunyai potensi cadangan minyak dan gas bumi (migas) yang cukup melimpah di laut. Dengan itu, aktivitas industri hulu minyak dan gas di Indonesia mulai fokus dan beralih dari lapangan *onshore* ke daerah lepas pantai maupun perairan dalam (Tim Komunikasi ESDM, 2018; Eksplorasi Lapangan Offshore, Fokus Utama Pengembangan Aktivitas Hulu Migas). Dalam tahap *field development* di lapangan *offshore*, salah satu faktor yang diperhatikan adalah fasilitas produksi. Salah satu alternatif fasilitas produksi yang sesuai untuk perairan dalam adalah FPSO (*Floating Production and Storage Offloading*).

Dalam proses perancangan dan operasional FPSO, isu keselamatan (*safety issue*) merupakan tolok ukur kualitas bangunan laut, terutama dalam aspek desain strukturnya. Salah satu tantangan dalam mendesain struktur FPSO adalah struktur antara *topside structure* dan *hull structure* dimana struktur tersebut sangat mempengaruhi *production integrity*. Kerusakan struktur bangunan laut seperti FPSO pada umumnya diakibatkan oleh kelelahan (*fatigue*), kelelahan pada *topside interface structure* diakibatkan karena struktur mendapatkan beban dominan yaitu *hull girder bending moment* dan *topside inertia loads*. Dimana beban tersebut merupakan respon akibat beban gelombang yang bersifat siklis, dimana struktur merespon secara dinamis gelombang acak.

Kelelahan tersebut memicu terjadinya *fatigue cracking* ditandai dengan retak awal (*initial crack*) dan pada proses selanjutnya terjadi perambatan (*propagation*) serta kerusakan (*failure*). Sumber awal perambatan retak pada *topside interface structure* adalah *global hull girder stress*, *local stress concentrations*, tegangan akibat *hull hull girder deflection* dan *topside inertia forces*. Oleh karena itu, diperlukan analisis kelelahan dengan dua pendekatan yaitu metode pendekatan *SN Curves* untuk menganalisis umur kelelahan dengan pendekatan *stress life* dan metode pendekatan *Fracture Mechanics* untuk menganalisis perambatan retak yang kemungkinan terjadi pada struktur yang terbentuk selama masa fabrikasi atau *service life* dan pengaruh perambatan retak terhadap umur kelelahan sambungan *topside interface structure*.

I.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah:

1. Di mana lokasi kritis pada konfigurasi kaki *topside module*?
2. Berapa nilai *stress intensity factor* dari sambungan *bracket topside module FPSO* akibat adanya *initial crack*?
3. Bagaimana *crack propagation* berdasarkan pengaruh *initial crack* pada sambungan *bracket topside module FPSO*?
4. Berapakah umur kelelahan dari sambungan *bracket topside module FPSO* akibat adanya *initial crack*?

I.3. Tujuan

Dari perumusan masalah diatas, dapat diambil tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah :

1. Mendapatkan lokasi kritis pada konfigurasi kaki *topside module*.
2. Mendapatkan nilai *stress intensity factor* pada sambungan bracket topside module FPSO akibat adanya initial crack.
3. Memperoleh indikasi crack propagation pada sambungan bracket topside module FPSO
4. Mengetahui umur kelelahan pada sambungan bracket topside module FPSO akibat adanya initial crack.

I.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. FPSO kondisi muatan penuh, dengan sarat air 14,78 m
2. Beban yang ditinjau adalah *topside inertia loads* dengan variasi tinggi gelombang dan periode gelombang yang meliputi semua arah gelombang. Arah sudut datang gelombang 0°, 90°, 180°, 270°.
3. Model yang digunakan adalah model lambung sebagian dan *topside stool*.
4. Metode *cumulative fatigue damage* menggunakan *simplified fatigue analysis*.
5. *Crack* diasumsikan memiliki retak awal 0,5 mm berdasarkan DNV-RP C203.
6. Mode retak yang digunakan pada analisis adalah mode opening yang hanya memperhitungkan gaya aksial (Mode I).

I.5. Manfaat

Manfaat dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Memberikan pemahaman tentang perhitungan umur kelelahan *sambungan bracket* pada *Topside Module FPSO* dengan pendekatan *Fracture Mechanics* dan pendekatan *SN Curves*.
2. Dari hasil analisis kelelahan akan diperoleh data – data dan info yang diperlukan untuk strategi perencanaan pemeriksaan berkala dan dapat dijadikan dasar dalam merancang

I.6. Hipotesis

Dengan dilakukan penelitian ini maka akan diketahui *stress intensity factor* yang dipakai untuk menentukan perambatan retak dan umur kelelahan struktur. Hipotesis dari penelitian ini adalah inisiasi retak terjadi pada sambungan *bracket topside module FPSO* dan retak akan merambat sampai retak kritis dengan umur kelelahan lebih dari *design life*.

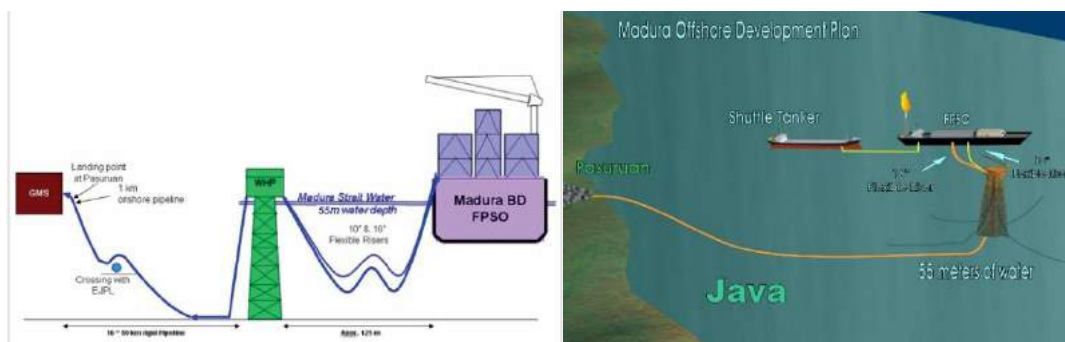
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II STUDI LITERATUR

II.1. Dasar Teori

II.1.1. *Floating Production Storage Offloading (FPSO)*

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) adalah sebuah bangunan apung (*floating structure*) dengan konsep *ship-shaped vessel* yang mempunyai fasilitas produksi diatas geladak untuk memproses hidrokarbon dan penyimpanan minyak atau gas didalam tangki-tangki. FPSO didesain untuk menerima hidrokarbon yang dihasilkan dari *platform* terdekat atau *subsea*, lalu memprosesnya dan menyimpannya sampai minyak dan gas tersebut ditransfer ke kapal tanker atau menggunakan pipa untuk didistribusikan ke konsumen atau pasaran seperti pada Gambar II-1

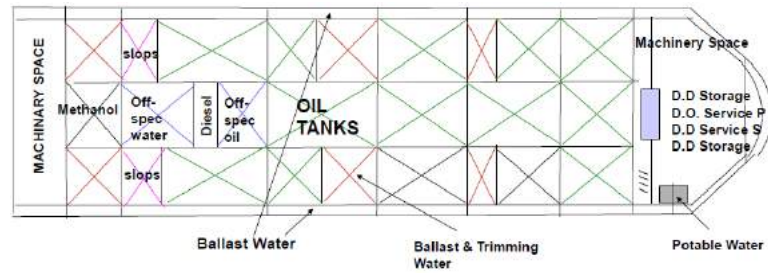


Gambar II-1 Contoh *Design Technology* FPSO
(Sumber : PT. XX, 2018)

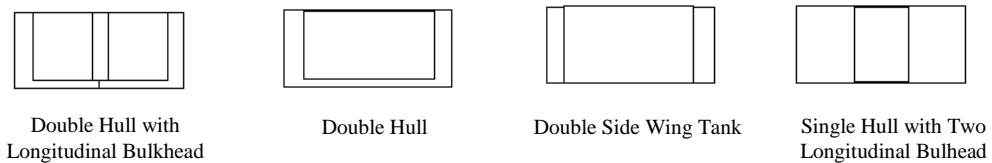
FPSO memiliki beberapa komponen penting, yaitu :

1) *Hull / lambung*

Pengadaan lambung FPSO dapat dilakukan dengan membangun kapal baru (*new build*) yang biasanya berbentuk tongkang atau dengan melakukan konversi terhadap kapal tanker bekas. Lambung pada FPSO ini memiliki tangki-tangki yang berfungsi sebagai penyimpanan minyak atau gas. Gambar II-2 menunjukkan layout tangki pada FPSO. Tangki penyimpanan pada FPSO mempunyai beberapa konfigurasi yang ditunjukkan seperti pada Gambar II-3.



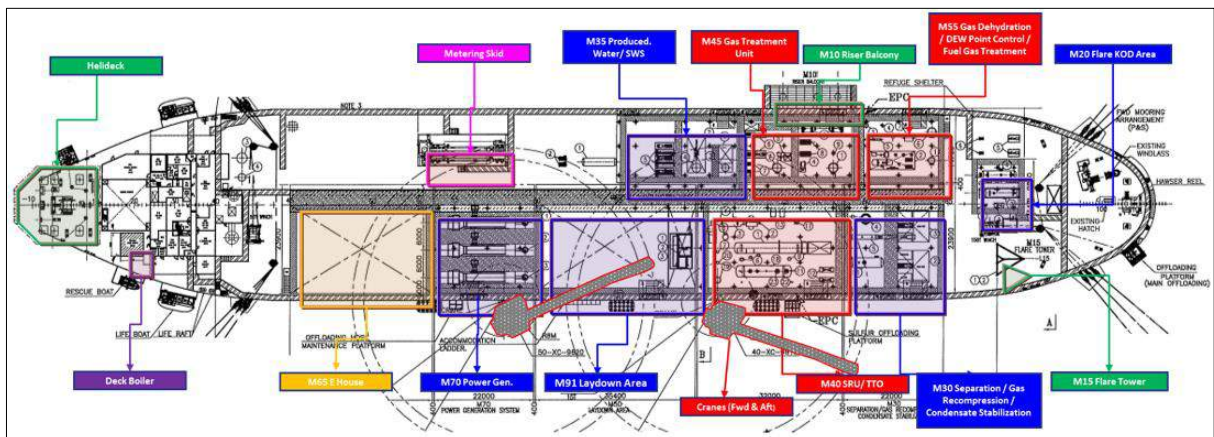
Gambar II-2 Contoh *Tank Layout*
(Sumber : PT. XX, 2018)



Gambar II-3 Konfigurasi Tangki
(Sumber : PT. XX, 2018)

2) *Topsides*

Fasilitas produksi di atas geladak FPSO terdiri dari beberapa fasilitas pemrosesan dan pendukung yang disusun dalam beberapa module. Fasilitas produksi pada FPSO biasanya terletak pada *production deck* dan pada umumnya diposisikan 2,5 m di atas *main deck*. Hal ini bertujuan untuk meminimalisir efek dari *green water* dan untuk meminimalisir apabila terjadi ledakan atau api yang mengenai module agar tidak banyak mempengaruhi lambung. Fasilitas produksi didesain berdasarkan komposisi (*chemistry*) dan *physical properties* dari *reservoir fluids* yang diproduksi, secara umum topside module pada FPSO diantaranya adalah *oil separation system, gas compression and treatment system, water injection system, dan other process systems*.



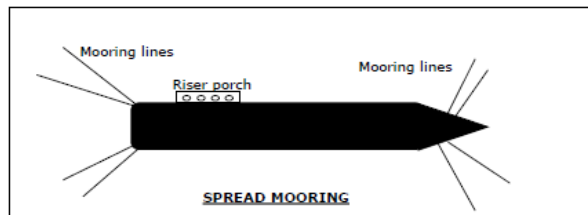
Gambar II-4 *Topside Module Layout*
(Sumber : PT. XX, 2018)

3) Mooring system

Sistem tambat berfungsi untuk menahan gerakan struktur terhadap eksitasi gaya lingkungan. Sistem tambat (mooring) yang sering digunakan saat ini adalah:

a. Spread Mooring Systems

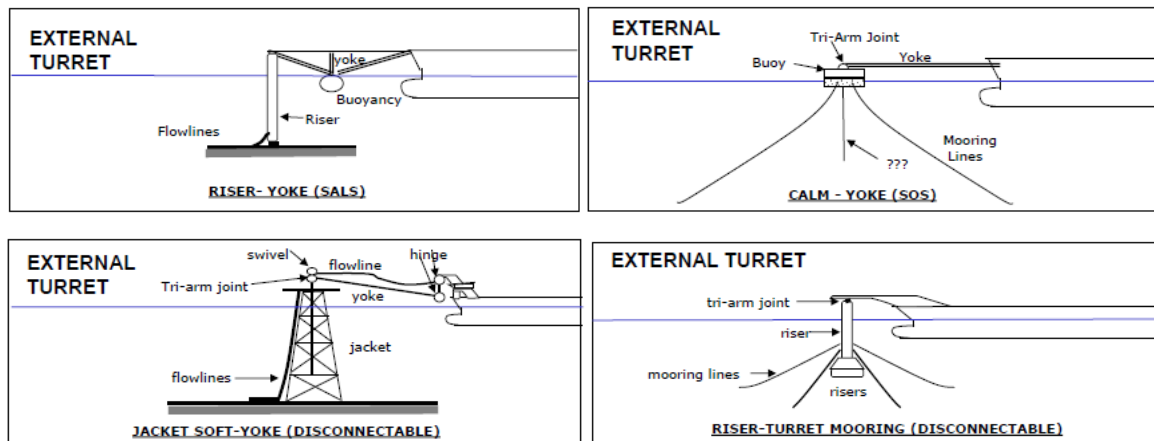
- *Weather vaning*
- Cocok untuk: *Semi Submersibles, Spars, Deep Draught Semi Submersibles, Monohulls (mild environment only)*



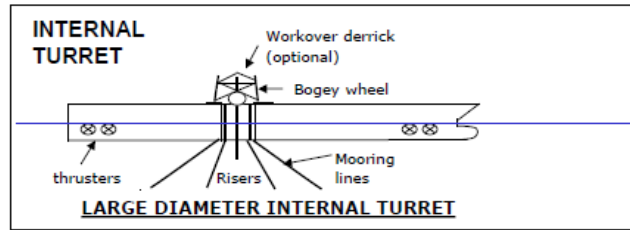
Gambar II-5 *Spread Mooring Systems*
(Sumber : PT. XX, 2018)

a. Single Point Mooring Systems

- *No weather vaning*
- *Connection / disconnection feasible*
- Cocok untuk *monohulls* dengan: *CALM, SALM, External Turret* dan *Internal Turret*



Gambar II-6 *External Turret*
(Sumber : PT. XX, 2018)



Gambar II-7 *Internal Turret*
(Sumber : PT. XX, 2018)

4) *Riser*

Riser berfungsi untuk mengalirkan fluida yang keluar dari *wellhead* menuju anjungan yang nantinya akan diproses atau ditampung sementara. Terdapat beberapa konfigurasi *riser* yang umum digunakan pada struktur lepas pantai terapung. Menurut (Young Bai, 2011) konfigurasi untuk riser adalah sebagai berikut:

a. *Free Hanging Catenary*

Riser dengan konfigurasi ini sering digunakan di laut dalam. Konfigurasi jenis ini tidak perlu kompensasi mengangkat peralatan, ketika *riser* diangkat dan diturunkan dengan pengambang, *riser* akan dengan mudah diangkat atau diturunkan ke bawah menuju *seabed*.

b. *Lazy S* dan *Steep S*

Lazy S dan *Steep S* adalah *riser* yang ditambahkan konfigurasi pelampung bawah laut, dengan *fixed buoy* yang dipasang pada suatu struktur di dasar laut.

c. *Lazy Wave* dan *Steep Wave*

Tipe ini hampir sama dengan *Lazy S* dan *Steep S*, hanya saja pada kedua tipe ini tidak ditambahkan *single buoy*, tetapi ditambahkan *buoyancy* dan *weight* sepanjang yang dibutuhkan

d. *Pliant Wave*

Konfigurasi *Pliant Wave* hampir sama dengan *Lazy S* dan *Steep S* dimana subsea anchor mengendalikan *Touch Down Point* (TDP) yaitu tegangan *riser* dipindahkan ke jangkar bukan pada *Touch Down Point*.

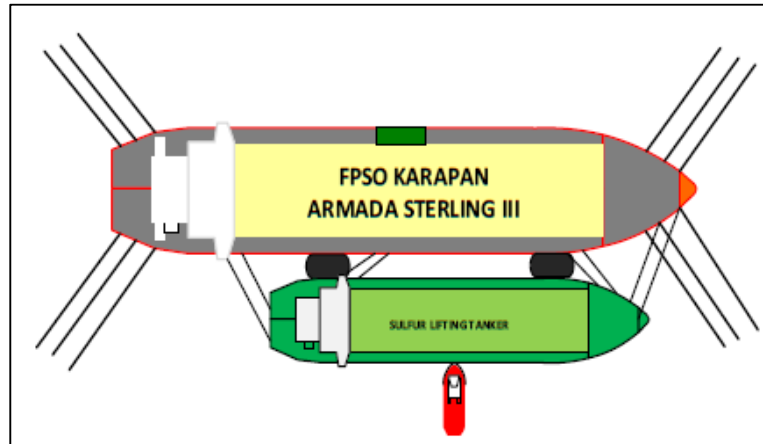
5) *Offloading system*

Setelah minyak dan gas telah diproses, minyak didistribusikan kepada ke kapal pengangkut minyak. Dalam proses pendistribusian dilakukan secara langsung (*direct*) dengan *shuttle tanker* atau tidak langsung (*indirect*)

a. *Direct*

- *Side by side*

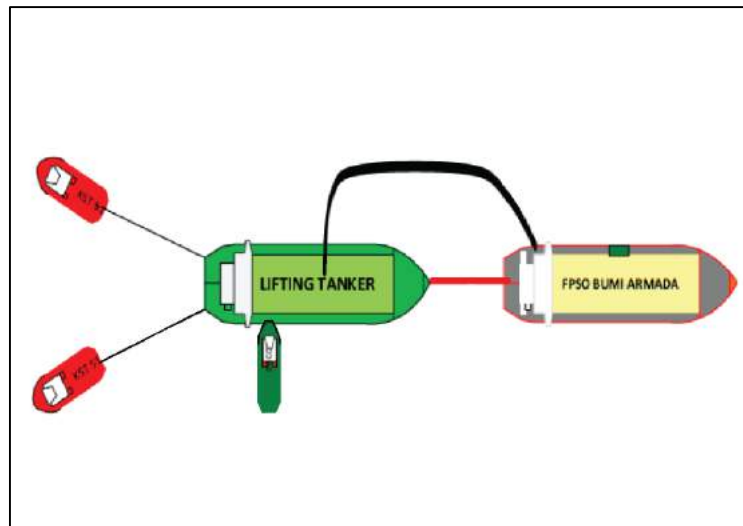
Moda *offloading* ini merupakan *offloading* dengan posisi FPSO dengan objek kapal bersebelahan.



Gambar II-8 *Side by Side Offloading*
(Sumber : PT. XX, 2018)

- *Tandem (stern to bow atau bow to bow)*

Konfigurasi *offloading* secara tandem memposisikan objek FPSO dan objek kapal berada pada satu garis dengan jarak tertentu.



Gambar II-9 *Stern to Bow Offloading*
(Sumber : PT. XX, 2018)

b. *Indirect*

Offloading dengan cara *indirect* yaitu menggunakan *Offloading station* yang dipasang 1 atau 2 KM dari posisi FPSO. *Offloading station* ini biasa menggunakan SPM (*single point mooring*).

II.1.2. Topside Module Support

Topside structure adalah struktur yang dibangun secara modular serta semua jenis *equipment* dan sistem diatas geladak. *Topside structure* dan *interface structures* didesain untuk dapat menahan beban dari peralatan dan *topside structure*, beban inersia akibat beban gelombang dan *hull girder deformation*.

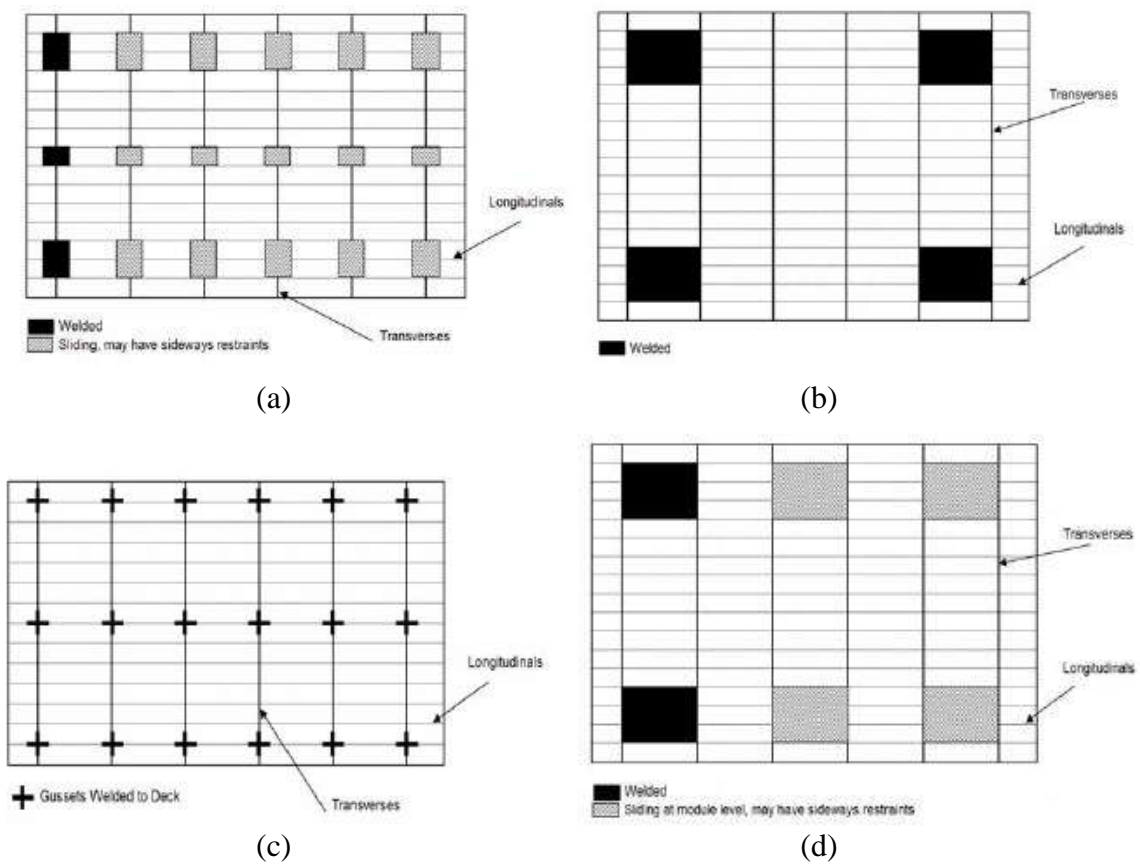
Topside interface structures adalah struktur yang mentransfer beban antara lambung dan *topside structure*. Berdasarkan banyak variasi tipe desain *deck stool*, desain diaplikasikan menjadi sistem yang ditunjukkan oleh Tabel II-1 sebagai berikut (*Lars O. Henriksen, 2008*)

Tabel II-1 Tipe Desain *Deck Stool*

	<i>Description</i>	<i>Number of Stools</i>	<i>Stool Design Size and Stiffness</i>	<i>Deck Reinforcement</i>
A	<i>Stools at each frame</i>	<i>3-6 longitudinal 2-4 transverse</i>	<i>Slides, small, stiff</i>	<i>No</i>
B	<i>Stools span two frames</i>	<i>2 longitudinal 2 transverse</i>	<i>Welded, large, stiff</i>	<i>Yes</i>
C	<i>Gussets at each frame</i>	<i>3-6 longitudinal 2-4 transverse</i>	<i>Welded, small, flexible</i>	<i>No</i>
D	<i>Stools span two frames</i>	<i>3-4 longitudinal 2 transverse</i>	<i>Slides, large, stiff</i>	<i>Possibly</i>

Gambar II-10 menunjukkan skema tipe sambungan kaki. Sambungan antara geladak dan kaki / *gusset* diasumsikan dilakukan pengelasan. Desain sambungan pada geladak secara umum dilakukan sepanjang *transverse frames* dan *longitudinal stiffener*. Tipe sambungan A dan C biasanya tidak memerlukan modifikasi atau penguatan struktur dibawah geladak, sedangkan tipe sambungan B memerlukan tambahan pelat dan penguatan dibawah geladak. *Deck stool* atau *gussets* diatur pada lokasi seperti *web frame* dan *transverse bulkhead* pada arah

memanjang dan pada arah melintang yaitu pada *longitudinal stiffener* dan *longitudinal bulkhead*.



Gambar II-10 Skema Sambungan
 (a) Sambungan A (b) Sambungan B (c) Sambungan C (d) Sambungan D
 (Sumber : Henriksen, 2018)

Topside module support termasuk dalam detail struktur pada FPSO yang harus dianalisis kelelahan karena *topside module support* mengalami beban – beban siklis seperti *hull girder bending moment*, *topside inertia loads* dll seperti yang ditunjukkan seperti Tabel II-2 berikut (Det Norske Veritas, 2010)

Tabel II-2 Detail critical struktur untuk analisis kelelahan

<i>Table 3-1 Example FPSO Critical Structural Details for Fatigue Analysis</i>		
	<i>Critical Structural Details</i>	<i>Example Fatigue Loads</i>
<i>Longitudinal Hull Structural Members</i>	<i>Double plates Bracket toes and heels Rat holes and erection butts Deck openings Longitudinal girders Structural terminations</i>	<i>Hull girder bending/shear loads Wave pressure loads Pressure loads from internal fluid Topside loads Stresses due to loading/offloading</i>
<i>Transverse Hull Structural Members</i>	<i>Shear lugs and cut-outs Hopper corners Hopper corners Transverse frames and gussets Transverse bulkheads</i>	<i>Wave pressure loads Pressure loads from internal fluid Topside loads Differential pressure loads</i>
<i>FPSO-specific Details</i>	<i>Topside module supports Flare tower foundation Riser porches Caissons Mooring foundations Crane pedestals Deck penetrations Hull/turret structure Helideck to deck connection</i>	<i>Hull girder bending Variation of side shell pressure loads Deck deformation loads Riser loads Mooring loads Topside inertia loads Crane loads Wind loads Temperature loads</i>

II.1.3. Konsep Pembebanan

Dalam proses perancangan struktur lepas pantai (*offshore structure*), penentuan kemampuan kerja struktur dipengaruhi oleh beban yang bekerja pada struktur tersebut. Perancang harus menentukan akurasi beban yang akan dipakai dalam perancangan *offshore structure* terlebih dahulu. Beban – beban yang harus dipertimbangkan oleh perancang dalam perancangan *offshore structure* adalah sebagai berikut :

1) Beban mati (*dead load*).

Beban mati atau *dead load* adalah beban dari semua komponen kering serta peralatan, perlengkapan dan permesinan yang tidak berubah dari mode operasi pada suatu struktur.

2) Beban hidup (*live load*).

Beban hidup atau *live load* adalah beban yang terjadi pada struktur selama dipakai dan berubah dari mode operasi satu ke mode operasi yang lain.

3) Beban akibat kecelakaan (*accidental load*).

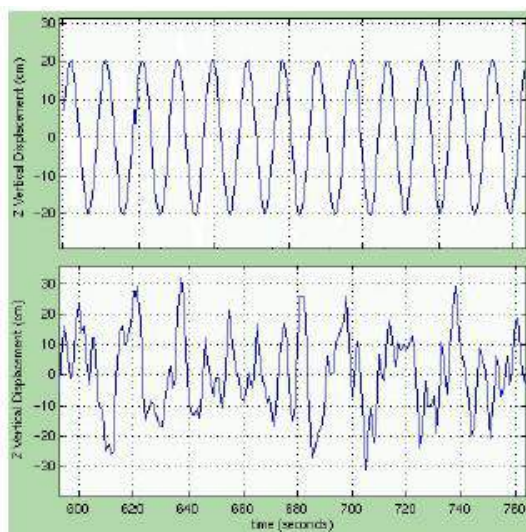
Beban kecelakaan merupakan beban yang tidak dapat diduga sebelumnya yang terjadi pada struktur, misalnya tabrakan dengan kapal pemandu operasi, putusnya tali tambat (*mooring*) dan kebakaran.

4) Beban lingkungan (*environmental load*).

Beban lingkungan adalah beban yang terjadi karena dipengaruhi oleh lingkungan dimana suatu struktur bangunan apung dioperasikan atau bekerja. Beban lingkungan yang digunakan dalam perancangan bangunan apung adalah beban angin, beban arus dan beban gelombang.

II.1.4. Beban Gelombang

Gelombang secara umum yang digunakan dalam perhitungan struktur bangunan apung dibagi menjadi 2 (dua) yaitu gelombang regular dan gelombang irregular seperti pada Gambar II-11. Gelombang regular adalah gelombang yang elevasinya mengikuti suatu fungsi sudut. Sedangkan gelombang irregular merupakan gelombang yang elevasinya mengalami proses acak ((UCSD), 2018)



Gambar II-11 Gelombang Regular dan Gelombang Irregular
(Sumber : UCSD, 2012)

Keadaan sesungguhnya gelombang laut adalah bukan seperti gelombang regular tetapi merupakan suatu bentuk gelombang irregular. Periode gelombang pada keadaan laut (*sea state*) didefinisikan sebagai waktu yang terjadinya puncak gelombang yang berurutan sepanjang permukaan air tenang, dimana tinggi gelombang didefinisikan sebagai selisih antara nilai maksimum dan minimum dari satu periode gelombang. Pada interval waktu yang pendek yaitu dalam beberapa jam, properti statistik dari keadaan laut dapat dianggap konstan, dan laut tersebut dianggap stationer. Besaran – besaran yang dipakai dalam deskripsi gelombang irregular adalah sebagai berikut:

- a. *Mean zero crossing period*, T_z adalah harga rata-rata periode gelombang
- b. Tinggi gelombang signifikan, H_s adalah harga rata-rata dari sepertiga gelombang tertinggi
- c. Spektrum gelombang $S_{\eta\eta}$ adalah spektrum energi dari elevasi permukaan laut

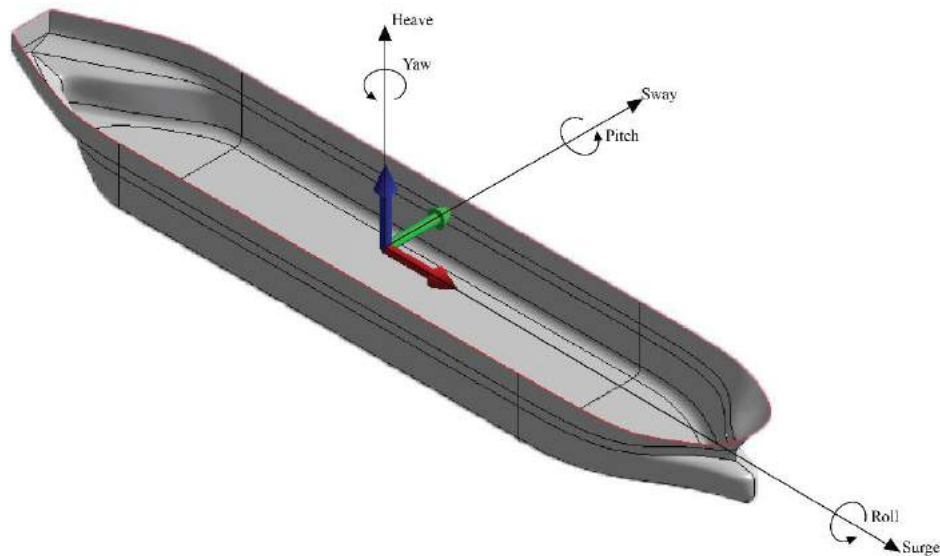
Dalam perhitungan gaya gelombang, data gelombang yang digunakan adalah gelombang yang terjadi selama umur operasi. Data gelombang dalam kurun waktu operasi tersebut disajikan dalam tabel yang dikenal sebagai *wave scatter diagram*. *Wave scatter diagram* adalah tabel hubungan dimana menunjukkan hubungan antara tinggi signifikan gelombang (H_s) dan *periode zero-up crossing* (T_z) yang dinotasikan dengan banyaknya kejadian gelombang tersebut. Berikut adalah respon akibat beban gelombang yang harus dihitung (Det Norske Veritas, 2012)

- 1) *Motion in 6 degrees of freedom*
- 2) *Vertical wave bending moment*
- 3) *Horizontal bending moment*
- 4) *Accelerations*
- 5) *Axial forces*
- 6) *External sea pressure distribution*

Pada penelitian ini respon akibat beban gelombang yang digunakan adalah *accelerations*, dimana *accelerations* merupakan komponen *topside inertia loads*. *Topside inertia loads* ini dihitung sesuai 6 dof (moda gerakan bebas). 6 moda gerakan bebas terbagi menjadi dua jenis, yaitu tiga mode gerakan translasional dan tiga mode gerakan rotasional (*Bhattacharyya, 1978*). Berikut adalah keenam mode gerakan tersebut.

- 1) Mode gerak translasional
 - *Surge*, gerakan *transversal* arah sumbu x.
 - *Sway*, gerakan *transversal* arah sumbu y.

- *Heave*, gerakan *transversal* arah sumbu z.
- 2) Mode gerak rotasional.
- *Roll*, gerakan rotasional arah sumbu x.
 - *Pitch*, gerakan rotasional arah sumbu y.
 - *Yaw*, gerakan rotasional arah sumbu z.



Gambar II-12 6 Degree of Freedom FPSO

Topside module FPSO juga mengalami percepatan akibat gerakan FPSO. Sesuai dengan hukum Newton yang kedua, struktur pada FPSO akan mengalami gaya akibat gerakan FPSO. Untuk gerakan translasi, gaya inersia diperoleh dalam persamaan dibawah:

$$F = ma \quad (II-1)$$

Dimana :

m : massa (kg)

a : percepatan (m/s^2)

Terdapat empat momen rotasi gerakan yaitu momen inersia, momen *damping*, momen *restoring*, dan momen *exciting* (*Bhattacharyya, 1978*). Persamaan momen inersia yaitu sebagai berikut:

$$I = mr^2 \quad (II-2)$$

Dimana :

m : massa (kg)

r : jari-jari girasi (m)

sedangkan untuk momen gaya persamaannya yaitu:

$$\text{Moment} = I\alpha \quad (\text{II-3})$$

Dimana :

I : momen inersia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

α : percepatan putar (rad/s^2)

II.1.5. Konsep Metode Elemen Hingga

Dalam menganalisis perilaku struktur dapat dilakukan menggunakan dua metode yaitu dengan metode numerik dan eksperimen. Analisis numerik dapat menggunakan pemodelan matematik, pemodelan analitik, dan pendekatan rumus empiris. Pemodelan matematik untuk penyelesaian pada masalah teknik jarang untuk mendapatkan hasil yang analitik. Penyelesaian dengan menggunakan model matematik masih menghasilkan ekspresi matematik yang rumit dan melibatkan kondisi batas serta sifat material. Untuk itu pemodelan numerik menjadi praktis digunakan untuk analisis dengan hasil yang lebih akurat. Untuk kasus-kasus yang rumit digunakan *numerical modelling finite element analysis* atau metode elemen hingga. Prinsip dasarnya yaitu memperlakukan suatu sistem sebagai gabungan dari elemen-elemen kecil yang disebut dengan *finite element*. Antar elemen digabungkan melalui titik-titik yang disebut nodes atau nodal point. Tahapan-tahapan dalam pemodelan *Finite Element Analysis* adalah sebagai berikut:

1. Pemilihan jenis elemen

Dilakukan pendekatan model dengan melakukan pemilihan element untuk dilakukan pemodelan. Pemilihan jenis elemen disini menentukan untuk mendefinisikan elemen sesuai dengan permasalahan yang akan diselesaikan dan mewakili kondisi dari struktur yang sebenarnya.

2. Pemilihan fungsi material

Menentukan jenis material seperti *displacement* untuk memberikan karakteristik pada material yang berhubungan dengan kerapatan material, young modulus dan poisson ratio dari material yang digunakan. Elemen yang diberikan *displacement* akan didefinisikan menggunakan nilai parameter pada simpul elemen tersebut, fungsi yang dipakai berupa *polynomial*, linier kuadrat, kubik atau deret trigonometri.

3. Mendefinisikan hubungan displacement dan tegangan regangan

Kemampuan mendefinisikan hubungan antara *displacement* dan tegangan regangan atau sifat dari material tersebut akan memberikan hasil analisis yang akurat dan dapat diterima.

4. Penurunan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen

Metode yang sering digunakan dalam penurunan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen adalah metode keseimbangan langsung dan metode ini cocok untuk elemen satu dimensi dan metode energi dengan prinsip energi potensial minimum.

5. Penggabungan persamaan elemen dan penentuan kondisi batas

Persamaan elemen dalam tahap empat digabungkan menggunakan metode kekakuan langsung untuk mendapatkan persamaan global keseluruhan struktur. Matrik kekakuan global ini berupa matrik singular, sehingga untuk menghindari masalah singularitasnya harus ditentukan kondisi batas.

6. Menyelesaikan derajat kebebasan yang belum diketahui

Merupakan tahapan iterasi untuk mendapatkan besaran yang belum diketahui.

7. Menentukan regangan dan tegangan pada elemen

Dari besaran yang telah didapatkan dari tahap 6 maka digunakan untuk mendapatkan regangan dan tegangan pada elemen.

8. Intepretasi Hasil

Hasil yang diperoleh akan ditampilkan dalam bentuk grafis atau animasi oleh post processor. Kemampuan sebuah benda untuk kembali ke bentuk semula segera setelah gaya luar yang diberikan kepada benda itu dibebaskan (dihilangkan) disebut elastisitas. Jika sebuah pegas diberi gaya berupa tarikan, maka pegas itu akan mengalami perubahan bentuk yaitu pertambahan panjang. Akan tetapi, jika tarikan pada pegas tersebut dilepas maka pegas tersebut akan kembali ke posisi semula. Jika sebuah benda tegar diubah bentuknya (diberikan deformasi) sedikit, benda akan segera kembali ke bentuk awal ketika gaya tekan atau gaya tarik ditiadakan. Jika benda tegar diubah bentuknya melalui batas elastisitasnya, benda tidak akan kembali ke bentuk awalnya ketika gaya ditiadakan, melainkan akan berubah bentuk secara permanen. Bahkan jika perubahan bentuknya jauh melebihi batas elastisitasnya, benda tersebut akan patah. Sehingga dari pernyataan di atas dapat disimpulkan bahwa, benda plastis akan mengalami perubahan bentuk jika diberi gaya dan akan kembali ke bentuk semula jika

gaya yang diberikan sedikit, namun benda plastis tidak akan kembali ke posisi semula setelah gaya dihilangkan jika gaya tersebut melebihi batas elastis benda.

II.1.6. Konsep Perhitungan Fatigue

Analisis *fatigue* merupakan salah satu aspek utama yang harus diperhitungkan dalam desain struktur bangunan laut seperti kapal, *platform, floating structure*, pipa, *mooring line* dan *riser*. Hasil dari analisis *fatigue* dapat mempengaruhi biaya dan keselamatan dalam desain terutama pada aspek berikut ini (Bai, 2003) :

- 1) Kualitas sambungan material
- 2) Kualitas fabrikasi dan pengelasan
- 3) Frekuensi dari perbaikan dan inspeksi
- 4) Konsekuensi dari potensi kegagalan *fatigue*
- 5) Kekuatan residual dari kerusakan parsial sistem terukur

Secara umum terdapat dua metode pendekatan yang dipakai dalam analisis fatigue yaitu metode pendekatan *stress life* dan metode pendekatan *fracture mechanics*. Dalam tahap desain struktur, metode pendekatan *stress life* merupakan metode yang paling sering digunakan dengan menggunakan kurva SN untuk menentukan umur kelelahan. Sedangkan metode *Fracture Mechanics* adalah metode dengan pendekatan kriteria ukuran cacat pada material beserta perambatan kelelahan retak, sehingga metode ini lebih cocok digunakan untuk perencanaan inspeksi dan strategi perbaikan.

Analisis fatigue dengan menggunakan pendekatan *stress life* (*S-N Curve*) dapat dilakukan dengan tiga langkah sebagai berikut (Jeom Kee Paik, 2007):

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

Prosedur dalam analisis fatigue dengan menggunakan pendekatan *fracture mechanics* adalah sebagai berikut

- 1) Memilih dan mendefinisikan model perambatan retak termasuk nilai *threshold*
- 2) Menentukan rentang tegangan
- 3) Menentukan ΔK untuk rentang tegangan yang dipilih
- 4) Mengestimasi perambatan retak untuk satu siklis dengan menggunakan nilai ΔK
- 5) Menentukan *stress intensity factor*
- 6) Memeriksa ukuran retak yang diijinkan

II.1.7. Siklus Rentang Tegangan

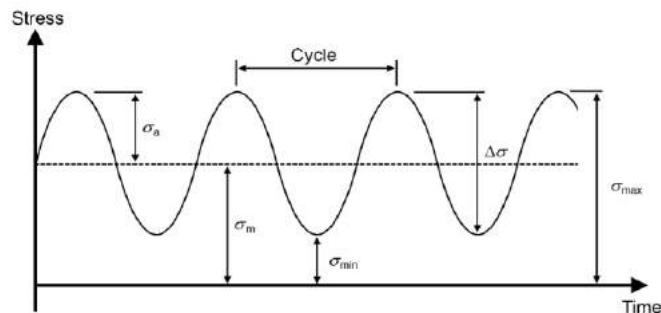
Selama beroperasi struktur bangunan laut seperti *floating structure* dipengaruhi oleh beban lingkungan yang berulang dengan nilai yang bervariasi. Pembebanan berulang (siklis) tersebut dapat terjadi hingga berjuta kejadian sehingga struktur konstruksi mengalami kegagalan lelah (*fatigue failure*). Terdapat berbagai macam beban siklis yaitu (Widodo, 2010):

- 1) Beban siklis frekuensi rendah (*quasi-static*) yang ditimbulkan oleh eksitasi gelombang dengan jumlah sekitar 10^7 sampai dengan 10^8 kali selama umur operasi struktur (25 tahun)
- 2) Beban siklis frekuensi tinggi (dinamis), yang dapat diklasifikasikan menjadi beban transien (*slamming, wave slapping, hull whipping*) dan steady (mesin, baling - baling, *hull springing*) dengan jumlah sekitar 10^6 kali selama umur operasi (25 tahun)
- 3) Beban siklis frekuensi sangat rendah (status) akibat perubahan beban (logistik) di atas struktur dan hidrostatik (pasut) dengan jumlah sekitar 4000-8000 kali selama umur operasi struktur (25 tahun)
- 4) Beban siklis karena gradien panas tak beraturan akibat cuaca dan temperatur muatan dengan jumlah sekitar 7000 kali selama umur operasi struktur (25 tahun)

Beban siklis lingkungan bersifat tidak pasti (irregular) dan tidak bisa diprediksi (Joonmo Choung, 2008). Selain itu beban lingkungan mempunyai karakteristik yang sangat spesifik pada setiap wilayah perairan yang dipengaruhi oleh kondisi cuaca local seperti gelombang dan angin.

Dalam analisis kerusakan fatigue pada struktur konstruksi yang menjadi perhatian utama adalah rentang tegangan siklis (tegangan maksimum dan minimum) yang diakibatkan oleh beban siklis. Dimana tegangan maksimum dan minimum adalah σ_{max} dan σ_{min} , dengan rata – rata $\sigma_{mean} = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$ dan rasio $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$. Sedangkan rentang tegangan didefinisikan sebagai:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (II-4)$$

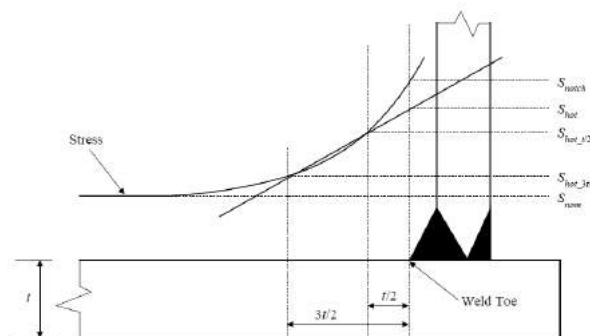


Gambar II-13 Siklus Rentang Tegangan
(Sumber : Syahroni, 2015)

Analisis rentang tegangan menggunakan metode elemen hingga dilakukan dengan mendefinisikan interaksi pembebanan siklis gelombang dengan struktur terhadap arah gelombang dan frekuensi. Variasi beban gelombang siklis dapat diperoleh dari *wave scatter diagram* untuk setiap sea state.

Rentang tegangan yang digunakan untuk analisis fatigue dengan pendekatan *S-N Curve* dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu rentang tegangan nominal, *hot-spot* dan takik (*notch*). Ketiga jenis tersebut menggambarkan ketelitian dalam mendefinisikan geometri struktur sambungan.

Tegangan nominal $S_{i(nominal)}$ didefinisikan sebagai tegangan yang diperoleh dari analisis global elemen hingga (*coarse FE model*) dengan mengabaikan faktor konsentrasi tegangan karena geometri sambungan (Blagojevic, 2010). Sedangkan tegangan hotspot $S_{i(hotspot)}$ didefinisikan sebagai tegangan lokal pada daerah kritis (*hotspot*) dimana keretakan dapat terjadi. Pada analisis tegangan *hotspot*, kualitas pengelasan dan kemungkinan cacat las dapat diabaikan. Tegangan takik (*notch*), yaitu pada kaki las atau di daerah tepi dari suatu potongan sambungan struktur. Gambar II-14 menjelaskan grafik setiap tipe dari rentang tegangan.



Gambar II-14 Jenis Rentang Tegangan
(Sumber : ABS, 2003)

Rentang tegangan yang dihasilkan dari analisis metode elemen hingga adalah rentang tegangan nominal ($S_{nominal}$) yang tertinggi, dimana kegagalan fatigue akan terjadi. Untuk analisis fatigue maka rentang tegangan nominal perlu dikalikan dengan faktor konsentrasi tegangan (*stress concentration factor*) sehingga estimasi rentang tegangan *hot spot* dapat diketahui.

$$S_{i(hotspot)} = S_{i(nominal)} \times SCF \quad (II-5)$$

Dimana :

$S_{i(hotspot)}$: rentang tegangan hotspot (N/mm^2)

$S_{i(nominal)}$: rentang tegangan nominal (N/mm²)
 SCF : faktor konsentrasi tegangan yang terjadi pada detail sambungan struktur akibat adanya diskontinuitas geometri seperti lubang atau retakan

II.1.8. Kurva S-N

Analisis *fatigue* merupakan fungsi dari jumlah siklus maksimal suatu struktur hingga mengalami kegagalan (N) yang dapat ditentukan dari Kurva S-N yang diperoleh dari hasil test kelelahan material dari struktur tertentu. Untuk analisis *fatigue* berdasarkan pendekatan tegangan nominal, sambungan struktur dibagi menjadi beberapa klas yang memiliki desain kurva S-N masing-masing. Klasifikasi kurva S-N bergantung pada geometri detil sambungan las, arah dari fluktuasi tegangan yang bersifat relatif bergantung pada detil, dan metode fabrikasi dan inspeksi dari detil sambungan tersebut. Tiap sambungan konstruksi, dimana berpotensi terjadi *fatigue crack*, harus disesuaikan pada klas sambungan yang tepat berdasarkan Basic design dari kurva S-N dinyatakan sebagai berikut (Bai, 2003) :

$$\log N = \log \bar{a} - m \log \Delta\sigma \quad (\text{II-6})$$

Dimana:

$\Delta\sigma$: rentang tegangan (N/mm²)

N : nilai prediksi dari siklus untuk gagal pada rentang tegangan $\Delta\sigma$

m : *slope inverse negative* dari kurva S-N

$\log \bar{a}$: intersep dari log N-axis pada kurva S-N

$$\log \bar{a} = \log a - 2S_{\log N} \quad (\text{II-7})$$

Dimana :

$\log a$: intersep dari mean kurva SN dengan log N axis

$S_{\log N}$: standar deviasi dari log N.

Dari persamaan II-6 dapat disederhanakan menjadi persamaan dasar Kurva S-N yaitu

$$\Delta\sigma^m N = \bar{a} \quad (\text{II-8})$$

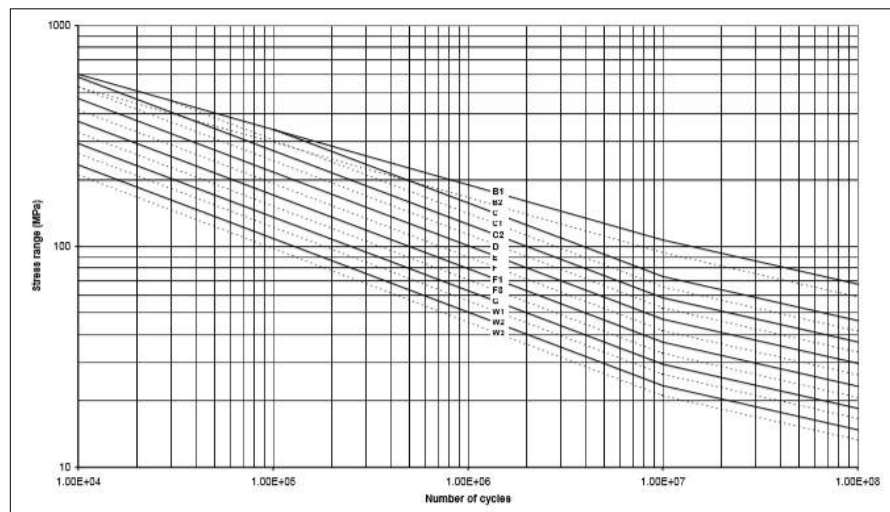
Dimana:

\bar{a} : konstanta yang bergantung pada jenis material dan pengelasan, jenis pembebanan, konfigurasi geometris dan kondisi lingkungan.

Nilai \bar{a} dan m dapat dilihat pada Tabel II-3 berikut.

Tabel II-3 Tipe Sambungan (Sumber : DNV, 2011)

SN Curve	$N \leq 10^7$ cycles		$\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5$	Fatigue limit	Thickness exponent	SCF in the detail
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4,00	15,117	17,146	106,97	0	
B2	4,00	14,885	16,856	93,59	0	
C	3,00	12,592	16,320	73,10	0,15	
C1	3,00	12,449	16,081	65,50	0,15	
C2	3,00	12,301	15,835	58,48	0,15	
D	3,00	12,164	15,606	52,63	0,20	1,00
E	3,00	12,010	15,350	46,78	0,20	1,13
F	3,00	11,855	15,091	41,52	0,25	1,27
F1	3,00	11,699	14,832	36,84	0,25	1,43
F3	3,00	11,546	14,576	32,75	0,25	1,61
G	3,00	11,398	14,330	29,24	0,25	1,80
W1	3,00	11,261	14,101	26,32	0,25	2,00
W2	3,00	11,107	13,845	23,39	0,25	2,25
W3	3,00	10,970	13,617	21,05	0,25	2,50
T	3,00	12,164	15,606	52,63	0,25/0,3	1,00



Gambar II-15 SN Curve
(Sumber : DNV, 2011)

II.1.9. Cumulative Fatigue Damage

Analisis *fatigue* dengan metode *S-N Curve* sambungan struktur dilakukan berdasarkan hukum kegagalan Palmgren-Miner atau disebut *Miner's Rule*. *Miner's Rule* merupakan hipotesis kumulatif kerusakan berdasarkan konsep *strain energy* (Bilal M. Ayyub, 2003). Konsep *strain energy* menyatakan bahwa kerusakan terjadi ketika total *strain energy* pada saat siklus n dari variabel amplitudo pembebanan adalah sama dengan total energy dari siklus N dari konstan amplitudo pembebanan. Dapat ditulis dalam persamaan matematik sebagai berikut:

$$D = \sum_i^m = 1 \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_m}{N_m} \quad (\text{II-9})$$

Dimana:

D : kerusakan fatigue kumulatif

n_i : jumlah siklus rentang tegangan (S_i) akibat pembebanan gelombang yang sebenarnya terjadi

N_i : jumlah siklus rentang tegangan (S_i) yang mengakibatkan kegagalan pada sambungan, diambil dari diagram S-N

Dalam mengestimasi kumulatif kerusakan fatigue (*Cummulative Fatigue Damage*) terdapat empat metodologi yaitu metode derministik, metode *simplified fatigue analysis*, metode spectral dan metode *time domain fatigue*. Pada metode *simplified fatigue analysis*, pendekatan empiris menggunakan parameter distribusi Weibull dan distribusi rentang tegangan disesuaikan dengan distribusi penyebaran rentang tegangan terhadap beban siklis yang terjadi pada struktur.

Distribusi rentang tegangan dalam kurung waktu panjang digambarkan sebagai distribusi Weibull dua parameter :

$$Q(\Delta\sigma) = \exp \left[- \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^h \right] \quad (\text{II-10})$$

Dimana :

Q : probabilitas untuk melebihi rentang tegangan

h : parameter bentuk Weibull

q : parameter bentuk Weibull yang didefinisikan dari rentang tegangan, $\Delta\sigma_o$, sebagai :

$$q = \frac{\Delta\sigma_o}{(\ln n_o)^{1/h}} \quad (\text{II-11})$$

$\Delta\sigma_o$ adalah rentang tegangan dari siklus n_o .

Saat distribusi rentang tegangan dalam kurung waktu panjang diaplikasikan dengan distribusi Weibull untuk kondisi beban berbeda, dan *one-slope S-N curve* dipakai, fatigue damage ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$D = \frac{V_o T_d}{a} q^m \Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right) \leq \eta \quad (\text{II-12})$$

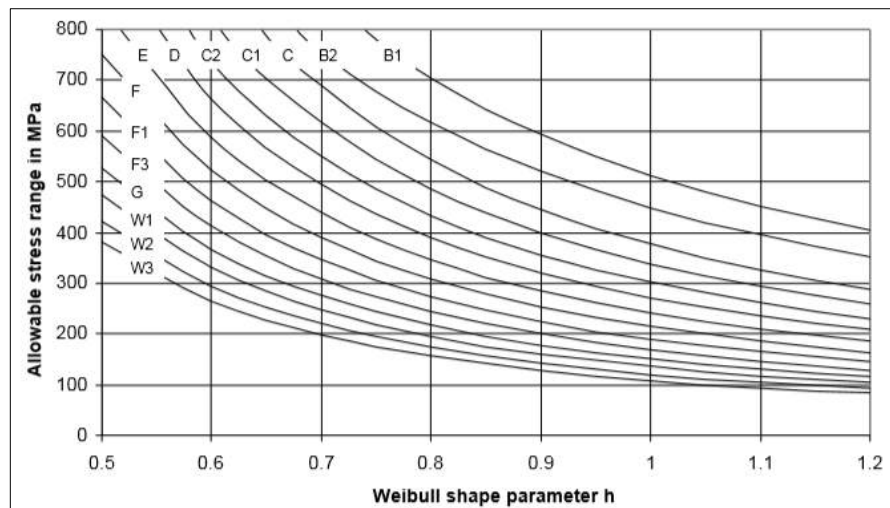
Dimana :

Td : umur desain dalam detik.

- h : parameter bentuk distribusi rentang tegangan Weibull, dapat dilihat pada Gambar II-15
- q : parameter skala distribusi rentang tegangan Weibull
- v_0 : frekuensi *zero-crossing* rata-rata
- $\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$: *gamma function*. Nilai dari gamma function dapat dilihat pada Tabel II-4

Tabel II-4 Nilai *Gamma Function* (Sumber : DNV, 2011)

h	m = 3	h	m = 3	h	m = 3
0,60	120,000	0,77	20,548	0,94	7,761
0,61	104,403	0,78	19,087	0,95	7,342
0,62	91,350	0,79	17,772	0,96	7,035
0,63	80,358	0,80	16,586	0,97	6,750
0,64	71,048	0,81	15,514	0,98	6,483
0,65	63,119	0,82	14,542	0,99	6,234
0,66	56,331	0,83	13,658	1,00	6,000
0,67	50,491	0,84	12,853	1,01	5,781
0,68	45,442	0,85	12,118	1,02	5,575
0,69	41,058	0,86	11,446	1,03	5,382
0,70	37,234	0,87	10,829	1,04	5,200
0,71	33,886	0,88	10,263	1,05	5,029
0,72	30,942	0,89	9,741	1,06	4,868
0,73	28,344	0,90	9,261	1,07	4,715
0,74	26,044	0,91	8,816	1,08	4,571
0,75	24,000	0,92	8,405	1,09	4,435
0,76	22,178	0,93	8,024	1,10	4,306



Gambar II-16 Distribusi tegangan yang diterima selama 10^8 siklus (Sumber : DNV, 2011)

Secara teori fatigue damage $D = 1$ pada saat mengalami kegagalan. Tetapi sebagaimana telah disampaikan sebelumnya bahwa D dipengaruhi oleh banyak ketidakpastian sehingga ketentuan berbagai klasifikasi menetapkan bahwa D kecil dari satu (Bilal M. Ayyub, 2003).

II.1.10. Mekanisme Kepecahan

Proses terjadinya kepecahan memperlihatkan 3 fase yaitu pertumbuhan retak tanpa pembebanan, pertumbuhan retak stabil, dan pertumbuhan retak tidak stabil (A. Salvadori, 2011)

1) Retak awal (*crack initiation*)

Cacat (defect) pada struktur dapat bertindak sebagai awal keretakan. Cacat pada struktur berdasarkan asal terbentuknya dapat dikategorikan menjadi dua kelompok:

a. Cacat yang terbentuk selama masa fabrikasi, disebabkan oleh:

- Cacat lateral yang terjadi pada material (*material defect*).
- Proses pengerjaan material (*manufacturing defect*).
- Pemilihan material yang salah atau proses perlakuan panas material /*poor choice of material or heat treatment*.
- Teknik produksi dari material yang salah (*poor choice of production technique*).
- Desain material yang salah (*poor detail design*).

b. Cacat yang terbentuk selama *service* struktur, diantaranya disebabkan oleh:

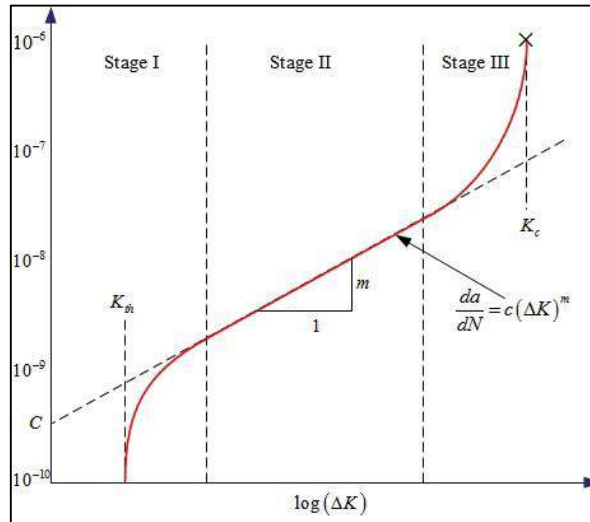
- Kelelahan struktur, terjadi saat struktur mencapai umur kelelahannya.
- Fluktuasi tegangan pada permukaan yang telah mengalami korosi

2) Perambatan retak (*crack propagation*)

Pertumbuhan retak lelah ditentukan oleh 2 (dua) parameter mekanika kepecahan, yaitu ΔK dan K_{max} (Stoychev, 2007). Perambatan retak adalah tahap selanjutnya setelah tahap retak awal (*crack initiation*). Dalam tahap ini retak tumbuh dan menjalar hingga mencapai batas kritis (*critical size*). Dari data perambatan retak suatu prediksi umur lelah (*fatigue life*) dapat dikembangkan.

Perambatan retak terjadi dalam waktu yang lama dalam kondisi operasi normal. Perambatan retak akibat medan tegangan dan regangan di sekitar ujung retak, ditunjukkan dengan parameter *stress intensity factor* (K), yang merupakan fungsi dari tegangan, geometri dan dimensi retak. Dari konsep *fracture mechanics*, laju perambatan

retak dinyatakan dengan da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, panjang retak, dan tegangan operasi. Perambatan retak terdiri dari tiga tahapan, seperti Gambar II-17.



Gambar II-17 Tahapan Perambatan Retak
(Sumber : Elhewy, 2016)

- a. Region I, perambatan retak pada region ini menunjukkan karakteristik “*fatigue treshold*” yang merupakan fluktuasi kenaikan *stress intensity factor* dengan parameter ΔK_{th} . Nilai ΔK harus lebih besar dari nilai ΔK_{th} untuk memungkinkan terjadinya perambatan retak.

Nilai da/dN antara region I dan region II adalah:

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K^m - \Delta K + h^m) \quad (II-13)$$

- b. Region II, perambatan – perambatan retak mulai terjadi. Kecepatan perambatan retak dapat dihitung menggunakan hukum Paris-Erdogan:

$$da/dN = c(\Delta K)^m \quad (II-14)$$

Nilai da/dN antara region II dan region III (bila efek R diperhitungkan) adalah:

$$\frac{da}{dN} = \frac{c\Delta K^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (II-15)$$

- c. Region III, perambatan retak yang terjadi lebih cepat daripada region II, merupakan awal terjadinya kepecahan. Nilai da/dN antara region I, II, dan III

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta K^2}{4\pi\sigma_y} \left\{ \frac{(\Delta K - \Delta K + h)(1-R)}{(1-R)K_c - \Delta K} \right\}^{1/2} \quad (II-16)$$

Keterangan:

da/dN : kecepatan perambatan retak, m/cycle

ΔK : range faktor intensitas tegangan, $Mpa\sqrt{m}$

K	: faktor intensitas tegangan, $\text{Mpa}\sqrt{m}$
K_c	: harga kritis K, $\text{Mpa}\sqrt{m}$
R	: rasio tegangan = $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$
C dan m	: parameter perambatan retak

II.1.11. Metode *Fracture Mechanics*

Fracture mechanics adalah suatu analisis penyelesaian dengan cara mendefinisikan kondisi lokal dari tegangan dan regangan di sekitar retakan yang dikorelasikan dengan parameter – parameter globalnya (beban – beban, geometri dan sebagainya) dimana retakan akan merambat (Almarnaess, 1985)

Berbagai pendekatan telah digunakan untuk menganalisis masalah *fracture*, yang kemudian mengarah ke berbagai parameter *fracture mechanics* yang semuanya saling berkaitan. Parameter – parameter tersebut diantaranya adalah G (Rasio pelepasan energi), J (*Rice's Integral*), COD (*Crack Opening Displacement*), K (*Stress intensity factor*). Dimana semua parameter, yang terkenal adalah *stress intensity factor* (SIF). Prinsip fundamental dari *fracture mechanics* adalah medan tegangan di depan ujung retakan yang dapat dikarakteristikan dengan parameter tunggal K (A. Salvadori, 2011)

Menurut Naess (1985), *fracture mechanics* terbagi menjadi dua kategori, yakni *linear-elastic* (LEFM) dan *elastic-plastic* (EPFM).

1) *Linier Elastic Fracture Mechanics*

LEFM adalah metode yang menunjukkan hubungan antara medan tegangan dan distribusinya di sekitar ujung retak dengan ukuran, bentuk, orientasi retak dan material properti akibat tegangan nominal yang dikenakan pada struktur. Metode ini menggunakan parameter K, atau SIF untuk menunjukkan karakteristik dari medan tegangan yang terjadi.

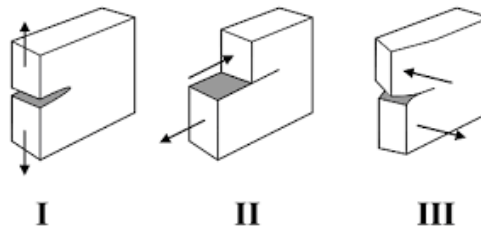
2) *Elastic Plastic Fracture Mechanic*

EPFM kurang tepat digunakan pada struktur – struktur besar yang menggunakan baja berkekuatan rendah atau sedang karena adanya zona plastis yang cukup besar di sekitar ujung retak, sehingga menyebabkan timbulnya perilaku elastis-plastis. Metode ini merupakan pengembangan dari LEFM, dengan penambahan analisis yang dapat menunjukkan deformasi plastis dari material.

Mode deformasi retak dapat digolongkan dalam tiga mode deformasi:

- 1) Moda I (*opening mode*) adalah retak yang diakibatkan oleh adanya tegangan tarik yang tegak lurus terhadap arah/bidang penjaran retak. Jadi displasemen permukaan tegak lurus bidang retak.
- 2) Moda II (*sliding mode*) adalah retak yang diakibatkan oleh tegangan geser yang searah dengan penjaran retak. Displacement permukaan retak adalah dalam bidang retak dan tegak lurus leading edge dari retak.
- 3) Moda III (*tearing mode*) adalah retak yang diakibatkan karena tegangan geser yang bekerja pada arah melintang dan membentuk sudut dengan arah penjaran retak.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar II-18 dibawah ini :



Gambar II-18 Tiga Mode Deformasi Retak
(Sumber : Barsom & Rofle, 1987)

Tegangan dan displasemen pada setiap titik dekat dengan retakan dapat diturunkan berdasar teori elastisitas dan fungsi kompleks tegangan. Tegangan elastis dekat titik retakan ($r/a \ll 1$) untuk moda I adalah (Almarnaess, 1985) :

$$\sigma_y = \frac{KI}{\sqrt{2\pi R}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (\text{II-17})$$

$$\sigma_x = \frac{KI}{\sqrt{2\pi R}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (\text{II-18})$$

$$\tau_{xy} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi R}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (\text{II-19})$$

$$\sigma_x = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad \text{untuk } \textit{plane stress}$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{untuk } \textit{plane strain}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad \text{untuk } \textit{plane strain}$$

II.1.12. *Stress Intensity Factor*

Faktor intensitas tegangan (*Stress Intensity Factor*) merupakan fungsi dari panjang dan arah retak, geometri, dan distribusi beban yang diberikan. SIF merupakan parameter yang mengandung pengertian prinsip keseimbangan energi dan distribusi di ujung retak. *Range* dari SIF diberikan oleh Bai dengan persamaan :

$$\Delta K = F \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{II-20})$$

Besarnya SIF dipengaruhi oleh panjang retak a , tegangan yang diberikan (σ), serta faktor korelasi tanpa dimensi F yang dipengaruhi oleh bentuk pembebanan yakni dari beban tarik dan tekan, posisi retak yang berada di tengah atau di tepi, geometri retak dan perbandingan panjang retak terhadap lebar material

Tabel II-5 SIF untuk beberapa geometri

Type of Crack	Stress Intensity Factor, K_I
Center crack length $2a$, in an infinite plate	$\sigma_\infty \sqrt{\pi a}$
Edge crack, length a , in a semi-infinite plate	$1,12 \sigma_\infty \sqrt{\pi a}$
Central penny-shaped cracks, radius a , in an infinite body	$2 \sigma_\infty \sqrt{\frac{a}{\pi}}$
Center crack, length $2a$ in plate of width W	$\sigma_\infty \sqrt{W \tan\left(\frac{\pi a}{W}\right)}$
2 symmetrical edge cracks, each length a , in plate of total width W	$\sigma_\infty \sqrt{W \left[\tan\left(\frac{\pi a}{W}\right) + 0,1 \sin\left(\frac{2\pi a}{W}\right) \right]}$

Perbedaan antara *Stress Concentration Factor* (SCF) dan SIF dapat dijelaskan dengan pengertian bahwa SCF merupakan faktor skala untuk tegangan nominal yang merupakan perbandingan antara tegangan global maksimum terhadap tegangan nominal. SIF bertindak sebagai faktor skala bagi medan tegangan pada ujung retak. Bila SCF adalah parameter yang menggambarkan konsentrasi tegangan, maka SIF mengkarakteristikan keadaan pada ujung retak (singularitas tegangan) serta kondisi yang tidak dapat ditangani oleh SCF.

Pada penelitian ini bentuk geometri retak yaitu *through crack* dengan persamaan nilai *Stress Intensity Factor* berikut

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)^2 \right] \left[1 - 0,025 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0,06 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (\text{II-21})$$

II.1.13. Kedalaman Retak Kritis

Kedalaman retak kritis terjadi jika *stress intensity factor* yang dihasilkan telah mencapai *fracture toughness* dari material. Kedalaman retak kritis dihitung dengan menggunakan rumus:

$$a_f = \left(\frac{K_{Ic}}{\alpha \sigma_{max}} \right)^2 \frac{1}{\pi} \quad (\text{II-22})$$

dimana :

a_{cr} : kedalaman retak kritis, m

K_{Ic} : material fracture toughness, $\text{Mpa}\sqrt{\text{m}}$

σ_{max} : tegangan normal maksimum, MPa

II.1.14. Perambatan Retak

Hasil perhitungan perambatan retak ini umumnya sebagai umur kelelahan dari struktur yang ditinjau. Dengan memberikan masukan berupa besar retak awal dan retak akhir akan diketahui jumlah batas siklus yang masih aman dengan mengintegalkan persamaan laju keretakan berikut (Almarnaess, 1985)

$$N = \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{da/dN} \quad (\text{II-23})$$

dengan mensubstitusi Persamaan II-24 didapatkan persamaan baru yaitu:

$$N = \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{c (\Delta K)^m} \quad (\text{II-24})$$

Dengan :

da : pertambahan panjang retak, m

dN : pertambahan jumlah *cycle* dari beban, *cycle*

a_f : *failure crack*, panjang retak setelah pembebanan hingga gagal, m

a_o : *initial crack*, panjang retak pada waktu permulaan, m

II.1.15. Perbandingan antara Pendekatan *Fracture Mechanics* dan *SN Curve*

Perbandingan antara pendekatan *fracture mechanics* dan *SN Curve* untuk perhitungan *fatigue* ditunjukkan pada Tabel II-6

Tabel II-6 Perbandingan antara *Fracture Mechanics* dan *S-N Curve*

<i>Fracture Mechanics</i>	<i>SN Curve</i>
<i>Region I : Threshold region</i>	<i>Fatigue endurance (infinite life)</i>
<i>Region II : Paris equation</i>	<i>S-N Curve (high cycle fatigue)</i>
<i>Region III : Final fracture</i>	<i>Low cycle fatigue, failure region</i>

Sesuai Tabel II-6 diatas, *paris equation* dapat disubstitusikan dengan persamaan S-N curve pada persamaan II-8. Sebelum itu persamaan II-21 disubstitusikan dengan persamaan II-24 didapatkan persamaan berikut.

$$N = \frac{1}{c\sigma} \int_{a_0}^{af} \frac{da}{(\sqrt{\pi a} \left[\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right) \right]^2 \left[1 - 0,025\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0,06\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right])^m} \quad (\text{II-25})$$

Integral diatas didefinisikan dengan persamaan berikut

$$I = \int_{a_0}^{af} \frac{da}{(\sqrt{\pi a} \left[\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right) \right]^2 \left[1 - 0,025\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0,06\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right])^m} \quad (\text{II-26})$$

Selanjutnya persamaan jumlah siklus selama perambatan retak diturunkan sebagai berikut

$$N = \frac{I}{c\sigma^m} \quad (\text{II-27})$$

Persamaan antara *S-N formulation* dan *fracture mechanics* ditunjukkan dari persamaan diatas dengan I/C sama dengan \bar{a} pada persamaan II-8. Hal ini menunjukkan bahwa memungkinkan untuk merubah *SN Curves* untuk detail konstruksi yang lain berdasarkan *fracture mechanics*

II.2. Tinjauan Pustaka

Dalam melakukan penelitian ini, perlu untuk mengetahui penelitian terdahulu yang dianggap relevan untuk menguji validitas dan menjadi referensi atau literatur penelitian ini. Adapun literatur yang menjadu acuan dalam penelitian ini diantaranya adalah.

II.2.1. Analisis Kelelahan Berdasarkan *Fracture Mechanics*

- 1) Analisis Perilaku Kepecahan *Scantling Support Structure System Gas Processing Module FPSO Belanak*

Muvariz (2011) melakukan analisis perilaku kepecahan pada scantling support structure gas processing module pada FPSO Belanak. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan *elastic plastic fracture mechanics* dengan metode *J-integral*. Analisis dilakukan secara global, untuk memperoleh beban gelombang pada FPSO dan analisis

lokal pada *scantling support structure* untuk mencari *hotspot stress* yang akan diberi *initial crack* dengan ukuran sesuai DnV OS F201.

Hasil penelitian ini yaitu tegangan pada *hotspot stress* adalah 6,47 Mpa dan pada kondisi saat *initial crack* sebesar 25,1 Mpa. Dari pemberian *initial crack* tersebut, maka didapatkan empat nilai SIF, yaitu K_s maksimum adalah $2,73 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$ dan K_s minimum adalah $0,176 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$. Sedangkan nilai K_t maksimum adalah $0,420 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$ dan K_t minimum $0,0271 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$. Perambatan retak yang terjadi dengan variasi yang diberikan dalam analisis ini menunjukkan bahwa semakin besar retak awal semakin cepat laju perambatan retak. Dengan retak awal 0,1 mm hingga retak kritis dihasilkan jumlah siklus sebesar $1,89 \times 10^{18}$ dengan perambatan retak sebesar 0,0084 mm.

2) Analisa Penjalaran Retak Sekat Ruang Muat Kapal Tanker 17500 DWT Akibat Beban Muatan Dengan Metode Elemen Hingga

Zandi (2018) melakukan analisa penjalaran retak sekat ruang muat Kapal Tanker 17500 DWT dengan menggunakan metode elemen hingga. Melalui metode tersebut, dibuat pemodelan tiga ruang muat kapal untuk menentukan area nodal tegangan normal maksimum. Setelah itu, nilai tegangan tersebut diaplikasikan pada pemodelan retak untuk menentukan nilai faktor intensitas, laju penjalaran retak, jumlah siklus, maupun umur kelelahan struktur.

Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa semakin dalam retak awal atau *initial crack* maka *stress intensity factor* dan penjalaran retak akan semakin besar. Pada kedalaman retak awal 0,5 mm; 1,5 mm; dan 2,5 mm maka menghasilkan nilai laju perambatan retak sebesar $8,14 \times 10^{-9} \text{ m/cycle}$; $4,44 \times 10^{-9} \text{ m/cycle}$ dan $9,68 \times 10^{-9} \text{ m/cycle}$. Sehingga didapatkan nilai umur kelelahan pada kedalaman retak tersebut sebesar 30,88 tahun; 9,10 tahun; dan 5,11 tahun.

II.2.2. Analisis Kelelahan Berdasarkan Rasio Kerusakan Kumulatif

1) Studi Tentang Metode *Fatigue Assesment Topside Module FSO/FPSO*

Sujiatanti (2012) melakukan studi metode *fatigue assesment* pada *topside module* yang terpasang pada FSO. Analisis kelelahan menggunakan *pendekatan S-N Curve*. Dari hasil analisis dan perhitungan dalam thesis ini didapatkan bahwa data yang dibutuhkan untuk perhitungan *fatigue life topside module FSO/FPSO* yaitu data struktur dan data lingkungan di perairan setempat. Berdasarkan data lingkungan tersebut dapat

dilakukan analisis karakteristik gerak akibat gaya gelombang, karakteristik gerak tersebut memberikan respon gerak dalam enam mode gerak. Dari perhitungan respon gerak didapatkan nilai percepatan gerak dengan variasi tinggi dan periode gelombang. Percepatan gelombang dihitung berdasarkan spektrum gelombang yang terjadi dan respon spektrum yang dihasilkan.

Metode *fatigue-assesment* yang dipakai adalah metode *semi-probabilistic*. Dalam metode ini percepatan gerak dihitung menggunakan *spectral* dan *fatigue life* dihitung dengan memasukkan variabel probabilitas kejadian gelombang dari total gelombang yang terjadi. Dengan menerapkan metode tersebut, diperoleh hasil perhitungan umur kelelahan yaitu 18,3 tahun untuk design life 25 tahun desain *interface* tersebut dilakukan improvisasi yaitu dengan *radius bracket* dan memiliki umur kelelahan yaitu 27,3 tahun.

2) Analisa *Fatigue Life Graving Dock Gate* Dengan Metode Simplified.

Eky (2016) melakukan penelitian tentang analisa *fatigue* (kelelahan) pada struktur *graving dock gate*. Analisa dilakukan dengan pendekatan *metode simplified fatigue life assessment*. Tahapan untuk menghitung D_{fat} yang digunakan dalam metode tersebut adalah mengetahui jenis sambungan dan klas sambungan, menghitung nilai tegangan tiap sambungan pada setiap kondisi pembebanan, mencari nilai-nilai dari variable lain yang dibutuhkan untuk perhitungan *cumulative fatigue damage*. Sehingga umur kelelahan dari sambungan tersebut dapat didapatkan. Dari tahapan tersebut didapatkan umur kelelahan terkecil yaitu pada sambungan sekat melintang dan pelat sisi *graving dock gate*, dengan umur sebesar 30,78 tahun.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI

III.1. Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini adalah mencari dan mempelajari literatur – literatur berupa buku, jurnal ataupun penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan *Floating Production Storage Offloading (FPSO)*, *Topside Module FPSO*, *acceleration motion*, perhitungan *fatigue life*, dan *Fracture Mechanics*. Kemudian literatur tersebut digunakan sebagai acuan atau referensi dalam penelitian ini.

III.2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah ukuran utama FPSO, layout FPSO di tempat beroperasi, data – data struktur FPSO, dan data lingkungan tempat FPSO beroperasi dan data *mooring*.

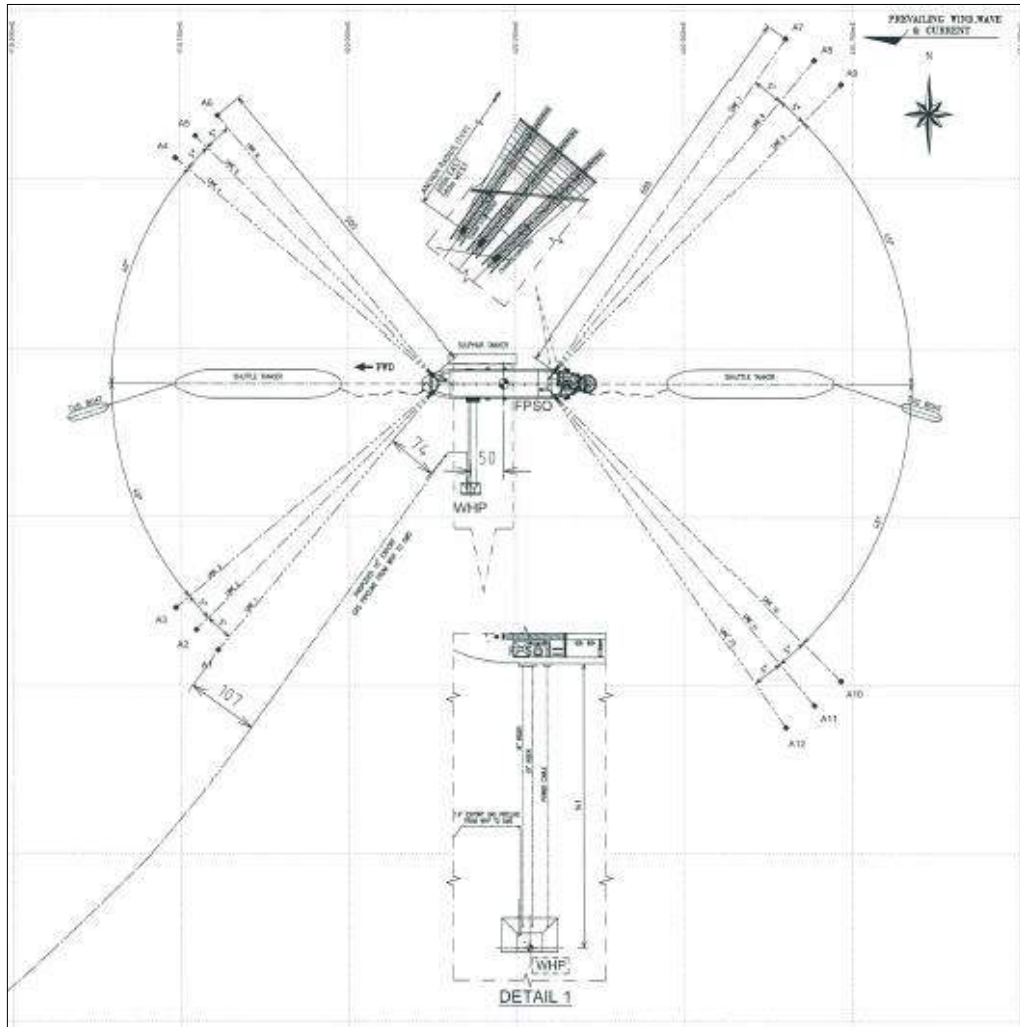
III.2.1. Ukuran Utama dan Layout FPSO

Dalam penelitian ini, objek penelitian yang digunakan adalah FPSO 101760 DWT. Dengan ukuran utama FPSO seperti tercantum pada Tabel III-1.

Tabel III-1 Ukuran Utama FPSO

<i>Item</i>	<i>Dimension</i>
<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
<i>Height</i>	92,05
<i>Displacement</i>	123877 ton

FPSO 101760 DWT beroperasi di Lapangan Gas Blok BD, dengan lokasi 11,5 *nautical miles* dari Sampang Madura, Jawa Timur dan kedalaman rata – rata yaitu 55,4 m. Layout FPSO beroperasi ditunjukkan pada Gambar III-1.



Gambar III-1 Layout FPSO di perairan Selat Madura
(Sumber : PT. XX, 2018)

Tabel III-2 Lokasi Lapangan

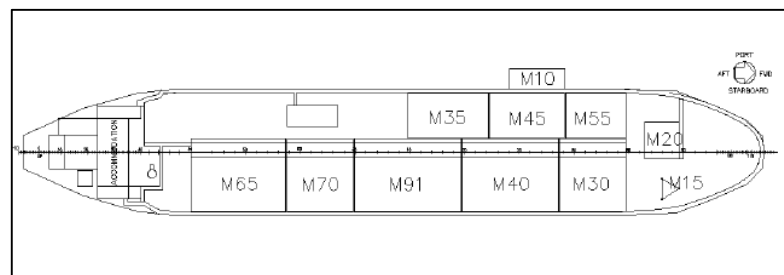
Lokasi	<i>Easting</i> (m)	<i>Northing</i> (m)	Kedalaman (m)
FPSO @midship	420232,19	9185197,63	55,4
WHP	420182,24	9185053,08	55,4

III.2.2. *Topside Module FPSO*

Pada FPSO 101760 DWT terdapat beberapa fasilitas pemrosesan gas diatas geladak seperti tercantum pada Tabel III-3 berikut :

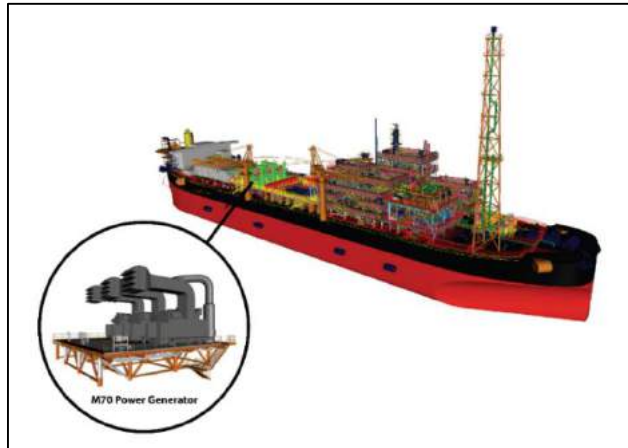
Tabel III-3 Data *Topside Module FPSO*

Lokasi Area	Deskripsi Module	Berat (Ton)
M10	<i>Riser Balcony</i>	100
M15	<i>Flare Tower</i>	120
M20	<i>Flare KOD area</i>	83
M30	<i>Separation/ Gas compression/ Condensate stabilization</i>	103
M35	<i>Produced water/Sour water stripper/Cooling water</i>	420
M40	<i>Sulphur recovery unit (SRU)/ TTO</i>	1374
M45	<i>Gas treatment unit (GTU)</i>	969
M55	<i>Gas dehydration unit/ Dwe point control unit/ FGT</i>	446
M65	<i>E-House</i>	621
M70	<i>Power Generation system</i>	500
M91	<i>Laydown area (starboard side – fwd)</i>	440



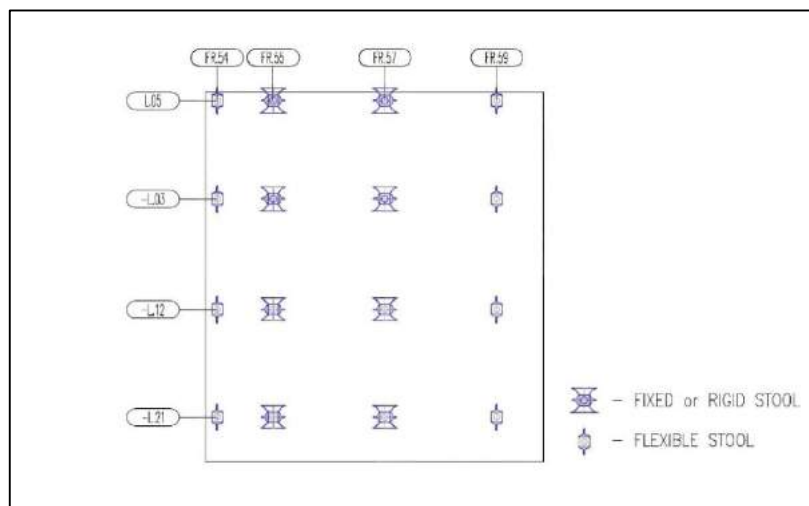
Gambar III-2 *Topside Module FPSO Arrangement*
(Sumber : PT. XX, 2018)

Pada penelitian ini, module yang menjadi objek penelitian adalah module *Power Generation System* (M70). Module *Power Generation System* (M70) ini berukuran 22,00 x 23,50 m dan terletak pada *framing* antara FR 54 sampai FR 59 pada arah memanjang dan L-21 to L05 pada arah melintang.



Gambar III-3 *Topside Module M70*
(Sumber : PT. XX, 2018)

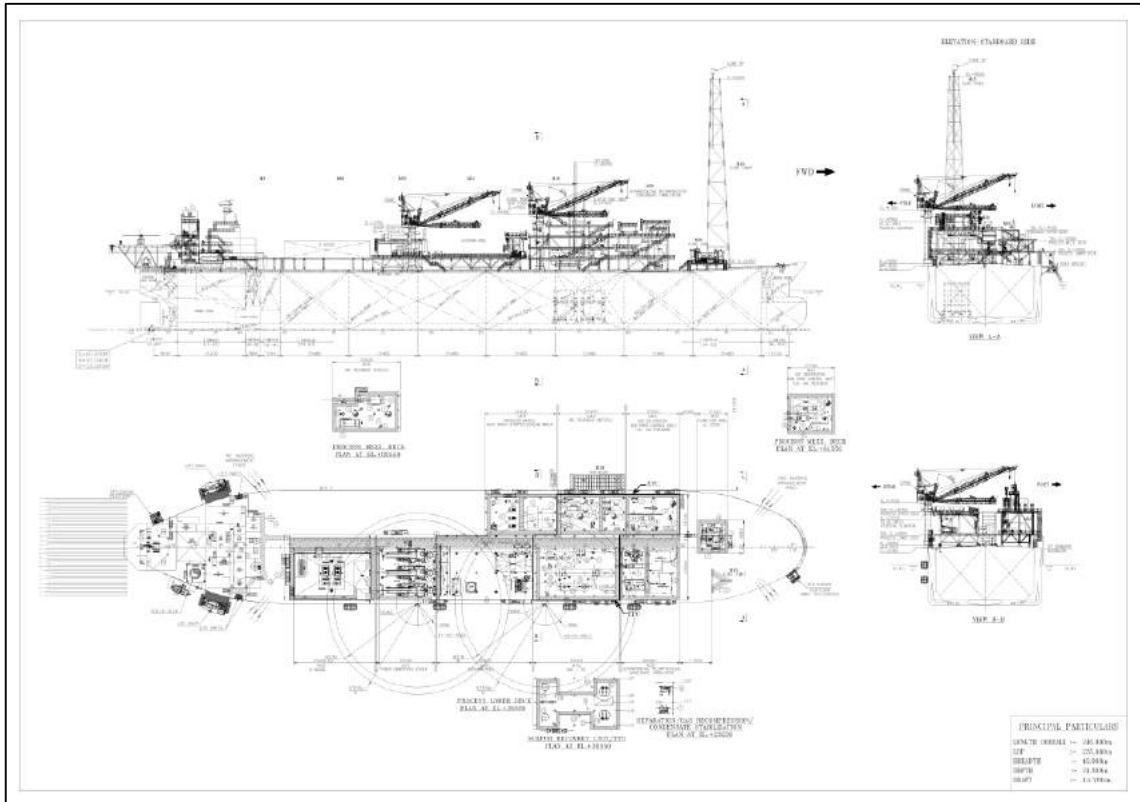
Module ini didesain didasari dengan konsep multi-support tanpa *elastometric bearing pads*. Module ini disanglah dengan 16 kaki dengan konfigurasi sesuai pada Gambar III-4 berikut:



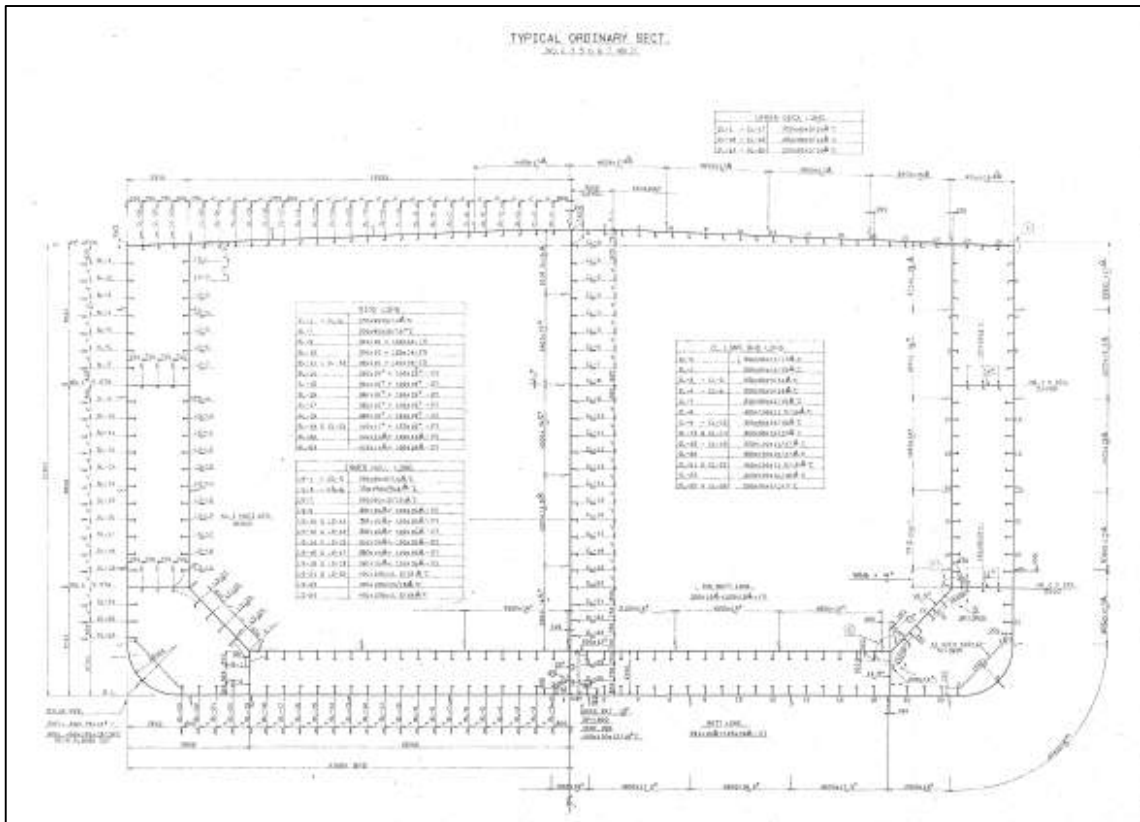
Gambar III-4 Konfigurasi Struktur Kaki *Topside Module M70*
(Sumber : PT.XX, 2018)

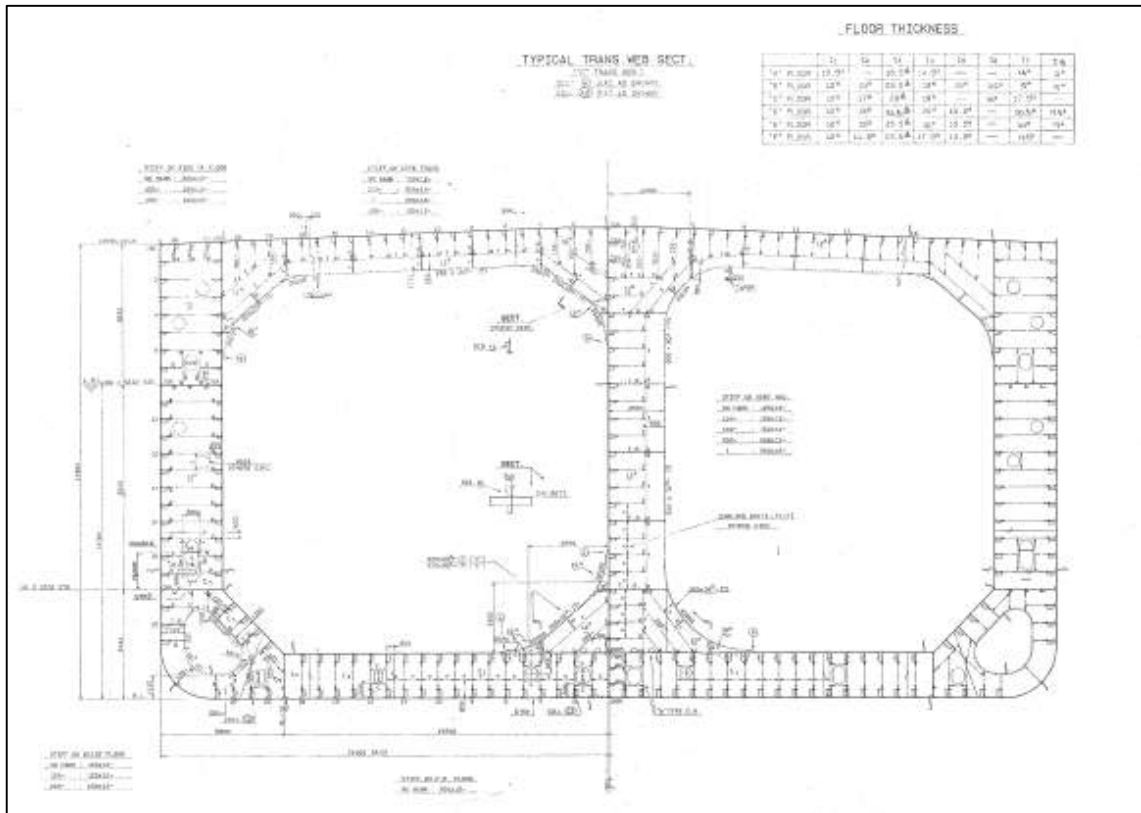
III.2.3. Data Struktur FPSO

Data struktur FPSO meliputi gambar rencana umum dan gambar *midship section* seperti pada Gambar III-5 sampai Gambar III-6.



Gambar III-5 Rencana Umum FPSO
(Sumber : PT.XX, 2018)





Gambar III-6 *Midship Section*
(Sumber : PT. XX, 2018)

III.2.4. Data Lingkungan

Data lingkungan yang digunakan adalah data gelombang dan data angin di perairan laut FPSO beroperasi. Data gelombang berupa diagram sebaran gelombang (*wave scatter diagram*) yang berisi keterangan tinggi gelombang (H_s), periode gelombang (T_p) dan jumlah kejadian gelombang (*number of wave occurrence*) untuk setiap variasi tinggi gelombang dan periode gelombang yang meliputi semua arah gelombang dalam kurun waktu 100 tahunan. Total distribusi kejadian gelombang setiap arah gelombang ditunjukkan pada Tabel III-4.

Tabel III-4 Persentase Gelombang setiap Arah

<i>Direction</i>	<i>Number of Hours</i>	<i>Percentage (%)</i>
<i>North</i>	7883	4,73
<i>North North East</i>	1811	1,09
<i>North East</i>	823	0,49
<i>East North East</i>	1559	0,94
<i>East</i>	9971	5,99
<i>East South East</i>	11934	7,16
<i>South East</i>	7105	4,27
<i>South South East</i>	3276	1,97
<i>South</i>	2894	1,74
<i>South South West</i>	825	0,5
<i>South West</i>	749	0,45
<i>West South West</i>	2601	1,56
<i>West</i>	41901	25,16
<i>West North West</i>	22938	13,77
<i>North West</i>	8199	4,92
<i>North North West</i>	7143	4,29
<i>Wavy</i>	131612	79,02
<i>Calm</i>	33640	20,09
<i>Unrecorded</i>	1488	0,89
<i>Total</i>	166560	100

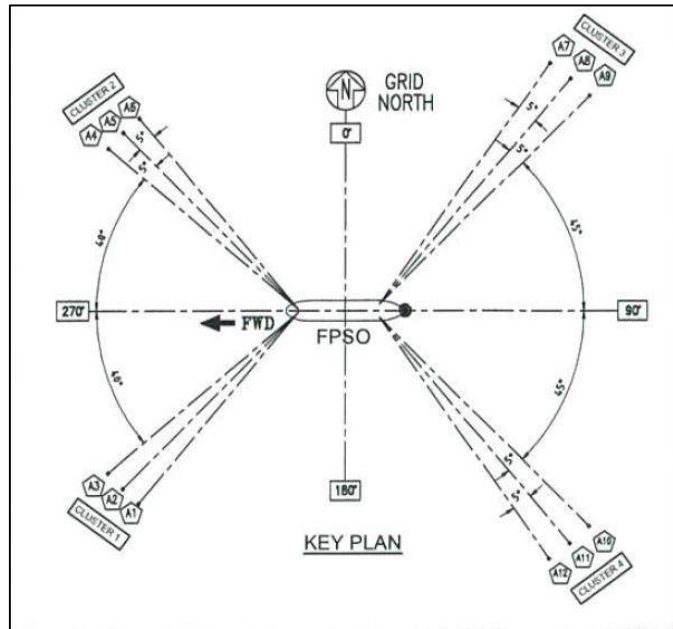
Tabel III-5 menunjukkan arah dari *west* mempunyai persentase paling besar yaitu 25,16%. Dengan itu untuk analisis hidrodinamis menggunakan arah gelombang dari *west*. Berikut adalah *wave scatter diagram* untuk gelombang 100 tahun dari arah *west*.

Tabel III-5 *Joint Probability* Gelombang 100 Tahun – *W Direction*

<i>Significant Wave Height, Hs (m)</i>	<i>Peak Period, Tp (Second)</i>									Total
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	
0,0 – 0,5	-	0,001	0,070	0,247	-	-	-	-	-	0,318
0,5 – 1,0	-	-	-	0,094	0,443	-	-	-	-	0,538
1,0 – 1,5	-	-	-	-	0,027	0,103	-	-	-	0,130
1,5 – 2,0	-	-	-	-	-	0,010	0,004	-	-	0,013
2,0 – 2,5	-	-	-	-	-	-	0,001	-	-	0,001
2,5 – 3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0 – 3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5 – 4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0 – 4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,5 – 5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	-	0,001	0,070	0,341	0,470	0,113	0,005	-	-	1,000

III.2.5. Data Mooring

Data mooring yang digunakan pada pemodelan global adalah posisi *anchor*, panjang *mooring* dan karakteristik *chain mooring*. Posisi *anchor* dan panjang *mooring* ditunjukkan pada Gambar III-7 dan Tabel III-6.



Gambar III-7 Posisi *Anchor*
(Sumber : PT. XX, 2018)

Tabel III-6 Posisi *Anchor*

<i>Anchor ID</i>	<i>Easting (m)</i>	<i>Northing (m)</i>	<i>Radius</i>
A1	419805,941	9184802,241	500
A2	419773,1517	9184832,242	500
A3	419743,1562	9184865,035	500
A4	419743,1562	9185530,225	500
A5	419773,1517	9185563,018	500
A6	419805,941	9185593,019	500
A7	420650,436	9185707,935	600
A8	420692,8835	9185675,436	600
A9	420732,2736	9185639,286	600
A10	420732,2736	9184755,974	600
A11	420692,8835	9184719,824	600
A12	420650,436	9184687,325	600

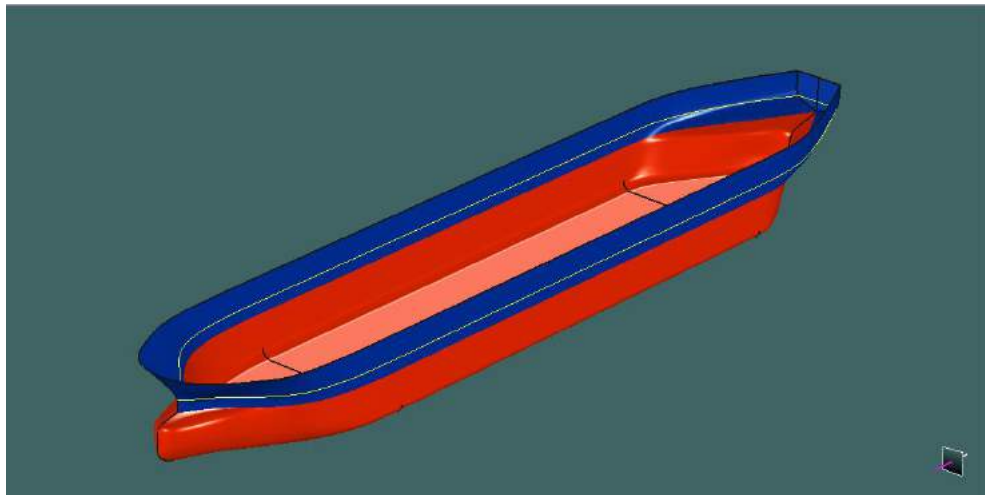
Berikut adalah data *properties chain mooring* yang digunakan pada pemodelan hidrodinamis.

Tabel III-7 Karakteristik *Chain Mooring*

Deskripsi	Nilai
Type	R3 Studless Chain
Diameter	114 mm
Berat	260 Kg/m
<i>Minimum Breaking Load</i>	10108 kN
<i>Stiffness, EA</i>	1109858,4 kN
<i>Maximum Tension</i>	6052,695 kN

III.3. Pemodelan Hidrodinamis

Pemodelan geometri FPSO dilakukan dengan bantuan piranti lunak *Maxsurf Pro* untuk menghasilkan bentuk badan FPSO dengan skala 1:1 seperti Gambar III-8 berikut. Model geometri dari piranti lunak *Maxsurf Pro* tersebut kemudian diekspor ke piranti lunak hidrodinamis untuk dilakukan analisis *acceleration motion*.



Gambar III-8 Model FPSO pada Maxsurf Pro

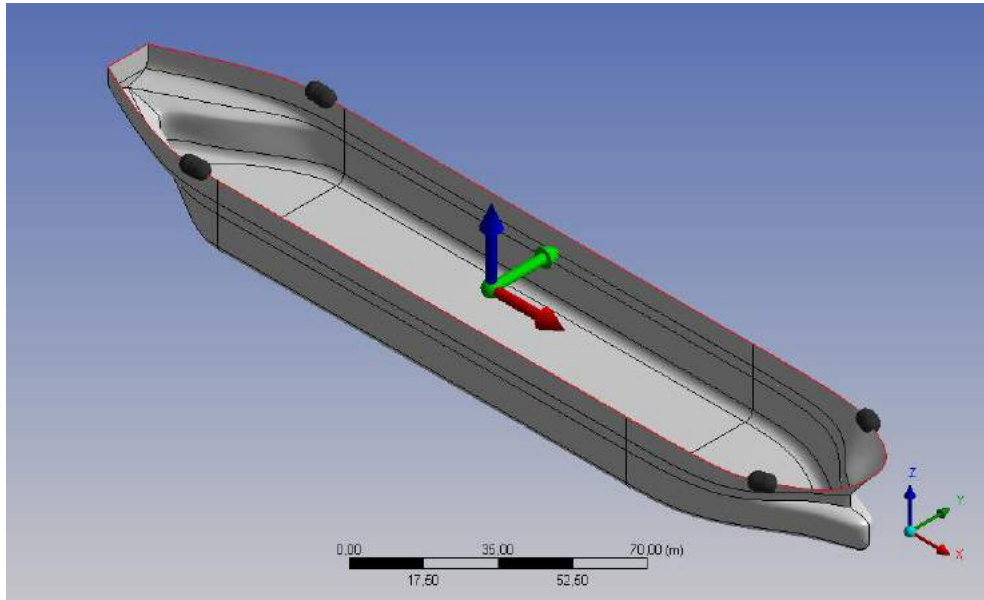
Sebelum dilakukan analisis, dilakukan pendefinisian letak sarat dan penentuan besar massa dan radius girasi. Untuk input radius girasi ini diberikan secara umum dengan persamaan berikut:

$$K_{xx} = 0,34 \times \text{Beam} \quad (\text{III-1})$$

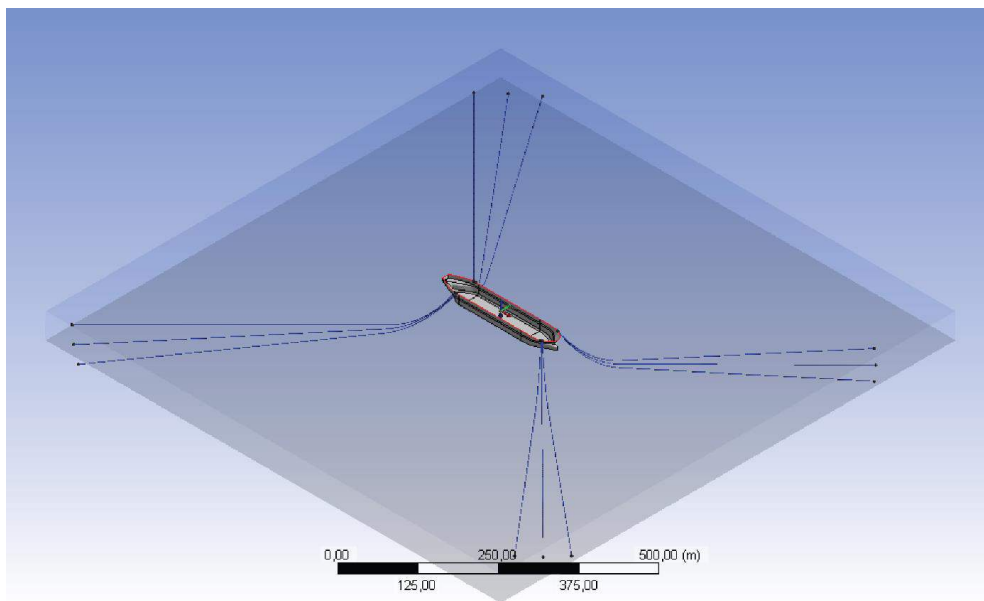
$$K_{yy} = 0,25 \times \text{Length} \quad (\text{III-2})$$

$$K_{zz} = 0,26 \times \text{Length} \quad (\text{III-3})$$

Model geometri yang telah didefinisikan letak sarat dan ditentukan besar massa dan radius girasi ditunjukkan pada Gambar III-9. Setelah itu, dilakukan pemodelan *mooring*, dengan menentukan posisi *connection point* dan *fixed point* dan setelah itu diberi *cable* seperti yang ditunjukkan pada Gambar III-10.



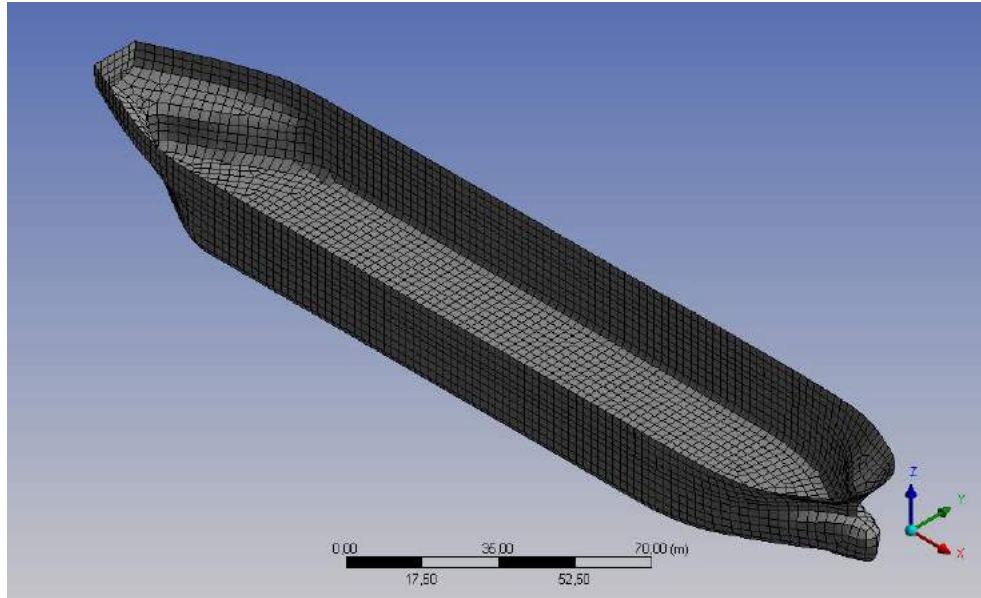
Gambar III-9 Pendefinisian Letak Sarat dan *Point Mass*



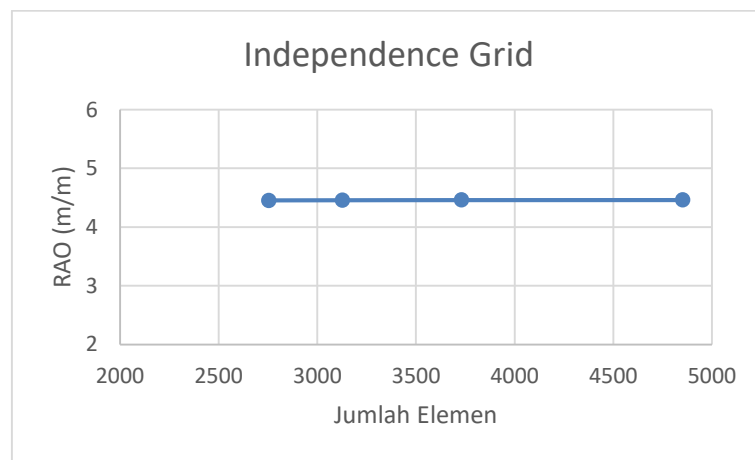
Gambar III-10 Model FPSO dengan *Mooring*

Setelah itu dilakukan validasi model dengan toleransi kesalahan sebesar 5% dan analisis *independence mesh*. Analisis *grid independence* atau *independence mesh* yaitu iterasi dengan variasi ukuran meshing untuk mendapatkan outputan yang optimal. Output yang digunakan sebagai acuan dalam proses *meshing* ini adalah RAO (Global X). Dari simulasi akan

menghasilkan nilai RAO yang berbeda dan dilakukan pemilihan nilai *meshing* yang paling optimal. Analisis ini dibuat 4 macam simulasi dengan variasi jumlah elemen, dan dilihat jumlah elemen yang paling optimal. Hasil dari simulasi ditunjukkan pada Tabel III-8.



Gambar III-11 Meshing Geometri



Gambar III-12 Simulasi *Independence Grid*

Tabel III-8 Simulasi *Independence Grid*

Simulasi	Ukuran Elemen	Jumlah Elemen	RAO (m/m)	Prosentase Perbedaan (%)
1	5	2755	4,453	0,0673
2	45	3127	4,456	0,0673
3	4	3732	4,459	0,0224
4	3.,5	4853	4,460	

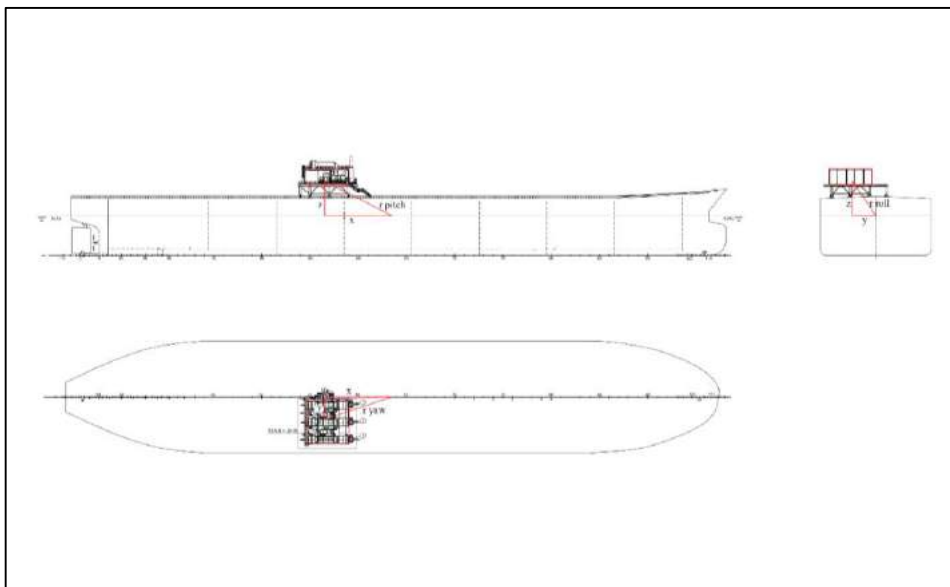
Pada Tabel III-8 selisih antara simulasi 3 dan 4 memiliki nilai paling kecil yaitu 0,0224% menunjukkan bahwa mulai pada simulasi 3 tidak lagi menunjukkan perubahan nilai yang signifikan. Sehingga untuk analisis hidrodinamis menggunakan ketentuan *meshing* sebagai berikut:

- a. *Element Size* : 4 m
- b. *Number of Nodes* : 3836
- c. *Number Elements* : 3732
- d. *Number of Diff. Nodes* : 3135
- e. *Number of Diff. Elements* : 3035

Selanjutnya dapat dilakukan analisis untuk mendapatkan *acceleration motion*. *Acceleration motion* ini selanjutnya digunakan sebagai parameter dalam perhitungan beban yang akan digunakan dalam analisis struktur (*topside stool*).

III.4. Perhitungan Beban dan Variasi Pembebanan

Beban – beban yang digunakan pada penelitian ini yaitu *topside inertia loads*. *Topside inertia loads* ini dihitung dihitung sesuai 6 dof dimana terbagi menjadi dua jenis, yaitu tiga mode gerakan translasional dan tiga mode gerakan rotasional. Untuk gerakan translasional, *topside inertia loads* didapatkan dengan persamaan II-1 dan untuk gerakan rotasional, *topside inertia loads* didapatkan dengan mencari dahulu momen inersia pada persamaan II-2 untuk mencari momen gaya pada persamaan II-3. Pada persamaan II-2, nilai r merupakan jari – jari girasi yang digunakan untuk mentransformasikan gerakan rotasional terhadap module dimana nilai r merupakan jarak COG FPSO terhadap titik berat *topside module*.



Gambar III-13 Posisi Topside Module dari COG FPSO

Kombinasi pembebanan yaitu *topside inertia loads* dengan variasi pembebanan dari arah gelombang *west* (270°) dengan variasi tinggi dan *peak period* sesuai arah masing-masing gelombang dan variasi muatan yaitu pada kondisi *full load*.

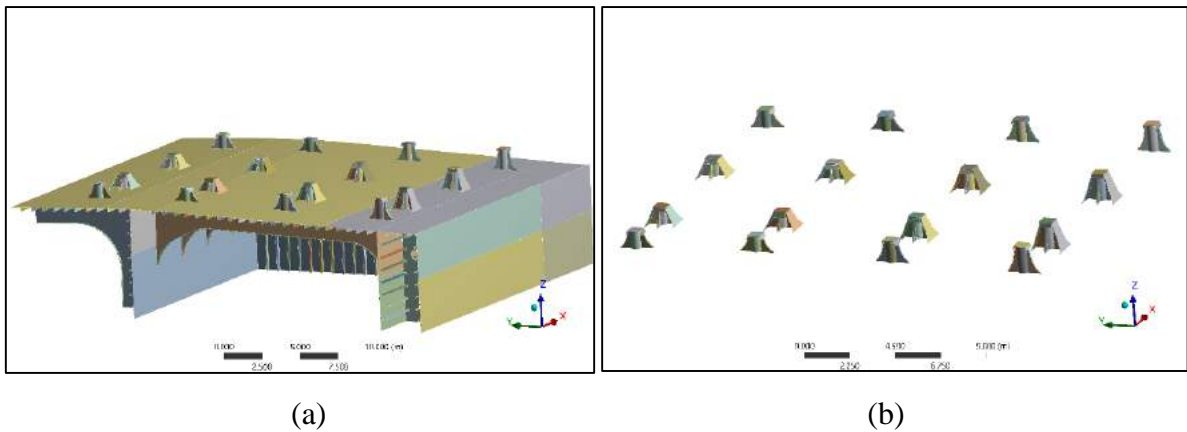
III.5. Pemodelan Global

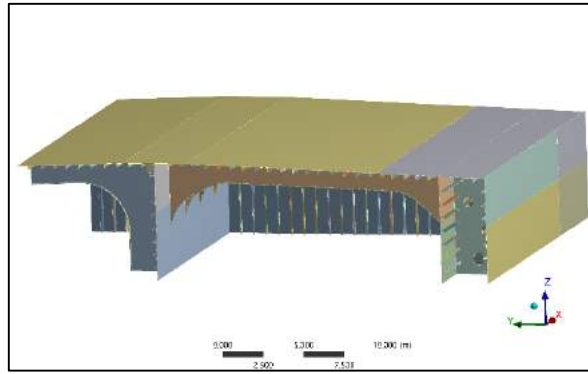
Pemodelan struktur global dengan menggunakan metode elemen hingga dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai tegangan pada struktur *topside stool* yang dimodelkan, sehingga mengetahui titik kritis untuk ditinjau dalam analisis. Pemodelan struktur ini dibuat dengan referensi pada penelitian sebelumnya (Gourdet, 2008)

Gourdet (2008) menyarankan pada penelitiannya untuk analisis struktur pada *interface structure*, model yang bisa digunakan meliputi:

1. Model lambung sebagian dan *topside stool*
2. Model lambung sebagian dan struktur utama topside
3. Model lambung lengkap dan struktur utama topside
4. *Integrated model* (lambung dan topside dimodelkan secara lengkap)

Pada penelitian ini model yang dibuat meliputi *topside stool* dan lambung FPSO. Lambung FPSO yang dibuat dalam pemodelan adalah frame 54 sampai dengan frame 59. Pemodelan struktur ditunjukkan pada Gambar III-14.

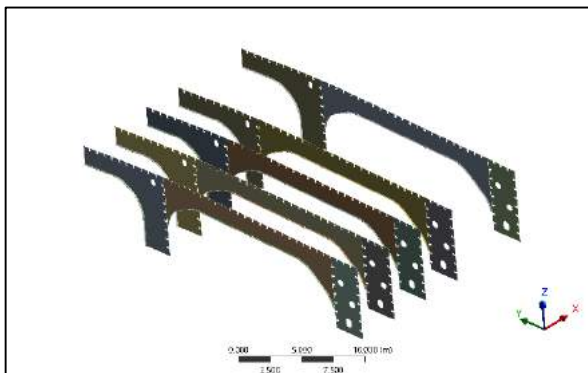




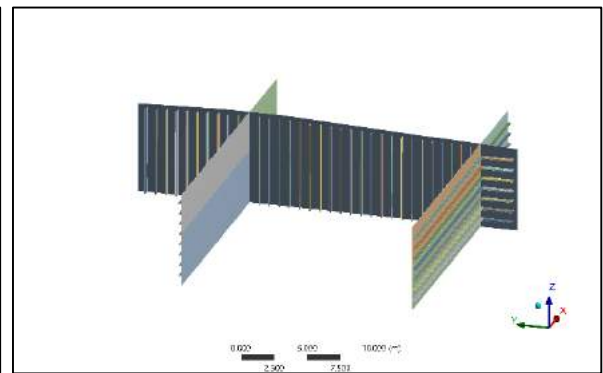
(c)

Gambar III-14 Geometri Struktur
 (a) Full Model (b) Topside Stool (c) Lambung FPSO

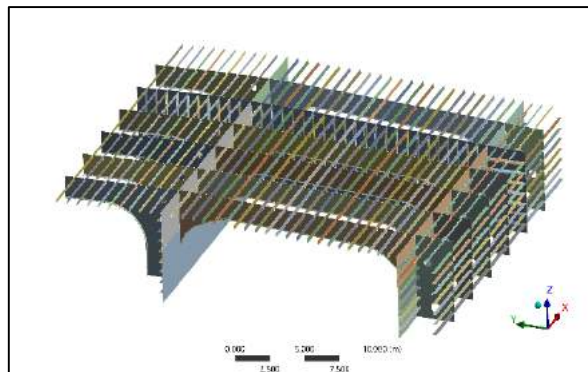
Dalam struktur lambung FPSO, pemodelan terdiri dari web frame, sekat dengan *stiffner*, longitudinal dan pelat geladak dan pelat sisi yang ditunjukkan pada Gambar III-15.



(a)



(b)

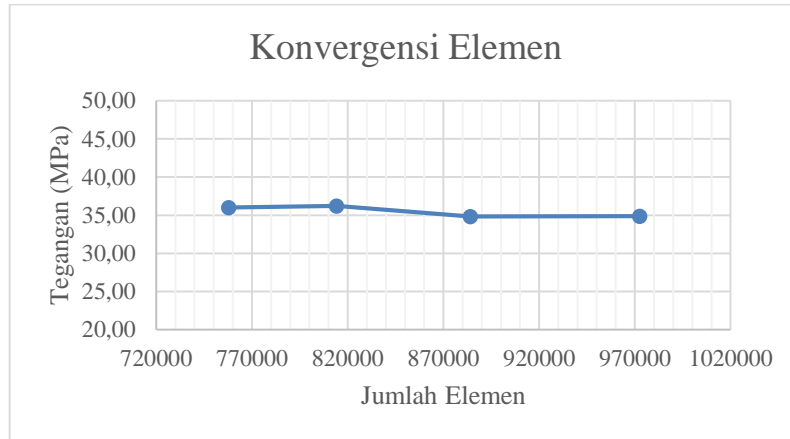


(c)

Gambar III-15 Pemodelan Lambung FPSO
 (a) Web Frame (b) Longitudinal dan Transverse Bulkhead (c) Geometri Tanpa Kulit

Sebelum dilakukan analisis, terlebih dahulu dilakukan konvergensi elemen yaitu iterasi untuk memperoleh tegangan dengan variasi ukuran *meshing*. Ketika tegangan yang didapat

telah mendekati konstan, maka model bisa digunakan dalam analisis. Hasil konvergensi elemen dengan 4 macam ukuran *meshing* dan pembebanan yang sama disajikan pada Tabel III-9 dan Gambar III-16.

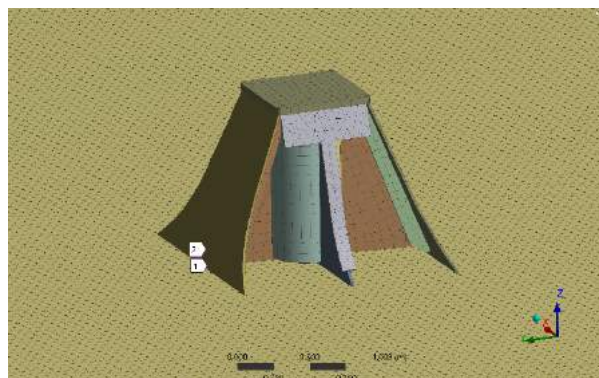


Gambar III-16 Konvergensi Elemen

Tabel III-9 Konvergensi Elemen

Simulasi	Mesh Size (m)	Jumlah Elemen	Tegangan (MPa)
1	0.075	757848	36,01
2	0.07	814189	36,22
3	0.065	884021	34,83
4	0.06	972388	34,88

Tabel III-9 dan Gambar III-16 menunjukkan bahwa perbedaan tegangan yang dihasilkan antara ukuran *meshing* tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan prosentase perbedaan dibawah 0,05% dengan itu tegangan yang dihasilkan cenderung konstan. Dengan mengacu pada hasil tersebut maka untuk analisis tegangan dalam penelitian ini digunakan model dengan ukuran *meshing* yaitu 0,06 karena ukuran *meshing* terkecil dan elemen yang dipakai yaitu *hexdominant* (segi empat) sehingga hasil analisis akan semakin akurat. Gambar III-17 menunjukkan hasil *meshing*.

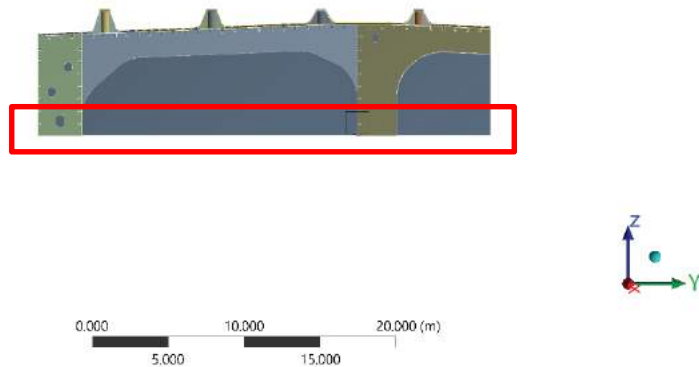


Gambar III-17 Ukuran *Meshing* 0.06 m

III.6. Kondisi Batas dan Pembebanan

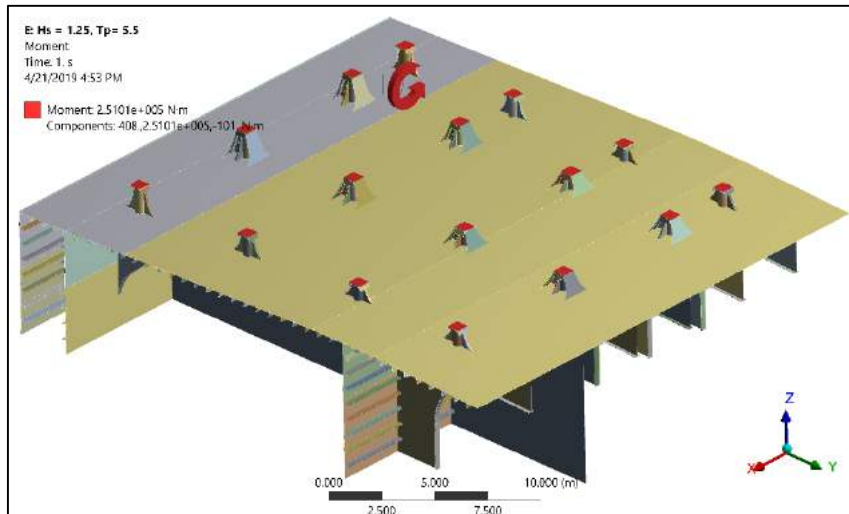
Pemberian kondisi batas berupa *fixed support* diaplikasi pada ujung geometri (*face*) pada geometri lambung FPSO ditunjukkan pada Gambar III-178.

A: Hs=0.25, Tp=1.5
Fixed Support
Time: 1. s
4/21/2019 9:48 PM
■ Fixed Support

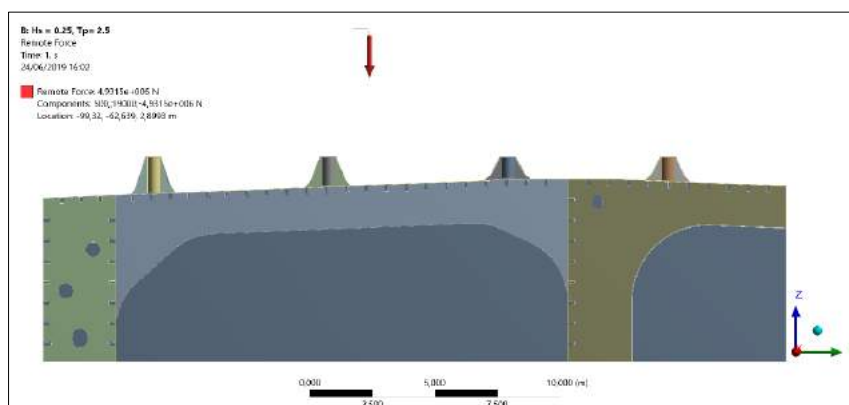
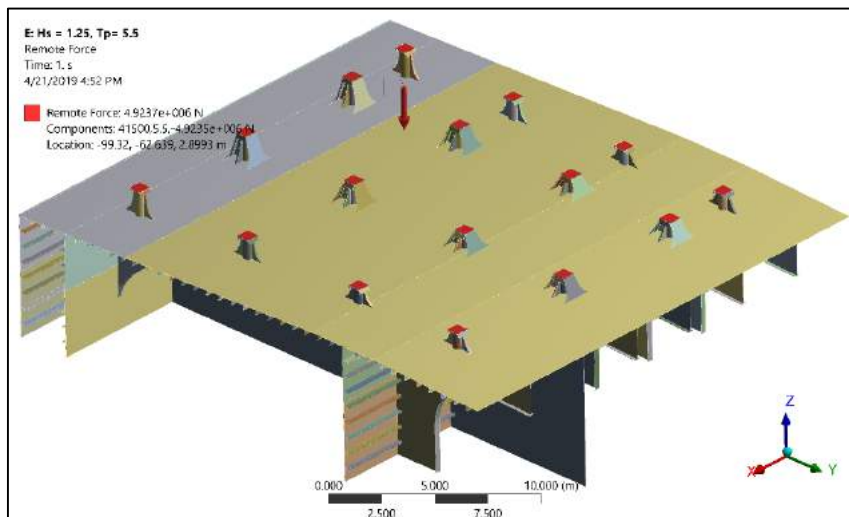


Gambar III-18 *Fixed Support*

Setelah pemberian kondisi batas, dimasukkan komponen – komponen beban yaitu gaya dan momen gaya (*topside inertia loads*) yang ditunjukkan pada Gambar III-19 dan Gambar III-20. Besar gaya dan momen gaya didapatkan pada sub-bab IV.1.3. Komponen beban diaplikasikan dengan cara pendekatan "*point load*" modelling. *Point load* didefinisikan sebagai suatu titik dengan nilai x, y, z sesuai dengan titik berat yang diaplikasikan diatas *topside stool*. *Point load* disini merepresentasikan *topside weight* sehingga *topside inertia loads* dapat diaplikasikan. (Det Norske Veritas, 2010)



Gambar III-19 Momen Gaya (M_x , M_y dan M_z)

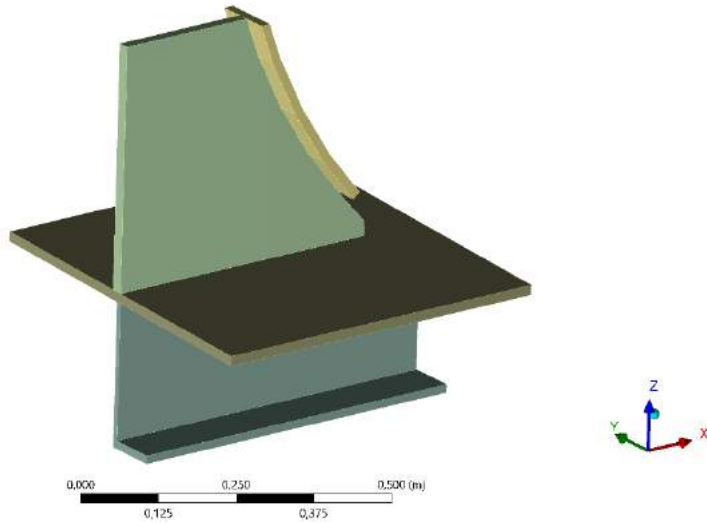


Gambar III-20 Gaya (F_x , F_y dan F_z)

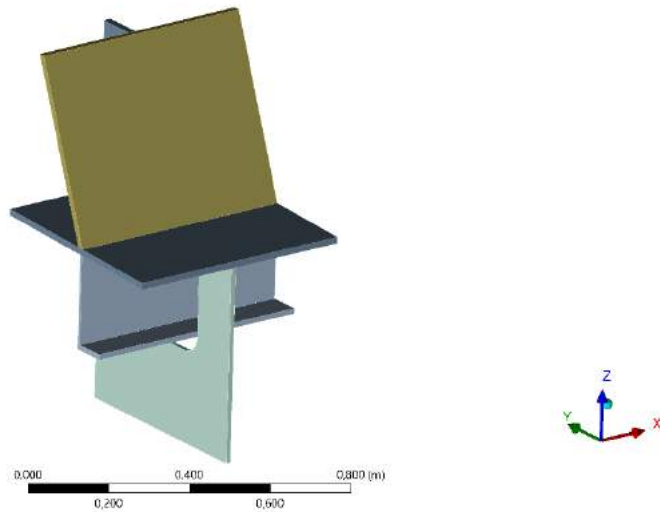
III.7. Pemodelan Lokal

Pemodelan lokal dengan dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai tegangan lokal pada struktur *topside stool* yang dipilih berdasarkan hasil pada analisis tegangan global. Pemodelan dilakukan setiap bracket pada *topside stool* yang dipilih. Pemodelan lokal

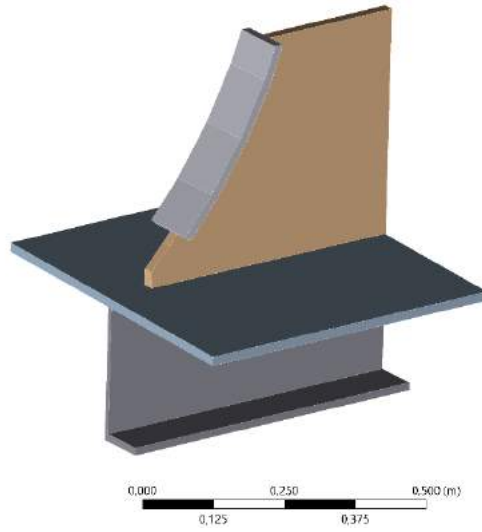
menggunakan teknik *submodelling*, dengan menggunakan *solution* dari model struktur global sebagai *boundary condition*. (Det Norske Veritas, 2010). Pemodelan lokal ditunjukkan pada Gambar III-20



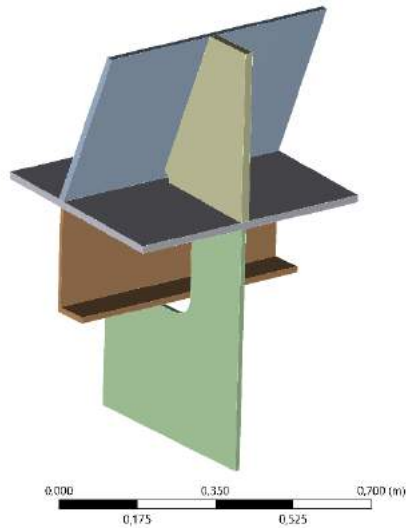
(a)



(b)

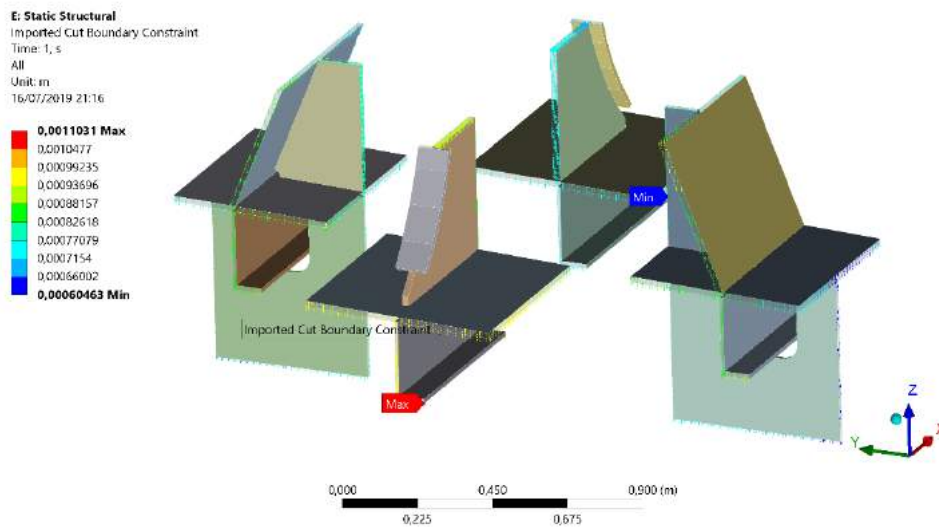


(c)



(d)

Gambar III-21 Pemodelan Lokal
 (a) Bracket 1 (b) Bracket 2 (c) Bracket 3 (4) Bracket 4



Gambar III-22 Submodelling technique

Setelah melakukan analisis tegangan lokal setiap *bracket*, dipilih *bracket* yang memiliki tegangan normal vertikal ke sumbu Z yang paling tinggi. Hasil tersebut menjadi acuan dalam menentukan skenario retak dan pemodelan retak. Pemodelan retak ini dilakukan dengan tujuan untuk melakukan perhitungan *stress intensity factor* menggunakan metode numerik. Nilai *stress intensity factor* dihitung dari retak awal sampai kedalaman kritis, yang selanjutnya digunakan untuk perhitungan perambatan retak.

Pada penelitian ini model retak yang digunakan adalah bentuk *through crack*. Ukuran retak awal yang digunakan pada pemodelan lokal ini sesuai dengan DNV RP C203 yaitu 0,5 mm. Untuk ukuran kedalaman kritis dihitung sesuai dengan persamaan II-24, dimana tegangan normal maksimum didapatkan dari analisis tegangan dan K_{ic} dihitung menggunakan persamaan:

$$K_{ic} = \sqrt{\frac{B}{2.5} \sigma_{ys}} \quad (III-4)$$

Setelah didapatkan kedalaman kritis, dilakukan pemodelan retak dari retak awal sampai retak kritis dan dilakukan proses *meshing* dan setelah itu dapat dilakukan analisis untuk mendapatkan SIF setiap ukuran retak.

III.8. Perhitungan Umur Kelelahan

Pada penelitian ini dilakukan dua pendekatan perhitungan umur kelelahan yaitu berdasarkan perhitungan menggunakan metode pendekatan *fracture mechanics* dengan pemberian retak awal dan menggunakan pendekatan *S-N Curve*. Perhitungan umur kelelahan dengan *S-N Curve*, dalam mengestimasi kumulatif kerusakan fatigue digunakan metode *simplified fatigue life assesment* dengan parameter \bar{a} (konstanta yang bergantung pada jenis

material dan pengelasan, jenis pembebanan, konfigurasi geometris dan kondisi lingkungan) didapatkan dari persamaan II-27.

Sedangkan dengan metode pendekatan *fracture mechanics*, umur kelelahan dapat diperhitungkan setelah mendapatkan jumlah siklus dari tiap ukuran retak yang terjadi. Jumlah siklus dihitung berdasarkan perbandingan rentang kedalaman retak dengan laju perambatan retak. Laju perambatan retak dapat ditentukan melalui persamaan II-24 dan dinyatakan dengan variabel da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, kedalaman retak, faktor geometri, dan tegangan. Rentang siklus dapat dihitung dengan persamaan III-5. Setelah itu dilakukan perhitungan total siklus melalui penjumlahan siklus dengan persamaan III-6.

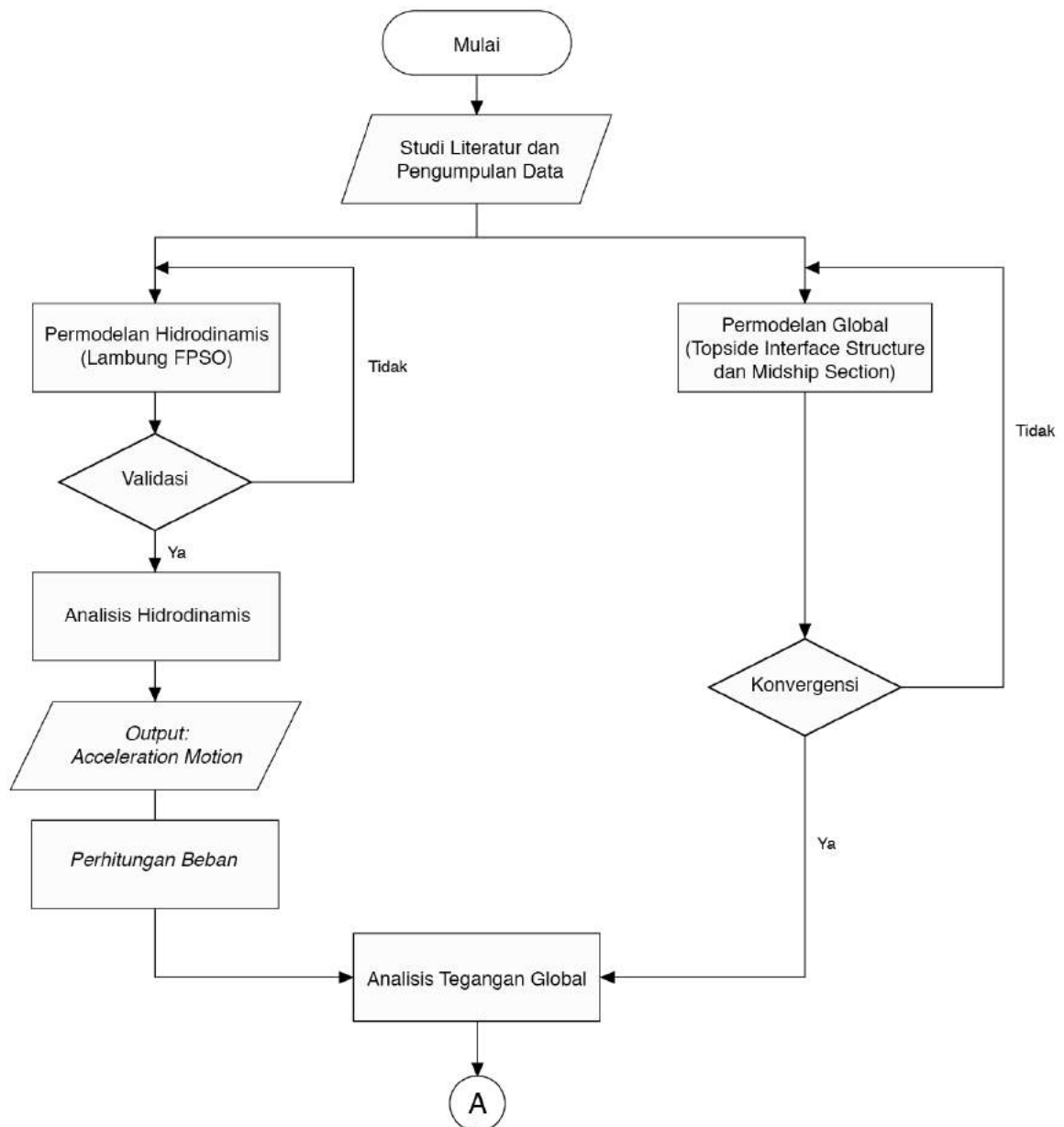
$$\Delta N = \frac{\Delta a}{da/dN} \quad (\text{III-5})$$

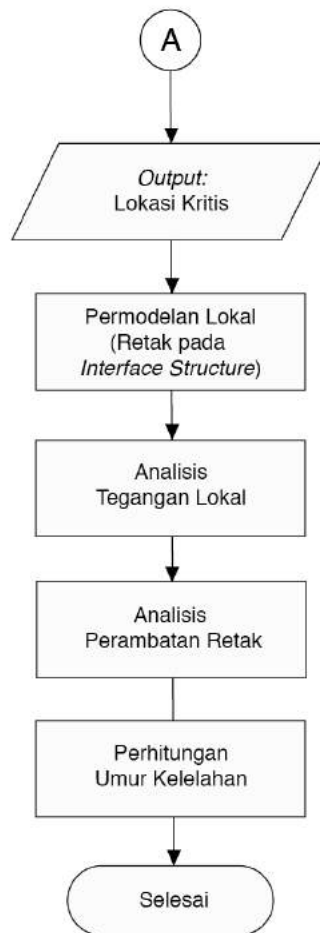
$$N_t = \Delta N + N_i \quad (\text{III-6})$$

Pada perhitungan umur kelelahan, perlu diketahui parameter – parameter seperti pada perhitungan perambatan retak yaitu parameter SIF dan parameter material yakni C dan m. Nilai C dan m yang digunakan adalah berdasarkan percobaan yaitu nilai C dan m masing – masing sebesar $6,98 \times 10^{-12}$ dan 3.

III.9. Bagan Alir

Metode penelitian dalam Tugas Akhir ini digambarkan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) sebagai berikut :





Gambar III-23 Diagram Alir Tugas Akhir

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1. Analisis Hidrodinamis

IV.1.1. Validasi Model

Pemodelan geometri lambung FPSO harus memiliki tingkat kesuaian yang tinggi dengan bentuk aslinya. Sehingga model harus dilakukan validasi dengan toleransi kesalahan sebesar 5%. Validasi model yang digunakan adalah validasi *displacement* data dengan *displacement* model global pada perangkat lunak hidrodinamis.

Tabel IV-1 Validasi Model Global

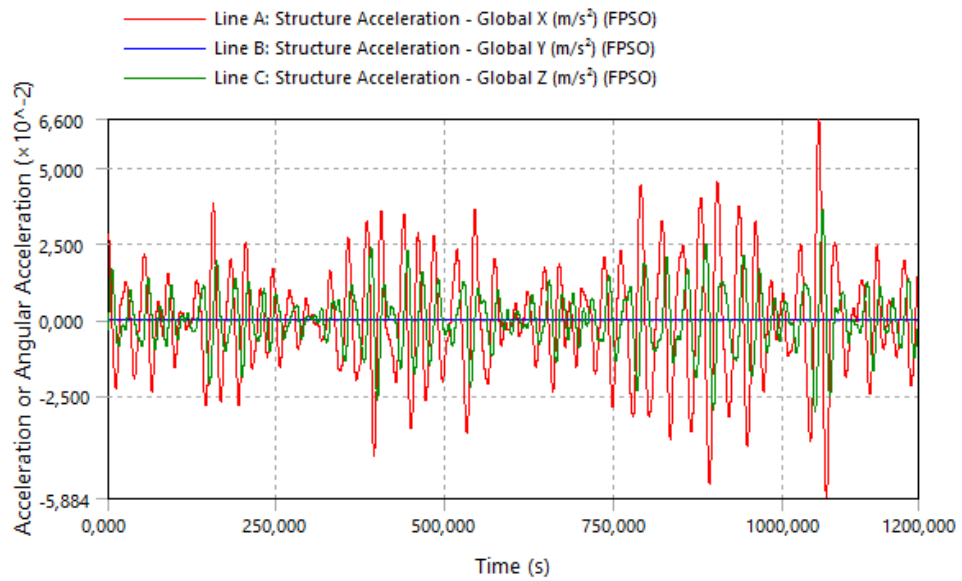
Parameter	Unit	Data	Model Numerik	Selisih (%)
<i>Displacement</i>	ton	123877	127306	2,7%

Pada Tabel IV-1 menunjukkan bahwa selisih antara *displacement* data dengan *displacement* model kurang dari 5%, dengan demikian model sesuai dengan bentuk yang sebenarnya.

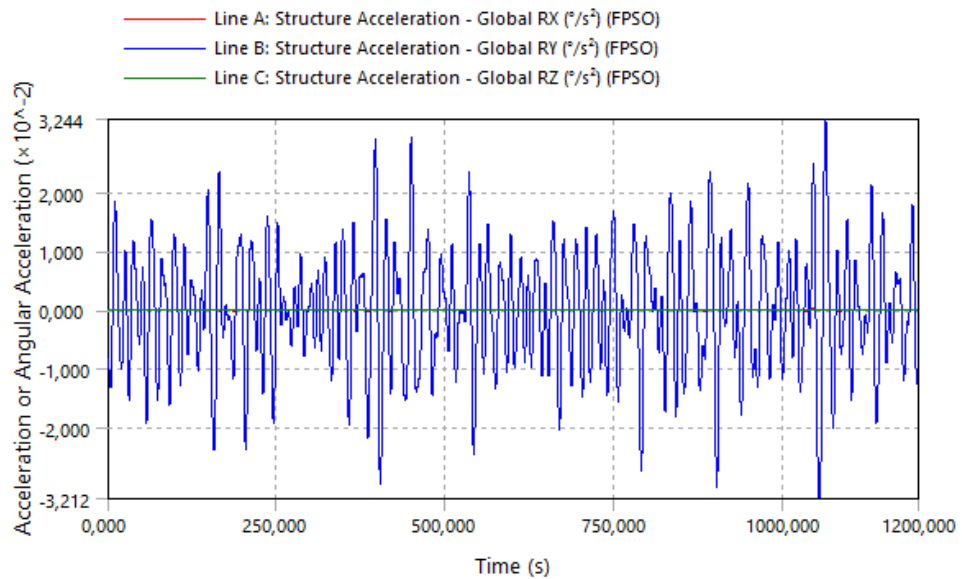
IV.1.2. Acceleration Motion

Percepatan gerak (*acceleration motion*) FPSO dihitung menggunakan analisis *time response with irregular wave* dibantu dengan perangkat lunak hidrodinamis. Nilai percepatan gerak (*acceleration motion*) dihitung sesuai 6 *dof* yang meliputi *surge, sway, heave, roll, pitch* dan *yaw*. Analisis dilakukan pada arah sudut datang gelombang *west* (270°). Dalam analisis ini, spektrum gelombang menggunakan teori JONSWAP dengan mengambil nilai γ (gamma) yaitu 3,38 dalam rentang frekuensi 0,1 rad/s sampai 1,793 rad/s. Simulasi dilakukan dengan waktu 1200 s. Kondisi gelombang yang digunakan adalah kondisi gelombang selama masa operasi sesuai pada Tabel III-5.

Hasil simulasi pada arah gelombang *west* (270°) dengan tinggi gelombang (H_s) 0,75 m dan peak period (T_p) 4,5 ditunjukkan pada Gambar IV-1 dan Gambar IV-2, untuk variasi gelombang yang lain dapat dilihat pada lampiran.



Gambar IV-1 Acceleration Translational Motion



Gambar IV-2 Acceleration Rotational Motion

Gambar IV-1 dan Gambar IV-2 menunjukkan gerak *surge* dan gerak *yaw* cenderung besar, hal ini dikarenakan gelombang datang dari arah *west* (270°) atau dari haluan kapal. Dari grafik seperti diatas setiap variasi tinggi dan *peak period* diambil nilai maksimum. Berikut adalah nilai percepatan gerak (*acceleration motion*) pada arah gelombang *west* (270°) sesuai 6 dof, untuk arah gelombang yang lain dapat dilihat pada lampiran.

Tabel IV-2 Acceleration Surge Motion (m/s²)

Significant Wave Height, Hs (m)	Peak Period, Tp (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	0,007	0,014	0,019	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	0,058	0,066	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	0,11	0,073	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	0,080	0,076	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	0,12	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel IV-3 Acceleration Sway Motion (m/s²)

Significant Wave Height, Hs (m)	Peak Period, Tp (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	1,30E-05	8,0,E-06	4,80E-06	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	1,50E-05	1,3,E-05	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	2,20E-05	9,90E-06	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	0,089	0,072	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	1,40E-05	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel IV-4 Acceleration Heave Motion (m/s²)

Significant Wave Height, Hs (m)	Peak Period, Tp (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	0,014	0,014	0,014	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	0,041	0,036	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	0,06	0,038	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	0,062	0,049	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	0,049	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel IV-5 Acceleration Roll Motion (rad/s²)

Significant Wave Height, Hs (m)	Peak Period, Tp (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	1,13E-06	2,1,E-06	1,33E-06	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	4,01E-06	3,1,E-06	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	5,41E-06	3,32E-06	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	2,0,E-03	1,8,E-03	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	4,19E-06	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel IV-6 Acceleration Pitch Motion (rad/s²)

Significant Wave Height, Hs (m)	Peak Period, Tp (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	2,44E-04	4,7,E-04	3,32E-04	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	9,77E-04	5,6,E-04	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	9,25E-04	5,93E-04	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	9,9,E-04	6,3,E-04	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	7,33E-04	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel IV-7 Acceleration Yaw Motion (rad/s²)

Significant Wave Height, Hs (m)	Peak Period, Tp (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	2,97E-07	2,3,E-07	1,54E-07	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	4,36E-07	2,8,E-07	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	5,06E-07	3,49E-07	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	6,8,E-04	5,2,E-04	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	4,54E-07	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

IV.1.3. Perhitungan Beban dan Variasi Pembebanan

Beban yang digunakan untuk input pembebanan pada analisis lokal ini yaitu *topside inertia loads* akibat gerak FPSO. *Topside inertia loads* ini dihitung sesuai 6 dof dimana terbagi menjadi dua jenis, yaitu tiga mode gerakan translasional dan tiga mode gerakan rotasional. Untuk gerakan translasional, *topside inertia loads* didapatkan dengan persamaan II-1 dengan nilai percepatan seperti pada Tabel IV-2 sampai Tabel IV-4. Pada gerakan *heave* ada pengaruh gravitasi, maka pada perhitungan ditambah faktor gravitasi. Hasil perhitungan *topside inertia loads* pada gerak translasi pada semua variasi kejadian gelombang untuk arah gelombang 270° (*west*) disajikan pada Tabel IV-8 sampai Tabel IV-10.

Tabel IV-8 Beban Pada Arah X (kN)

Significant Wave Height, H_s (m)	Peak Period, T_p (Second)								
	0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	5,0 - 6,0	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,0 - 9,0
0,0 - 0,5	-	3,500	7,000	9,500	-	-	-	-	-
0,5 - 1,0	-	-	-	29,000	33,000	-	-	-	-
1,0 - 1,5	-	-	-	-	55,000	36,500	-	-	-
1,5 - 2,0	-	-	-	-	-	40,000	38,000	-	-
2,0 - 2,5	-	-	-	-	-	-	60,000	-	-
2,5 - 3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0 - 3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5 - 4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0 - 4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,5 - 5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel IV-9 Beban Pada Arah Y (kN)

Significant Wave Height, H_s (m)	Peak Period, T_p (Second)								
	0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	5,0 - 6,0	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,0 - 9,0
0,0 - 0,5	-	6,50E-03	4,00E-03	2,40E-03	-	-	-	-	-
0,5 - 1,0	-	-	-	7,50E-03	6,50E-03	-	-	-	-
1,0 - 1,5	-	-	-	-	1,10E-02	4,95E-03	-	-	-
1,5 - 2,0	-	-	-	-	-	44,50	3,60E+01	-	-
2,0 - 2,5	-	-	-	-	-	-	7,00E-03	-	-
2,5 - 3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0 - 3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5 - 4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0 - 4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,5 - 5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel IV-10 Beban Pada Arah Z (kN)

Significant Wave Height, H_s (m)	Peak Period, T_p (Second)								
	0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	5,0 - 6,0	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,0 - 9,0
0,0 - 0,5	-	4912	4912	4912	-	-	-	-	-
0,5 - 1,0	-	-	-	4925,500	4923	-	-	-	-
1,0 - 1,5	-	-	-	-	4935	4924	-	-	-
1,5 - 2,0	-	-	-	-	-	4936	4929,5	-	-
2,0 - 2,5	-	-	-	-	-	-	4929,5	-	-
2,5 - 3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0 - 3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5 - 4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0 - 4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,5 - 5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Pada gerakan rotasional, *topside inertia loads* didapatkan dengan mencari dahulu momen inersia pada persamaan II-2 untuk mencari momen gaya pada persamaan II-3 nilai percepatan seperti pada Tabel IV-5 sampai Tabel IV-7. Hasil perhitungan *topside inertia loads* pada gerak translasi pada semua variasi kejadian gelombang untuk arah gelombang 270° (*west*) disajikan pada Tabel IV-11 sampai tabel IV-13.

Tabel IV-11 Momen Gaya Pada Arah X (kN.m)

Significant Wave Height, H_s (m)	Peak Period, T_p (Second)								
	0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	5,0 - 6,0	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,0 - 9,0
0,0 - 0,5	-	0,139	0,257	0,163	-	-	-	-	-
0,5 - 1,0	-	-	-	0,493	0,386	-	-	-	-
1,0 - 1,5	-	-	-	-	0,665	0,408	-	-	-
1,5 - 2,0	-	-	-	-	-	248,837	223,096	-	-
2,0 - 2,5	-	-	-	-	-	-	0,515	-	-
2,5 - 3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0 - 3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5 - 4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0 - 4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,5 - 5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel IV-12 Momen Gaya Pada Arah Y (kN.m)

Significant Wave Height, H_s (m)	Peak Period, T_p (Second)								
	0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	5,0 - 6,0	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,0 - 9,0
0,0 - 0,5	-	100,404	193,635	136,262	-	-	-	-	-
0,5 - 1,0	-	-	-	401,614	229,494	-	-	-	-
1,0 - 1,5	-	-	-	-	380,099	243,837	-	-	-
1,5 - 2,0	-	-	-	-	-	408,786	258,180	-	-
2,0 - 2,5	-	-	-	-	-	-	301,211	-	-
2,5 - 3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0 - 3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5 - 4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0 - 4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,5 - 5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel IV-13 Momen Gaya Pada Arah Z (kN.m)

Significant Wave Height, H_s (m)	Peak Period, T_p (Second)								
	0,0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	4,0 - 5,0	5,0 - 6,0	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,0 - 9,0
0,0 - 0,5	-	0,107	0,082	0,055	-	-	-	-	-
0,5 - 1,0	-	-	-	0,157	0,101	-	-	-	-
1,0 - 1,5	-	-	-	-	0,183	0,126	-	-	-
1,5 - 2,0	-	-	-	-	-	245,495	188,842	-	-
2,0 - 2,5	-	-	-	-	-	-	0,164	-	-
2,5 - 3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0 - 3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5 - 4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0 - 4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Variasi pembebanan terdiri dari arah gelombang *west* (270°) dengan variasi tinggi dan peak period sesuai arah masing-masing gelombang, sehingga jumlah variasi beban adalah 10 variasi (LC1-LC10) seperti Tabel IV-14.

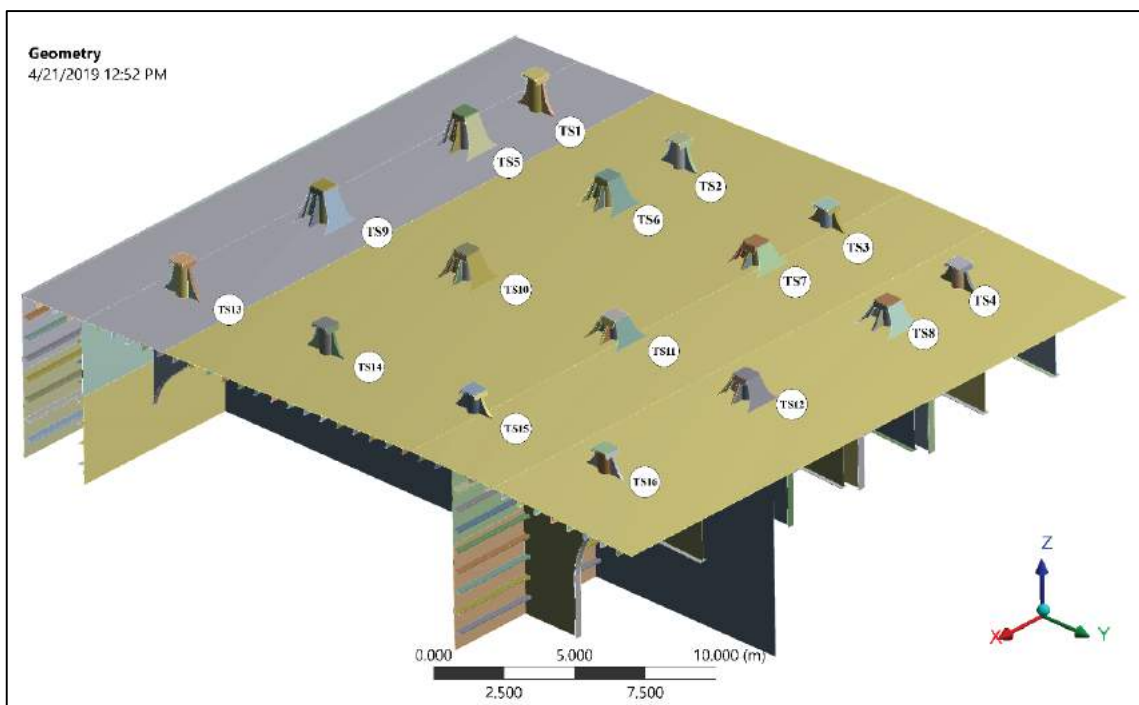
Tabel IV-14 Load Case

LC No.	Wave Direction	Hs	Tp
1	W	0,25	1,5
2			2,5
3			3,5
4		0,75	3,5
5			4,5
6			4,5
7		1,25	5,5
8			5,5
9			6,5
10		2,25	6,5

IV.2. Analisis Global

IV.2.1. Lokasi Tinjauan Struktur

Variasi pembebanan seperti yang telah diuraikan di atas merupakan kondisi batas yang diaplikasikan dalam analisa struktur terhadap setiap lokasi detail struktur yang ditinjau. Detail struktur yang ditinjau dalam penelitian ini adalah *topside stool* dimana lokasi tersebut salah satu titik kritis yang harus dianalisis sesuai Tabel II-2. Pada module *Power Generation System* (M70) disanggah dengan 16 *topside stool* dengan konfigurasi sesuai pada Gambar III-4. Lokasi tinjauan struktur disesuaikan dengan jumlah kaki yang menyanggah *topside module* yaitu 16 *topside stool* (TS1-TS16) yang ditunjukkan pada Gambar IV-3 berikut.



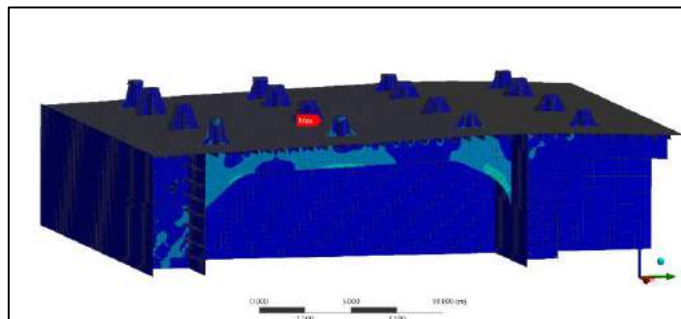
Gambar IV-3 Lokasi Tinjauan Struktur

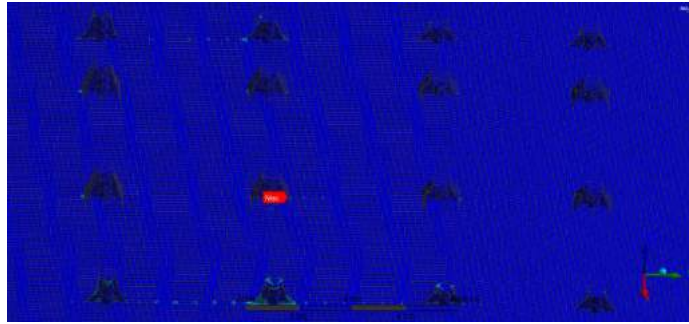
IV.2.2. Analisis Tegangan Global

Tegangan untuk setiap variasi pembebanan (LC1-LC10) ini diperoleh melalui analisis elemen hingga. Hasil tegangan ini digunakan untuk mengetahui lokasi kritis untuk selanjutnya dilakukan analisis lokal. Tegangan yang ditinjau adalah tegangan pada *interface structure* setiap lokasi sesuai pada Gambar IV-3. Distribusi tegangan ditunjukkan pada Tabel IV-15 dan Gambar IV-4 sebagai contoh *output* pada satu variasi pembebanan yaitu LC5.

Tabel IV-15 Distribusi Tegangan pada LC5

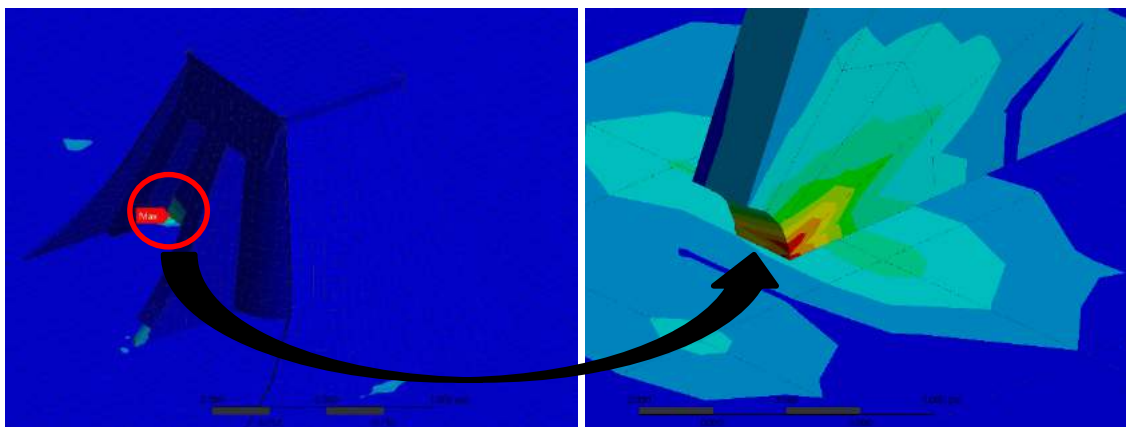
Lokasi Tinjau	σ_{\max} (MPa)
TS1	95,263
TS2	107,180
TS3	51,915
TS4	33,516
TS5	44,357
TS6	113,870
TS7	69,792
TS8	14,185
TS9	56,369
TS10	155,250
TS11	127,910
TS12	15,686
TS13	113,240
TS14	135,710
TS15	84,328
TS16	40,073





Gambar IV-4 Distribusi Tegangan

Tabel IV-15 menunjukkan lokasi yang memiliki tegangan maksimum yaitu pada sambungan kaki TS10. Hal ini disebabkan lokasi sambungan kaki TS10 memiliki lokasi yang paling dekat dengan “*point load*”, sehingga tegangan pada lokasi tersebut memiliki tegangan paling besar dibandingkan lokasi sambungan lain. Hasil tegangan maksimum pada variasi pembebanan yang lain juga menunjukkan pada lokasi sambungan kaki TS10. Dengan itu lokasi kritis yang selanjutnya digunakan untuk analisis lokal adalah sambungan kaki TS10 seperti pada Gambar IV-5. Hasil tersebut juga dapat menjadi pertimbangan dalam lokasi – lokasi untuk perencanaan inspeksi.



Gambar IV-5 Lokasi Kritis

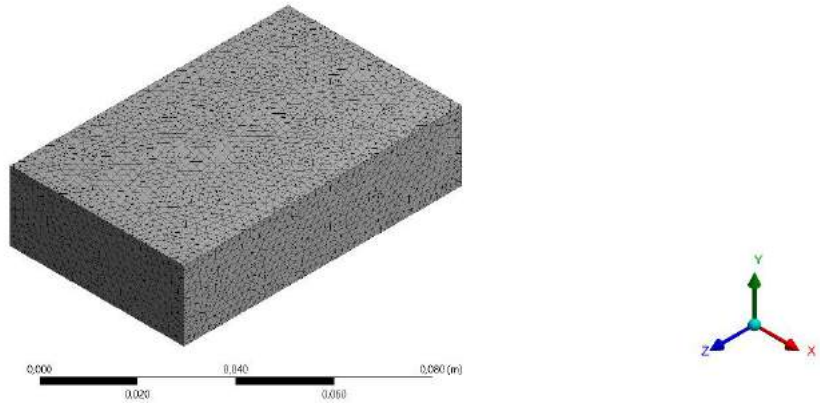
Pada Tabel IV-15 juga menunjukkan bahwa kondisi struktur telah memenuhi standar kekuatan desain dikarenakan nilai tegangan maksimum tidak lebih besar dari nilai tegangan yield material yaitu sebesar 250 MPa.

IV.3. Analisis Lokal

IV.3.1. Validasi Model Sederhana

Proses validasi dilakukan dengan cara membandingkan stress intensity factor (SIF) dari hasil numerik dengan hasil analitik. Model yang digunakan dalam proses validasi ini

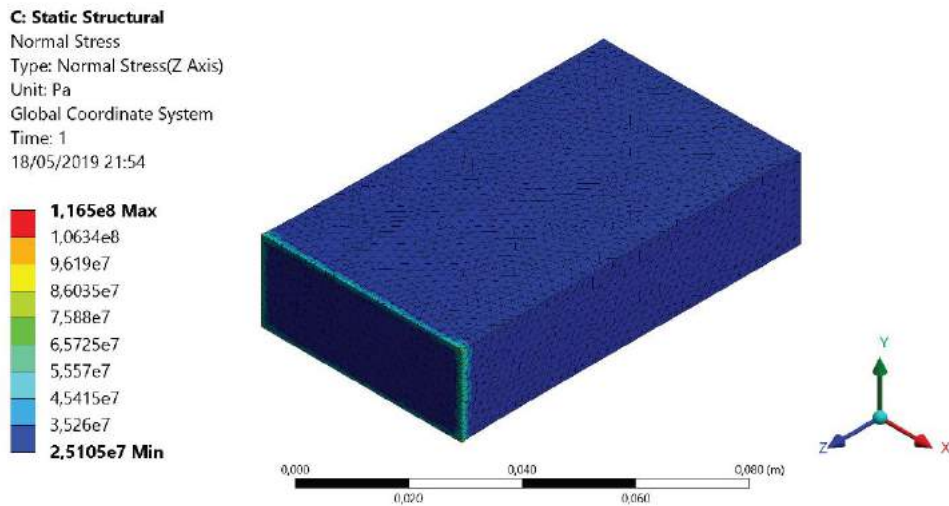
menggunakan model sederhana yaitu spesimen dengan lebar 50 mm dan tebal 20 mm, ditunjukkan pada Gambar IV-6.



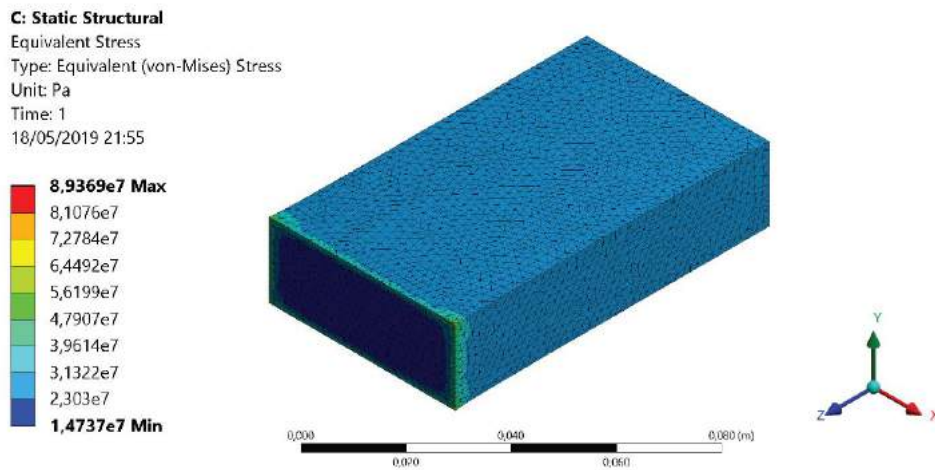
Gambar IV-6 Model Spesimen

Setelah dilakukan proses analisis pada model spesimen tersebut, didapatkan tegangan nominal dan tegangan normal seperti pada Gambar IV-7. Hasil tersebut selanjutnya digunakan untuk perhitungan *stress intensity factor* (SIF) secara analitik dengan rumus SIF *surface crack* sebagai berikut.

$$K_I^2 = \frac{1.21a\pi\sigma^2}{Q} \quad (IV-1)$$



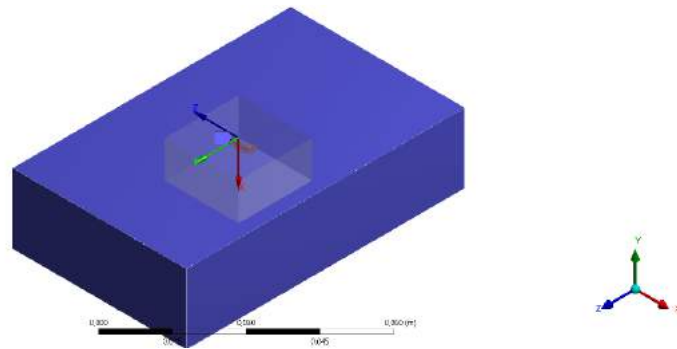
(a)



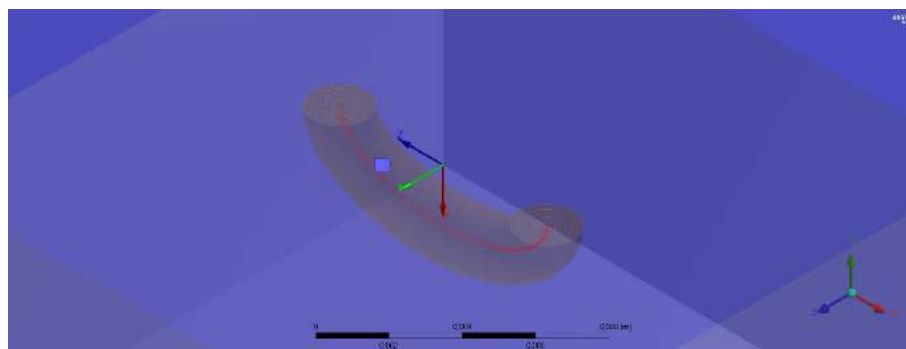
(b)

Gambar IV-7 Hasil Tegangan Model Spesimen

Nilai *stress intensity factor* dihitung menggunakan persamaan IV-1. Nilai tegangan dihitung secara numerik sesuai Gambar IV-7 dengan tegangan nominal sebesar 89,37 MPa dan tegangan normal sebesar 116,5 MPa. Nilai ukuran retak $a = 2$ mm dan $Q = 1,91$. Dari variable tersebut didapatkan hasil yaitu nilai SIF sebesar $224,206 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Setelah dilakukan perhitungan analitik, selanjutnya dilakukan dengan metode numerik. Pemodelan dilakukan dengan retak awal ukuran $a = 2$ mm yang ditunjukkan pada Gambar IV-8.



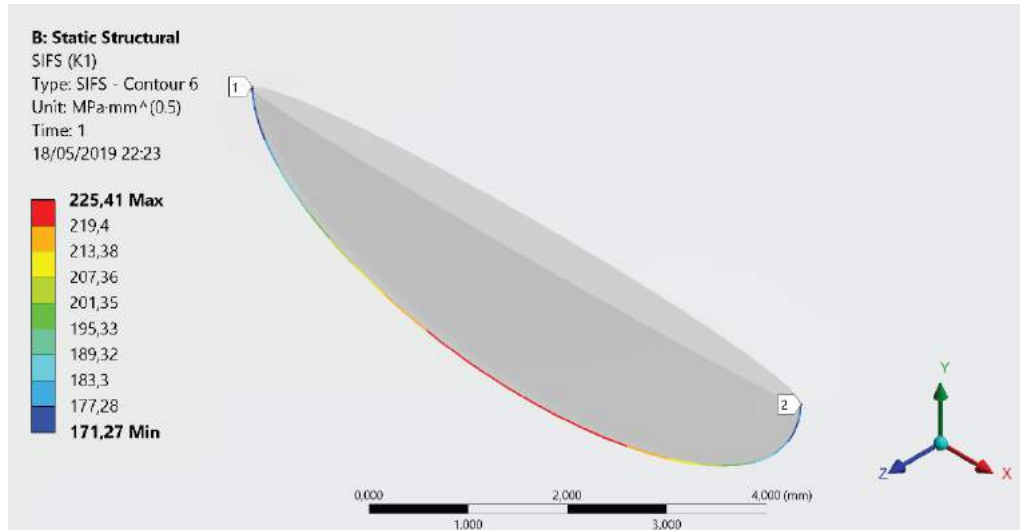
(a)



(b)

Gambar IV-8 Model Retak

Setelah dilakukan proses analisis dengan model spesimen yang telah diberi retak didapatkan hasil *stress intensity factor* yaitu $225,41 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Gambar IV-9 menunjukkan hasil SIF menggunakan metode numerik.



Gambar IV-9 Hasil SIF Numerik

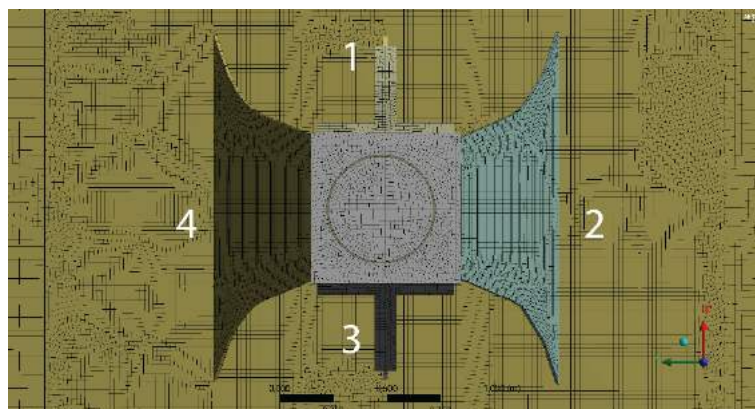
Tabel IV-16 Validasi Model

Parameter	Unit	Analitik	Numerik	Selisih (%)
SIF	$\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$	224,206	225,41	0,534%

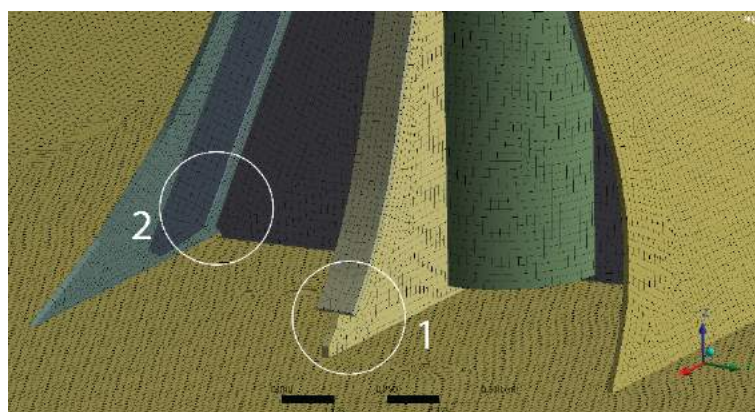
Pada Tabel IV-16 menunjukkan bahwa selisih antara hasil analitik dengan hasil numerik kurang dari 5%, maka didapatkan bahwa hasil dengan metode numerik sudah mendekati dan memiliki pola yang sama dengan analitik. Dengan itu dapat disimpulkan bahwa analisis dengan menggunakan metode numerik (XFEM) ini telah valid.

IV.3.2. Analisis Tegangan Lokal

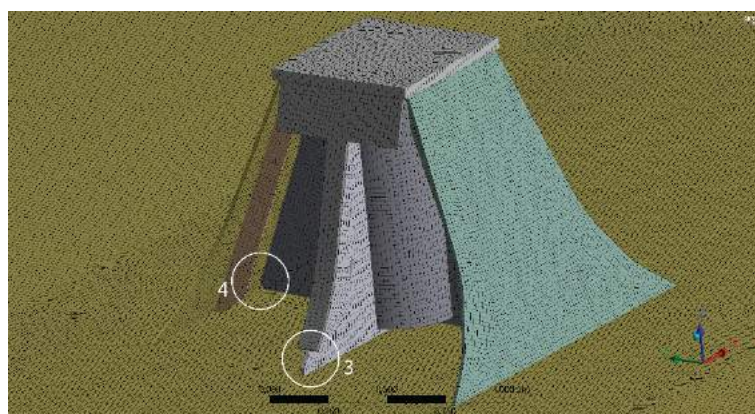
Tegangan pada setiap *topside interface structure* telah diperoleh melalui analisis tegangan model global, berdasarkan analisis tersebut lokasi kritis terletak pada sambungan kaki TS10 yang selanjutnya dilakukan analisis lokal. Analisis tegangan lokal ditinjau pada 4 bracket pada sambungan kaki TS10 yang ditunjukkan pada Gambar IV-10, hasil tegangan setiap *bracket* menjadi acuan untuk skenario retak. Tegangan yang digunakan pada analisis lokal ini adalah tegangan normal ke arah vertikal (sumbu z), karena analisis perambatan retak menggunakan moda I (*opening mode*)



(a)



(b)



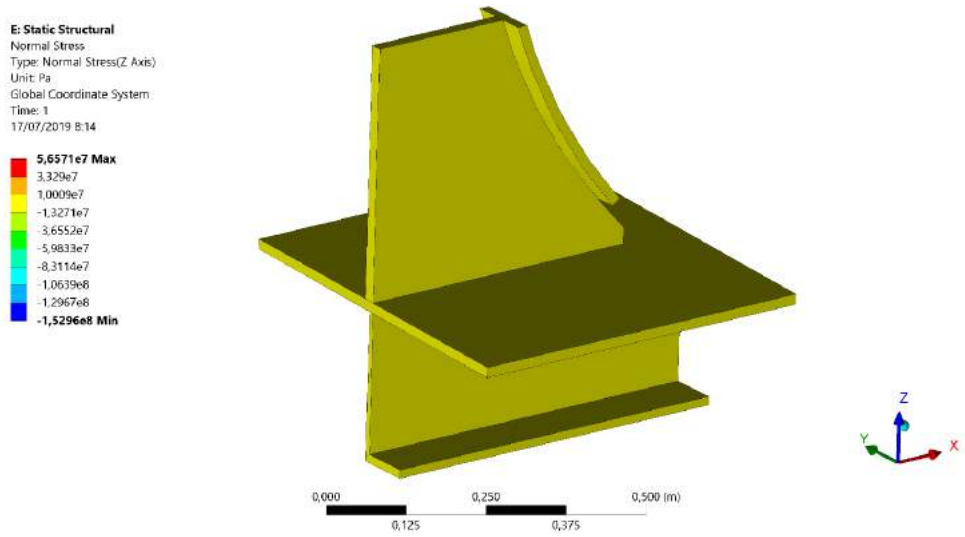
(c)

Gambar IV-10 Bracket yang ditinjau
 (a) Sambungan TS10 (b) Bracket 1 dan 2 (c) Bracket 3 dan 4

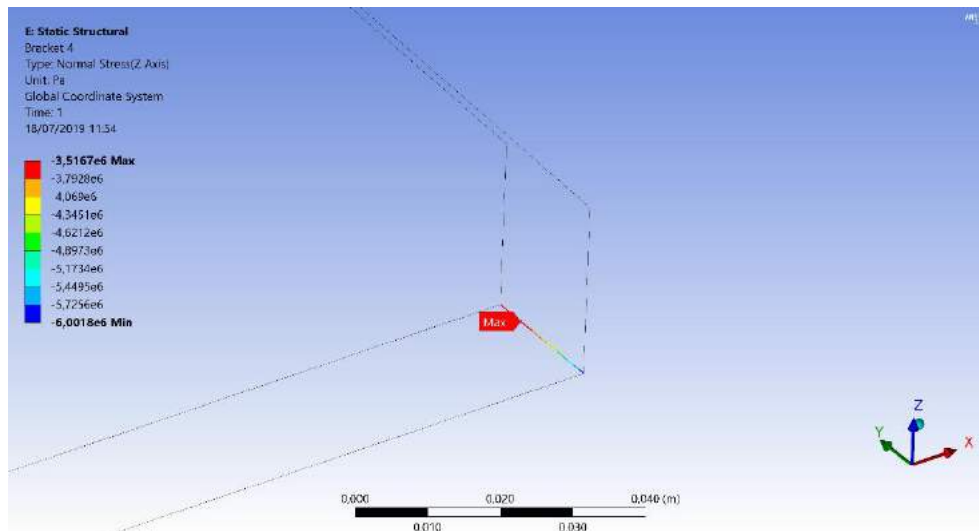
Analisis tegangan lokal hanya dilakukan pada pembebanan yang memiliki probabilitas terbesar dari variasi pembebanan yang lain. Sesuai *wave scatter diagram* bahwa gelombang dengan tinggi 0,75 m dan periode gelombang 4,5 s memiliki probabilitas terbesar dibanding yang lain yaitu 0.443. Setelah ditentukan pembebanan yang digunakan, analisis dilakukan dengan hasil tegangan setiap bracket ditunjukkan pada Tabel IV-17.

Tabel IV-17 Hasil Tegangan

Variasi	σ_{normal} (MPa)
<i>Bracket 1</i>	-3,516
<i>Bracket 2</i>	29,489
<i>Bracket 3</i>	-15,27
<i>Bracket 4</i>	-8,018

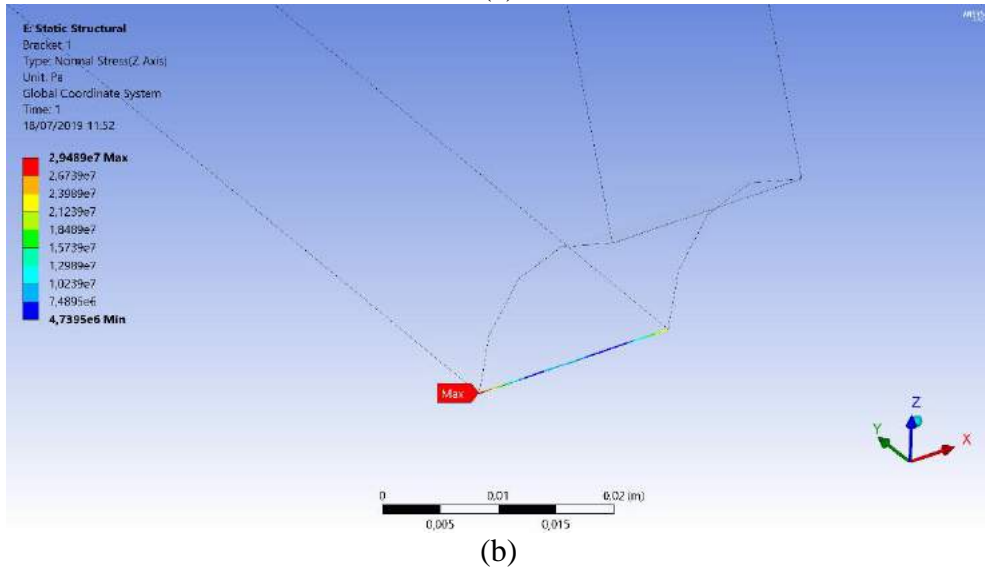
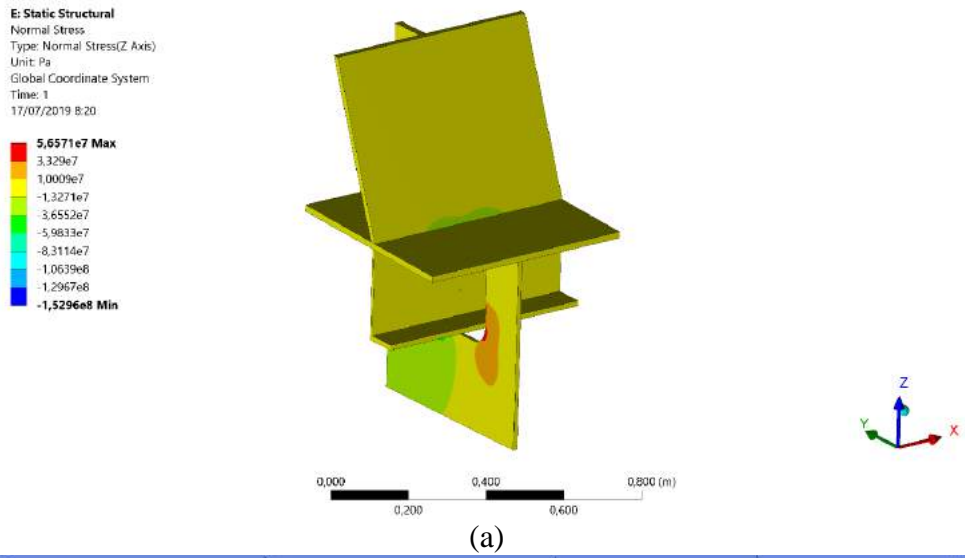


(a)

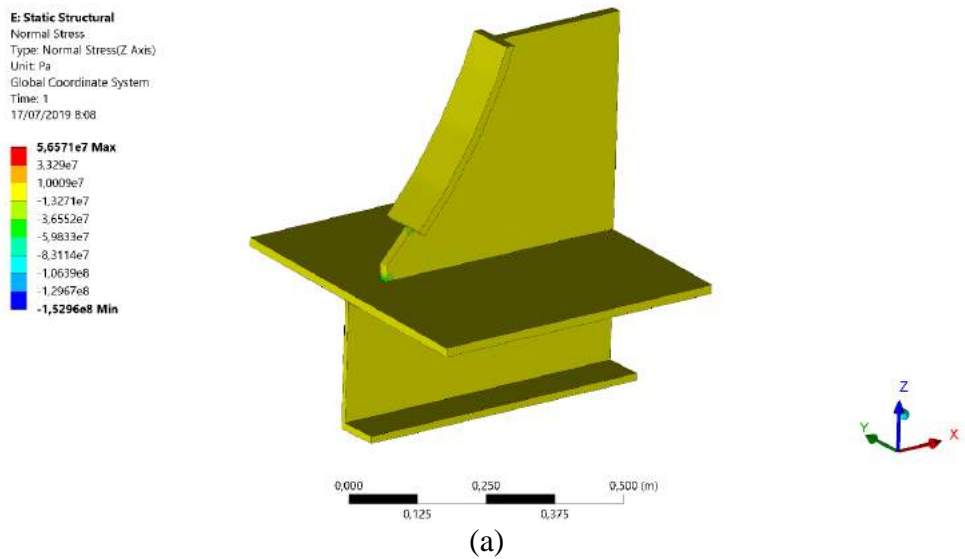


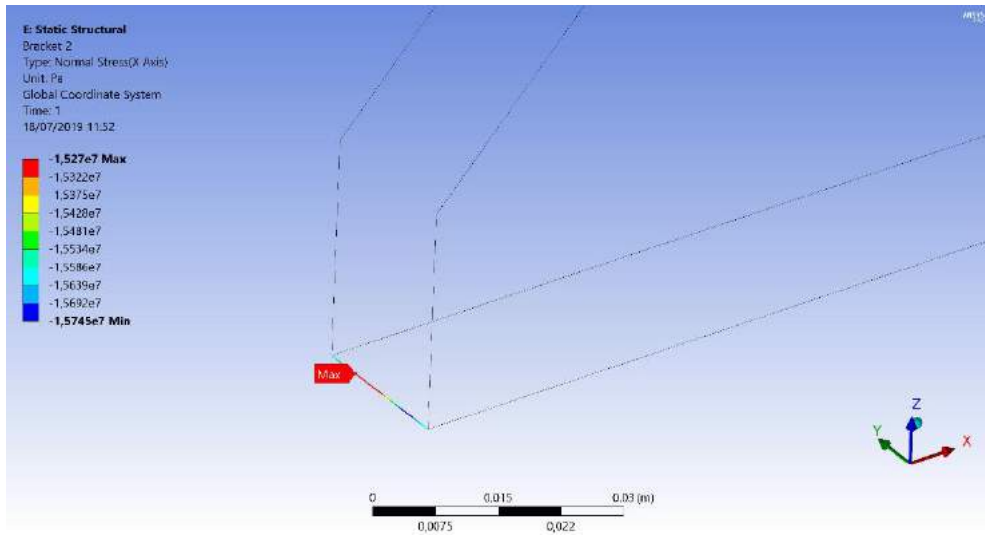
(b)

Gambar IV-11 Tegangan Pada *Bracket 1*
(a) Tegangan Normal (b) Tegangan Normal pada *Bracket Toe*



Gambar IV-12 Tegangan Pada *Bracket 2*
 (a) Tegangan Normal (b) Tegangan Normal pada *Bracket Toe*

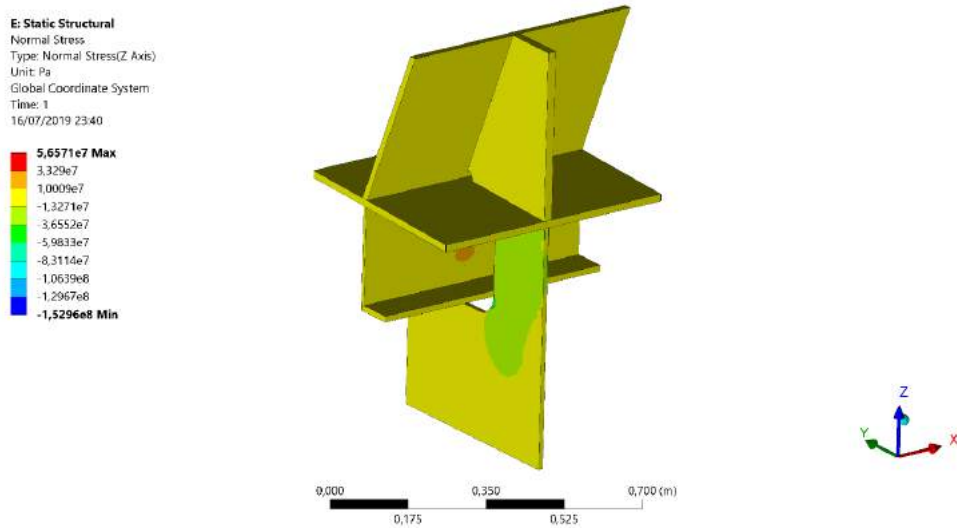




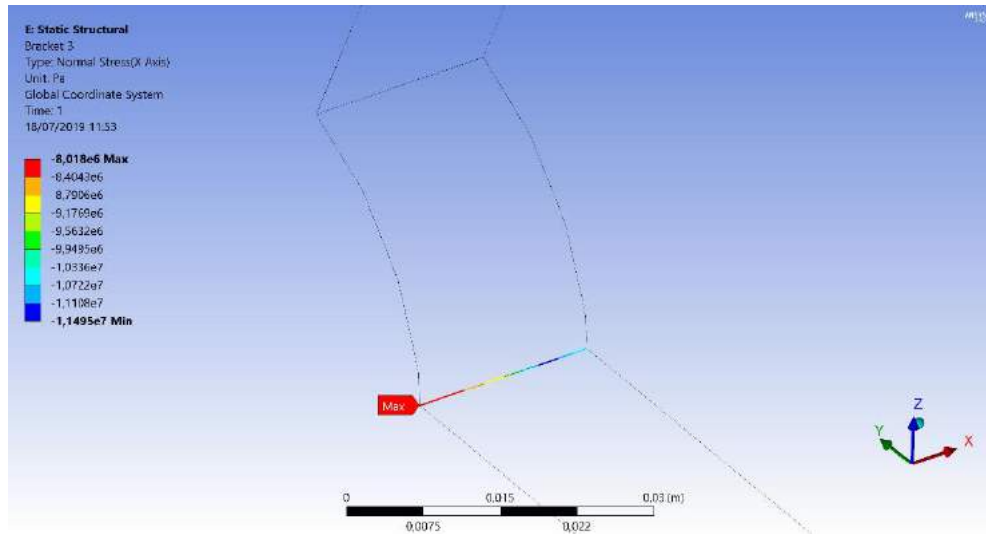
(b)

Gambar IV-13 Tegangan Pada *Bracket 3*

(a) Tegangan Normal (b) Tegangan Normal pada *Bracket Toe*



(a)



(b)

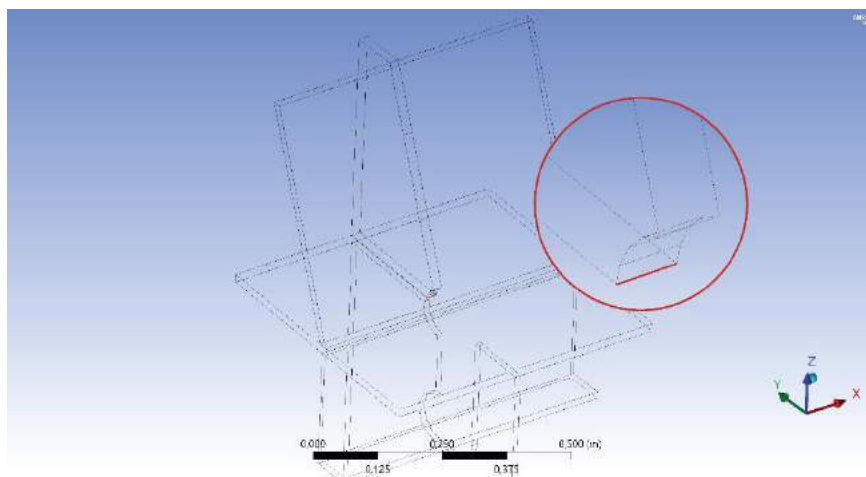
Gambar IV-14 Tegangan Pada *Bracket 4*

(a) Tegangan Normal (b) Tegangan Normal pada *Bracket Toe*

Tabel IV-16 menunjukkan bahwa tegangan dominan yang terjadi yaitu *compression*, karena pada penelitian ini beban yang digunakan adalah topside inertia loads dimana beban heave (sumbu Z) memiliki nilai yang besar diakibatkan oleh pengaruh gravitasi. Bracket yang mempunyai tegangan tarik yaitu pada *Bracket 2* dengan nilai tegangan yaitu 29,489 MPa.

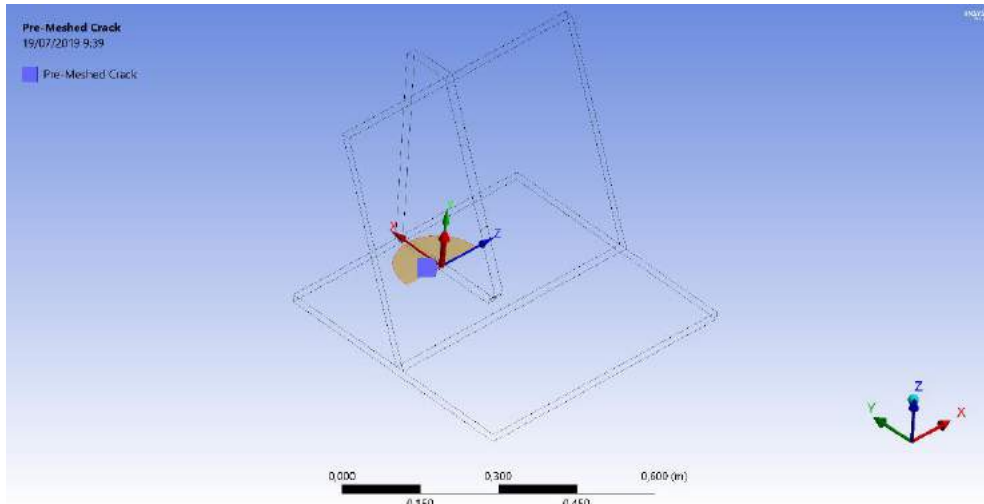
IV.3.3. Skenario Retak

Setelah didapatkan tegangan normal ke arah vertikal (sumbu z), ukuran retak kritis dapat dihitung menggunakan persamaan II-22 sehingga didapatkan ukuran kedalaman kritis yaitu 145,84 mm dan ukuran retak awal dalam penelitian ini merupakan dimensi asumsi sesuai dengan DNV RP C203 yaitu 0,5 mm. Lokasi retak awal terjadi pada *bracket toe* yang ditunjukkan pada Gambar IV-11. Lokasi retak tersebut ditentukan berdasarkan hasil tegangan maksimum pada analisis tegangan lokal.

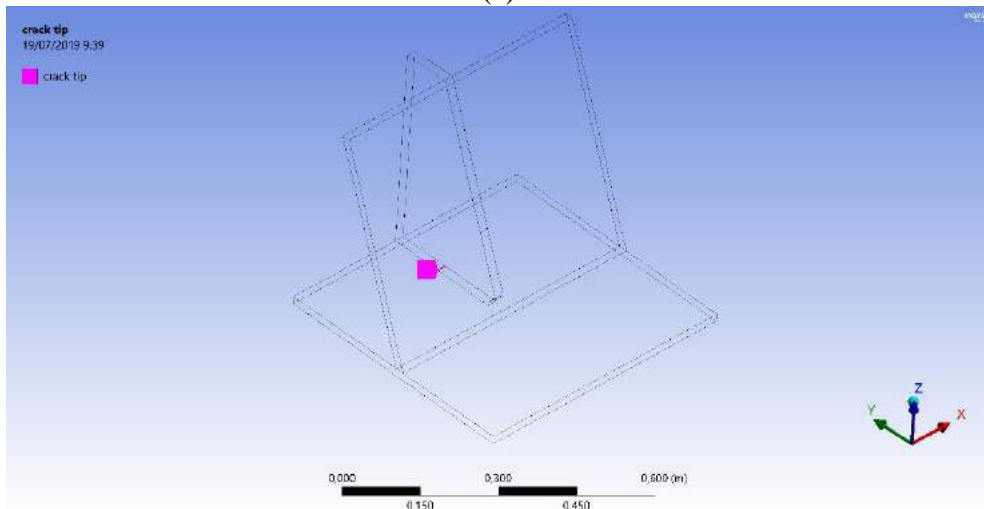


Gambar IV-15 Skenario Retak

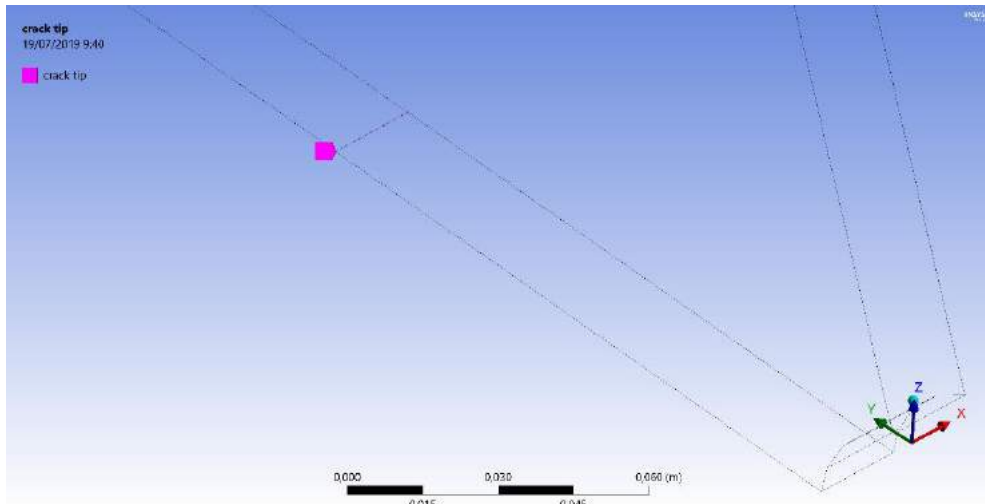
Geometri retak memiliki bentuk yaitu *through crack* dan akan merambat tegak lurus dengan sambungan antara geladak dan *bracket*. Pemodelan retak dilakukan dari retak awal sampai retak kritis dengan *increment* ukuran perambatan sebesar 10%, sehingga jumlah model retak pada penelitian ini adalah 10 model. Berikut adalah contoh model retak pada retak awal dan retak kritis.



(a)



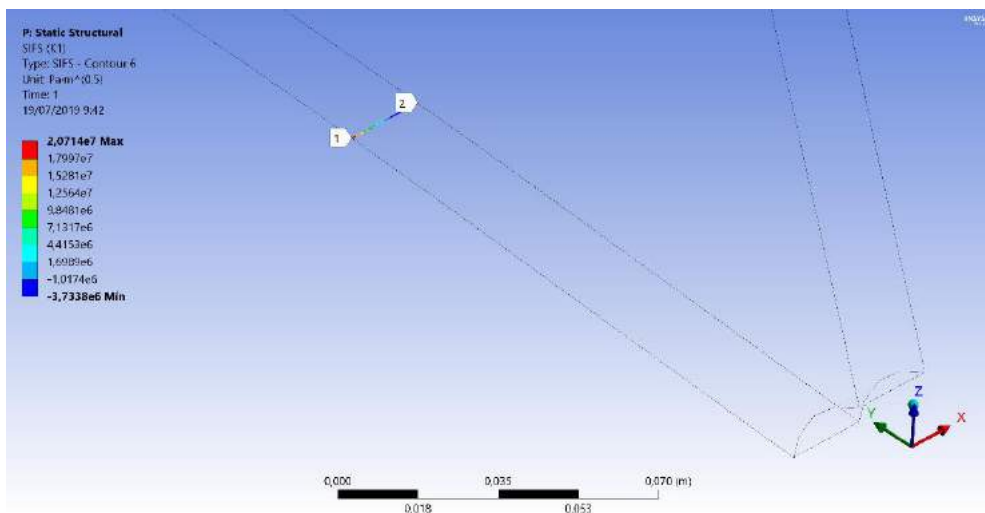
(b)

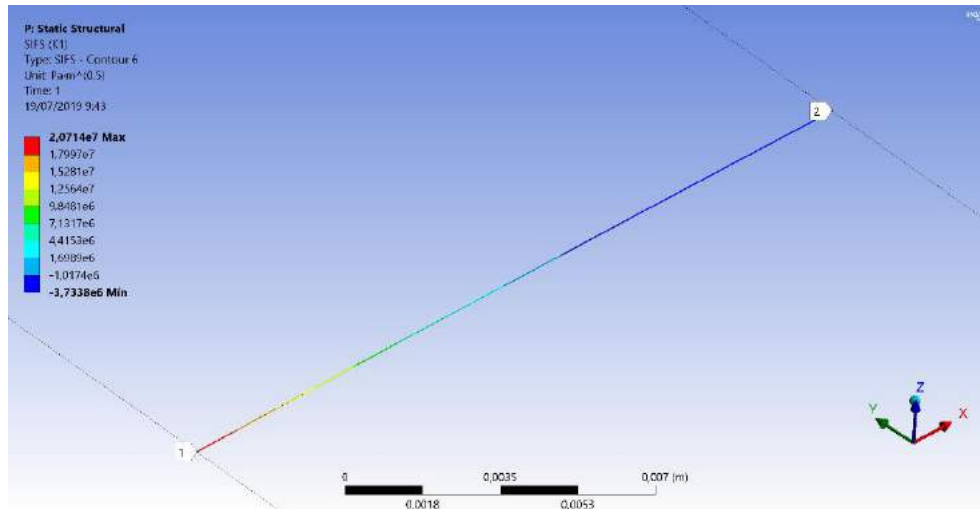


Gambar IV-16 Pemodelan Retak pada Kedalaman Kritis
(a) *Pre Meshed Crack* (b) dan (c) *crack tip*

IV.3.4. Perhitungan *Stress Intensity Factor*

Setelah dilakukan pemodelan retak, langkah selanjutnya adalah memasukkan pembebanan dan melakukan perhitungan *stress intensity factor*. Nilai *stress intensity factor* yang dihasilkan merupakan SIF mode I dimana mempertimbangkan beban tarik aksial dalam reaksi *opening mode* pada retak yang terjadi. Nilai SIF dihitung dengan menggunakan metode numerik (XFEM) ditunjukkan pada Gambar IV-17 sebagai contoh output dalam simulasi menggunakan perangkat lunak *finite element method*, sehingga didapatkan hasil nilai *stress intensity factor* dapat dilihat pada Tabel IV-18.

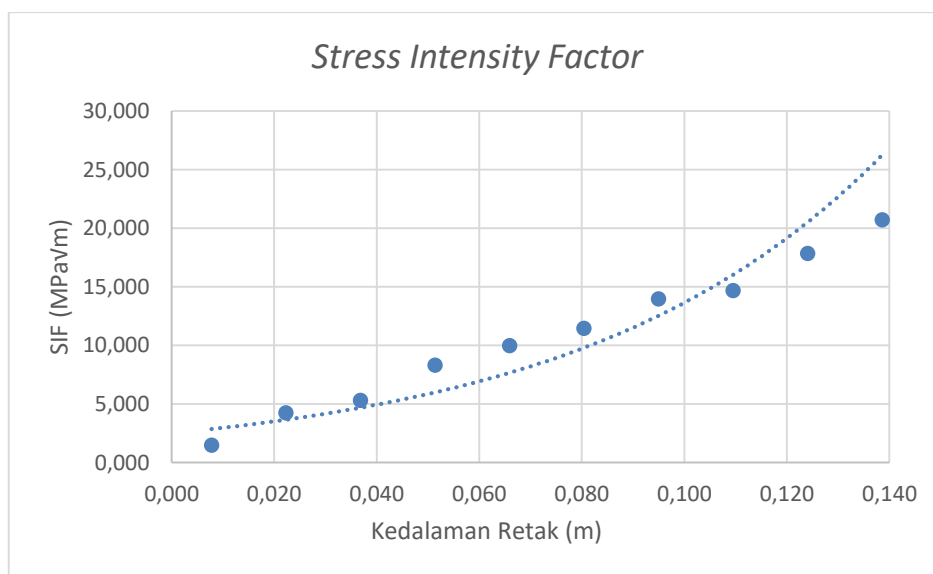




Gambar IV-17 Nilai *Stress Intensity Factor* Kedalaman Kritis Pada Simulasi Numerik

Tabel IV-18 Nilai *Stress Intensity Factor*

No.	a (mm)	af (mm)	ΔK_I (MPa \sqrt{m})
1	0,50	15,03	1,469
2	15,03	29,57	4,241
3	29,57	44,10	5,297
4	44,10	58,64	8,299
5	58,64	73,17	9,977
6	73,17	87,71	11,438
7	87,71	102,24	13,963
8	102,24	116,78	14,662
9	116,78	131,31	17,829
10	131,31	145,84	20,714



Gambar IV-18 Nilai *Stress Intensity Factor*

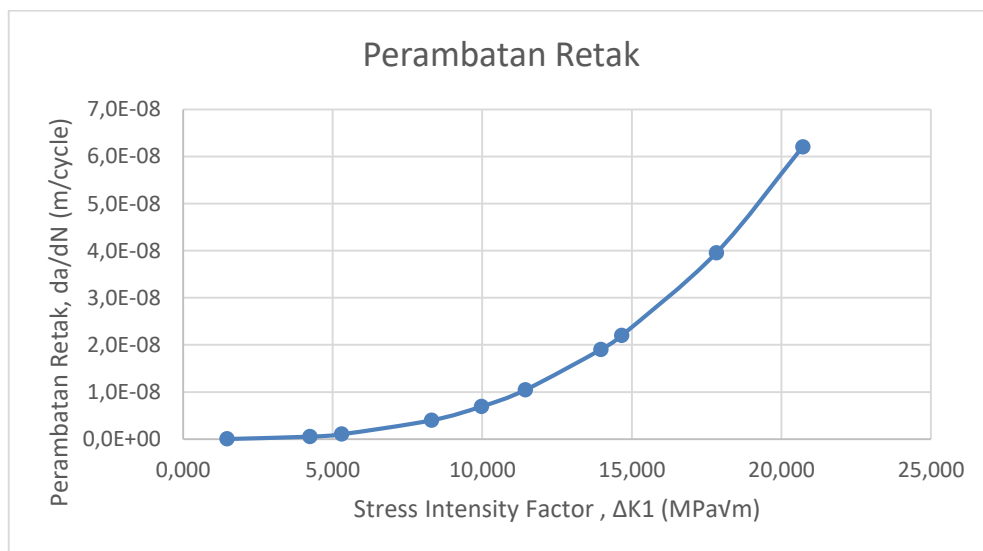
Gambar IV-18 menunjukkan bahwa nilai SIF semakin besar seiring bertambahnya kedalaman retak. Hal ini sesuai dengan persamaan II-20 bahwa nilai SIF berbanding lurus dengan kedalaman retak.

IV.3.5. Analisis Perambatan Retak

Nilai laju perambatan retak dapat dicari dengan persamaan II-23, dengan parameter material C dan m yaitu masing – masing $6,98 \times 10^{-12}$ dan 3. Nilai SIF ditunjukkan pada Tabel IV-18, sehingga berdasarkan persamaan II-24 didapatkan hasil laju perambatan retak yang dapat dilihat pada Tabel IV-19 berikut.

Tabel IV-19 Laju Perambatan Retak

No.	a (mm)	af (mm)	Δa (m)	$\Delta K1$ (MPa \sqrt{m})	da/dN (m/cycle)	ΔN	N
1	0,50	15,03	0,015	1,469	2,2E-11	6,6E+08	6,6E+08
2	15,03	29,57	0,015	4,241	5,3E-10	2,7E+07	6,8E+08
3	29,57	44,10	0,015	5,297	1,0E-09	1,4E+07	7,0E+08
4	44,10	58,64	0,015	8,299	4,0E-09	3,6E+06	7,0E+08
5	58,64	73,17	0,015	9,977	6,9E-09	2,1E+06	7,0E+08
6	73,17	87,71	0,015	11,438	1,0E-08	1,4E+06	7,1E+08
7	87,71	102,24	0,015	13,963	1,9E-08	7,6E+05	7,1E+08
8	102,24	116,78	0,015	14,662	2,2E-08	6,6E+05	7,1E+08
9	116,78	131,31	0,015	17,829	4,0E-08	3,7E+05	7,1E+08
10	131,31	145,84	0,015	20,714	6,2E-08	2,3E+05	7,1E+08



Gambar IV-19 Laju Perambatan Retak

Berdasarkan Gambar IV-19 menunjukkan bahwa semakin besar nilai *stress intensity factor* maka nilai laju perambatan retak akan semakin besar. Nilai laju perambatan retak

bertambah dengan stabil pada tahap awal namun akan bertambah dengan cepat saat tahap akhir. Hal tersebut telah sesuai dengan pernyataan Hukum Paris - Erdogan bahwa nilai laju perambatan retak berbanding lurus dengan nilai SIF.

IV.4. Perhitungan Umur Kelelahan

Perhitungan umur kelelahan dilakukan menggunakan 2 pendekatan yaitu dengan pendekatan *fracture mechanics* dan metode *SN Curve*. Maka didapatkan hasil perhitungan umur kelelahan seperti dibawah ini.

IV.4.1. Umur Kelelahan Berdasarkan *Fracture Mechanics*

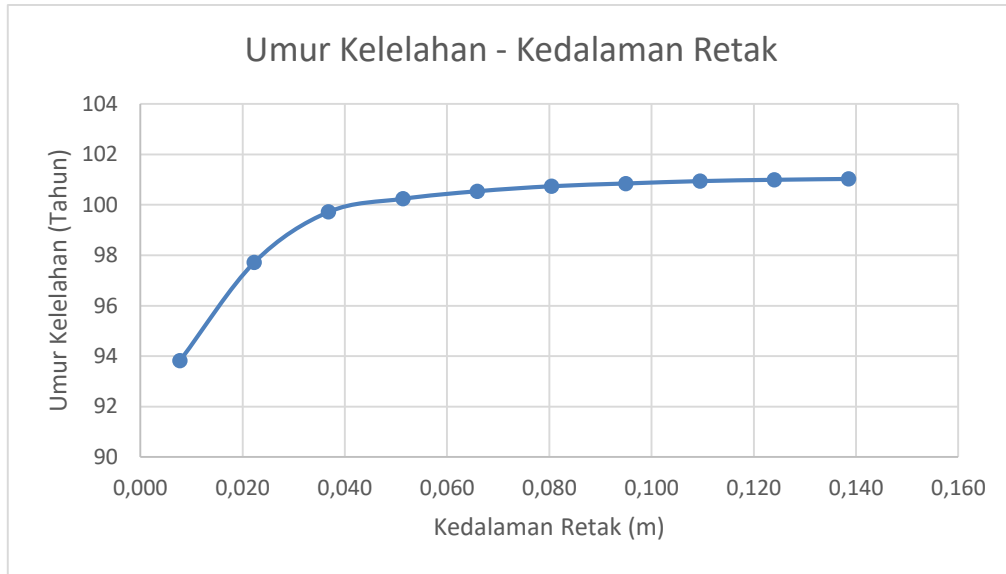
Setelah diperoleh nilai total siklus (Nt) sesesuai Tabel IV-20 dan Tabel IV-21 selanjutnya dilakukan perhitungan umur kelelahan. Umur kelelahan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$F = Nt \times T \quad (IV-2)$$

Dimana Nt adalah nilai total siklus dan T adalah periode gelombang dengan nilai 3.5 s. Dengan persamaan berikut didapatkan total umur kelelahan sambungan *bracket topside module* FPSO adalah 61,154 tahun. Tabel IV-20 menunjukkan pengaruh perambatan retak terhadap umur kelelahan.

Tabel IV-20 Umur Kelelahan Setiap Tahap Perambatan Retak

No.	a (mm)	af (mm)	F	Tahun	% Tahun
1	0,50	15,03	2,96E+09	93,827	92,872
2	15,03	29,57	3,08E+09	97,722	96,727
3	29,57	44,10	3,14E+09	99,721	98,706
4	44,10	58,64	3,16E+09	100,241	99,221
5	58,64	73,17	3,17E+09	100,541	99,517
6	73,17	87,71	3,18E+09	100,739	99,714
7	87,71	102,24	3,18E+09	100,848	99,822
8	102,24	116,78	3,18E+09	100,942	99,915
9	116,78	131,31	3,18E+09	100,995	99,967
10	131,31	145,84	3,19E+09	101,028	100



Gambar IV-20 Grafik Hubungan antara Umur Kelelahan dan Kedalaman Retak

Gambar IV-20 dan Tabel IV-20 menunjukkan bahwa retak mulai merambat dengan laju perambatan yang relatif sangat tinggi, karena perambatan retak dari retak awal sampai 10% kedalaman kritis membutuhkan sampai 92% dari total umur kelelahan.

IV.4.2. Umur Kelelahan Berdasarkan Rasio Kerusakan Kumulatif

Nilai rasio kerusakan kumulatif (D) dapat dicari dengan persamaan II-12. Parameter \bar{a} pada persamaan tersebut didapatkan dari perhitungan I/C pada persamaan II-27, sehingga didapatkan parameter \bar{a} yaitu $5,5 \times 10^{10}$ dan $m = 3$. Sedangkan untuk parameter bentuk Weibull (h) yaitu 1,25 didapatkan sesuai kondisi lingkungan. Setelah diperoleh nilai rasio kerusakan kumulatif (D), selanjutnya dilakukan perhitungan umur kelelahan dengan melakukan pembagian dari umur desain dengan rasio kerusakan kumulatif. Jika umur desain 20 tahun, maka umur kelelahan adalah 151,172 tahun.

Tabel IV-21 Perbandingan Hasil Umur Kelelelahan

Pendekatan	Tahun
<i>Fracture Mechanics</i>	101,028
<i>Cummulative Fatigue Damage</i>	151,172

Tabel IV-20 menunjukkan perbedaan hasil umur kelelahan dengan dua pendekatan. Hasil umur kelelahan dengan pendekatan *cummulative fatigue damage* dengan parameter \bar{a} pada *SN Curve* dihitung sesuai dengan pendekatan *fracture mechanics*. Dengan

membandingkan hasil tersebut dan hasil umur kelelahan berdasarkan perambatan retak didapatkan terdapat penurunan umur sebesar 33%. Dengan umur desain 20 tahun dan umur kelelahan yaitu 101,028 tahun, maka nilai *safety factor* dari sambungan *bracket topside module FPSO* adalah 5,05.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. Kesimpulan

Setelah dilaksanakan analisis dan pembahasan mengenai umur kelelahan sambungan *bracket Topside Module FPSO* menggunakan *Fracture Mechanics* menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada lokasi tinjauan struktur lokasi yang memiliki tegangan maksimum adalah sambungan TS10. Hal itu terjadi karena sambungan TS10 memiliki letak paling dekat dengan *point load*, sehingga tegangan pada lokasi tersebut memiliki tegangan paling besar dibandingkan lokasi sambungan lain. Hasil tegangan maksimum pada semua variasi pembebanan juga menunjukkan pada sambungan TS10. Dengan itu lokasi kritis yang digunakan untuk analisis umur kelelahan dan inspeksi adalah sambungan TS10.
2. Nilai *stress intensity factor* (SIF) retak awal dari sambungan *bracket topside module FPSO* yaitu $1,469 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Pada kedalaman kritis nilai SIF yaitu $20,174 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai SIF semakin besar seiring bertambahnya kedalaman retak.
3. Laju perambatan retak awal dari sambungan *bracket topside module FPSO* yaitu $2,2 \times 10^{-11} \text{ m/cycle}$. Pada kedalaman kritis laju perambatan retak yaitu $6,2 \times 10^{-8} \text{ m/cycle}$. Nilai laju perambatan tersebut relative sangat tinggi, karena perambatan retak dari retak awal sampai 10% kedalaman kritis membutuhkan sampai 92% dari total umur kelelahan. Hasil analisis perambatan retak juga menunjukkan semakin besar nilai *stress intensity factor* maka nilai laju perambatan retak akan semakin besar.
4. Umur kelelahan sambungan *bracket Topside Module FPSO* menggunakan pendekatan *fracture mechanics* yaitu 101,028 tahun. Sedangkan dengan menggunakan metode *cummulative fatigue damage* didapatkan umur yaitu 151,72 tahun. Hasil tersebut menunjukkan terdapat perbedaan umur kelelahan akibat retak awal sebesar 33%. Dengan umur kelelahan 101,028 tahun dan umur desain 20 tahun, didapatkan nilai *safety factor* pada sambungan *bracket Topside Module FPSO* adalah 5,05.

V.2. Saran

Untuk tujuan perbaikan dan pengembangan pada penelitian selanjutnya, ada beberapa hal yang perlu diakomodir namun belum dipertimbangkan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Variasi kondisi muatan agar ditambah pada kondisi muatan kosong (*full ballast*) dan *intermediate load*.
2. Beban yang digunakan ditambah *hull girder bending moment*.
3. Variasi sudut arah datang gelombang agar ditambah sesuai dengan klasifikasi yaitu interval $22.5^\circ - 30^\circ$.
4. Model yang digunakan yaitu *integrated model* (lambung dan topside dimodelkan secara lengkap)
5. Metode dalam mengestimasi kumulatif kerusakan fatigue (*Cummulative Fatigue Damage*) menggunakan metode *full spectral*.
6. Perhitungan umur kelelahan dengan metode pendekatan *fracture mechanics* agar dihitung berdasarkan probabilitas sesuai *sea state*.
7. Mode retak yang digunakan untuk analisis umur kelelahan menggunakan metode *fracture mechanics* ditambah mode II dan mode III.

DAFTAR PUSTAKA

- (UCSD), U. o. (2018, May 21). *Wave Measurement*. Retrieved from <http://cdip.ucsd.edu>
- A. Salvadori, A. C. (2011). Minimum Theorems in Incremental Linear Elastic Fracture Mechanics. *International Journal of Solids and Structures*.
- Ahmed M.H. Elhewy, H. W. (2016). Analysis of Fatigue Crack Growth in Ship Structural Details. *POLISH MARITIME RESEARCH 2*.
- Almarnaess, A. (1985). *Fatigue Handbook: Offshore Steel Structure*. Tapir Academic Press; 3rd Revised edition edition.
- American Bureau of Shipping. (2003). Fatigue Assessment of Offshore Structure. Houston.
- Anderson, T. (2004). *Fracture Mechanics : Fundamental and Applications*. CRC Press ; 3 Edition.
- Bai, Y. (2003). *Marine Structure Design*. Oxford: Elsevier.
- Bhattacharyya, R. (1978). *Dynamics of Marine Vehicle*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Bilal M. Ayyub, I. A. (2003). Reliability-Based Structural Design. *Master Set*.
- Broek, D. (1982). *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Springer Netherlands.
- Det Norske Veritas. (2010). *DNV-RP-C206: Fatigue Methodology of Offshore Ships*.
- Det Norske Veritas. (2011). *DNV-RP-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structure*.
- Det Norske Veritas. (2012). *DNV-OS-C102: Structural Design of Offshore Ships*.
- Gourdet, G. (2008). Connection Hull-Topsides: Principles, Designs and Returns of Experience. *Bureau Veritas Technical Paper*.
- Jeom Kee Paik, A. K. (2007). *Ship-Shaped Offshore Installation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- John M Barsom, S. T. (1999). *Fracture and Fatigue Control in Structures, Third Edition : Application of Fracture Mechanics*. Butterworth-Heinemann.
- Joonmo Choung, K.-Y. Y. (2008). Fully Stochastic Fatigue Analysis For FPSO Based On Shipyard Practices. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*.
- Lars O. Henriksen, B. D. (2008). Structural Design and Analysis of FPSO Topside Module Supports. *ABS Technical Paper*.

- Muvariz, M. F. (2011). *1) Analisis Perilaku Kepecahan Scantling Support Structure System Gas Processing Module FPSO Belanak*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- S. Stoychev, D. K. (2008). Crack-tip Stresses and Their Effect on Stress Intensity Factor for Crack Propagation. *Engineering Fracture Mechanics Vol. 75*.
- Setiahadi, E. (2016). *Analisa Fatigue Life Graving Dock Gate Dengan Metode Simplified*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sujiatanti, S. H. (2012). *Studi Tentang Metode Fatigue Assesment Topside Module FSO/FPSO*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Syahroni, N. (2015). *Slide-1 Basic of Fatigue Mechanism*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wang, C. H. (1996). *Introduction of Fracture Mechanics*. Sydney.
- Widodo, M. T. (2010). *Keandalan Scantling Struktur Geladak dan Dasar Pada Konversi Tanker Menjadi FPSO Terhadap Beban Kelelahan*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Zandi, E. F. (2018). *Analisa Penjalaran Retak Sekat Ruang Muat Kapal Tanker 17500 DWT Akibat Beban Muatan Dengan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

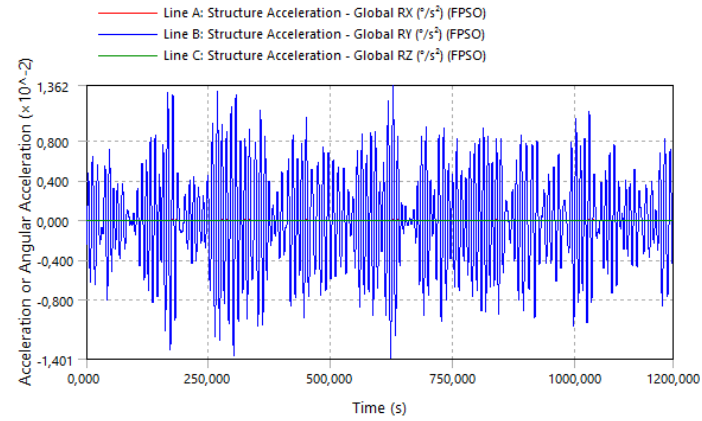
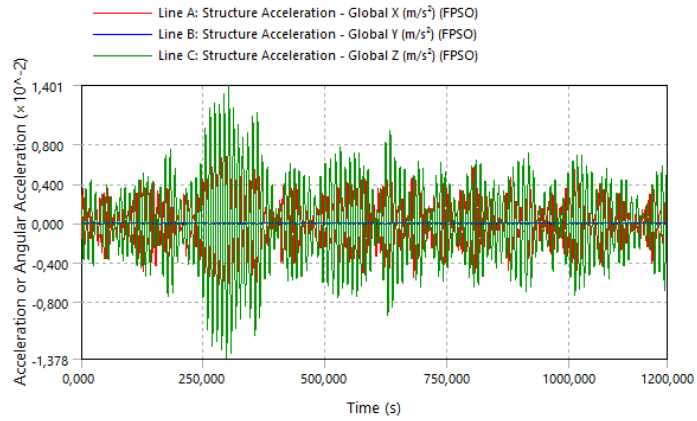
LAMPIRAN

- Lampiran A Hasil Running Analisis Hidrodinamis
- Lampiran B *Acceleration Motion* dan Perhitungan Beban
- Lampiran C Tegangan Global
- Lampiran D Reaksi Tumpuan
- Lampiran E Perhitungan Model Sederhana
- Lampiran F Pemodelan Retak dan Hasil SIF
- Lampiran G Perhitungan Perambatan Retak dan Umur Kelelahan

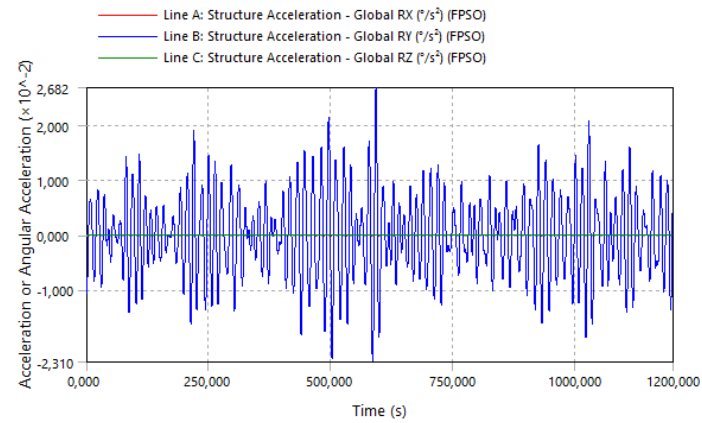
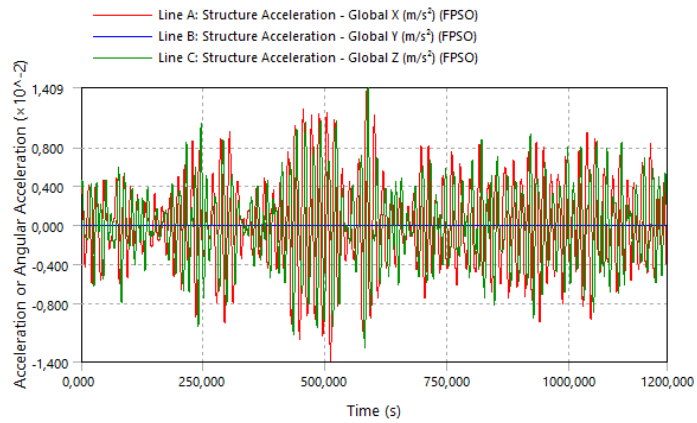
LAMPIRAN A
HASIL RUNNING ANALISIS HIDRODINAMIS

ARAH GELOMBANG WEST

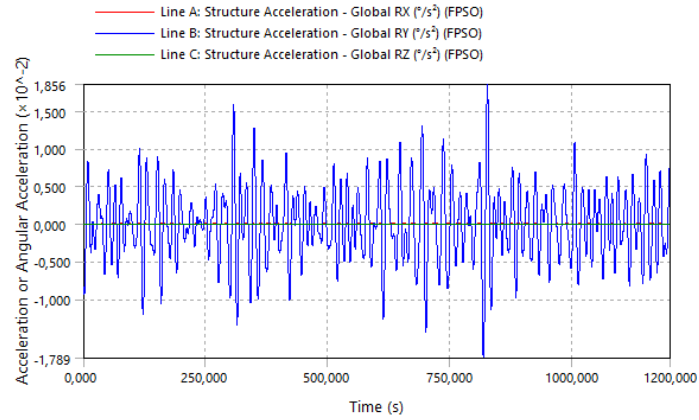
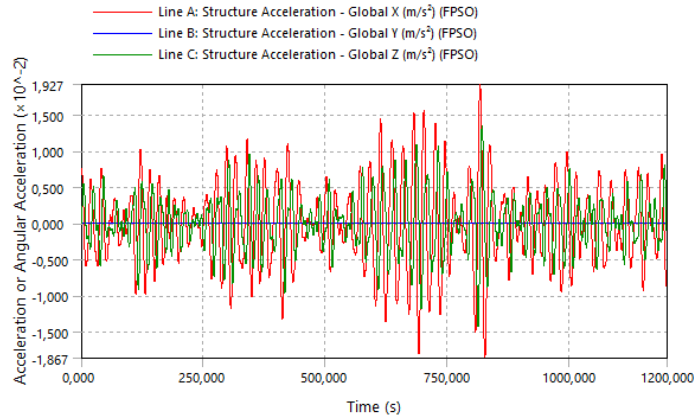
Acceleration Motion untuk $H_s = 0.25$ dan $T_p = 1.5$



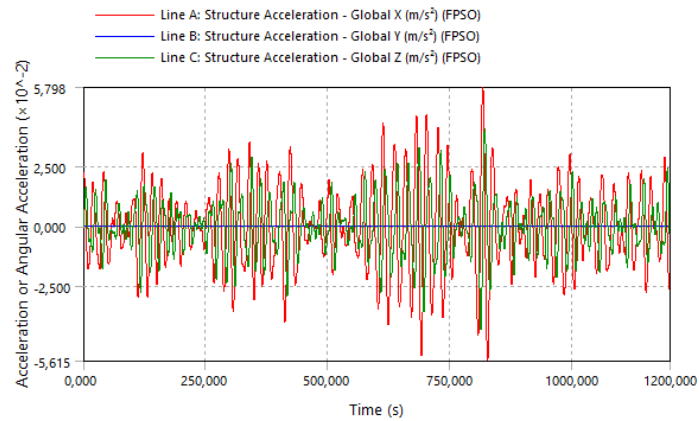
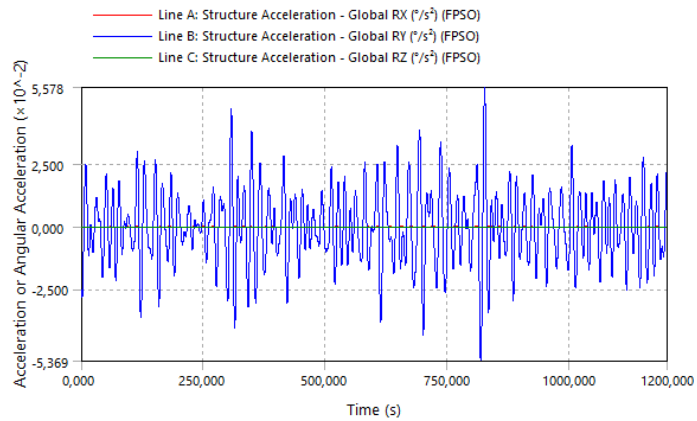
Acceleration Motion untuk $H_s = 0.25$ dan $T_p = 2.5$



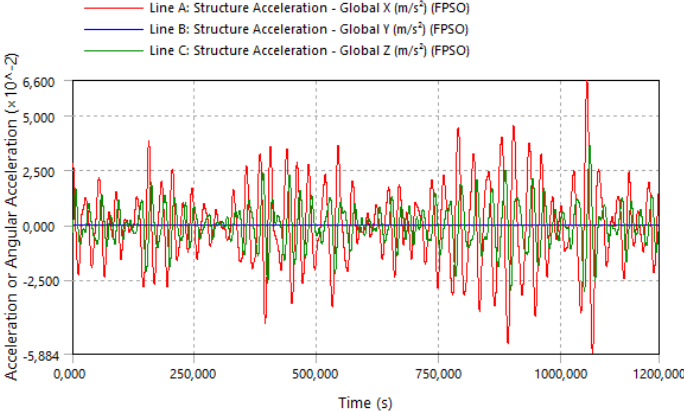
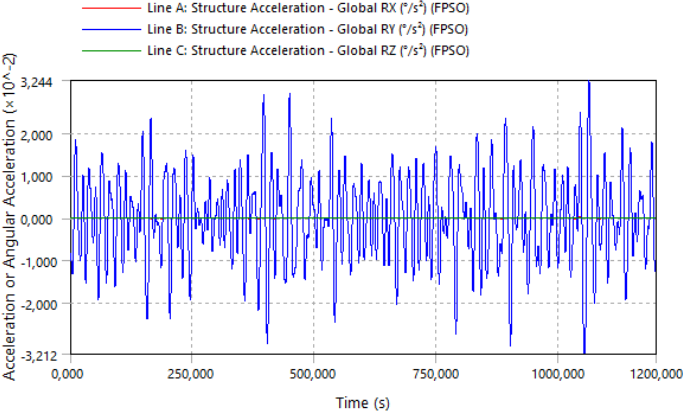
Acceleration Motion untuk $H_s = 0.25$ dan $T_p = 3.5$



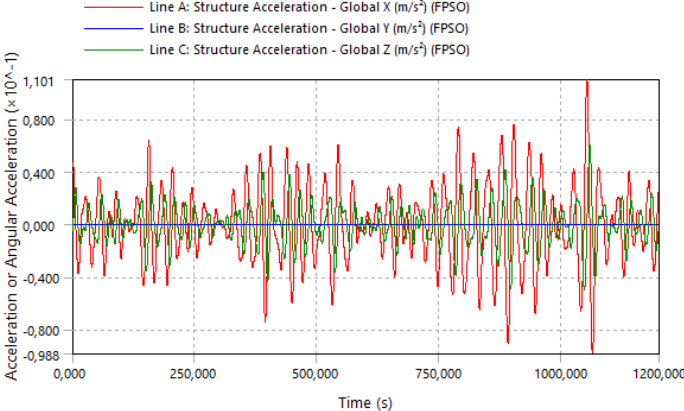
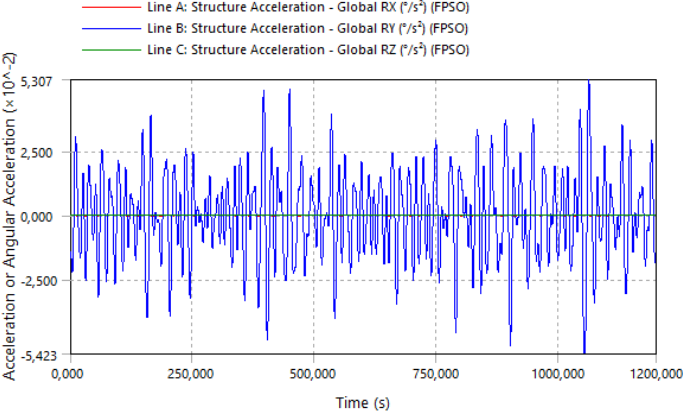
Acceleration Motion untuk $H_s = 0.75$ dan $T_p = 3.5$



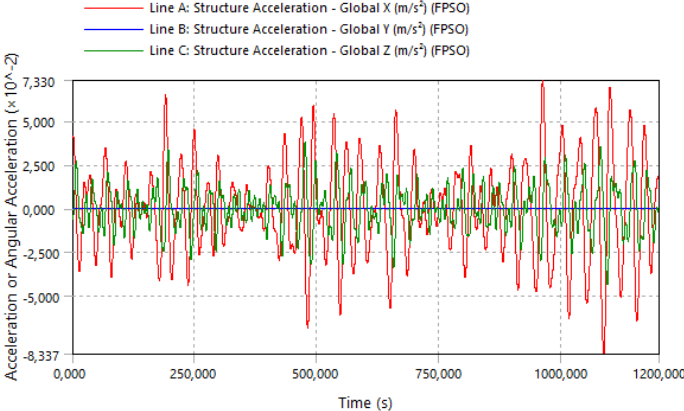
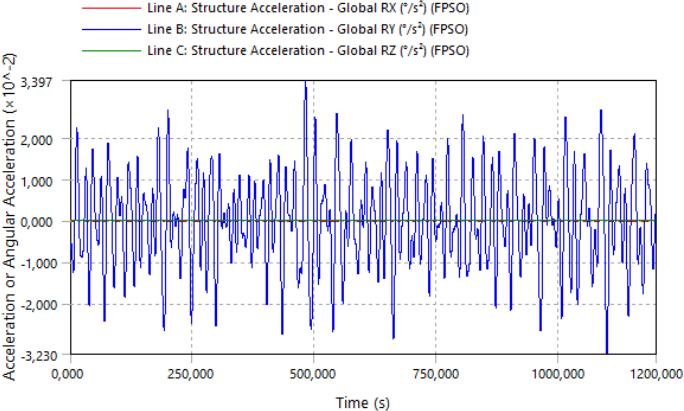
Acceleration Motion untuk $H_s = 0.75$ dan $T_p = 4.5$



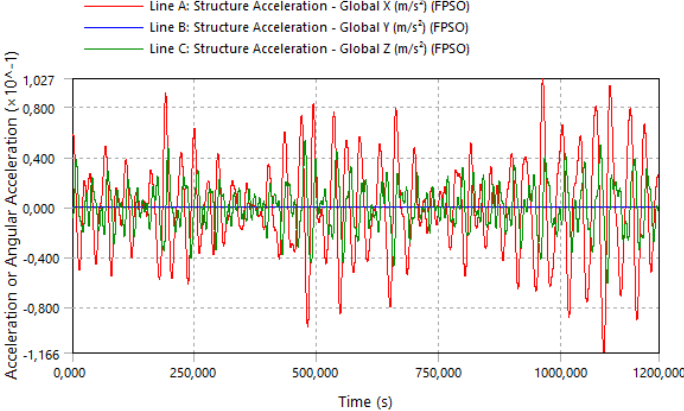
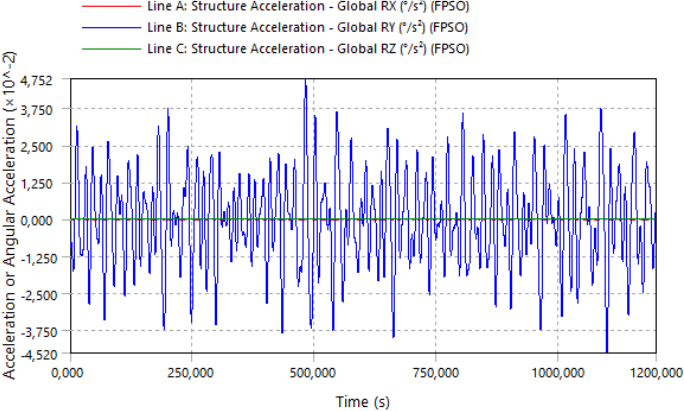
Acceleration Motion untuk $H_s = 1.25$ dan $T_p = 4.5$



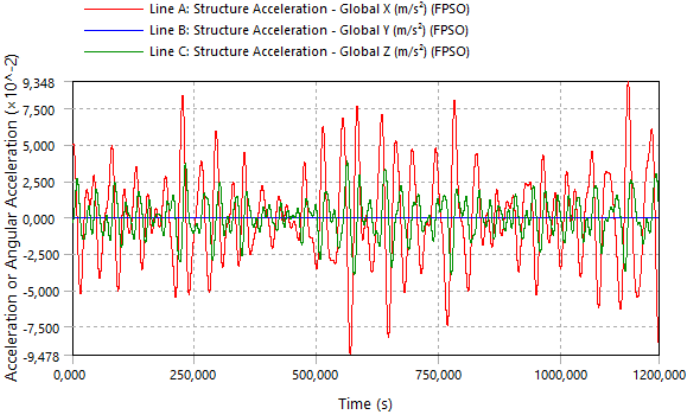
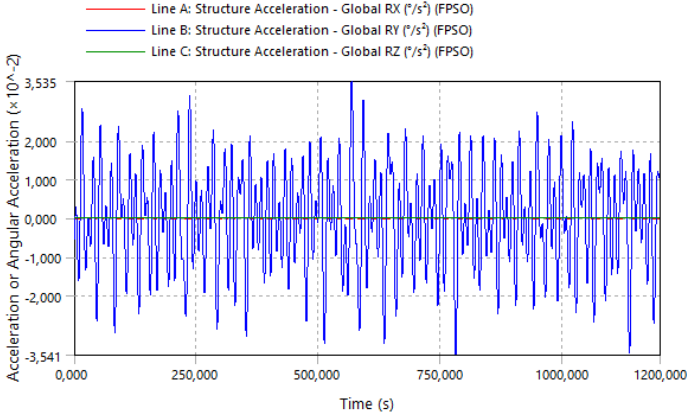
Acceleration Motion untuk $H_s = 1.25$ dan $T_p = 5.5$



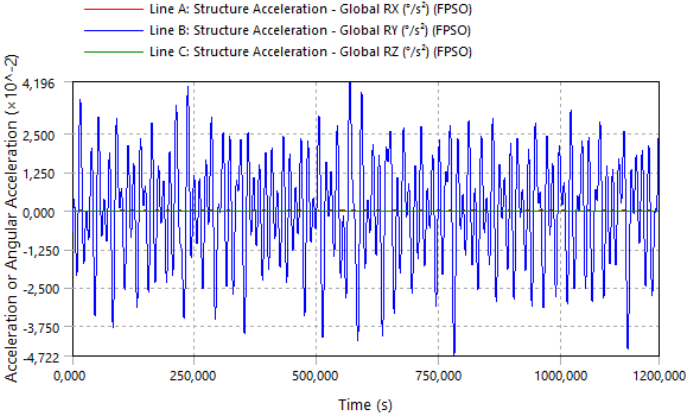
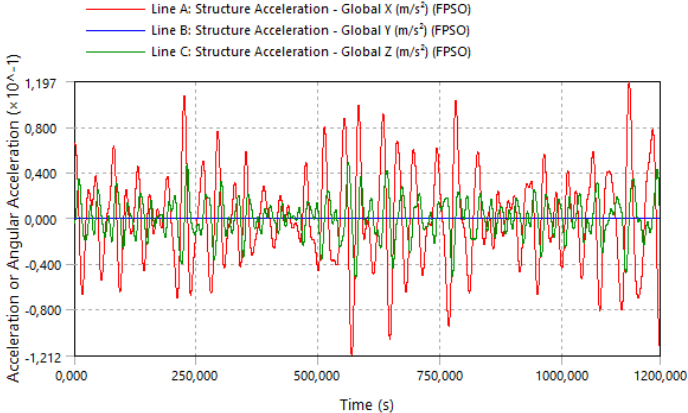
Acceleration Motion untuk $H_s = 1.75$ dan $T_p = 5.5$



Acceleration Motion untuk $H_s = 1.75$ dan $T_p = 6.5$



Acceleration Motion untuk $H_s = 2.25$ dan $T_p = 6.5$



LAMPIRAN B
ACCELERATION MOTION DAN PERHITUNGAN BEBAN

Gerak Translasi

$F = m \times a$

Diketahui

m : 500 ton

a : sesuai tabel dibawah

Hs (m)	Acceleration Surge Motion (m/s^2)								
	Peak Period, T_p (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	0,007	0,014	0,019	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	0,058	0,066	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	0,11	0,073	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	0,080	0,076	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	0,12	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Hs (m)	Acceleration Sway Motion (m/s^2)								
	Peak Period, T_p (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	1,30E-05	8,0E-06	4,80E-06	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	1,50E-05	1,3E-05	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	2,20E-05	9,90E-06	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	0,089	0,072	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	1,40E-05	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Hs (m)	Acceleration Heave Motion (m/s^2)								
	Peak Period, T_p (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	0,014	0,014	0,014	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	0,041	0,036	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	0,06	0,038	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	0,062	0,049	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	0,049	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Hs (m)	Fx (kN)								
	Peak Period, T_p (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	3,500	7,000	9,500	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	29,000	33,000	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	55,000	36,500	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	40,000	38,000	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	60,000	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Hs (m)	Fy (kN)								
	Peak Period, T_p (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	6,50E-03	4,00E-03	2,40E-03	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	7,50E-03	6,50E-03	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	1,10E-02	4,95E-03	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	44,50	3,60E+01	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	7,00E-03	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Hs (m)	Fz (kN)								
	Peak Period, T_p (Second)								
	0.0 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.0	3.0 - 4.0	4.0 - 5.0	5.0 - 6.0	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.0 - 9.0
0.0 - 0.5	-	4912	4912	4912	-	-	-	-	-
0.5 - 1.0	-	-	-	4925,500	4923	-	-	-	-
1.0 - 1.5	-	-	-	-	4935	-4924	-	-	-
1.5 - 2.0	-	-	-	-	-	4936	4929,5	-	-
2.0 - 2.5	-	-	-	-	-	-	4929,5	-	-
2.5 - 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0 - 3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5 - 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0 - 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5 - 5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*pada gerakan heave terdapat pengaruh gravitasi

LAMPIRAN C
TEGANGAN GLOBAL

Berikut adalah nilai tegangan von mises setiap lokasi tinjauan struktur

Sambungan TS1				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1	W	0,25	1,5	93,884
2			2,5	94,019
3			3,5	94,115
4		0,75	3,5	95,148
5			4,5	95,263
6		1,25	4,5	104,150
7			5,5	95,426
8		1,75	5,5	98,992
9			6,5	98,166
10		2,25	6,5	113,780

Sambungan TS2				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1	W	0,25	1,5	106,660
2			2,5	106,690
3			3,5	106,710
4		0,75	3,5	107,190
5			4,5	107,180
6		1,25	4,5	107,690
7			5,5	107,240
8		1,75	5,5	109,060
9			6,5	108,600
10		2,25	6,5	107,620

Sambungan TS3				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1	W	0,25	1,5	55,776
2			2,5	54,599
3			3,5	53,812
4		0,75	3,5	50,642
5			4,5	51,915
6		1,25	4,5	63,180
7			5,5	53,148
8		1,75	5,5	53,966
9			6,5	53,288
10		2,25	6,5	67,026

Sambungan TS4				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1	W	0,25	1,5	23,283
2			2,5	22,868
3			3,5	43,128
4		0,75	3,5	28,987
5			4,5	33,516
6		1,25	4,5	58,550
7			5,5	37,487
8		1,75	5,5	36,076
9			6,5	34,841
10		2,25	6,5	64,253

Sambungan TS5				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1	W	0,25	1,5	42,839
2			2,5	43,008
3			3,5	43,128
4		0,75	3,5	44,186
5			4,5	44,357
6		1,25	4,5	45,524
7			5,5	44,534
8		1,75	5,5	44,852
9			6,5	44,686
10		2,25	6,5	45,714

Sambungan TS6				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1	W	0,25	1,5	112,550
2			2,5	112,670
3			3,5	112,760
4		0,75	3,5	113,780
5			4,5	113,870
6		1,25	4,5	114,960
7			5,5	114,020
8		1,75	5,5	112,690
9			6,5	112,790
10		2,25	6,5	115,000

Sambungan TS7				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1	W	0,25	1,5	68,528
2			2,5	68,659
3			3,5	68,753
4		0,75	3,5	69,676
5			4,5	69,792
6		1,25	4,5	70,792
7			5,5	69,938
8		1,75	5,5	68,359
9			6,5	68,544
10		2,25	6,5	70,898

Sambungan TS8				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1	W	0,25	1,5	13,107
2			2,5	13,230
3			3,5	13,319
4		0,75	3,5	14,048
5			4,5	14,185
6		1,25	4,5	15,009
7			5,5	14,313
8		1,75	5,5	13,203
9			6,5	13,348
10		2,25	6,5	15,175

Sambungan TS9				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1		0,25	1,5	54,697
2			2,5	54,881

Sambungan TS10				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σ_{max}
1		0,25	1,5	153,940
2			2,5	154,050

3	W	0,75	3,5	55,012
4			3,5	56,186
5			4,5	56,369
6		1,25	4,5	57,659
7			5,5	56,564
8		1,75	5,5	55,220
9			6,5	55,354
10			2,25	6,5

3	W	0,75	3,5	154,130
4			3,5	155,200
5			4,5	155,250
6		1,25	4,5	156,350
7			5,5	155,400
8		1,75	5,5	153,510
9			6,5	153,680
10			2,25	6,5

Sambungan TS11				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σmax
1	W	0,25	1,5	126,980
2			2,5	127,050
3			3,5	127,110
4		0,75	3,5	127,890
5			4,5	127,910
6		1,25	4,5	128,710
7			5,5	128,010
8		1,75	5,5	125,660
9			6,5	125,960
10			2,25	6,5

Sambungan TS12				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σmax
1	W	0,25	1,5	14,968
2			2,5	15,047
3			3,5	15,104
4		0,75	3,5	15,598
5			4,5	15,686
6		1,25	4,5	16,255
7			5,5	15,772
8		1,75	5,5	14,498
9			6,5	14,694
10			2,25	6,5

Sambungan TS13				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σmax
1	W	0,25	1,5	113,300
2			2,5	113,250
3			3,5	113,230
4		0,75	3,5	113,340
5			4,5	113,240
6		1,25	4,5	113,350
7			5,5	113,240
8		1,75	5,5	117,070
9			6,5	116,240
10			2,25	6,5

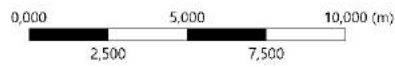
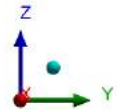
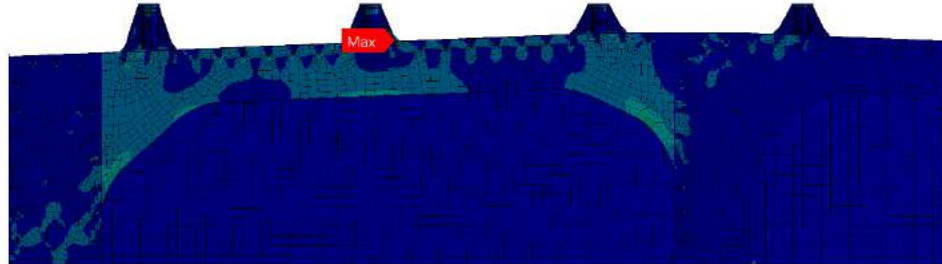
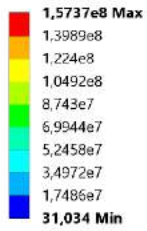
Sambungan TS14				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σmax
1	W	0,25	1,5	136,180
2			2,5	136,090
3			3,5	136,020
4		0,75	3,5	135,880
5			4,5	135,710
6		1,25	4,5	135,510
7			5,5	135,650
8		1,75	5,5	137,600
9			6,5	137,130
10			2,25	6,5

Sambungan TS15				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σmax
1	W	0,25	1,5	83,891
2			2,5	83,913
3			3,5	83,930
4		0,75	3,5	84,328
5			4,5	84,328
6		1,25	4,5	84,806
7			5,5	84,384
8		1,75	5,5	84,600
9			6,5	84,462
10			2,25	6,5

Sambungan TS16				
LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	σmax
1	W	0,25	1,5	41,164
2			2,5	40,928
3			3,5	40,776
4		0,75	3,5	40,145
5			4,5	40,073
6		1,25	4,5	58,890
7			5,5	40,065
8		1,75	5,5	40,918
9			6,5	40,725
10			2,25	6,5

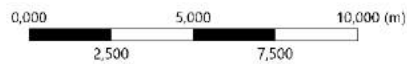
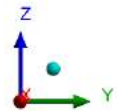
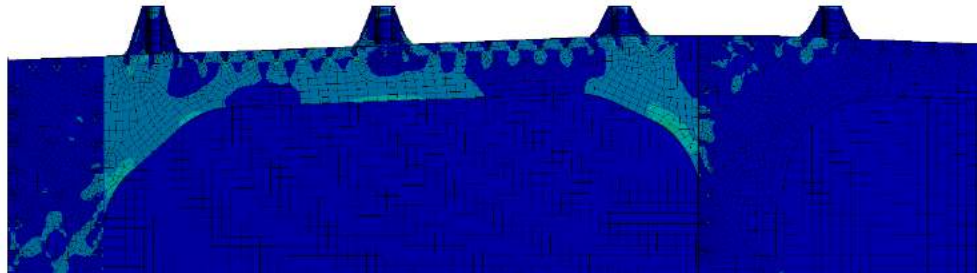
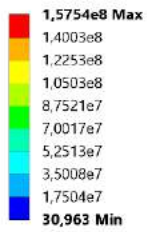
LC1 (Hs = 0,25 ; Tp = 1,5)

A: Hs=0.25, Tp=1.5
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
17/07/2019 19:17



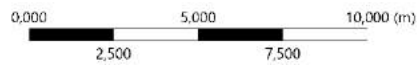
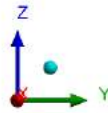
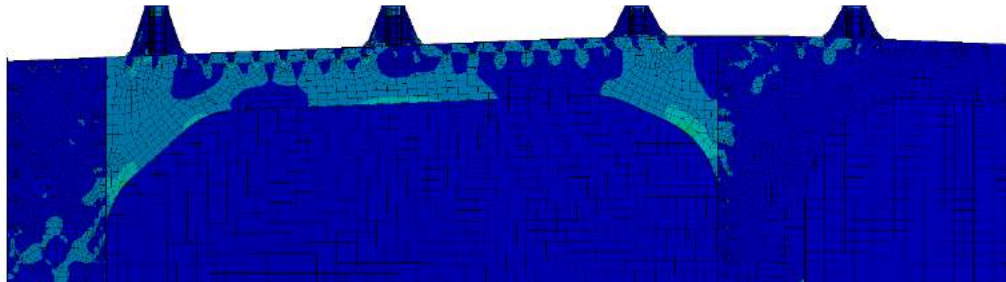
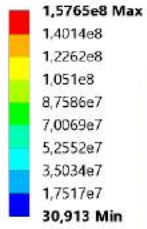
LC2 (Hs = 0,25 ; Tp = 2,5)

B: Hs = 0.25, Tp= 2.5
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
17/07/2019 19:41



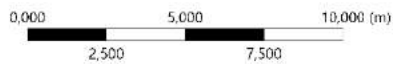
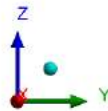
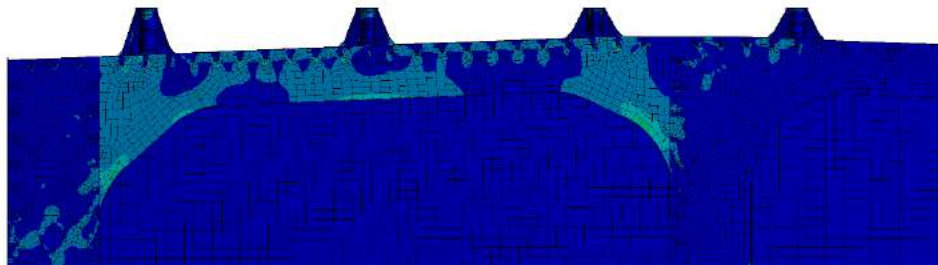
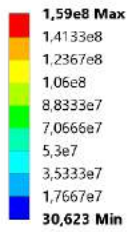
LC3 (Hs = 0,25 ; Tp = 3,5)

C: Hs = 0,25, Tp= 3.5
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
17/07/2019 19:44



LC4 (Hs = 0,75 ; Tp = 3,5)

D: Hs = 0.75, Tp= 3.5
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
17/07/2019 19:46



LC5 (Hs = 0,75 ; Tp = 4,5)

E: Hs = 0.75, Tp = 4.5

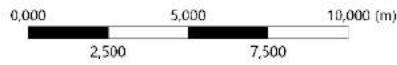
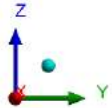
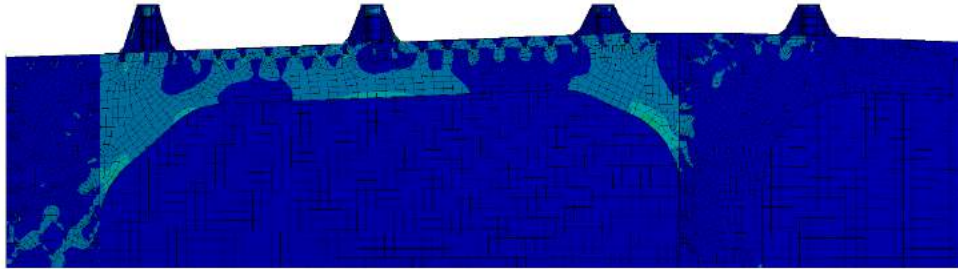
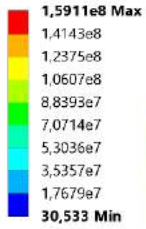
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: Pa

Time: 1

17/07/2019 19:49



LC6 (Hs = 1,25 ; Tp = 4,5)

F: Hs = 1.25, Tp = 4.5

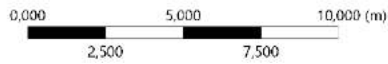
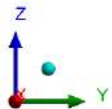
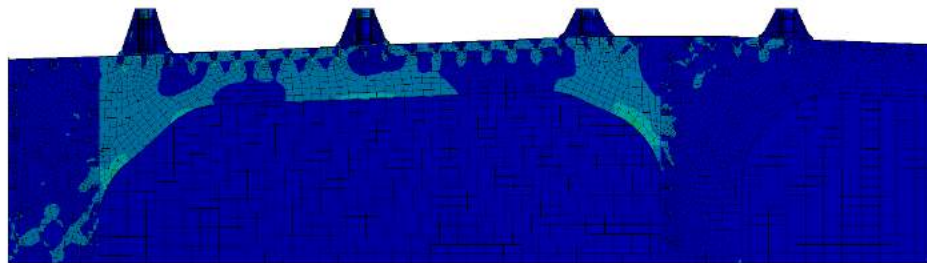
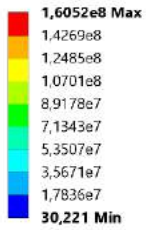
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: Pa

Time: 1

17/07/2019 19:56



LC7 (Hs = 1,25 ; Tp = 5,5)

G: Hs = 1.25, Tp = 5.5

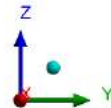
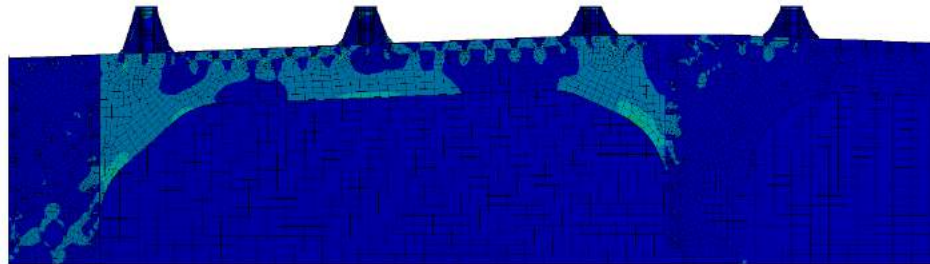
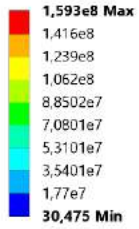
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: Pa

Time: 1

17/07/2019 20:00



LC8 (Hs = 1,75 ; Tp = 5,5)

H: Hs = 1.75, Tp = 5.5

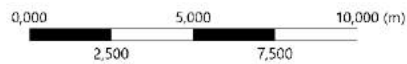
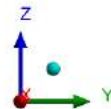
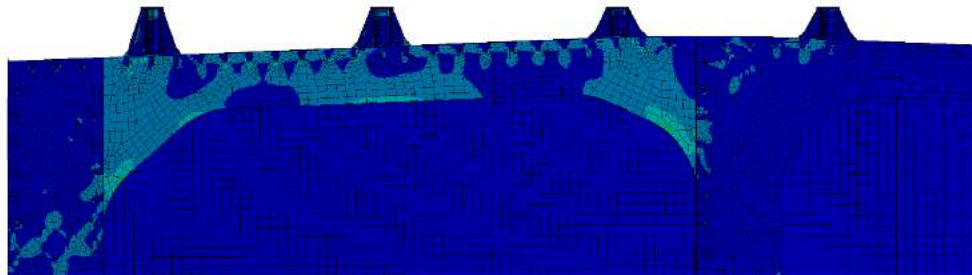
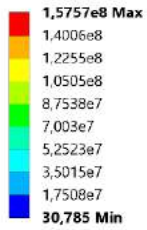
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: Pa

Time: 1

17/07/2019 20:05



LC9 (Hs = 1,75 ; Tp = 6,5)

I: Hs = 1.75, Tp = 6.5

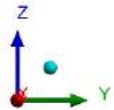
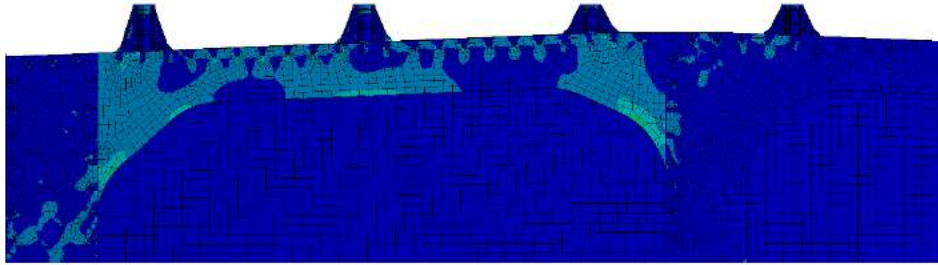
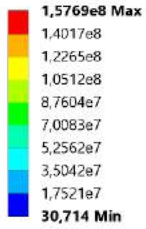
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: Pa

Time: 1

17/07/2019 20:07



LC10 (Hs = 2,25 ; Tp = 6,5)

J: Hs = 2.25, Tp = 6.5

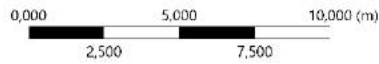
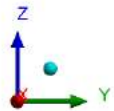
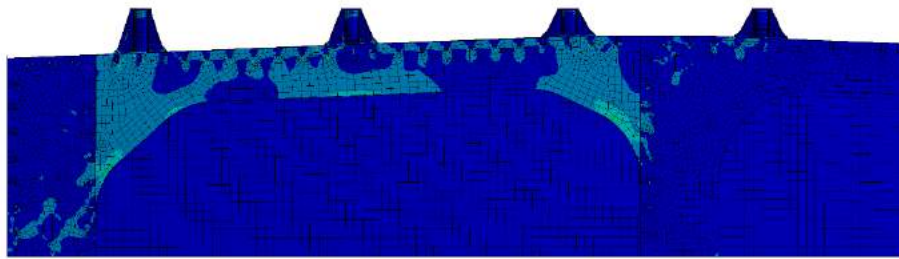
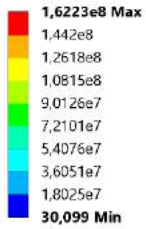
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: Pa

Time: 1

17/07/2019 20:10



LAMPIRAN D
REAKSI TUMPUAN

Reaksi Tumpuan

Karena aplikasi pembebanan pada analisis global menggunakan teknik point load. Sehingga untuk mempermudah dilakukan simulasi numerik untuk mendapatkan reaksi tumpuan sambungan TS10 pada semua variasi pembebanan. Reaksi tumpuan tersebut sebagai input beban pada analisis lokal

LC No.	Wave Direction	Hs	Tp	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	W	0,25	1,5	1050,4	27416	3,57E+05	1,05E+05	5593,6	120,75
2			2,5	1281,7	27425	3,57E+05	1,05E+05	6541,9	125,55
3			3,5	1446,9	27432	3,57E+05	1,05E+05	7221,3	128,98
4		0,75	3,5	2738,1	27563	3,57E+05	1,06E+05	12523	156,07
5			4,5	3002	27561	3,57E+05	1,06E+05	13600	161,5
6		1,25	4,5	4458,2	27691	3,57E+05	1,06E+05	19576	191,99
7			5,5	3233,5	27576	3,57E+05	1,06E+05	14549	166,33
8		1,75	5,5	4039,7	30887	3,57E+05	1,19E+05	17859	186,8
9			6,5	3777,6	30212	3,57E+05	1,16E+05	16779	180,83
10		2,25	6,5	4787,7	27673	3,57E+05	1,06E+05	20923	198,72

LAMPIRAN E
PERHITUNGAN MODEL SEDERHANA

Validasi Model Sederhana

$$K_I^2 = \frac{1,21a\pi\sigma^2}{Q}$$

Dimana :

a : crack size

Q : parameter yang merupakan fungsi dari geometri retak (a/2c) dan perbandingan tegangan nominal dan tegangan luluh material

σ : tegangan normal

Diketahui :

a : 2 mm

Q : 1,91

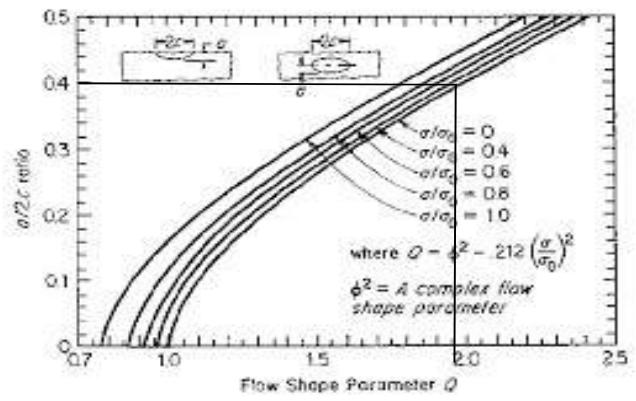
σ : 116,51 MPa

Jawab :

Ki : 224,21

No. a (mm) Numeric Analytical Perbedaan(%)

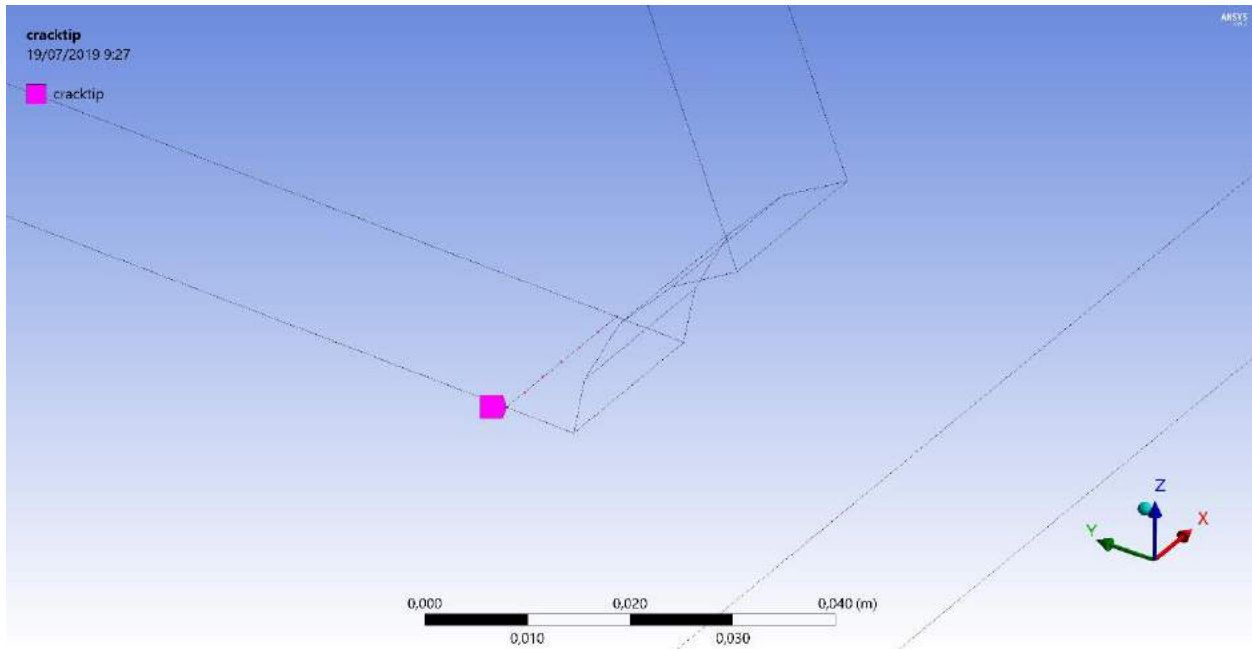
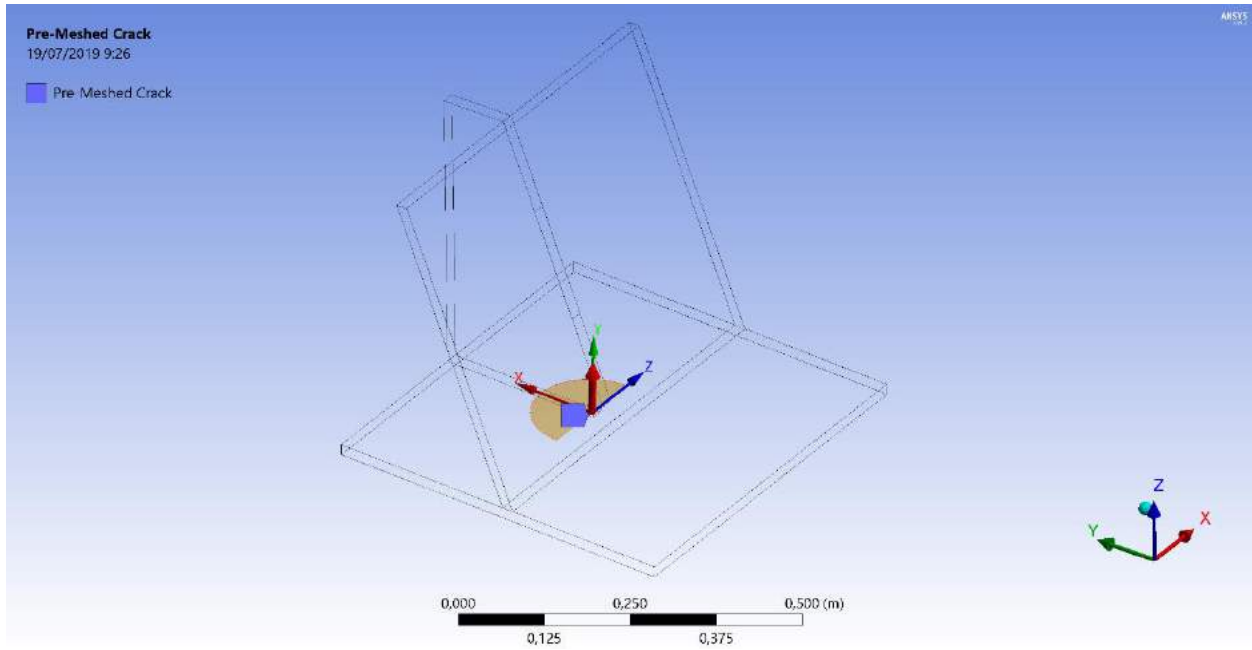
1 2 225,41 224,206 0,533945458

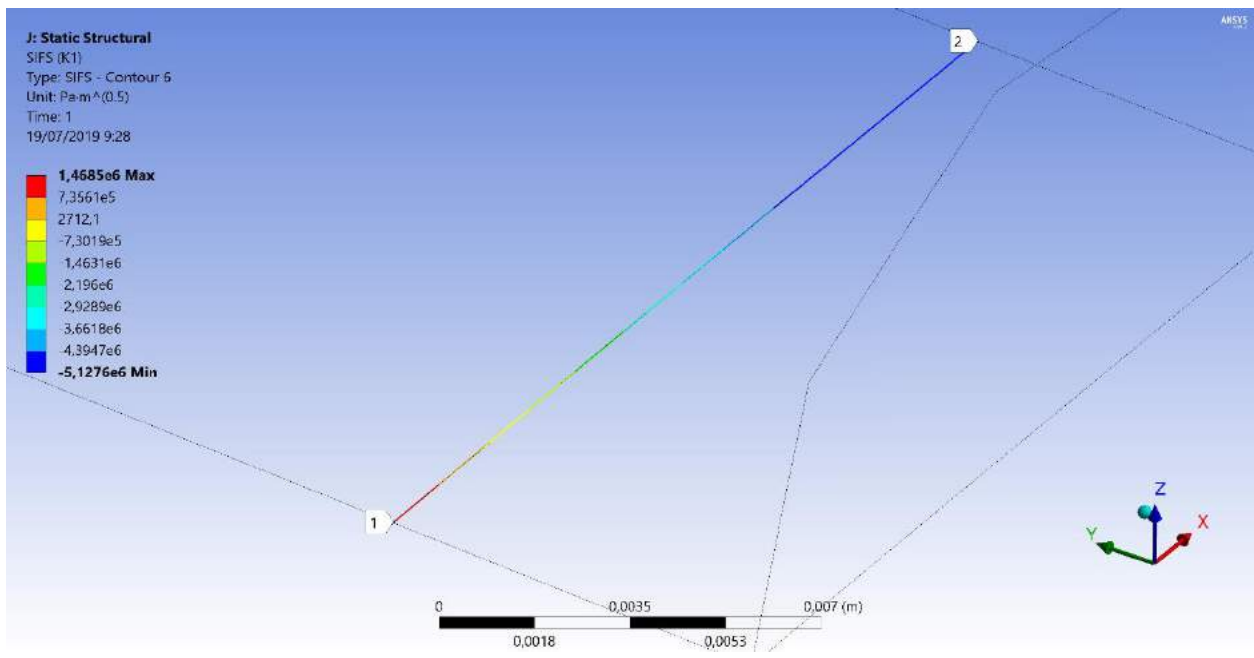
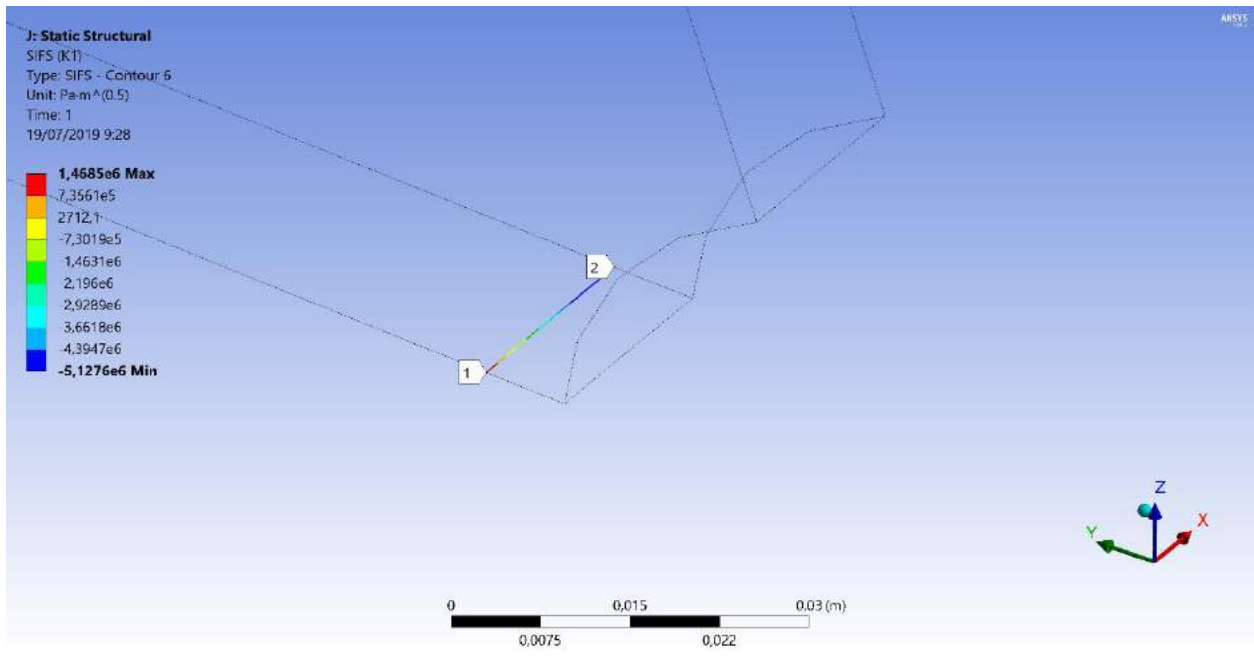


LAMPIRAN F
PEMODELAN RETAK DAN HASIL SIF

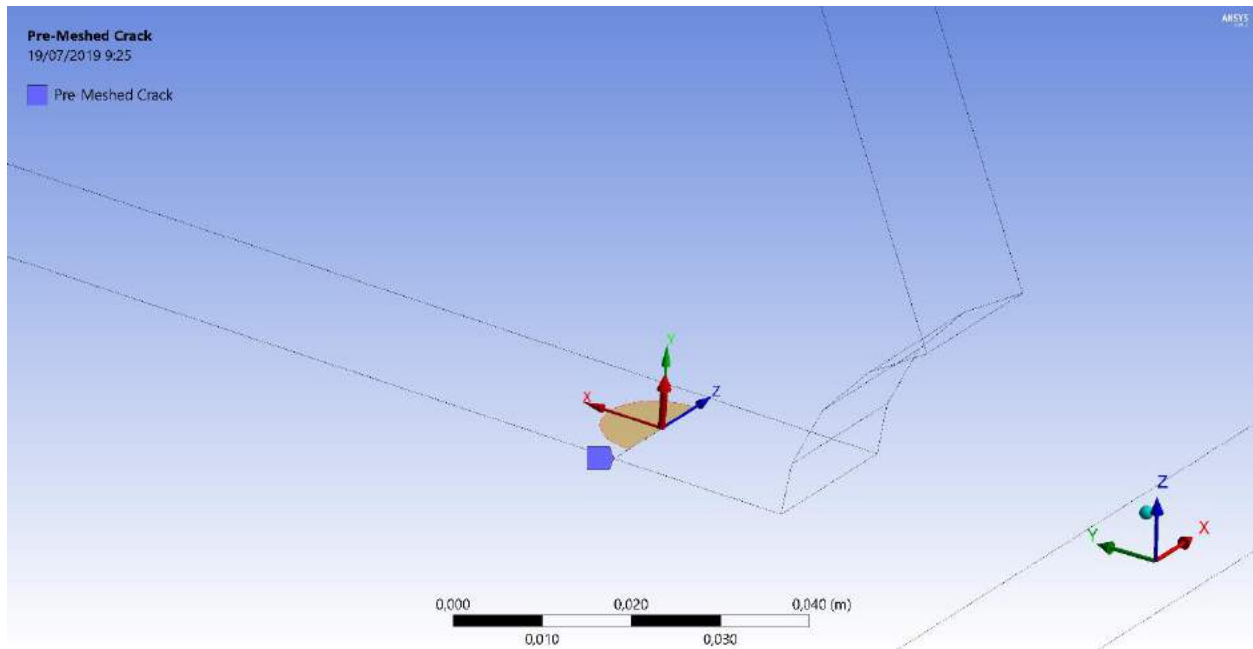
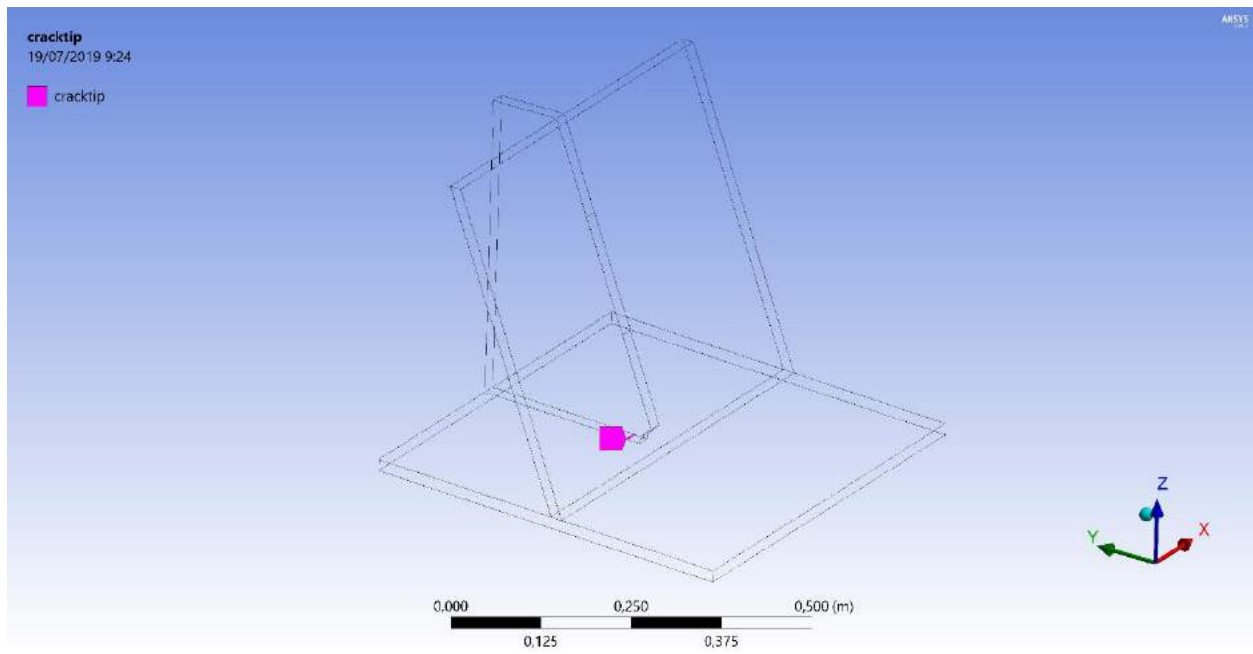
PEMODELAN RETAK DAN NILAI *STRESS INTENSITY FACTOR*

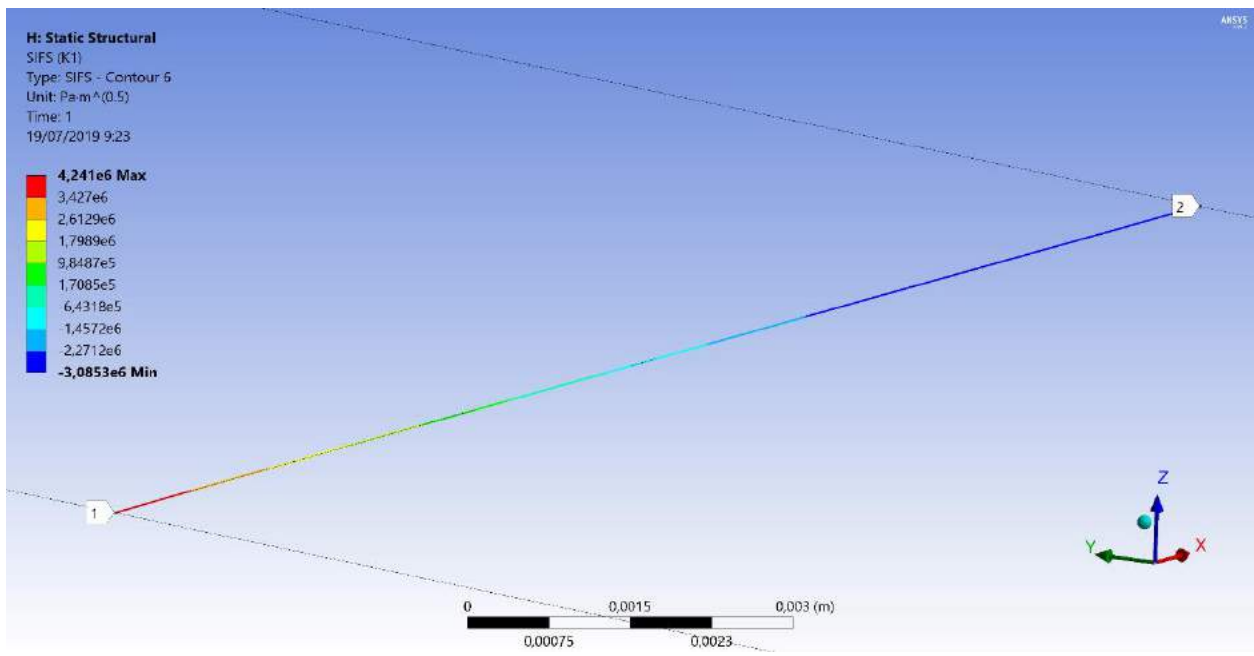
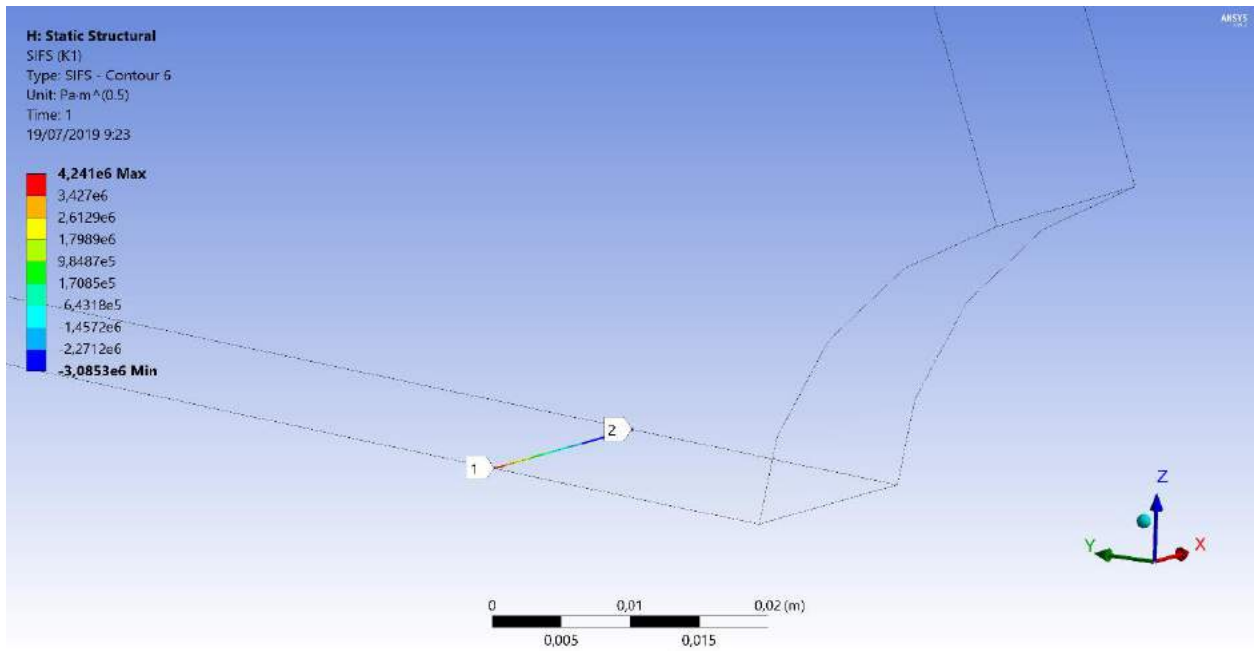
Retak 0,5 – 15,03



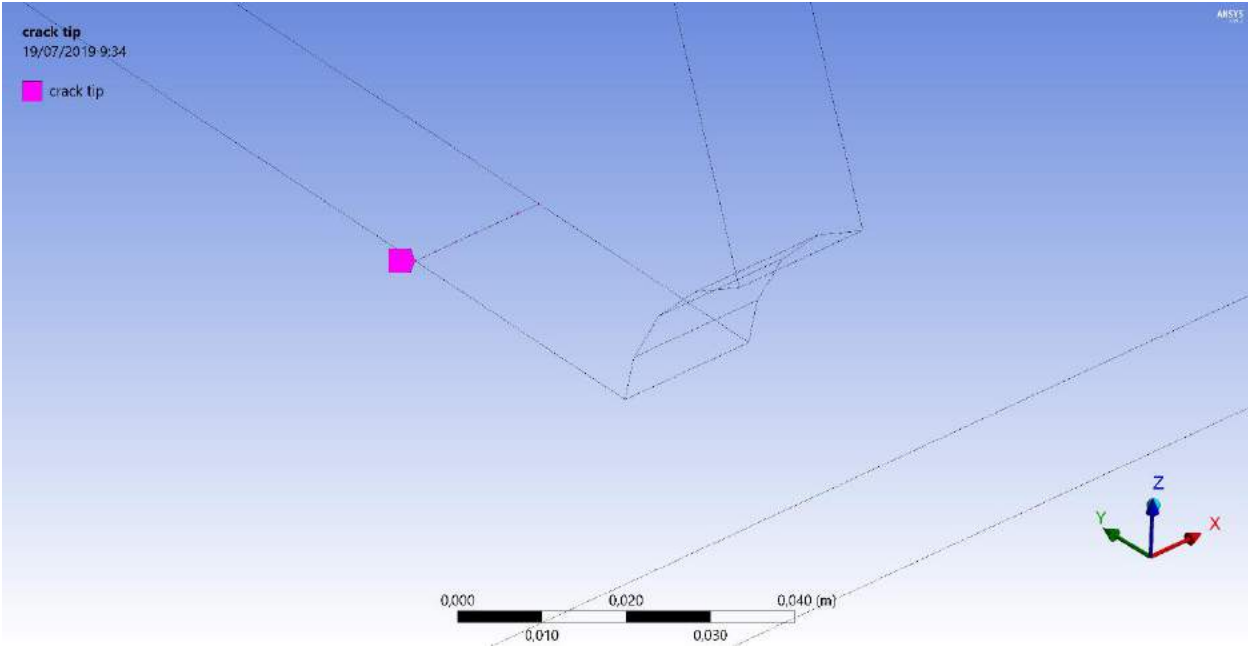
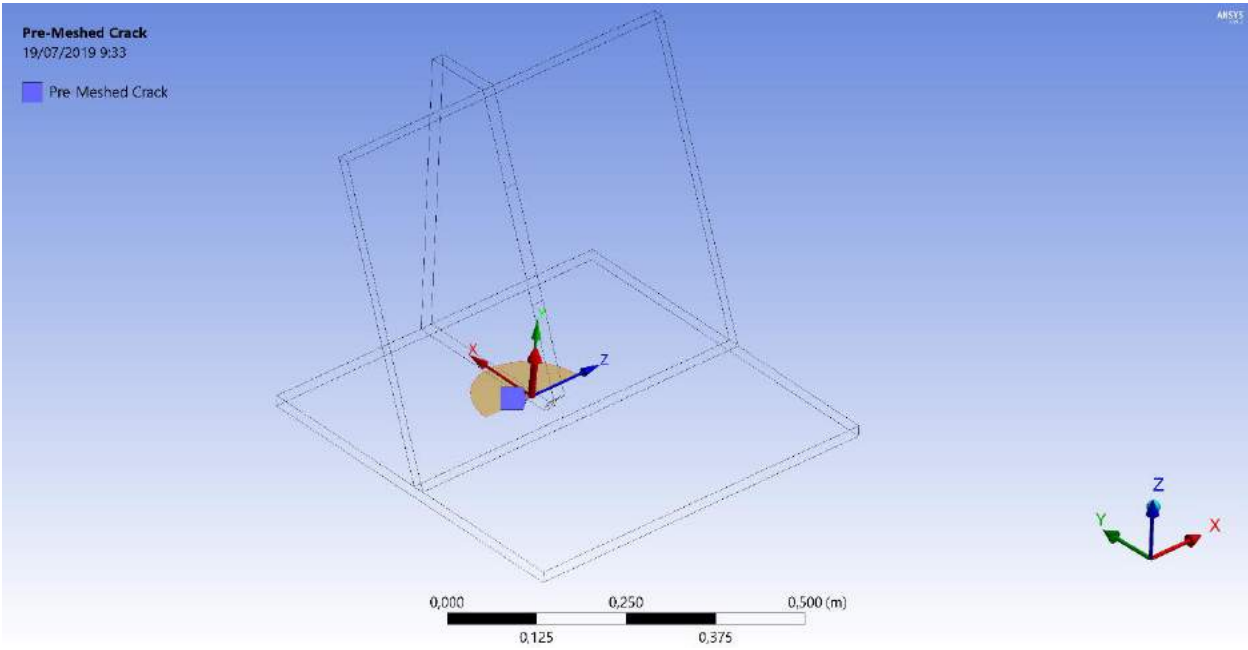


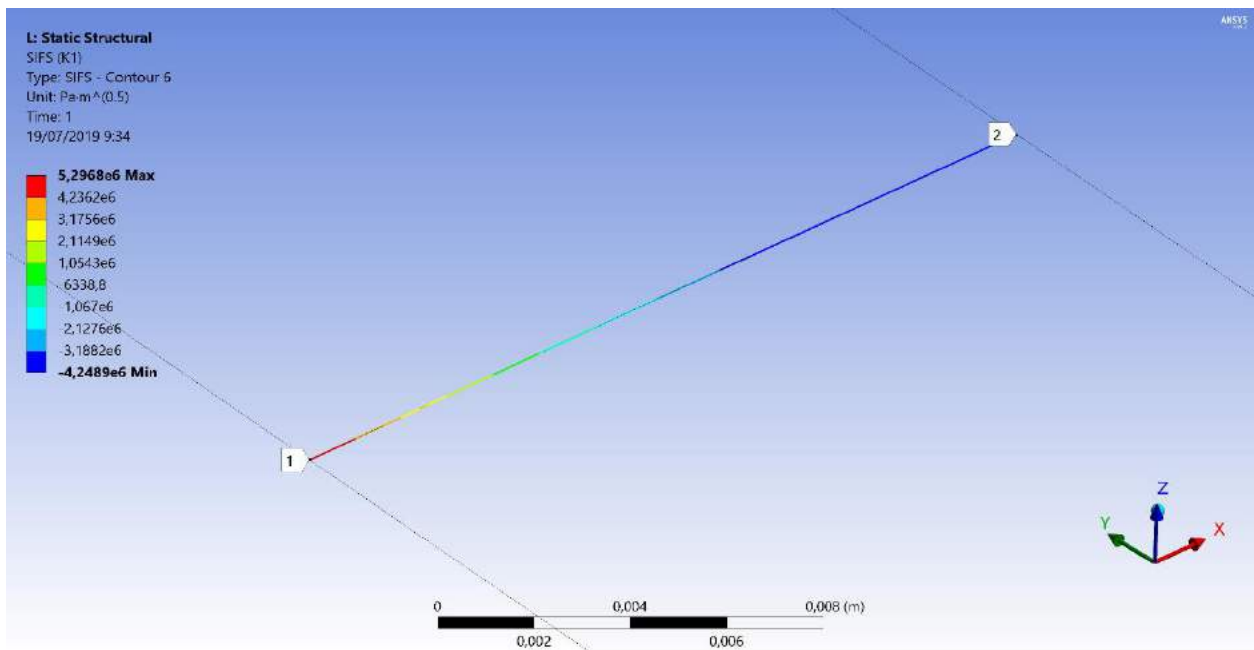
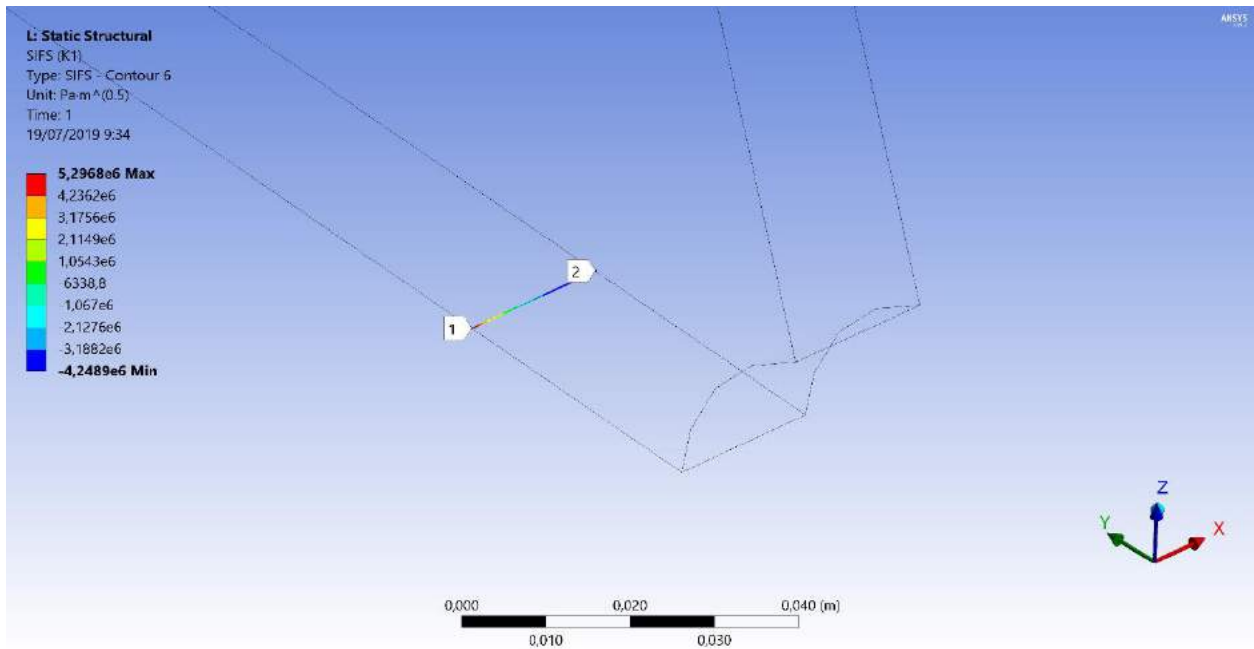
Retak 15,03 – 29,57



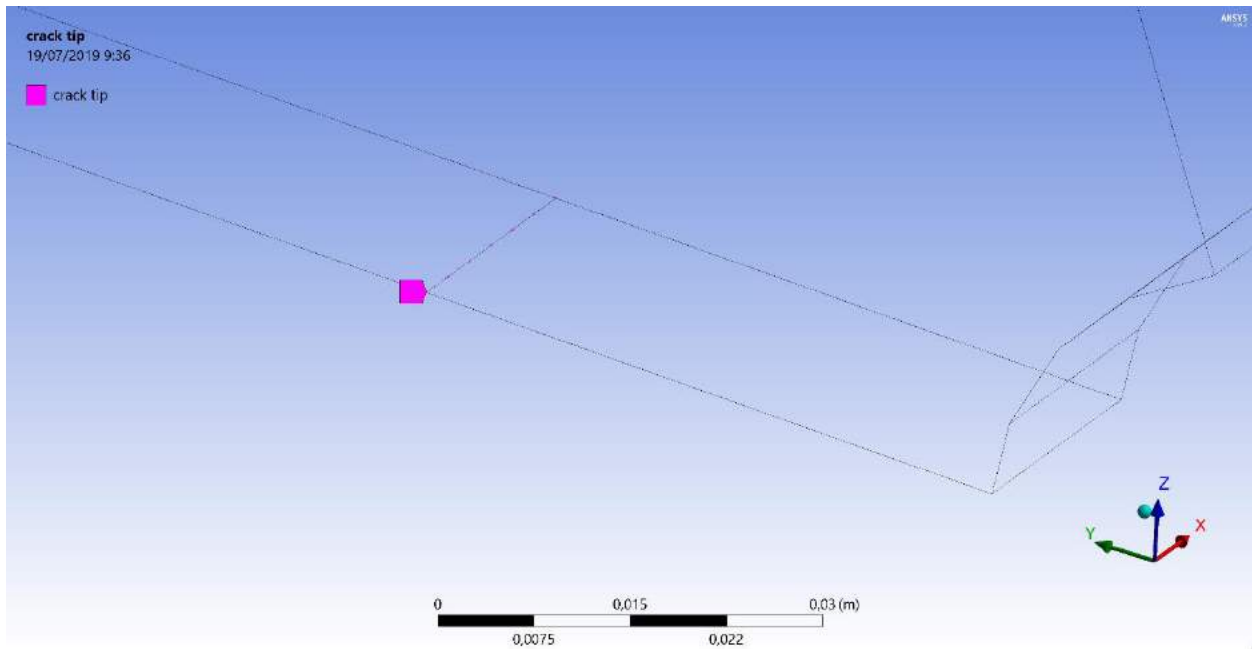
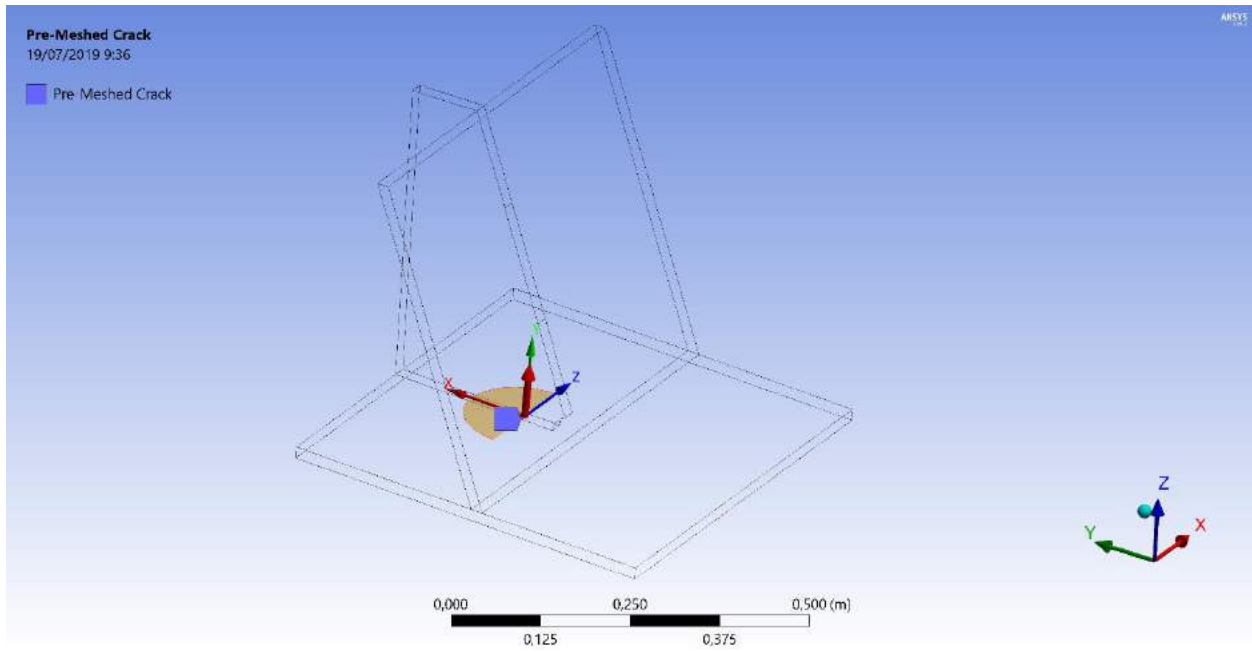


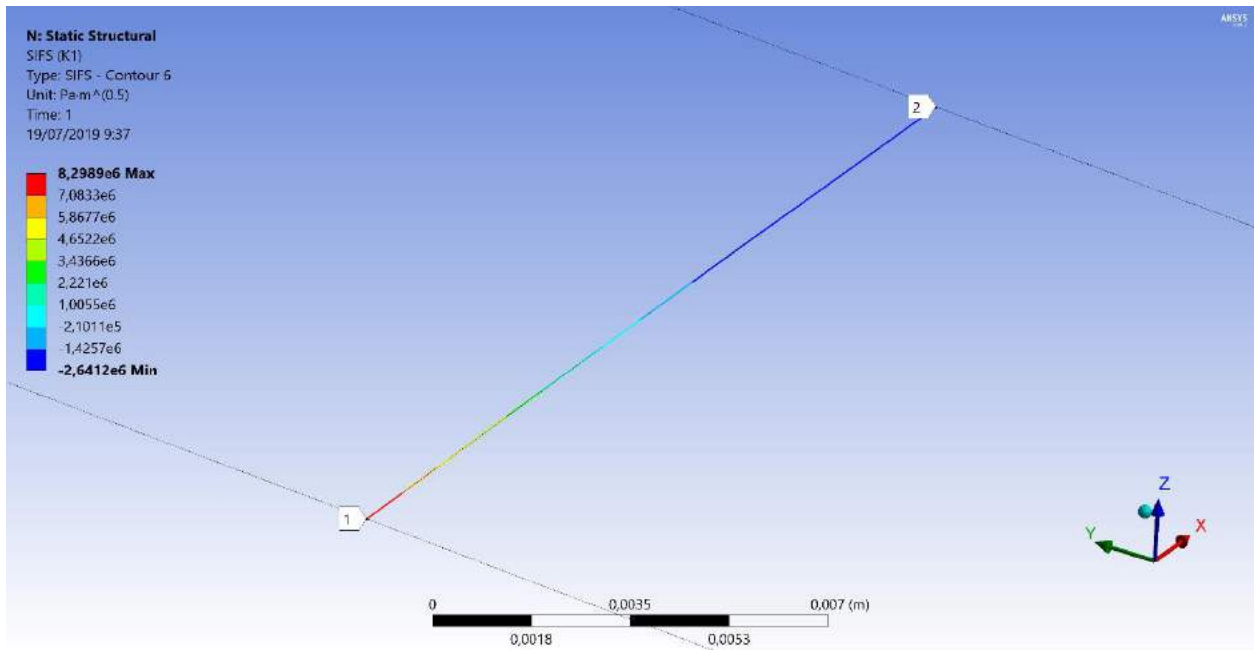
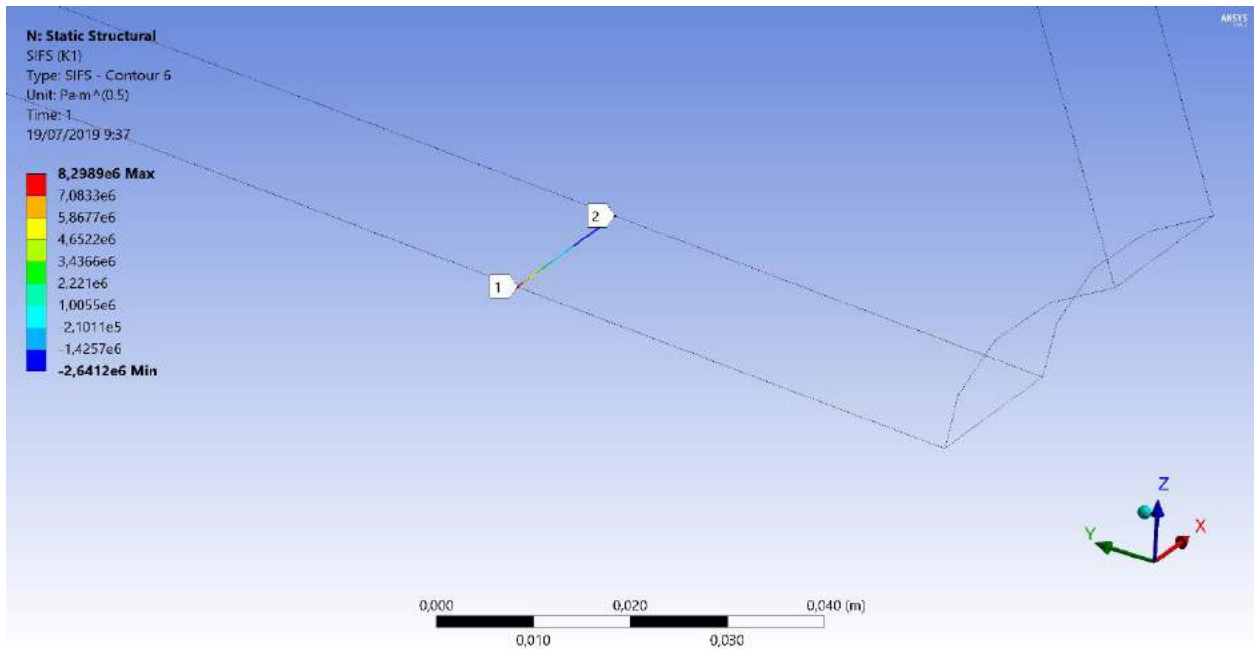
Retak 29,57 – 44,10



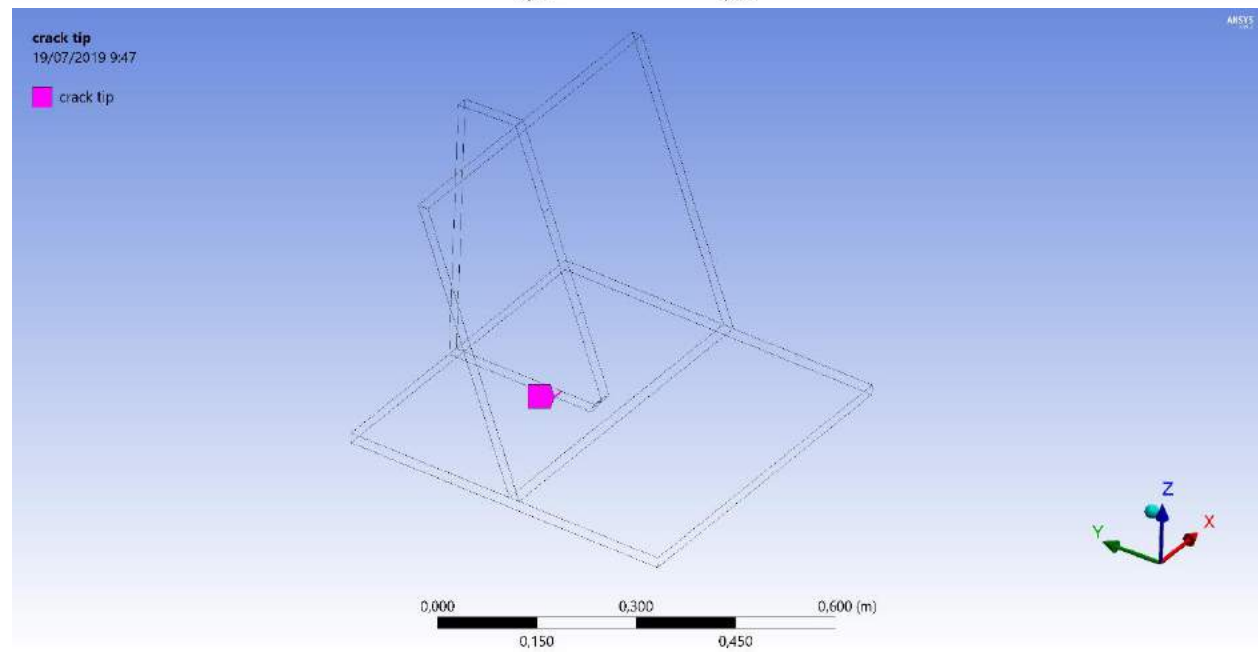
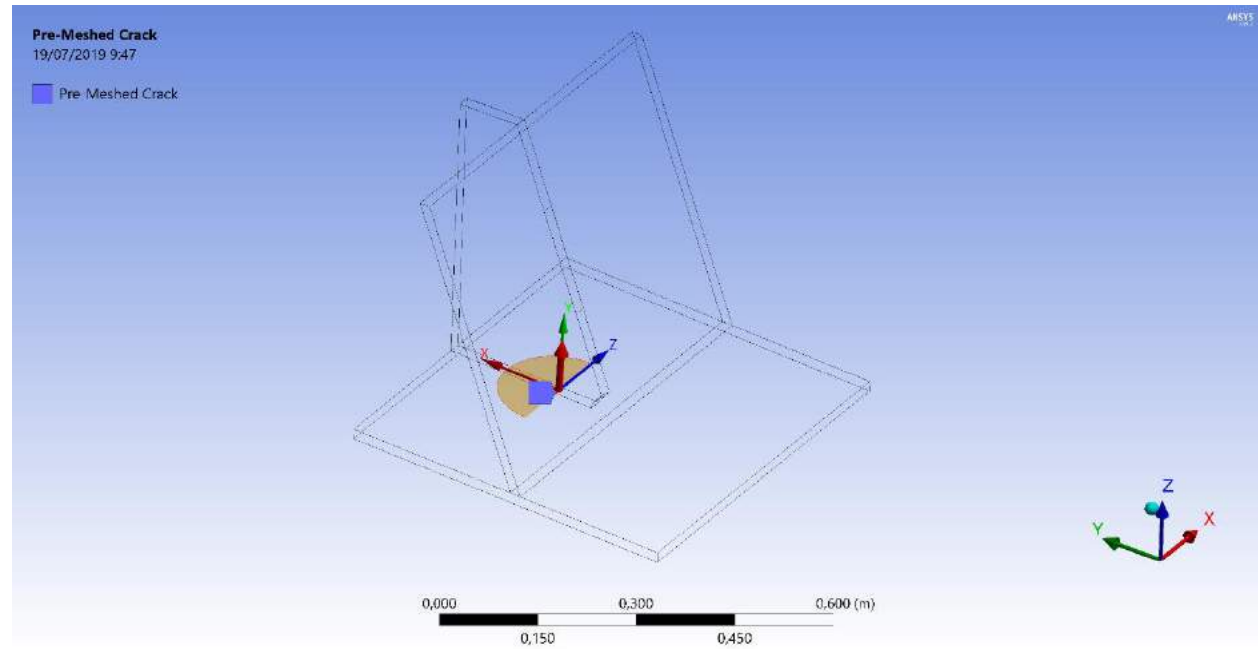


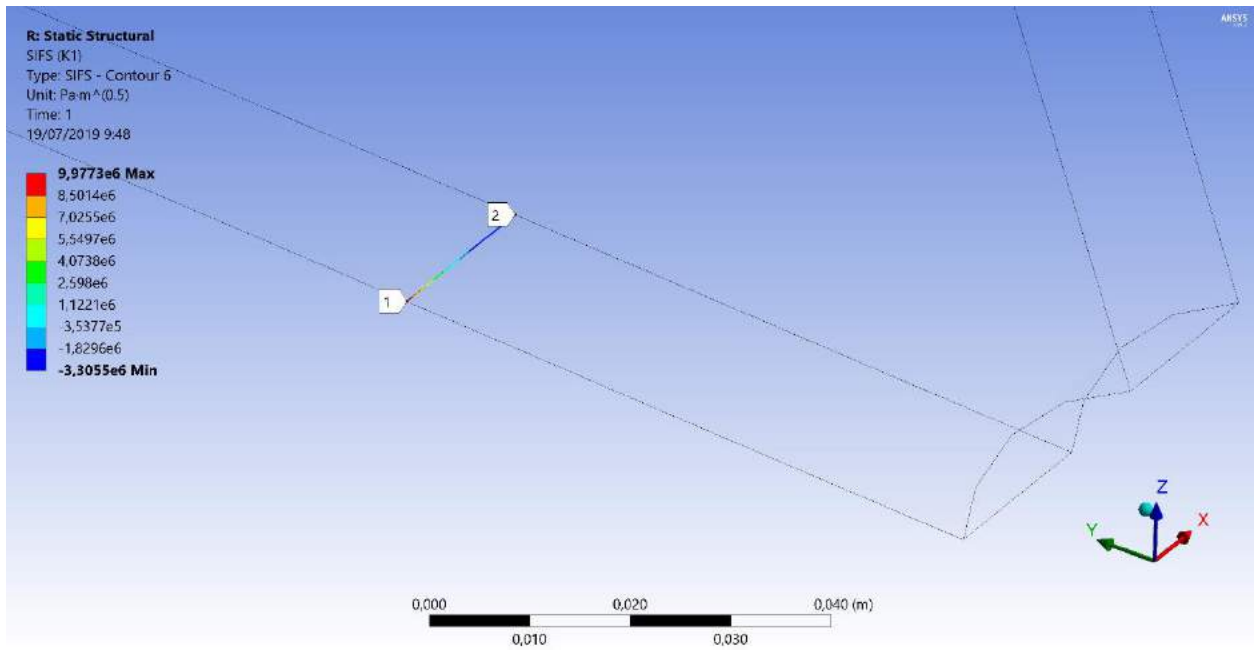
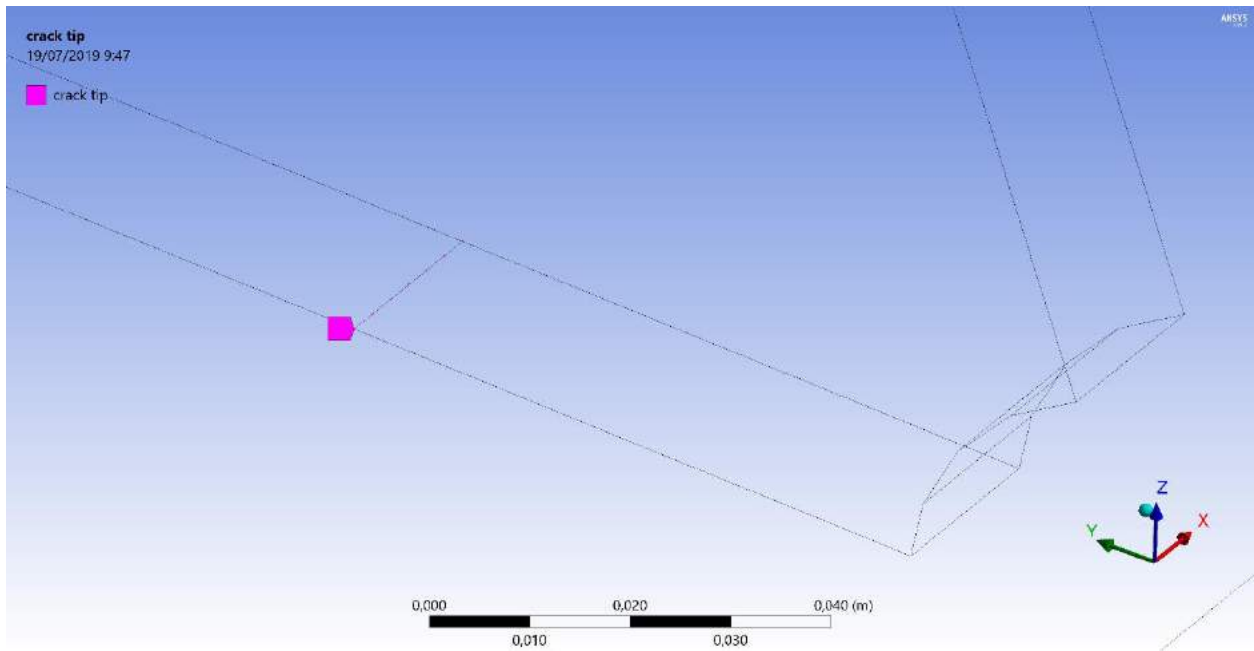
Retak 44,10 – 58,64

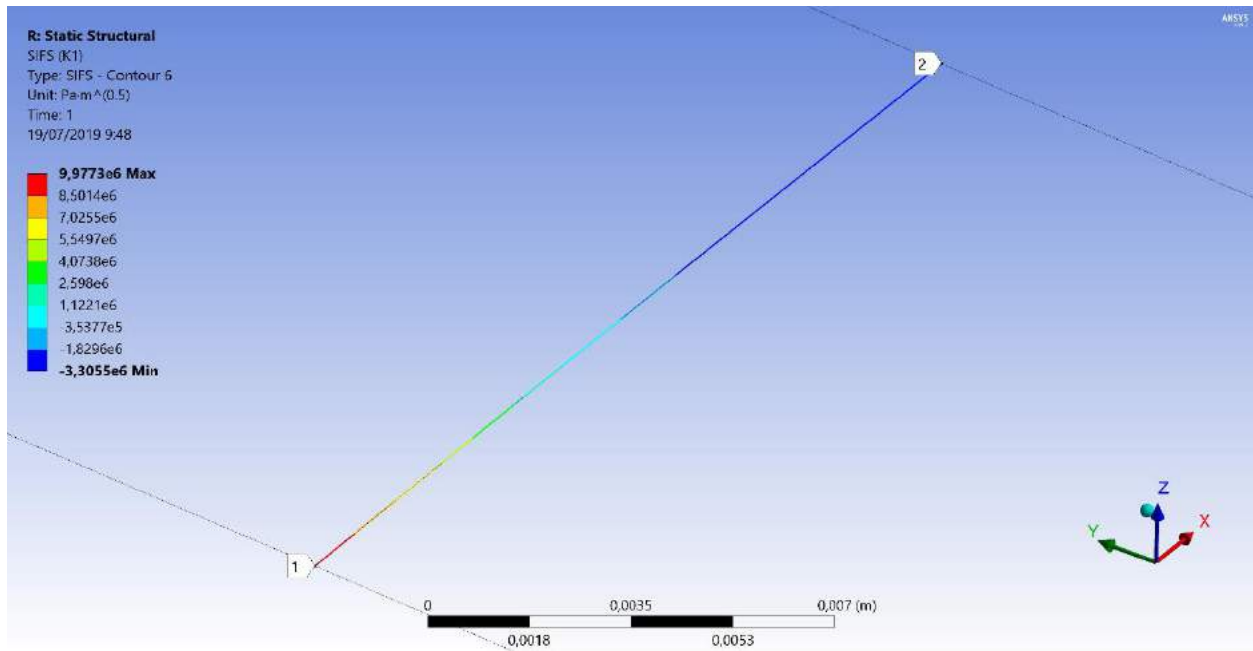




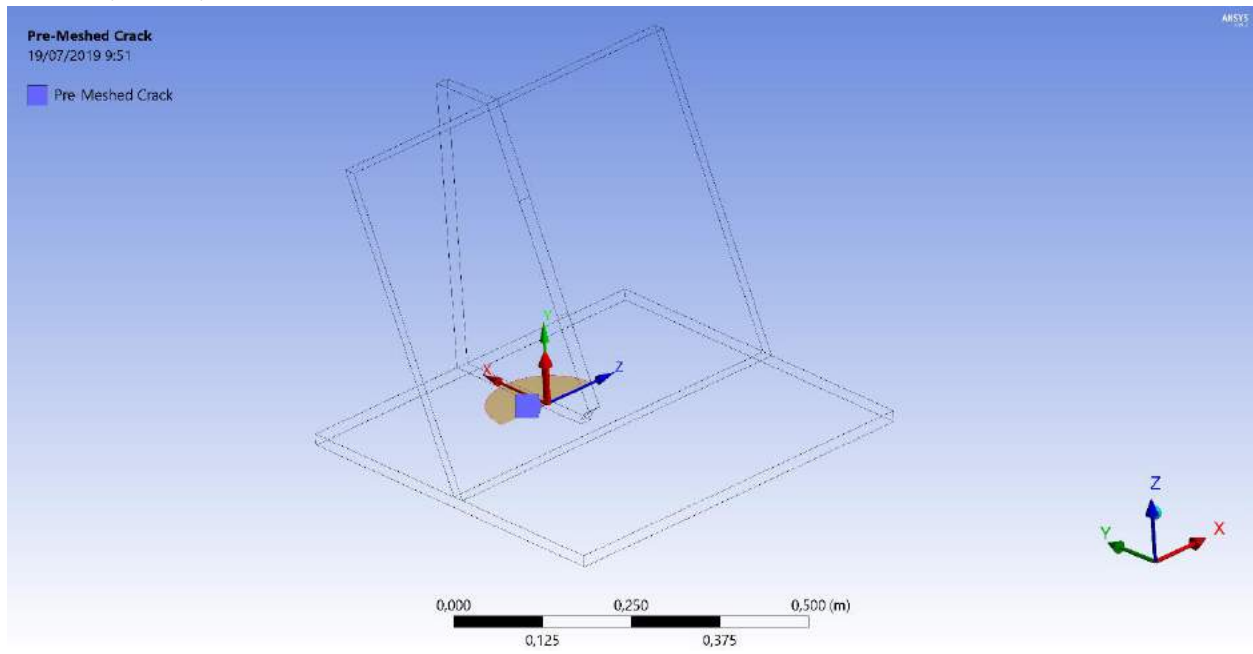
Retak 58,64 - 73,17

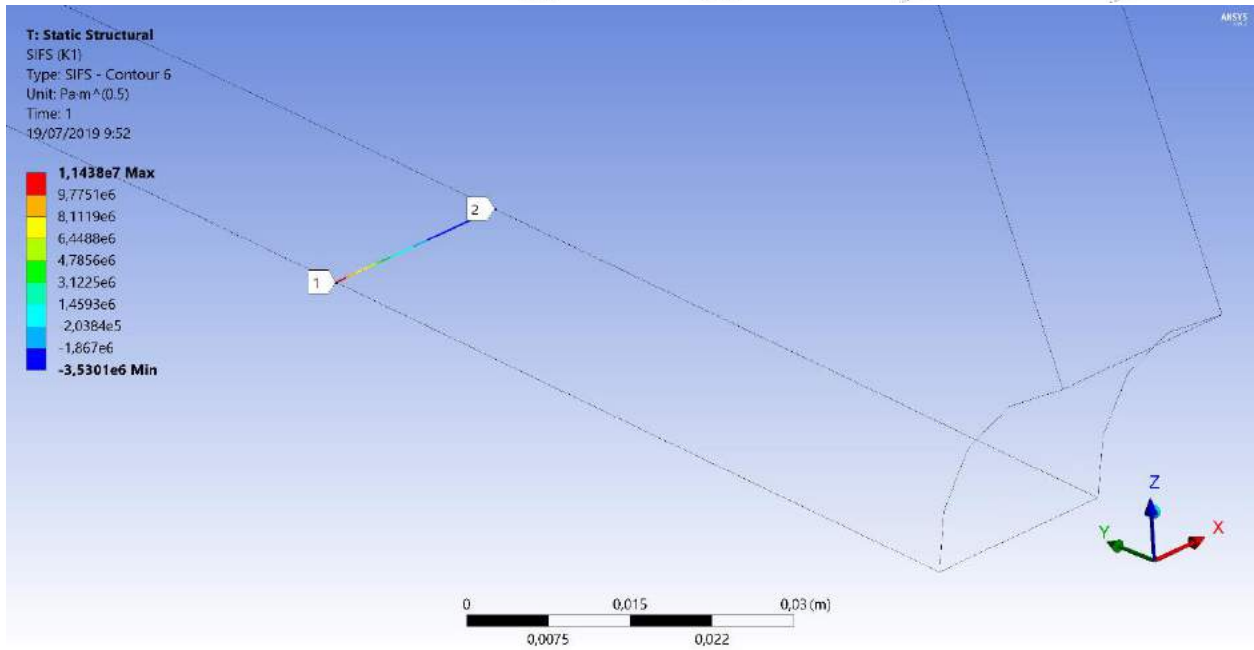
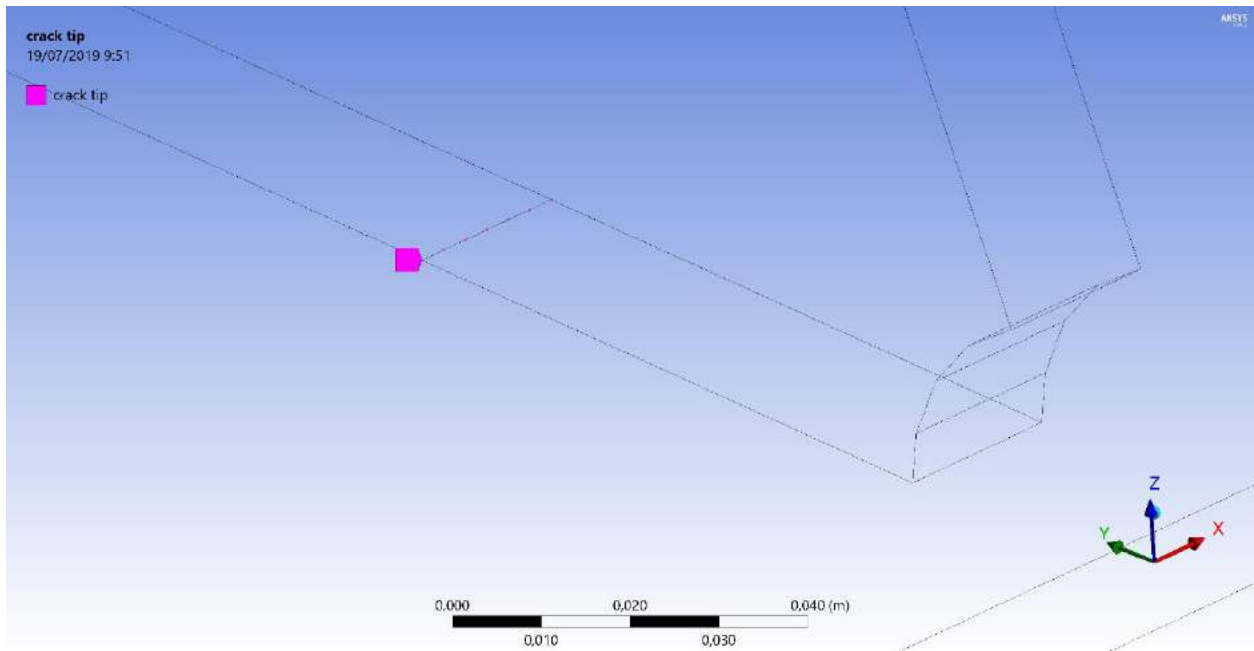


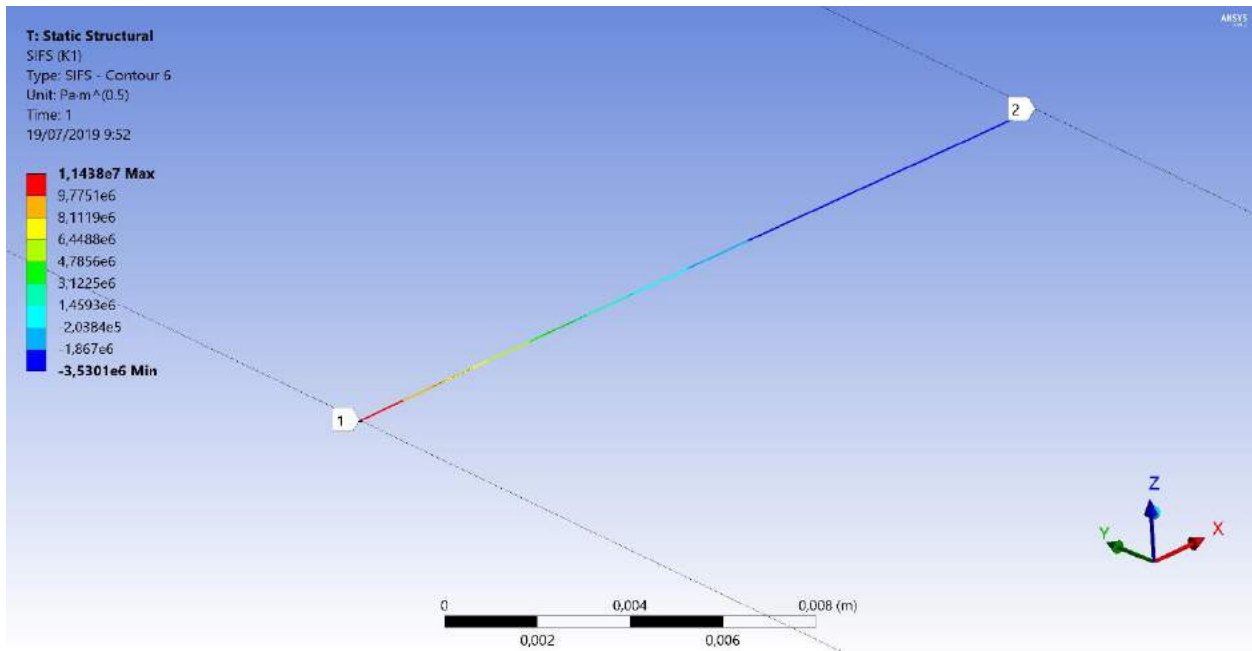




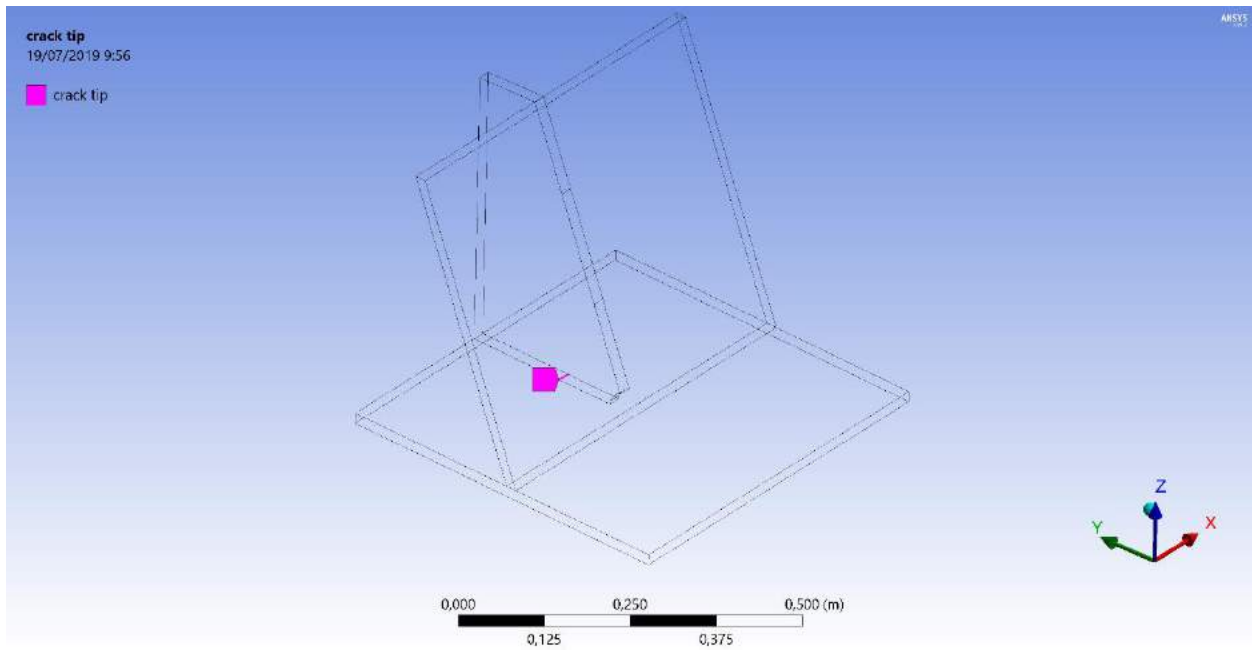
Retak 73,17 - 87,71





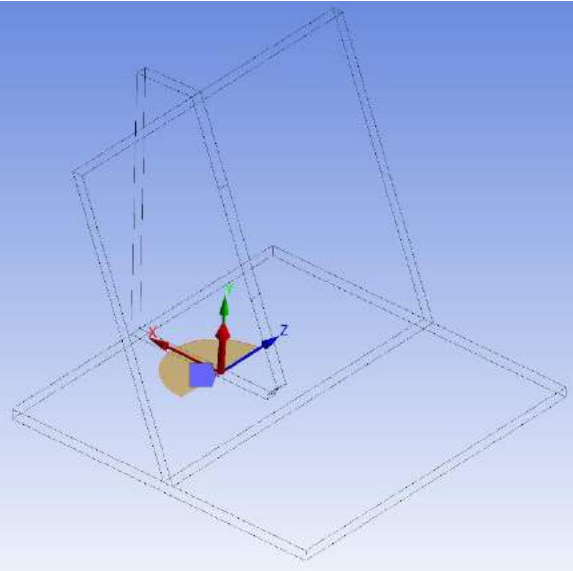


Retak 87,71 - 102,24



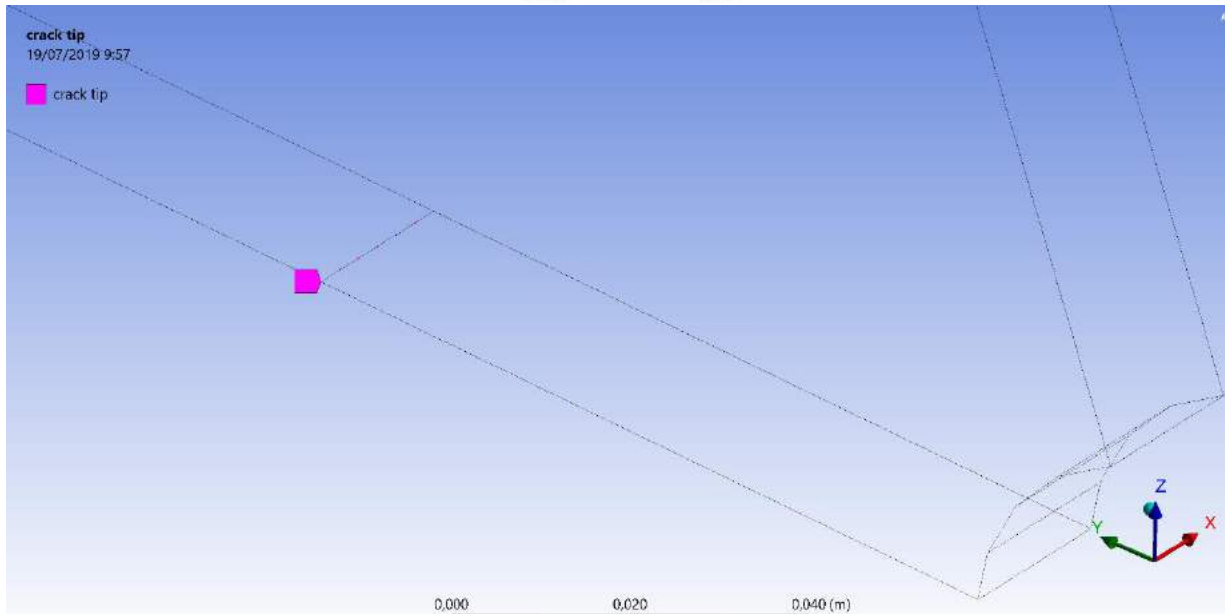
Pre-Meshed Crack
19/07/2019 9:55

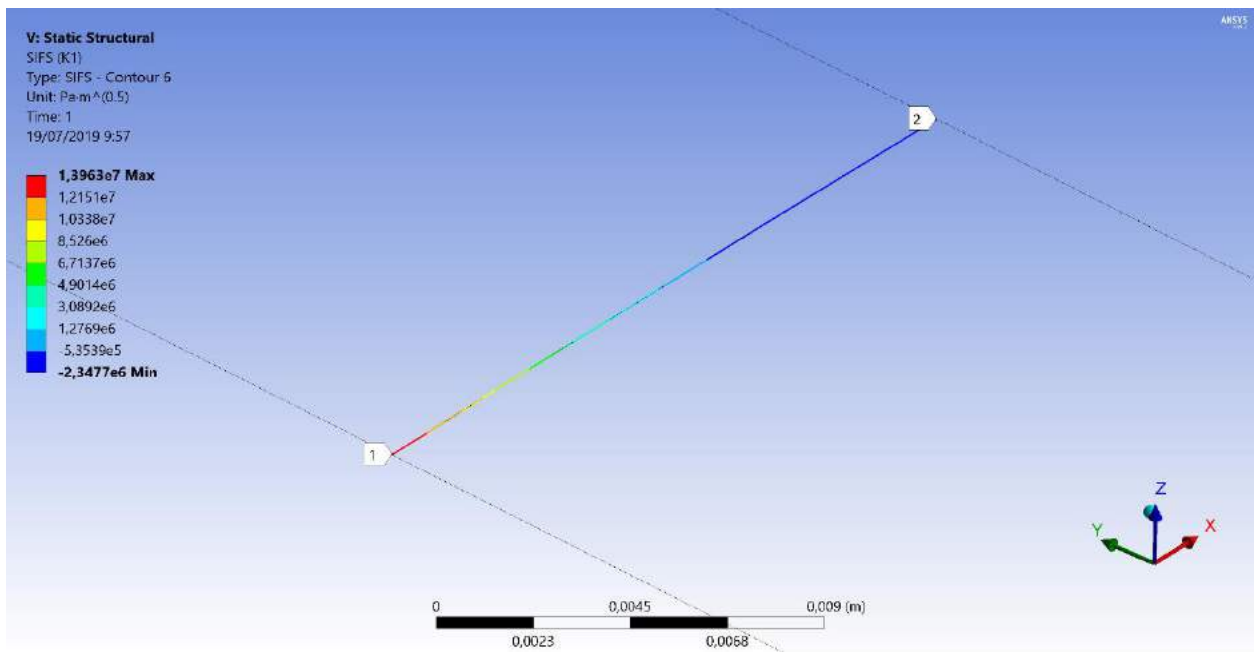
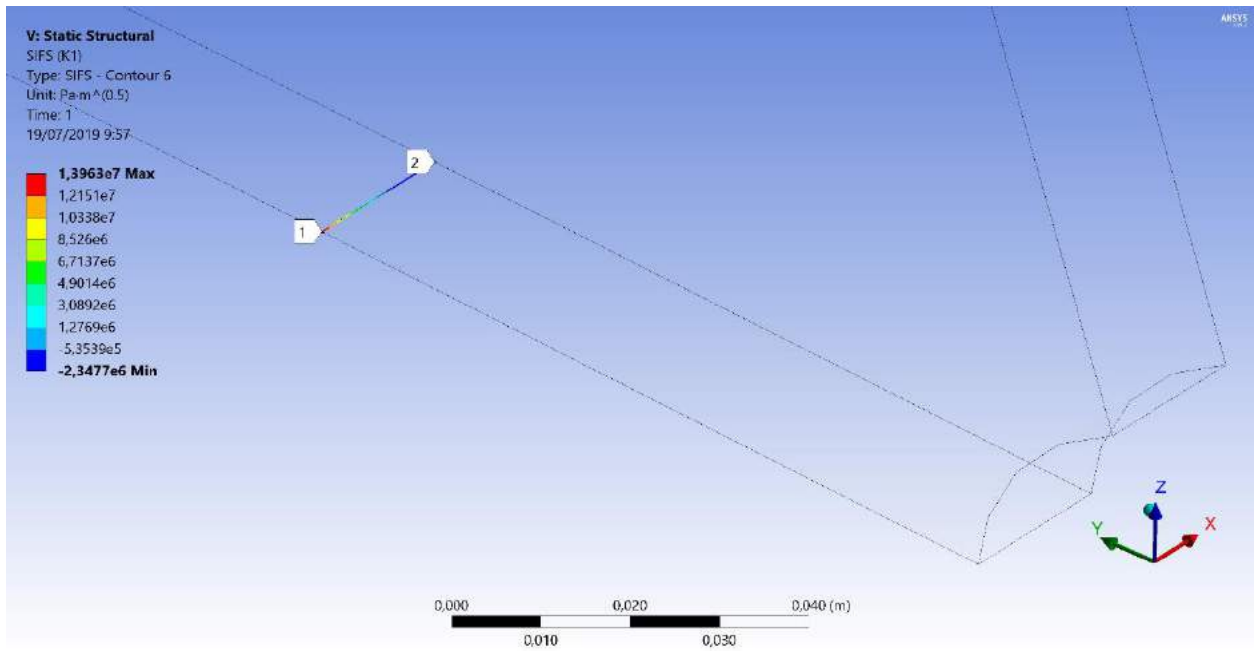
Pre-Meshed Crack



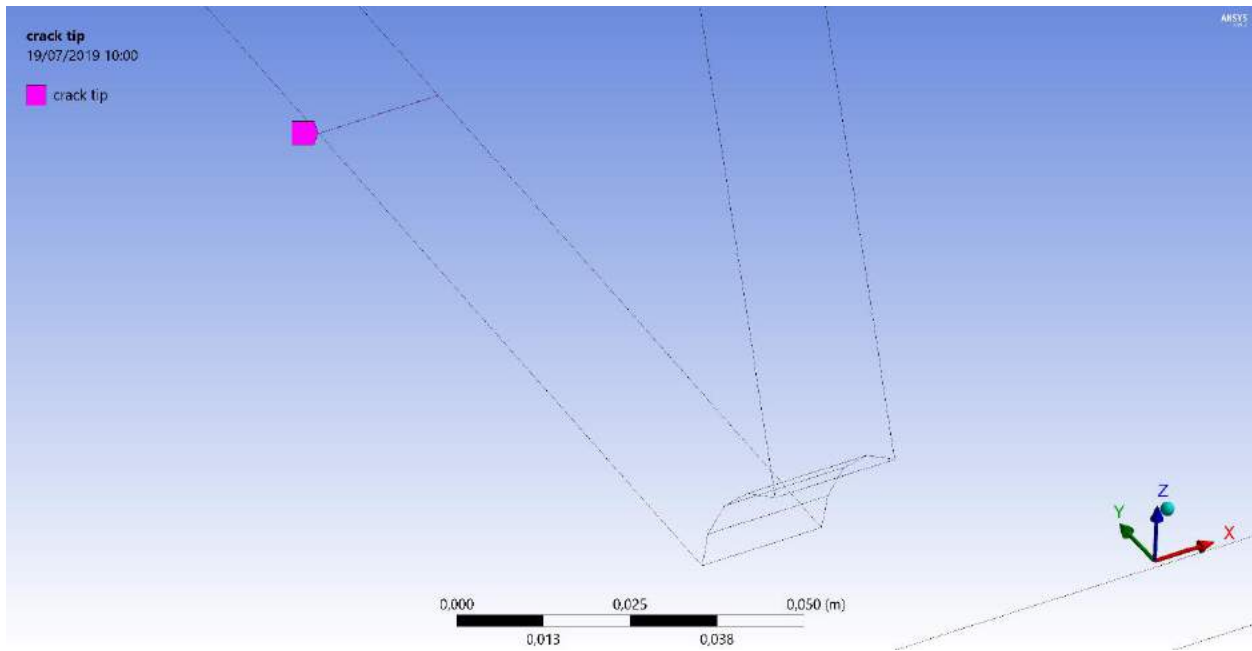
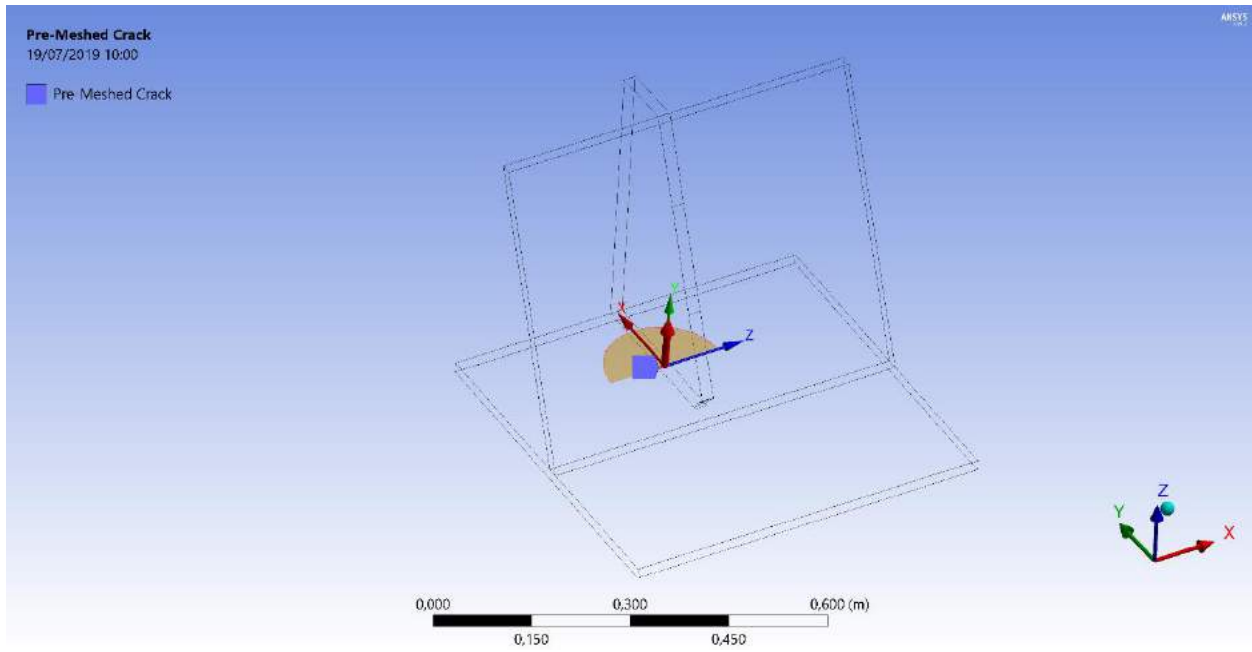
crack tip
19/07/2019 9:57

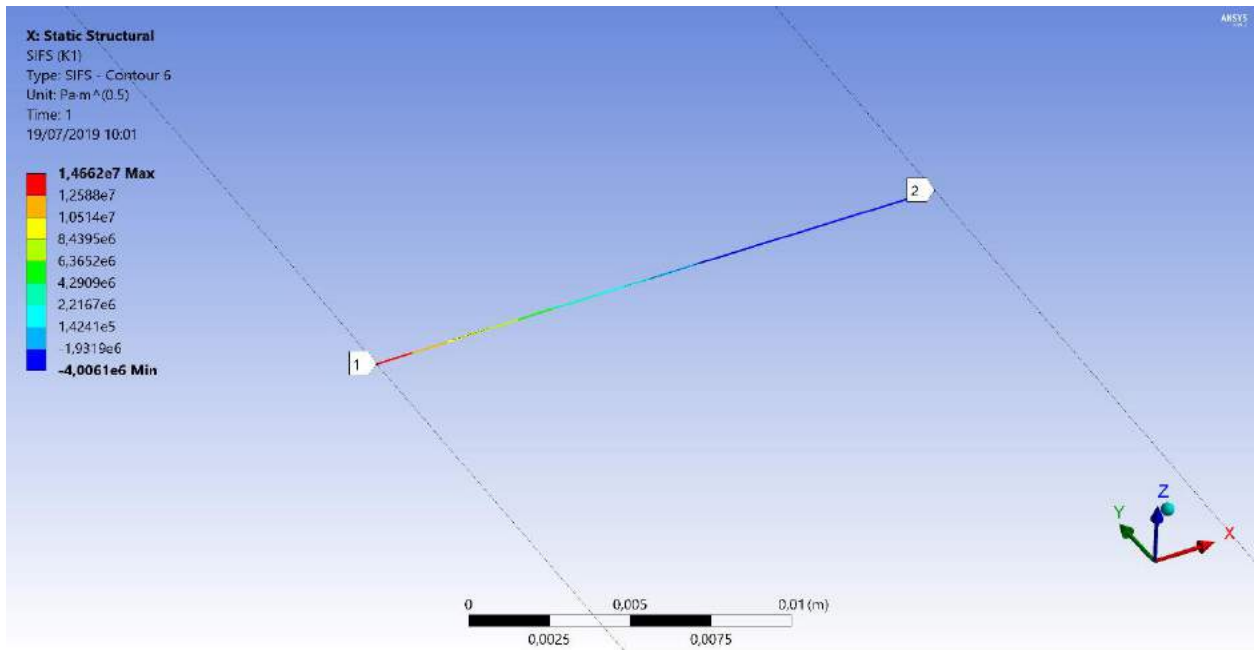
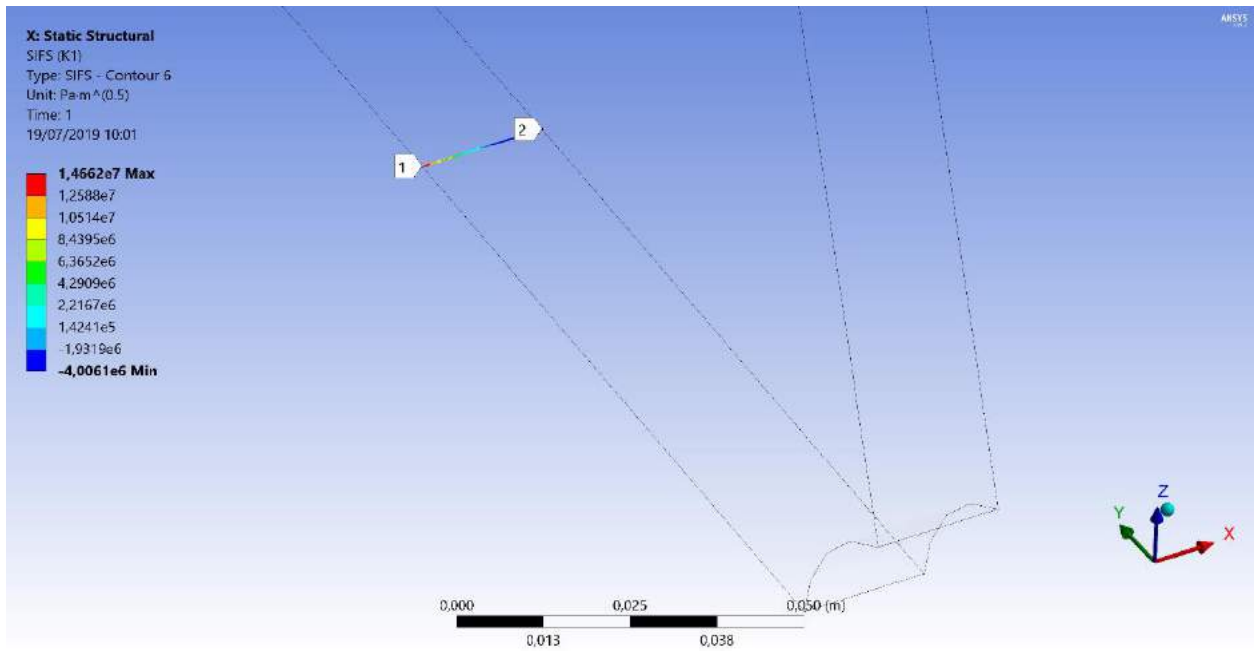
crack tip



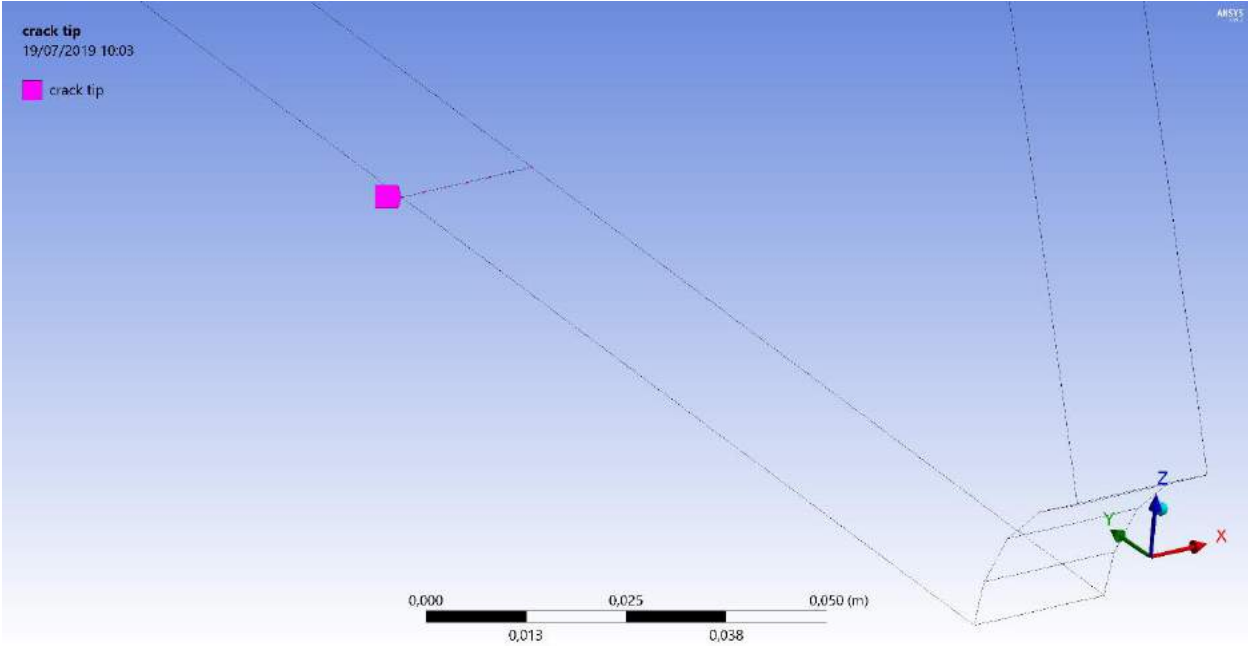
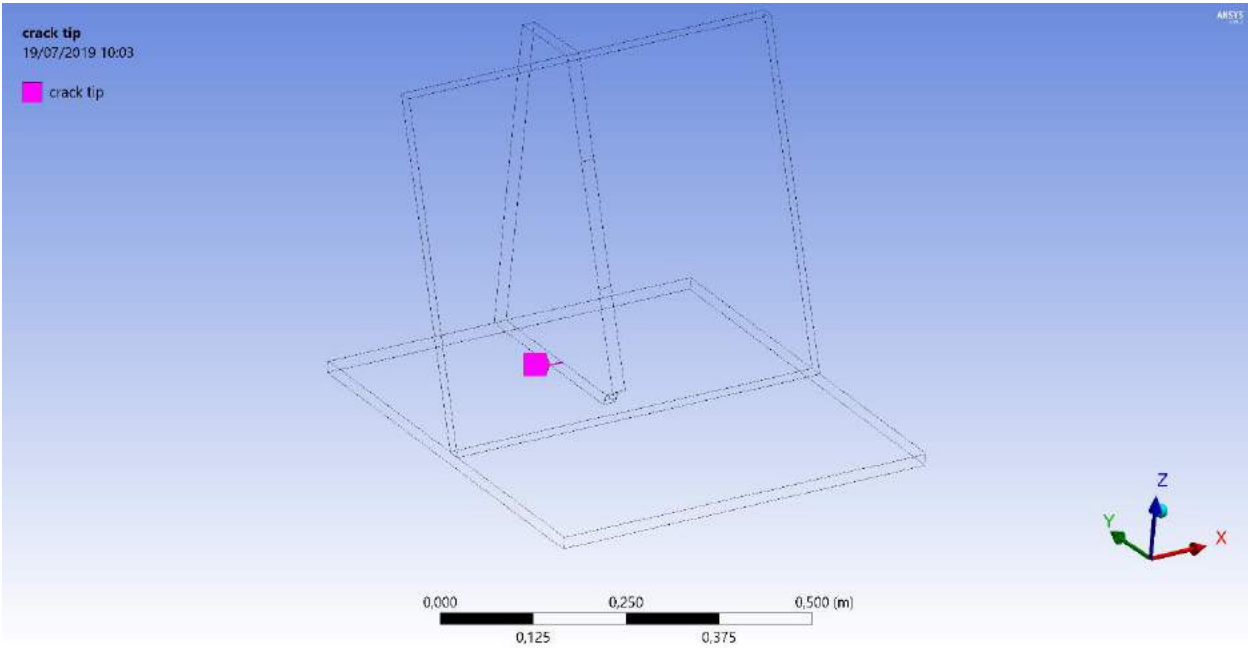


Retak 102,24 - 116,78





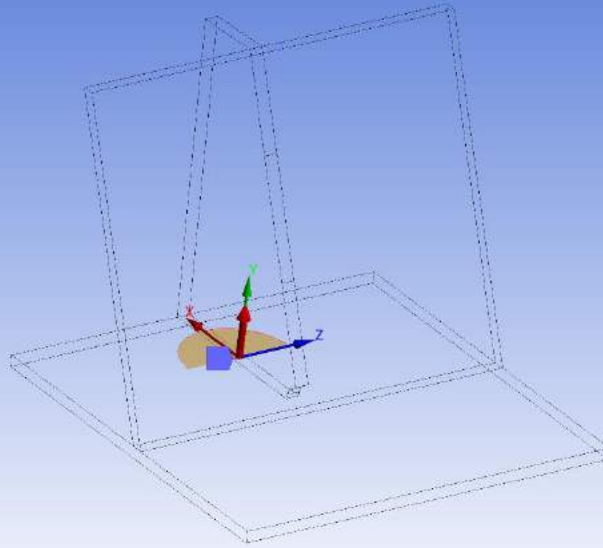
Retak 116,78 - 131,31



Pre-Meshed Crack

19/07/2019 10:03

Pre-Meshed Crack



Z: Static Structural

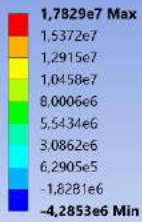
SIFS (K1)

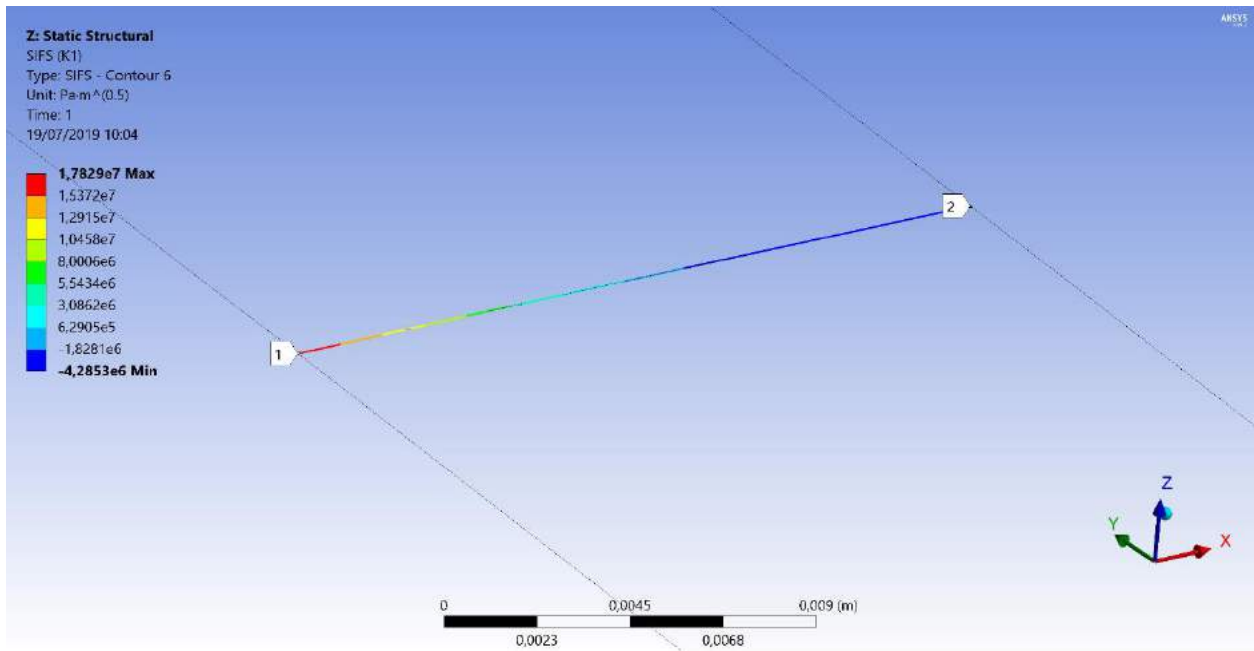
Type: SIFS - Contour 6

Unit: Pa·m^(0.5)

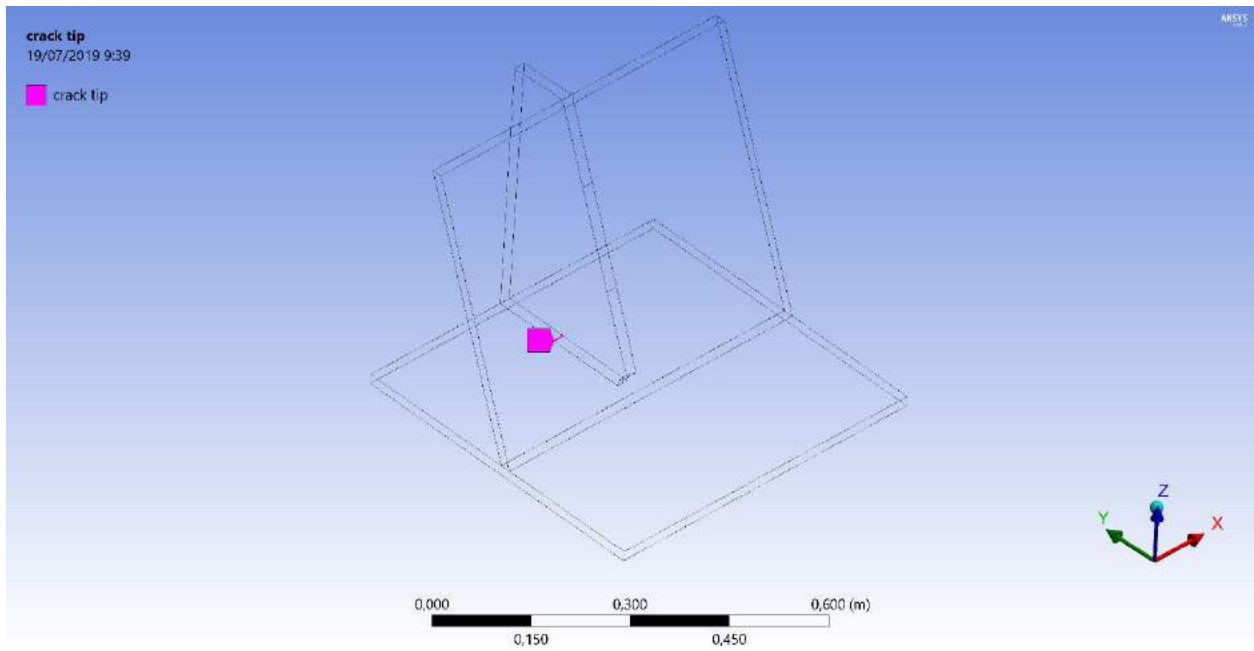
Time: 1

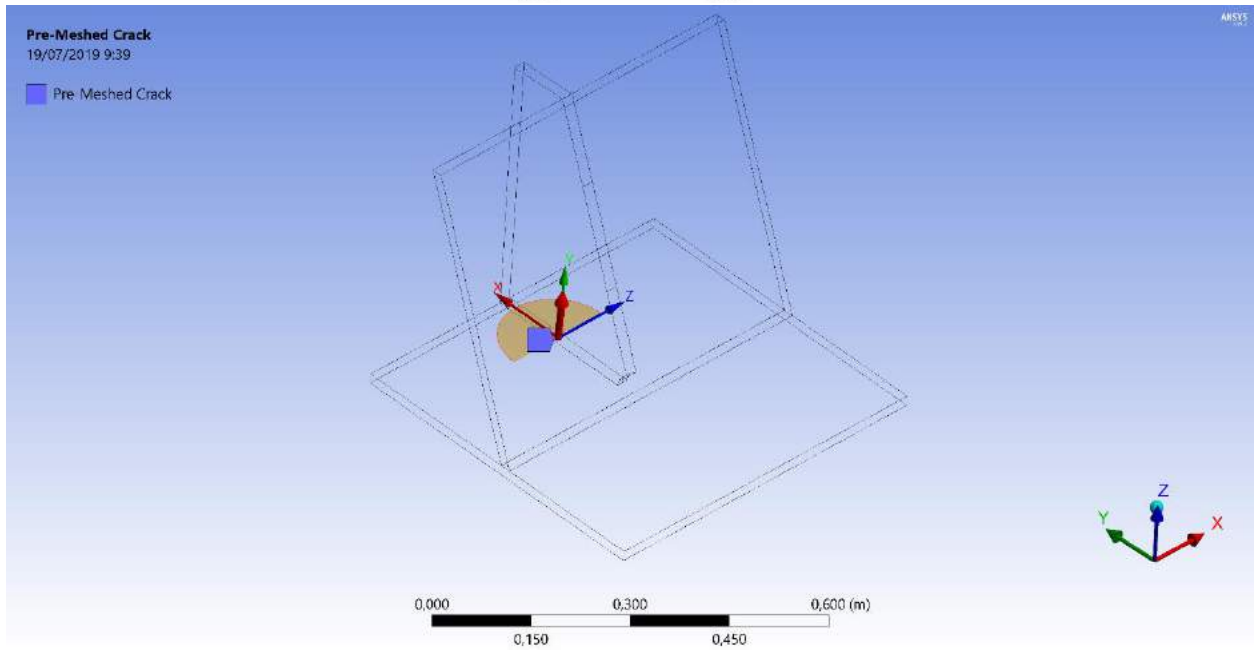
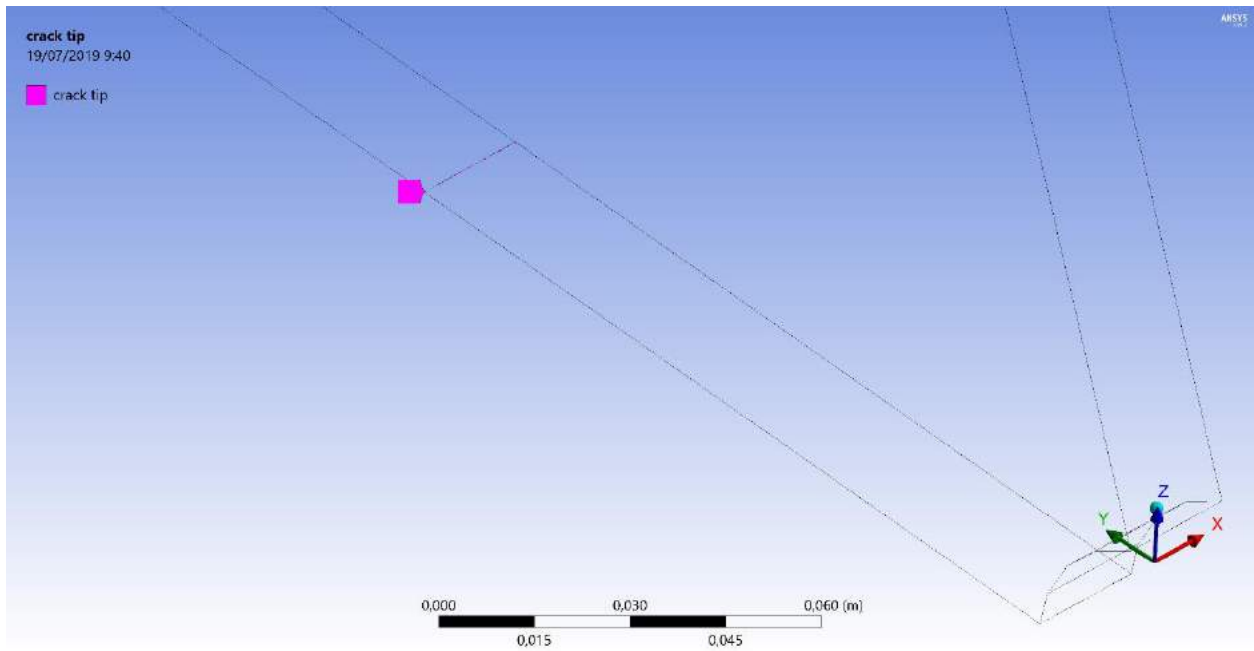
19/07/2019 10:04

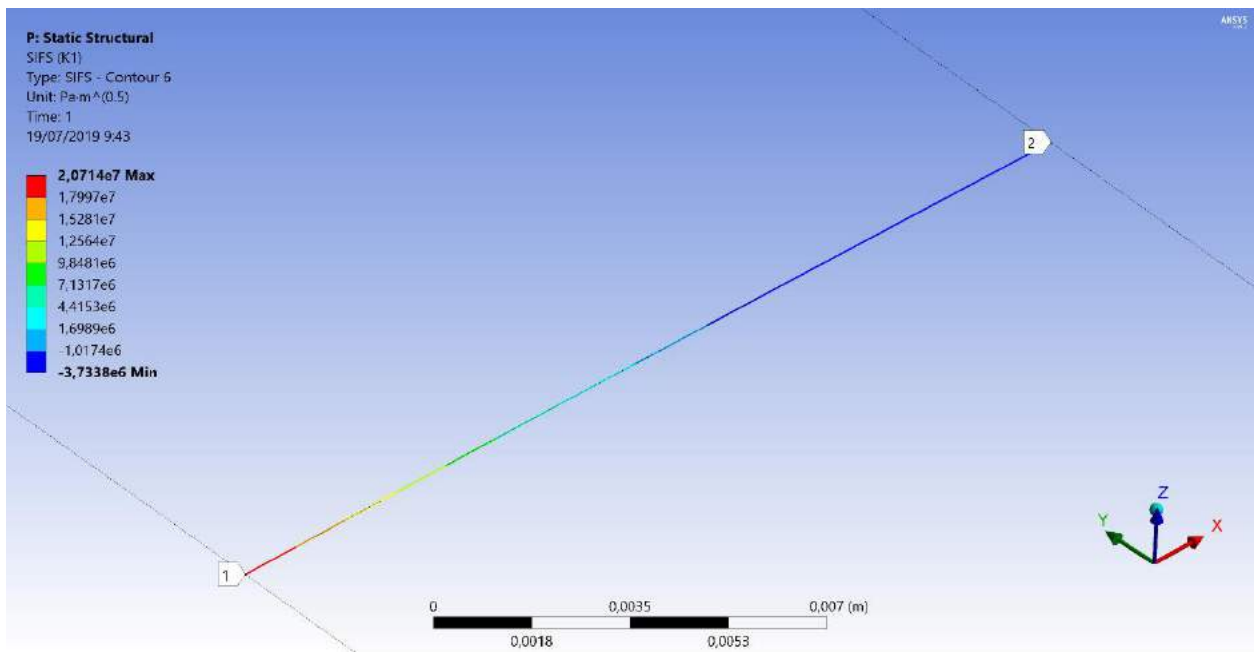
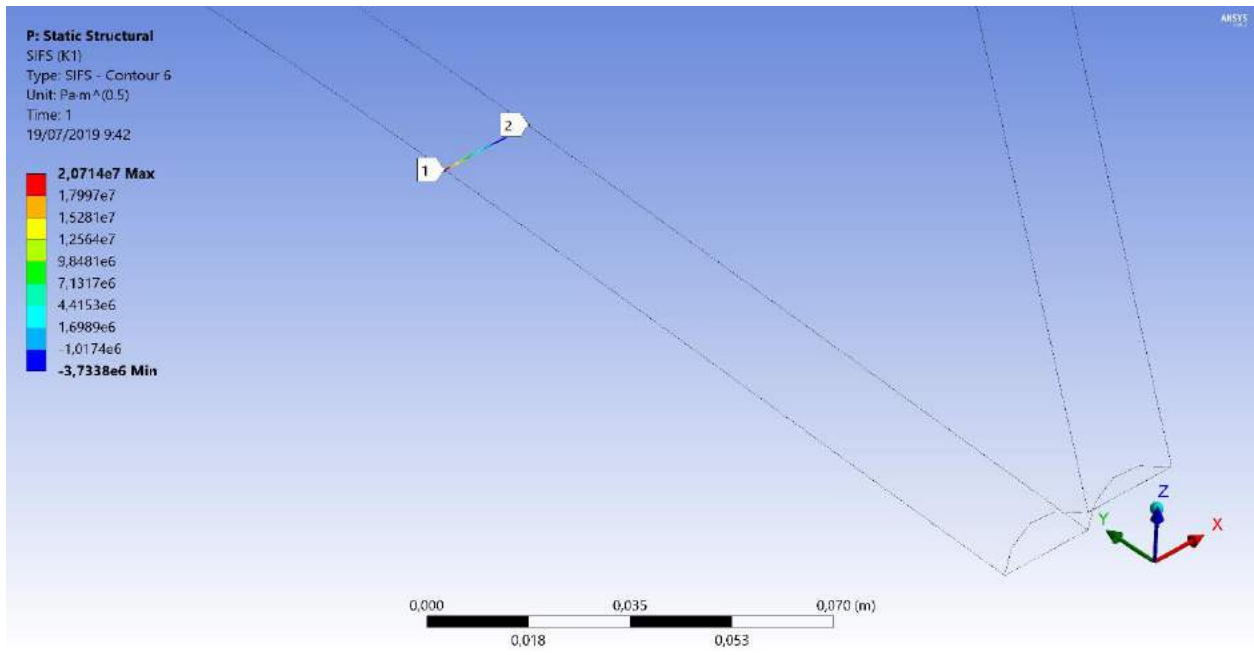




Retak 131,31 – 145,84







LAMPIRAN G
PERHITUNGAN PERAMBATAN RETAK DAN UMUR
KELELAHAN

Penentuan Kedalaman Kritis

$$a_{cr} = \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{max}\sqrt{\pi}} \right)^2$$

Dimana :

K_{IC} : fracture toughness

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{B}{2,5}} \sigma_{ys}$$

σ_{max} : tegangan normal maksimum

σ_{ys} : tegangan yield

B : lebar

Diketahui :

B : 0,02 m

σ_{ys} : 250 MPa

σ_{max} : 29,489 MPa

Jawab :

K_{IC} : 22,36068 MPa√m

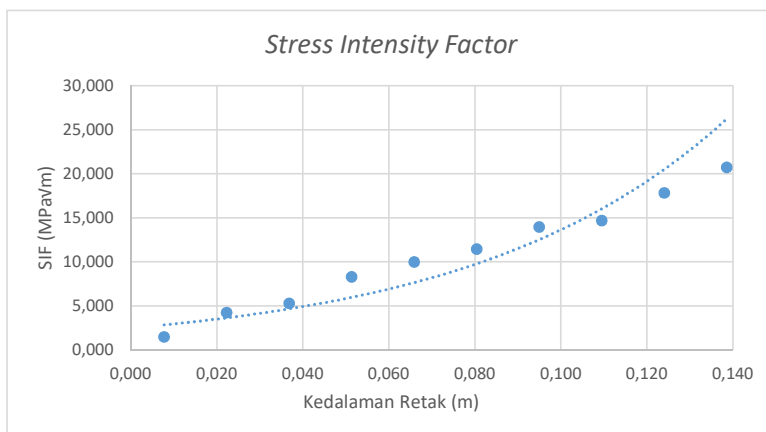
a_{cr} : 0,146 m

145,84 mm

Penentuan Stress Intensity Factor (SIF)

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left[\sqrt{\sec \frac{\pi a}{2W}} \right] \left[\left(1 - 0.025 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 0.06 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right) \right]$$

No.	a (mm)	af (mm)	ΔK1 (MPa√m)
1	0,50	15,03	1,469
2	15,03	29,57	4,241
3	29,57	44,10	5,297
4	44,10	58,64	8,299
5	58,64	73,17	9,977
6	73,17	87,71	11,438
7	87,71	102,24	13,963
8	102,24	116,78	14,662
9	116,78	131,31	17,829
10	131,31	145,84	20,714



Perhitungan Perambatan Retak

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad \Delta N = \frac{\Delta a}{\left[\frac{da}{dN}\right]} \quad N = \Delta N + N_0$$

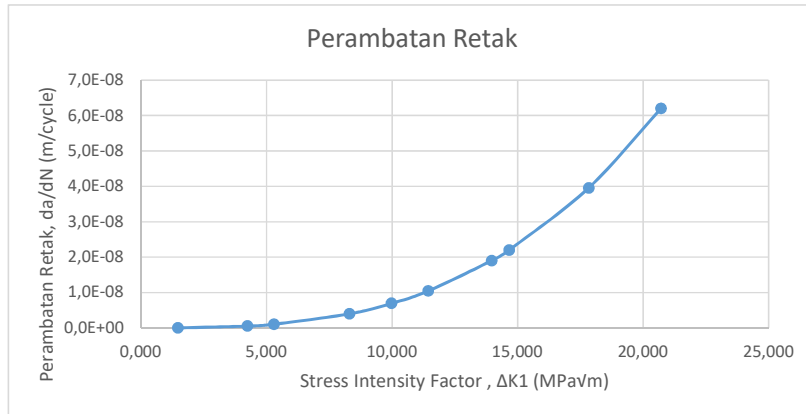
Diketahui :

C : 6,98E-12

m : 3

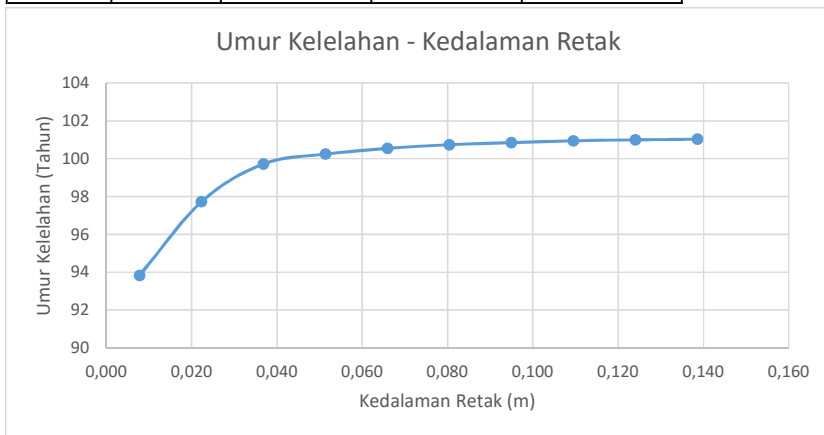
Tp : 4,5

No.	a (mm)	af (mm)	Δa (m)	ΔK1 (MPa√m)	da/dN (m/cycle)	ΔN	N	F
1	0,50	15,03	0,015	1,469	2,2E-11	6,6E+08	6,6E+08	2,96E+09
2	15,03	29,57	0,015	4,241	5,3E-10	2,7E+07	6,8E+08	3,08E+09
3	29,57	44,10	0,015	5,297	1,0E-09	1,4E+07	7,0E+08	3,14E+09
4	44,10	58,64	0,015	8,299	4,0E-09	3,6E+06	7,0E+08	3,16E+09
5	58,64	73,17	0,015	9,977	6,9E-09	2,1E+06	7,0E+08	3,17E+09
6	73,17	87,71	0,015	11,438	1,0E-08	1,4E+06	7,1E+08	3,18E+09
7	87,71	102,24	0,015	13,963	1,9E-08	7,6E+05	7,1E+08	3,18E+09
8	102,24	116,78	0,015	14,662	2,2E-08	6,6E+05	7,1E+08	3,18E+09
9	116,78	131,31	0,015	17,829	4,0E-08	3,7E+05	7,1E+08	3,18E+09
10	131,31	145,84	0,015	20,714	6,2E-08	2,3E+05	7,1E+08	3,19E+09
							Total Umur (tahun)	101,028



Perhitungan Perambatan Retak

No.	a (mm)	af (mm)	Tahun	% Tahun
1	0,50	15,03	93,827	92,872
2	15,03	29,57	97,722	96,727
3	29,57	44,10	99,721	98,706
4	44,10	58,64	100,241	99,221
5	58,64	73,17	100,541	99,517
6	73,17	87,71	100,739	99,714
7	87,71	102,24	100,848	99,822
8	102,24	116,78	100,942	99,915
9	116,78	131,31	100,995	99,967
10	131,31	145,84	101,028	100



Cumulative Fatigue Damage

$$D = \frac{V_o T_d}{\bar{a}} q^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right) \leq \eta$$

Dimana :

$$V_o = \frac{1}{4 \cdot \log_{10}(L)} = 0,183590284$$

$$\bar{a} = 5,50E+10$$

$$m = 3$$

$$T_d = \text{design life}$$

$$= 6,31,E+08$$

$$\sigma_{\max} = 29,489$$

$$\sigma_{\min} = 4$$

$$\Delta\sigma = 25,489$$

$$\Delta\sigma_{\text{hotspot}} = 41,03729$$

$$h = 1,25$$

$$\Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right) = 2,98$$

$$q = \frac{\Delta\sigma_o}{(\ln n_0)^{1/h}} = 3$$

$$D = 0,132$$

$$151,172 \text{ tahun}$$

BIODATA PENULIS



Tyo Dwiki Prakoso, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Bogor pada 19 Nopember 1996 silam, Penulis merupakan anak kedua dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Pertiwi Bogor, kemudian melanjutkan ke SDS Angkasa IX Halim Jakarta, SMPN 81 Jakarta dan SMAN 48 Jakarta. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2015 melalui jalur SNMPTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil bidang studi untuk Tugas Akhir yaitu Konstruksi dan Kekuatan Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi *staff* BSO Hydromodelling HIMATEKPAL 2016/2017, *staff* RnD INDOCOR ITS SC 2016/2017, anggota divisi mekanik Barunastra ITS Robo boat Team dan Ketua BSO Hydromodelling HIMATEKPAL 2017/2018. Selan itu, Penulis juga aktif mengikuti lomba RC boat dan Robo boat dalam lingkup nasional dan internasional.

Email: tyo15@mhs.na.its.ac.id, tyodwikip@gmail.com