



TUGAS AKHIR - MN 234801

**ANALISIS UMUR LELAH STRUKTUR *TOWING HOOK*
PADA *TUGBOAT* MENGGUNAKAN METODE *FRACTURE*
*MECHANICS***

**Hana Bahesti Rachima
NRP 5018211026**

**Dosen Pembimbing
Ir. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2025**



TUGAS AKHIR - MN 234801

ANALISIS UMUR LELAH STRUKTUR *TOWING HOOK* PADA TUGBOAT MENGGUNAKAN METODE *FRACTURE* *MECHANICS*

**Hana Bahesti Rachima
NRP 5018211026**

**Dosen Pembimbing
Ir. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2025**



FINAL PROJECT - MN 234801

FATIGUE ANALYSIS OF TUGBOAT TOWING HOOK STRUCTURE USING FRACTURE MECHANICS METHOD

Hana Bahesti Rachima
NRP 5018211026

Supervisor

Ir. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.

Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T.

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS UMUR LELAH STRUKTUR *TOWING HOOK* PADA *TUGBOAT* MENGGUNAKAN METODE *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:

HANA BAHESTI RACHIMA
NRP 5018211026

Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing II



Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T.
NIP 19960803 202406 1 001

Dosen Pembimbing I



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

Mengetahui,

Kepala Departemen Teknik Perkapalan



Ir. Februh Putranto, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19900513 201404 1 001

SURABAYA, 28 JULI 2025

LEMBAR REVISI

ANALISIS UMUR LELAH STRUKTUR *TOWING HOOK* PADA *TUGBOAT* MENGGUNAKAN METODE *FRACTURE* *MECHANICS*

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 28 Juli 2025

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

Oleh:

HANA BAHESTI RACHIMA
NRP 5018211026

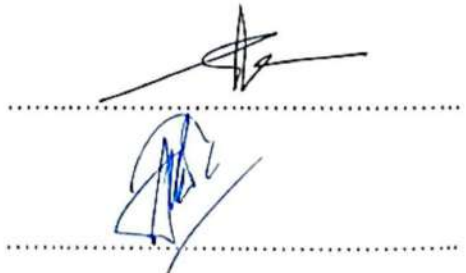
Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Dr. Ir. Hasanudin, S.T., M.T.
2. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D.
3. Dr. Ir. Dony Setyawan, S.T., M.Eng. IPU



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Ir. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
2. Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T.



SURABAYA, 28 JULI 2025

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Hana Bahesti Rachima / 5018211026
Departemen : Teknik Perkapalan
Dosen Pembimbing / NIP : Ir. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T./
19730404 199702 1 001
Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T./
19960803 202406 1 001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Umur Lelah Struktur *Towing Hook* Pada *Tugboat* Menggunakan Metode *Fracture Mechanics*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 28 Juli 2025

Mengetahui,

Mahasiswa

Hana Bahesti Rachima



Dosen Pembimbing II


Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T.
NIP 19960803 202406 1 001

Dosen Pembimbing I


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

HALAMAN PERUNTUKAN

Dipersembahkan kepada orang tua saya Bapak Saifuddin dan Ibu Dianggu Manggrayani, kedua adik saya Virgi Aulin dan Jovita Rizki Ananda, serta keluarga besar di Lombok atas segala dukungan dan doanya dari awal perkuliahan hingga selesainya Tugas Akhir ini.

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. Kedua orang tua serta kedua adik penulis yang senantiasa memberikan dukungan dan motivasi untuk dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini;
2. Bapak Ir. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T. dan Bapak Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
3. Bapak Prof. Ir. Raden Sjarief Widjaja, Ph.D. selaku Dosen Wali atas bimbingan selama perkuliahan di Departemen Teknik Perkapalan FTK-ITS;
4. Bapak Dr. Ir. Hasanudin, S.T., M.T., Bapak Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D., dan Bapak Dr. Ir. Dony Setyawan, S.T., M.Eng. IPU selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan sarannya untuk perbaikan Laporan Tugas Akhir ini;
5. Mas Richard P59, Mas Reyhandi P60, Mas Fathur P59, Mas Alif, dan Yogi yang telah memberikan banyak pertolongan dan ilmu saat pengerjaan Tugas Akhir ini;
6. Ahmad Fatih Arkan Hanif yang telah memberikan penulis bantuan dan dukungan sepanjang pengerjaan Tugas Akhir ini.
7. P-61 PANZERSCHIFFE yang telah berjuang bersama penulis.

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, 28 Juli 2025

Hana Bahesti Rachima

ANALISIS UMUR LELAH STRUKTUR *TOWING HOOK* PADA *TUGBOAT* MENGGUNAKAN METODE *FRACTURE MECHANICS*

Nama Mahasiswa : Hana Bahesti Rachima
NRP : 5018211026
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
2. Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T.

ABSTRAK

Struktur *towing hook* pada *tugboat* merupakan komponen penting yang menerima beban tarik secara berulang selama operasi penarikan *barge*, sehingga sangat rentan terhadap kegagalan akibat kelelahan (*fatigue*). Dalam penelitian ini, dilakukan analisis umur lelah struktur *towing hook* menggunakan pendekatan *fracture mechanics* untuk mengevaluasi potensi kegagalan akibat perambatan retak. Pemodelan dilakukan secara global pada struktur utama kapal dari *frame* 10 hingga *frame* 25 untuk memperoleh distribusi tegangan akibat tiga variasi kondisi beban ekstrem hasil simulasi ANSYS AQWA, yaitu beban sebesar 227.027 N, 164.014 N, dan 236.847 N. Hasil tegangan global digunakan sebagai acuan untuk pemodelan lokal dengan metode *submodelling* pada kupingan *towing hook* yang mengalami konsentrasi tegangan tertinggi. Retak dimodelkan secara *arbitrary* pada ujung bawah kupingan dengan retak awal sepanjang 0,5 mm. Analisis dilakukan dengan menghitung nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) pada berbagai kedalaman retak dan menghitung laju perambatan retak menggunakan persamaan Paris, dengan konstanta material *structural steel* ASTM A36. Berdasarkan hasil analisis, umur lelah struktur *towing hook* pada kondisi beban 227.027 N dan ketebalan kupingan 20 mm, 22 mm dan 24 mm secara berturut-turut sebesar 37,27 tahun, 62 tahun, dan 126,88 tahun. Pada kondisi beban 164.014 N pada ketebalan 20 mm, 22 mm dan 24 mm secara berturut-turut adalah 43,06 tahun, 69,69 tahun, dan 336,36 tahun. Pada kondisi beban 236.847 N pada ketebalan 20 mm, 22 mm dan 24 mm secara berturut-turut sebesar 19,05 tahun, 29,31 tahun, dan 48,73 tahun. Dan pada koondisi pembebanan 241.584 N umur lelah pada ketebalan 20 mm, 22 mm dan 24 mm berturut-turut sebesar 13,42 tahun, 26,35 tahun dan 36,56 tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur berpotensi mengalami kegagalan dalam waktu singkat jika tidak dilakukan inspeksi rutin dan perawatan yang memadai. Penelitian ini memberikan informasi penting bagi perencanaan umur layanan *towing hook* dan pengambilan keputusan teknis dalam meningkatkan keselamatan operasional kapal tunda.

Kata kunci: *fracture mechanics*, kupingan, struktur, *towing hook*, umur lelah.

FATIGUE ANALYSIS OF TUGBOAT TOWING HOOK STRUCTURE USING FRACTURE MECHANICS METHOD

Author : Hana Bahesti Rachima
Student Number : 5018211026
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology
Supervisor : 1. Ir. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
2. Ir. Rizky Chandra Ariesta, S.T., M.T.

ABSTRACT

The towing hook structure on a tugboat is a vital component that experiences cyclic tensile loading during barge towing operations, making it particularly vulnerable to fatigue failure. This study conducts a fatigue life assessment of the towing hook structure through a fracture mechanics-based approach to evaluate its failure risk due to crack propagation. A global finite element model of the ship's primary structure, extending from frame 10 to frame 25, was developed to determine the stress distribution under three critical loading scenarios obtained from ANSYS AQWA simulations, with applied loads of 227,027 N, 164,014 N, and 236,847 N. The resulting global stress field was subsequently applied as a boundary condition in a local submodeling analysis focused on the towing hook lug, identified as the region with the highest stress concentration. An arbitrary crack was introduced at the lower edge of the lug with an initial length of 0.5 mm. The analysis included the calculation of the Stress Intensity Factor (SIF) at various crack depths and the prediction of crack growth rates using Paris' law, based on material constants for ASTM A36 structural steel. The estimated fatigue life under the 227,027 N loading scenario for lug thicknesses of 20 mm, 22 mm, and 24 mm was 37.27 years, 62 years, and 126.88 years, respectively. For the 164,014 N load, the corresponding fatigue lives were 43.06 years, 69.69 years, and 336.36 years, for the 236,847 N load, they were 19.05 years, 29.31 years, and 48.73 years, while for 241,584 N load, they were 13.42 years, 26.35 years, and 36.56 years. These results suggest that premature failure may occur if routine inspection and maintenance are not adequately implemented. This study offers valuable insights for predicting the service life of towing hooks and informs engineering decisions aimed at improving the operational safety of tugboats.

Keywords: fracture mechanics, lug, structure, towing hook, fatigue life.

DAFTAR ISI

LEMBAR REVISI	vii
HALAMAN PERUNTUKAN	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
ABSTRAK.....	x
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR SIMBOL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	19
1.1. Latar Belakang.....	19
1.2. Perumusan Masalah	20
1.3. Tujuan	20
1.4. Batasan Masalah	20
1.5. Manfaat.....	20
1.6. Hipotesis.....	21
BAB 2 STUDI LITERATUR	23
2.1. Dasar Teori	23
2.1.1. <i>Tugboat</i>	23
2.1.2. <i>Towing Hook</i>	23
2.1.3. Tegangan.....	24
2.1.4. Tegangan Izin Maksimum Menurut BKI.....	25
2.1.5. <i>Factor of Safety</i>	25
2.1.6. <i>Fatigue</i>	25
2.1.7. Deformasi.....	26
2.1.8. <i>Fracture Mechanics</i>	27
2.1.9. <i>Stress Intensity Factor</i>	28
2.1.10. Laju Pertumbuhan Retak.....	28
2.1.11. Perhitungan Umur Lelah.....	29
2.1.12. Metode Elemen Hingga.....	29
2.2. Tinjauan Pustaka.....	30
2.2.1. Analisis Kelelahan Struktur	30
2.2.2. Analisa Kelelahan Berdasarkan <i>Fracture Mechanics</i>	31
BAB 3 METODOLOGI	33
3.1. Bagan Alir	33
3.2. Studi Literatur.....	34
3.3. Pengumpulan Data	34
3.4. Pemodelan Global.....	36
3.5. Analisis Tegangan Global	39
3.6. Pemodelan Lokal	39
3.6.1. <i>Submodelling 1</i>	40
3.6.2. <i>Submodelling 2</i>	42
3.7. Analisis Tegangan Lokal.....	44

3.8. Pemodelan <i>Crack</i>	44
3.9. Analisis <i>Crack</i>	47
3.10. Perhitungan Umur Lelah	48
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1. Hasil Pembebanan dari ANSYS AQWA	51
4.2. Analisis Tegangan Global	52
4.2.1. Analisis Tegangan Global Variasi Pembebanan 1	53
4.2.2. Analisis Tegangan Global Variasi Pembebanan 2	53
4.2.3. Analisis Tegangan Global Variasi Pembebanan 3	54
4.2.4. Analisis Tegangan Global Variasi Pembebanan 4	55
4.2.5. Konvergensi <i>Mesh</i> Model Global.....	56
4.3. Analisis Tegangan Lokal	57
4.3.1. Analisis Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 1	57
4.3.2. Analisis Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 2	58
4.3.3. Analisis Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 3	59
4.3.4. Analisis Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 4	60
4.4. Tegangan Izin Menurut <i>Rules</i> BKI	60
4.5. Analisis Perambatan Retak	61
4.5.1. Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 1	62
4.5.2. Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 2	63
4.5.3. Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 3	65
4.5.4. Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 4	66
4.5.5. Konvergensi SIF	68
4.6. Perhitungan Laju Perambatan Retak.....	69
4.6.1. Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 1	69
4.6.2. Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 2	70
4.6.3. Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 3	70
4.6.4. Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 3	71
4.7. Perhitungan <i>Fatigue</i>	71
4.7.1. Kondisi Pembebanan 1	72
4.7.2. Kondisi Pembebanan 2	73
4.7.3. Kondisi Pembebanan 3	75
4.7.4. Kondisi Pembebanan 4	76
4.7.5. Rekapitulasi Perhitungan <i>Fatigue</i>	77
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	79
5.1. Kesimpulan.....	79
5.2. Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN A <i>General Arrangement Tugboat</i> dan Struktur <i>Towing Hook</i>	
LAMPIRAN B Perhitungan <i>Permissible</i> Menurut <i>BKI Rules</i>	
LAMPIRAN C Hasil Analisis Tegangan	
LAMPIRAN D Hasil SIF	
LAMPIRAN E Perhitungan <i>Fatigue</i>	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Tugboat</i>	23
Gambar 2. 2 <i>Towing Hook</i>	24
Gambar 2. 3 Proses dari <i>Crack Free Hingga Failure</i>	26
Gambar 2. 4 Mode Deformasi Retak	26
Gambar 2. 5 <i>Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)</i>	27
Gambar 3. 1 Bagan Alir.....	33
Gambar 3. 2 <i>General Arrangement Tugboat</i>	35
Gambar 3. 3 <i>Drawing Struktur Towing Hook</i>	35
Gambar 3. 4 Pemodelan Global di <i>software AutoCad</i>	36
Gambar 3. 5 Pemodelan Global di <i>software ANSYS</i>	36
Gambar 3. 6 Pendefinisian Material Geometri	37
Gambar 3. 7 <i>Mesh Model Global</i>	37
Gambar 3. 8 <i>Fixed Support Model Global</i>	38
Gambar 3. 9 <i>Displacement Model Global</i>	38
Gambar 3. 10 Peng-input-an <i>Remote Force Model Global</i>	39
Gambar 3. 11 Meng-input <i>Engineering Data dan Geometry</i> ke Submodel 1	40
Gambar 3. 12 Geometri Submodel 1.....	40
Gambar 3. 13 Meng-input <i>Solution</i> ke Submodel 1.....	41
Gambar 3. 14 Input <i>Boundary Constraint</i> Submodel 1.....	41
Gambar 3. 15 Lokasi Penempatan <i>Boundary Constraint</i> Submodel 1	41
Gambar 3. 16 Meng-input <i>Engineering Data dan Solution</i> ke Submodel 2.....	42
Gambar 3. 17 Geometri Model Lokal	42
Gambar 3. 18 Model Lokal Solid	43
Gambar 3. 19 Letak <i>Boundary Constrain</i> Model Lokal.....	43
Gambar 3. 20 <i>Mesh Model Lokal</i>	44
Gambar 3. 21 <i>Crack Surface</i>	45
Gambar 3. 22 Koordinat <i>Crack</i>	45
Gambar 3. 23 <i>Meshing Crack</i>	46
Gambar 3. 24 <i>Arbitrary Crack</i>	46
Gambar 3. 25 Tahapan Perambatan Retak	47
Gambar 3. 26 Grafik <i>Cable Force</i> dalam Setiap Frekuensi	48
Gambar 4. 1 Penarikan <i>Barge</i> oleh <i>Tugboat</i> Pembebanan 1	51
Gambar 4. 2 Penarikan <i>Barge</i> oleh <i>Tugboat</i> Pembebanan 2.....	51
Gambar 4. 3 Penarikan <i>Barge</i> oleh <i>Tugboat</i> Pembebanan 3.....	52
Gambar 4. 4 Penarikan <i>Barge</i> oleh <i>Tugboat</i> Pembebanan 4.....	52
Gambar 4. 5 Tegangan Global Variasi Pembebanan 1	53
Gambar 4. 6 Tegangan Global Variasi Pembebanan 2	54
Gambar 4. 7 Tegangan Global Variasi Pembebanan 3	55
Gambar 4. 8 Tegangan Global Variasi Pembebanan 4	56
Gambar 4. 9 Grafik Konvergensi <i>Mesh Model Global</i>	57
Gambar 4. 10 Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 1.....	57
Gambar 4. 11 Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 2.....	58
Gambar 4. 12 Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 3.....	59

Gambar 4. 13 Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 4.....	60
Gambar 4. 14 Grafik SIF Pembebanan 1 Ketebalan 20 mm	62
Gambar 4. 15 Grafik SIF Pembebanan 1 Ketebalan 22 mm	63
Gambar 4. 16 Grafik SIF Pembebanan 1 Ketebalan 24 mm	63
Gambar 4. 17 Grafik SIF Pembebanan 2 Ketebalan 20 mm	64
Gambar 4. 18 Grafik SIF Pembebanan 2 Ketebalan 22 mm	64
Gambar 4. 19 Grafik SIF Pembebanan 2 Ketebalan 24 mm	65
Gambar 4. 20 Grafik SIF Pembebanan 3 Ketebalan 20 mm	65
Gambar 4. 21 Grafik SIF Pembebanan 3 Ketebalan 22 mm	66
Gambar 4. 22 Grafik SIF Pembebanan 3 Ketebalan 24 mm	66
Gambar 4. 23 Grafik SIF Pembebanan 4 Ketebalan 20 mm	67
Gambar 4. 24 Grafik SIF Pembebanan 4 Ketebalan 22 mm	67
Gambar 4. 25 Grafik SIF Pembebanan 4 Ketebalan 24 mm	68
Gambar 4. 26 Grafik Konvergensi SIF	69
Gambar 4. 27 Grafik Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 1	70
Gambar 4. 28 Grafik Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 2.....	70
Gambar 4. 29 Grafik Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 3.....	71
Gambar 4. 30 Grafik Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 4.....	71
Gambar 4. 31 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 1 Ketebalan 20 mm	72
Gambar 4. 32 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 1 Ketebalan 22 mm	72
Gambar 4. 33 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 1 Ketebalan 24 mm	73
Gambar 4. 34 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 2 Ketebalan 20 mm	73
Gambar 4. 35 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 2 Ketebalan 22 mm	74
Gambar 4. 36 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 2 Ketebalan 24 mm	74
Gambar 4. 37 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 3 Ketebalan 20 mm	75
Gambar 4. 38 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 3 Ketebalan 22 mm	75
Gambar 4. 39 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 3 Ketebalan 24 mm	76
Gambar 4. 40 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 4 Ketebalan 20 mm	76
Gambar 4. 41 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 4 Ketebalan 22 mm	77
Gambar 4. 42 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 4 Ketebalan 24 mm	77
Gambar 4. 43 Grafik Perbandingan Umur Lelah Pada Setiap <i>Load Case</i>	78

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Permissible Stress</i> Menurut Rule BKI	25
Tabel 3. 1 Ukuran Utama <i>Tugboat</i>	34
Tabel 3. 2 Ukuran Utama <i>Barge</i>	34
Tabel 4. 1 Konvergensi <i>Mesh</i> Model Global.....	56
Tabel 4. 2 Tegangan Maksimum Kupingan <i>Towing Hook</i> Variasi Pembebanan 1	58
Tabel 4. 3 Tegangan Maksimum Kupingan <i>Towing Hook</i> Variasi Pembebanan 2	59
Tabel 4. 4 Tegangan Maksimum Kupingan <i>Towing Hook</i> Variasi Pembebanan 3	60
Tabel 4. 5 Tegangan Maksimum Kupingan <i>Towing Hook</i> Variasi Pembebanan 4.....	60
Tabel 4. 6 <i>Factor of Safety</i> Rules BKI Variasi Pembebanan 1.....	61
Tabel 4. 7 <i>Factor of Safety</i> Rules BKI Variasi Pembebanan 2.....	61
Tabel 4. 8 <i>Factor of Safety</i> Rules BKI Variasi Pembebanan 3.....	61
Tabel 4. 9 <i>Factor of Safety</i> Rules BKI Variasi Pembebanan 4.....	61
Tabel 4. 10 Konvergensi SIF	68
Tabel 4. 11 Umur Lelah pada Setiap Ketebalan pada Masing-Masing Pembebanan	78

DAFTAR SIMBOL

σ	: Tegangan nominal (MPa)
$\sigma_{\max}$	: Tegangan maksimum (MPa)
σ_{izin}	: Tegangan izin berdasarkan standar BKI (MPa)
ε	: Regangan
a	: Panjang retak (mm)
a_i	: Panjang retak awal (mm)
a_c	: Panjang retak kritis (mm)
a_{avg}	: Rata-rata panjang antar dua titik (mm)
Δa	: Pertambahan panjang retak (mm)
ΔK	: Rentang faktor intensitas tegangan ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)
K	: <i>Stress Intensity Factor</i> ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)
K_c	: Ketangguhan Fraktur (<i>fracture toughness</i>) ($\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$)
Y	: Faktor Geometri
da/dN	: Laju pertumbuhan retak per siklus
C, m	: Konstanta material dari hukum paris
N_f	: Umur lelah total (siklus)
ΔN	: Jumlah siklus pertumbuhan retak dari a_1 ke a_2
ΣN	: Total siklus perambatan retak
N_i	: Jumlah siklus untuk inisiasi retak awal
N_p	: Jumlah siklus untuk propagasi retak menjadi kritis
f	: jumlah siklus per tahun
F	: Gaya aksial atau gaya tarik (N)
A	: Luas penampang (mm^2 atau m^2)
FoS	: Faktor keamanan (Factor of Safety)
E	: Modulus Elastisitas (GPa atau MPa)
γ	: Regangan geser

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara maritim yang terkenal dengan ribuan pulau-pulau yang tersebar di seluruh wilayahnya. Dikutip dari data Kementerian Kelautan dan Perikanan menyebutkan bahwa jumlah pulau di seluruh nusantara sebanyak 17.408 pulau (Hidayah, Rosyid, & Dwito, 2016). Kehadiran pulau-pulau ini memerlukan sistem transportasi yang handal untuk menghubungkan mereka. Transportasi laut menjadi salah satu pilihan utama dalam hal tersebut. *Tugboat* menjadi salah satu alat transportasi laut yang penting dalam menjaga kelancaran transportasi barang di sekitar perairan Indonesia. Kapal tunda (*tugboat*) adalah kapal yang dapat digunakan untuk melakukan manuver atau pergerakan dan fungsi utama *tugboat* adalah untuk menarik atau mendorong kapal lainnya di pelabuhan, laut lepas atau melalui sungai.

Dalam menjalankan peran pentingnya, *tugboat* dilengkapi dengan berbagai perlengkapan khusus, salah satunya adalah *towing hook* atau pengait penarik. *Towing hook* merupakan alat yang memungkinkan kapal untuk mengaitkan tali penarik dengan kapal atau tongkang yang akan ditariknya. Kekuatan struktur *towing hook* krusial karena kegagalan *towing hook* dapat menyebabkan kecelakaan serius, bahkan kegagalan struktural pada kapal. Selama beroperasi, struktur *towing hook* mengalami beban dinamis yang dapat mengakibatkan kegagalan struktur seperti *fatigue*.

Fatigue atau kelelahan material merupakan fenomena kegagalan struktural yang terjadi akibat pembebanan berulang atau *cyclic loading* dalam jangka waktu tertentu, meskipun tegangan yang diberikan berada di bawah batas kekuatan tarik material. Menurut Bitty et al. (2015), *fatigue* dapat diartikan sebagai proses kerusakan progresif yang terjadi pada suatu material atau struktur setelah mengalami beban yang berulang kali dalam siklus yang konsisten maupun bervariasi. Untuk menganalisis fenomena *fatigue* secara akurat, salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM). Pendekatan ini memungkinkan pemodelan struktur secara numerik untuk memprediksi distribusi tegangan, deformasi, serta perilaku material di bawah beban siklik.

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan beban yang diterima oleh struktur *towing hook* yang berpotensi menimbulkan kelelahan struktur?
2. Bagaimana cara menentukan umur lelah pada struktur *towing hook*?
3. Berapakah umur lelah struktur *towing hook* pada setiap variasi kondisi beban operasional yang diberikan?

1.3. Tujuan

Tujuan dari penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakter beban yang diterima oleh struktur *towing hook* yang berpotensi menimbulkan kelelahan struktur;
2. Mengetahui cara menentukan umur lelah pada struktur *towing hook*;
3. Mengetahui umur lelah struktur *towing hook* pada setiap variasi kondisi beban operasional yang diberikan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini, antara lain:

1. Analisis umur lelah struktur dilakukan dengan simulasi menggunakan *software* elemen hingga (ANSYS);
2. Analisis umur lelah struktur menggunakan metode *Fracture Mechanics*;
3. Pemodelan global meliputi struktur *towing hook* dan *main deck* dari *frame* 10 hingga *frame* 25;
4. Variasi dilakukan pada beban yang didapatkan dari hasil simulasi AQWA (penelitian “Analisis Kekuatan Struktur *Towing Hook* pada *Tugboat* Menggunakan Metode Elemen Hingga” oleh Ahmad Fatih Arkan Hanif NRP 5018211012) dan tebal kupingan *towing hook*;
5. Pengelasan tidak dimodelkan; dan
6. Perhitungan umur lelah tidak dipengaruhi oleh kondisi lingkungan.

1.5. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, antara lain:

1. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai panduan untuk mengetahui umur kelelahan struktur *towing hook* pada *tugboat*, sehingga dapat membantu dalam merencanakan pemeliharaan dan perbaikan yang lebih efektif.

2. Penelitian ini dapat membantu industri perkapalan dalam meningkatkan keselamatan operasional dan efisiensi biaya melalui pemahaman yang lebih baik mengenai umur lelah komponen struktural.

1.6. Hipotesis

Beban tarik terhadap struktur *towing hook* akan menyebabkan munculnya *stress* yang berakibat pada timbulnya resiko kegagalan karena kelelahan di umur operasional kupingan *towing hook*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

STUDI LITERATUR

2.1. Dasar Teori

Dasar teori menjelaskan landasan teoritis yang mendasari penelitian, termasuk konsep-konsep utama, rumus dasar, serta prinsip-prinsip yang relevan dengan topik yang dibahas.

2.1.1. *Tugboat*

Tugboat adalah kapal kecil namun bertenaga besar yang digunakan untuk membantu pergerakan kapal-kapal besar di pelabuhan, sungai, atau kanal, terutama saat melakukan manuver seperti berlabuh, lepas tambat, atau berputar. Contoh *tugboat* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 *Tugboat*

(Sumber https://www.ktushipyard.com/27m_tugboat)

Tugboat bekerja dengan cara mendorong atau menarik kapal lain menggunakan sistem propulsi yang kuat serta kemampuan manuver yang tinggi, dan sering dilengkapi dengan sistem propulsi *azimuth thruster* atau Voith-Schneider untuk meningkatkan keakuratan arah gerak. Perannya vital dalam menjamin keselamatan dan efisiensi operasional pelayaran di area terbatas atau padat lalu lintas laut (Alford, 2004).

2.1.2. *Towing Hook*

Menurut Sorensen (2005) *towing hook* adalah perangkat mekanis yang dipasang di atas geladak kapal, khususnya pada *tugboat*, yang berfungsi sebagai pengait untuk menarik atau menahan kapal lain menggunakan tali atau kabel tambat. Alat ini dirancang untuk mampu menahan beban tarik tinggi dan sering dilengkapi dengan sistem pelepasan cepat atau *quick*

release guna meningkatkan keselamatan operasional dalam kondisi darurat, seperti saat terjadi tarikan mendadak atau perubahan arah gaya secara tiba-tiba. Penggunaan *towing hook* yang andal penting dalam operasi penarikan, khususnya di area pelabuhan atau perairan sempit. Contoh *towing hook* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 *Towing Hook*
(Sumber: <https://kisahyd.blogspot.com/2020/11/towing-and-lashing>)

Struktur *towing hook* menerima beban yang besar secara berulang akibat gaya tarik dinamis yang dihasilkan saat tugboat melakukan manuver menarik kapal lain, terutama dalam kondisi laut yang tidak stabil. Beban siklik ini menyebabkan tegangan fluktuatif pada komponen *towing hook* yang dapat memicu terjadinya kelelahan material atau *fatigue*, yaitu kerusakan progresif yang muncul akibat akumulasi kerusakan mikro pada struktur logam. Jika tidak dirancang dengan ketahanan lelah yang memadai, *towing hook* dapat mengalami kegagalan mendadak meskipun gaya tarik berada di bawah batas kekuatan tarik material. Oleh karena itu, evaluasi umur lelah dan perencanaan pelepasan beban darurat menjadi aspek penting dalam desain komponen ini (Suresh, 1998).

2.1.3. Tegangan

Tegangan adalah besaran fisika yang merepresentasikan gaya dalam suatu material per satuan luas, yang timbul akibat adanya beban eksternal atau perubahan bentuk internal, dan secara matematis dinyatakan sebagai gaya (F) dibagi luas penampang (A) dengan persamaan 2.1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Salah satu jenis tegangan adalah *equivalent stress*. *Equivalent stress* adalah besaran skalar tunggal yang digunakan untuk menggambarkan kondisi tegangan kompleks dalam suatu elemen material, sehingga dapat dibandingkan langsung dengan kekuatan batas luluh dari

material tersebut berdasarkan pengujian tarik satu arah. Konsep ini sangat penting untuk memprediksi kegagalan dalam beban multiaxial, dan sering kali dihitung menggunakan kriteria *von Mises* berdasarkan teori energi distorsi (Benasciutti, 2015).

2.1.4. Tegangan Izin Maksimum Menurut BKI

Berdasarkan *rules* Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) Pt 1 Vol II Sec 27 B.7 (*permissible for towing gear*), terdapat beberapa persyaratan tegangan maksimum yang diizinkan untuk struktur *towing hook*. *Rule* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 *Permissible Stress* Menurut *Rule* BKI

Type of stress	Permissible stress
Axial and bending tension and axial and bending compression with box type girders and tubes	$\sigma = 0,83 \cdot R_{eH}$
Axial and bending compression with girders of open cross sections or with girders consisting of several members	$\sigma = 0,72 \cdot R_{eH}$
Shear	$\tau = 0,48 \cdot R_{eH}$
Equivalent stress	$\sigma_v = 0,85 \cdot R_{eH}$
R_{eH} = yield strength or 0,2% (proof stress)	

2.1.5. Factor of Safety

Factor of Safety (FoS) atau faktor keamanan adalah rasio antara kapasitas maksimum suatu sistem atau material terhadap beban kerja aktual yang dikenakan padanya. Konsep ini digunakan untuk menjamin bahwa struktur atau komponen tetap aman meskipun terdapat ketidakpastian dalam perhitungan beban, kekuatan material, atau kondisi lingkungan selama operasi. FoS dirancang untuk memberikan margin keamanan guna menghindari kegagalan struktural atau kerusakan pada komponen teknik (Hibbeler, 2017). Secara matematis, FoS dirumuskan dengan Persamaan 2.2.

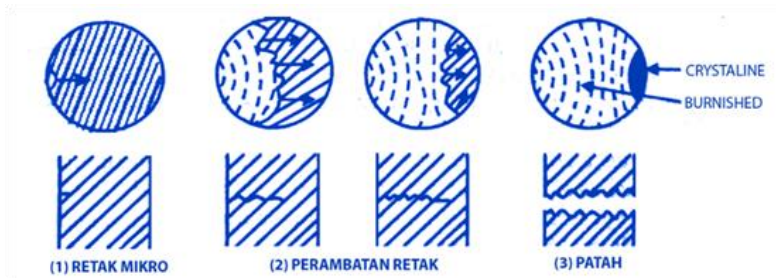
$$FoS = \frac{\text{Kekuatan Maksimum Material}}{\text{Beban Aktual}} \quad (2.2)$$

Jika FoS lebih besar dari 1, maka sistem dianggap aman. Namun, dalam praktik rekayasa, nilai FoS sering dipilih antara 1,5 hingga 3 atau lebih tinggi tergantung pada tingkat risiko dan konsekuensi kegagalan (Gere & Goodno, 2012).

2.1.6. Fatigue

Fatigue atau kelelahan adalah suatu proses penjumlahan siklus demi siklus kerusakan pada struktur yang terkena tegangan yang berfluktuasi, melalui beberapa tahap dimulai dari keadaan awal "*crack free*" sampai ke keadaan "*failure*" atau kegagalan (Pangestu Aryo, Misbah Mohammad Nurul and Setiawan Dony, 2019). Pada struktur *towing hook* kelelahan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti beban dinamis yang berulang, besarnya beban yang

ditarik, dan frekuensi beban. Visualisasi proses *crack free* hingga *failure* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

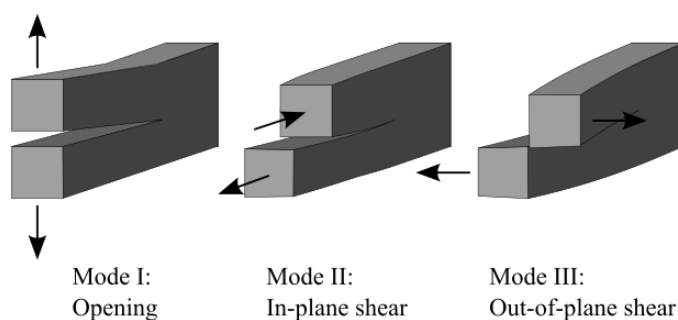


Gambar 2. 3 Proses dari *Crack Free* Hingga *Failure*
(Sumber: <https://hesa.co.id/kelelahan-struktur-beton/>)

Fatigue dimulai dengan inisiasi retak mikro pada lokasi-lokasi kritis seperti takikan, sambungan las, atau permukaan kasar, yang kemudian berkembang secara progresif menjadi retak makro hingga akhirnya menyebabkan kegagalan total. Proses ini terjadi karena setiap siklus pembebanan menyebabkan akumulasi deformasi plastis lokal yang tidak terlihat secara makroskopik, tetapi secara perlahan melemahkan ikatan antar butir material.

2.1.7. Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk atau ukuran suatu material akibat adanya gaya eksternal yang bekerja padanya, baik dalam bentuk tegangan tarik, tekan, geser, maupun torsi. Deformasi dapat bersifat elastis, yaitu material kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan, atau plastis, di mana perubahan bentuk bersifat permanen. Karakteristik deformasi bergantung pada sifat mekanik material dan besar gaya yang diterapkan, serta menjadi dasar penting dalam analisis kekuatan struktur teknik (Beer et al., 2012). Jenis-jenis mode deformasi retak dapat dilihat pada Gambar 2.4.



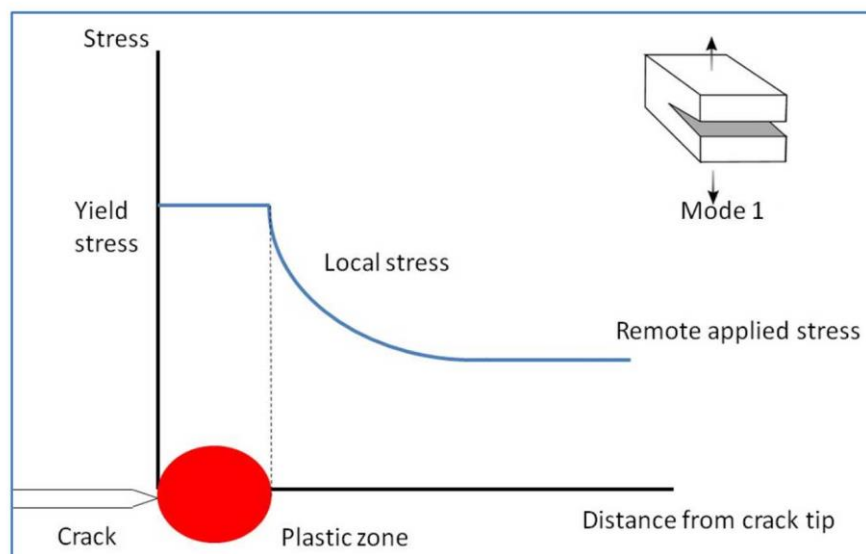
Gambar 2. 4 Mode Deformasi Retak
(Sumber: https://en-m-wikipedia-org.translate.google/wiki/Fracture_mechanics)

Menurut Anderson (2017) pada deformasi retak terdapat 3 jenis mode utama yang menggambarkan cara retak berkembang di dalam material akibat gaya yang diterima. Mode I (*opening mode*) terjadi ketika retak membuka akibat tegangan tarik tegak lurus terhadap bidang

retak. Mode II (*sliding mode*) ditandai dengan pergeseran permukaan retak secara sejajar dalam bidang retak akibat tegangan geser. Sedangkan Mode III (*tearing mode*) menunjukkan pergeseran permukaan retak secara tegak lurus terhadap bidang retak, juga akibat tegangan geser. Ketiga mode ini merupakan dasar penting dalam analisis mekanika retak karena masing-masing memengaruhi perilaku propagasi retak secara berbeda.

2.1.8. *Fracture Mechanics*

Menurut Anderson (2017), *fracture mechanics* adalah cabang ilmu rekayasa yang mempelajari perilaku retak dalam material dan bagaimana retak tersebut dapat berkembang hingga menyebabkan kegagalan struktur. Pendekatan ini mempertimbangkan parameter seperti stress intensity factor (K) dan *energy release rate* (G) untuk mengevaluasi stabilitas retakan. *Fracture mechanics* dibedakan menjadi dua pendekatan utama, yaitu *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) untuk material getas dan *Elastic-Plastic Fracture Mechanics* (EPFM) untuk material yang mengalami deformasi plastis. Pada penelitian ini, digunakan LEFM untuk menghitung perambatan retak yang terjadi. Visualisasi LEFM dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM)
(Sumber: <https://www.impact-solutions.co.uk/mechanical-testing/LEFM>)

Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) adalah cabang dari *fracture mechanics* yang mempelajari perilaku retakan dalam material elastis linier, terutama saat terjadi konsentrasi tegangan tinggi di sekitar ujung retak. LEFM mengasumsikan bahwa deformasi plastis di sekitar ujung retak sangat kecil dan dapat diabaikan, sehingga hukum elastis linier tetap berlaku di seluruh material kecuali di daerah sangat kecil di ujung retak. Parameter utama dalam LEFM adalah *stress intensity factor* (K), yang menggambarkan intensitas medan

tegangan di sekitar ujung retak dan digunakan untuk memprediksi inisiasi dan propagasi retakan. Jika nilai K mencapai nilai kritis tertentu yang disebut K_C (*toughness* patah), maka retakan akan terus berkembang secara cepat dan menyebabkan kegagalan struktural. LEFM sangat penting dalam rekayasa struktural, terutama untuk merancang komponen yang tahan terhadap inisiasi dan propagasi retak dalam kondisi beban berulang atau statik (Anderson, 2017).

2.1.9. *Stress Intensity Factor*

Stress Intensity Factor (SIF) adalah parameter fundamental dalam *fracture mechanics* yang menggambarkan besarnya intensitas tegangan di sekitar ujung retakan dalam material yang mengalami beban. SIF dilambangkan dengan huruf K dan digunakan untuk memprediksi apakah retakan akan tetap stabil atau mengalami propagasi lebih lanjut. Nilai K bergantung pada tiga faktor utama: beban yang diterapkan, geometri komponen, dan ukuran serta bentuk retakan. Dalam konteks fraktur linier elastik (*Linear Elastic Fracture Mechanics* atau LEFM), jika nilai K melebihi nilai ketangguhan fraktur material K_c maka retakan akan tumbuh secara tidak stabil, menyebabkan kegagalan struktural (Suresh, 1998). SIF dihitung dengan Persamaan 2.3.

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.3)$$

2.1.10. Laju Pertumbuhan Retak

Crack growth rate atau laju pertumbuhan retakan adalah ukuran seberapa cepat sebuah retakan tumbuh dalam suatu material di bawah kondisi pembebanan tertentu. Laju pertumbuhan retakan ini penting dalam menganalisis umur kelelahan material, karena retakan yang tumbuh dengan cepat dapat menyebabkan kegagalan material lebih dini (Suresh, 1998). Dalam analisis fraktur, *crack growth rate* dinyatakan sebagai da/dN , yang menggambarkan pertumbuhan retakan (da) per siklus beban (dN). Faktor utama yang mempengaruhi *crack growth rate* adalah *stress intensity factor range* (ΔK), yang merupakan perbedaan *stress intensity factor* antara beban maksimum dan minimum dalam satu siklus beban (Anderson, 1995). Salah satu model paling terkenal untuk memprediksi *crack growth rate* adalah Persamaan Paris, yang menyatakan bahwa laju pertumbuhan retakan berbanding lurus dengan pangkat dari rentang *stress intensity factor* (ΔK) sesuai dengan Persamaan 2.4.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.4)$$

C dan m pada persamaan tersebut merupakan konstanta material yang diperoleh dari eksperimen. Menurut Nemati, Metrovich, dan Nanni (2011), nilai konstanta C dan m dalam

hukum Paris untuk baja struktural dapat diambil sebagai $C = 3,6 \times 10^{-10}$ dan $m = 3,0$, berdasarkan hasil pengujian eksperimental terhadap spesimen material *Structural Steel A-36*.

2.1.11. Perhitungan Umur Lelah

Umur lelah atau *fatigue life* adalah jumlah total siklus pembebanan berulang yang dapat ditahan oleh suatu material atau komponen sebelum mengalami kegagalan akibat pertumbuhan retak. Umur lelah dipengaruhi oleh besarnya tegangan siklik, kondisi permukaan, sifat mikrostruktur, lingkungan, dan kehadiran cacat seperti retakan mikro. Dalam konteks *fracture mechanics*, umur lelah dibagi menjadi dua fase: fase inisiasi retak mikro dan fase pertumbuhan retak makro hingga kegagalan total. Analisis umur lelah menjadi krusial dalam perancangan struktur teknik seperti sayap pesawat, jembatan, turbin, dan komponen mesin yang bekerja di bawah beban fluktuatif. Umur lelah total dapat dihitung dari integrasi hukum Paris seperti pada Persamaan 2.5.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_c} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (2.5)$$

Persamaan laju pertumbuhan siklus antara dua panjang retak a_1 ke a_2 dapat dilihat pada Persamaan 2.6.

$$\Delta N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (2.6)$$

Total *cycle* perambatan dapat dihitung dengan Persamaan 2.7.

$$\Sigma N = \Delta N + N_i \quad (2.7)$$

Jika periode siklus per tahun diketahui sebagai T , maka umur lelah dalam satuan detik dapat dilihat pada Persamaan 2.8.

$$\text{Umur lelah} = \Sigma N \times T \quad (2.8)$$

2.1.12. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*Finite Element Method* atau FEM) adalah teknik numerik yang digunakan untuk menemukan solusi aproksimasi dari persamaan diferensial parsial serta masalah integral yang kompleks. Dikutip dari (Kosasih, 2012) Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) merupakan metode numerik untuk memperoleh penyelesaian persamaan diferensial, baik persamaan diferensial biasa maupun persamaan diferensial parsial. FEM membagi suatu struktur atau domain masalah menjadi elemen-elemen kecil yang disebut elemen hingga, yang secara kolektif membentuk suatu *mesh* atau jaringan. Setiap elemen tersebut memiliki persamaan yang kemudian dikombinasikan untuk memberikan solusi bagi keseluruhan struktur. *Finite Element Method* (FEM) cocok untuk menganalisis kelelahan

struktur karena kemampuannya untuk menangani geometri yang kompleks dan memberikan analisis distribusi tegangan yang akurat.

Dalam kelelahan struktur, distribusi tegangan yang rinci di seluruh struktur penting terutama di area dengan konsentrasi tegangan tinggi yang merupakan titik awal potensial untuk evaluasi respon struktur terhadap berbagai siklus beban dan menentukan perkembangan tegangan dan deformasi seiring waktu. Selain itu, FEM dapat mengidentifikasi titik-titik kritis dengan tegangan tertinggi dan memodelkan perilaku material non-linear yang lebih akurat di bawah kondisi beban siklik. Dengan integrasi data eksperimental, FEM dapat divalidasi untuk meningkatkan akurasi prediksi umur kelelahan, menjadikannya alat yang efektif untuk mengidentifikasi potensi masalah kelelahan pada tahap awal desain dan selama evaluasi kinerja struktur, serta membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih baik untuk memperpanjang umur dan memastikan keselamatan struktur.

2.2. Tinjauan Pustaka

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

2.2.1. Analisis Kelelahan Struktur

1. Analisis Kelelahan Struktur Pada Tiang Pancang Di Dermaga Amurang Dengan Metode S-N Curve

Bitty, Balamba, dan Sarayar (2015) melakukan analisis kelelahan pada struktur tiang pancang dermaga di Pelabuhan Amurang, Minahasa Selatan. Penelitian bertujuan untuk memperkirakan umur layan struktur terhadap beban gelombang berulang menggunakan metode S-N Curve sesuai standar API RP 2A WSD 2002. Gelombang laut dianalisis dengan teori *Airy* dan gaya gelombang dihitung menggunakan persamaan Morison.

Pada sambungan antara tiang pancang dan kepala tiang diperoleh nilai *Stress Concentration Factor* (SCF) sebesar 1,556. Berdasarkan variasi tinggi gelombang antara 1,10 m hingga 2,08 m, analisis menunjukkan semakin besar tinggi gelombang, semakin besar gaya gelombang dan tegangan yang bekerja, serta semakin pendek umur struktur. Dari kurva S-N diperoleh umur struktur untuk kurva X antara 29,8 hingga 3129,3 tahun, dan untuk kurva X' antara 15,4 hingga 820,9 tahun, bergantung pada tinggi gelombang.

Namun, berdasarkan prediksi gelombang signifikan selama 300 tahun, umur struktur menurun drastis menjadi hanya 1,18 tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa data gelombang

ekstrem mempengaruhi prediksi umur kelelahan dan pentingnya data gelombang yang lebih lengkap serta analisis yang mempertimbangkan kombinasi beban lingkungan lainnya.

2. Analisis *Fatigue Life* Konstruksi Kapal Tanker 17500 DWT Menggunakan Metode *Simplified Fatigue Analysis*

Pangestu et al. (2019) melakukan analisis kelelahan (*fatigue*) pada struktur konstruksi kapal tanker 17500 DWT dengan pendekatan metode *simplified fatigue analysis* berdasarkan regulasi *Common Structural Rules* (CSR) dari IACS. Analisis ini difokuskan pada tiga area sambungan struktur yaitu pembujur sisi, pembujur alas dalam, dan pembujur alas terhadap sekat melintang, akibat tekanan dinamis gelombang dan sloshing muatan arah melintang kapal. Model struktur yang dianalisis berupa tiga ruang muat bagian midship kapal, dengan variasi kondisi pemuatan 0.5hfilling, 0.7hfilling, dan 0.85hfilling.

Analisis dilakukan dengan bantuan *software* elemen hingga menggunakan elemen Shell 281 dan Beam 189. Hasil menunjukkan tegangan maksimum terjadi pada kondisi 0.85hfilling sebesar 56.3 MPa untuk pembujur sisi dan 59.1 MPa untuk pembujur alas, serta pada kondisi 0.7hfilling sebesar 53.4 MPa untuk pembujur alas dalam. Dari analisis *cumulative fatigue damage*, diperoleh umur kelelahan (*fatigue life*) sebesar 26.6 tahun pada pembujur sisi, 42.5 tahun pada pembujur alas dalam, dan 30.4 tahun pada pembujur alas. Semua nilai umur kelelahan masih memenuhi standar minimum CSR, yaitu 25 tahun. Hasil ini menunjukkan struktur kapal tanker dalam kondisi aman terhadap kelelahan akibat pembebanan berulang selama masa operasional.

2.2.2. Analisa Kelelahan Berdasarkan *Fracture Mechanics*

1. Analisis Umur Kelelahan Sambungan *Bracket Topside Module* FPSO Menggunakan *Fracture Mechanics*

Prakoso dan Misbah (2019) melakukan analisis umur kelelahan pada sambungan *bracket* struktur *interface* antara *topside* dan *hull* FPSO 101760 DWT yang beroperasi di Lapangan Gas Blok BD. Analisis bertujuan untuk mengetahui pengaruh beban siklis dari gelombang laut terhadap umur kelelahan struktur. Dua pendekatan digunakan dalam studi ini, yaitu *cumulative fatigue damage* (CFD) untuk menganalisis inisiasi retak dan *fracture mechanics* untuk perambatan retak. Pemodelan dilakukan secara global untuk mengetahui distribusi tegangan dan lokasi kritis, yaitu sambungan TS10, dan kemudian dilanjutkan dengan analisis lokal pada *bracket* sambungan tersebut.

Tegangan maksimum pada *Bracket 2* adalah 29,489 MPa, dengan nilai *stress intensity factor* (SIF) awal sebesar 1,469 MPa $\sqrt{\text{m}}$ dan mencapai 20,714 MPa $\sqrt{\text{m}}$ pada kedalaman retak kritis

145,84 mm. Laju perambatan retak awal adalah $2,2 \times 10^{-11}$ m/cycle dan mencapai $6,2 \times 10^{-8}$ m/cycle di kedalaman kritis. Perambatan retak menunjukkan bahwa 92% dari umur kelelahan habis pada 10% pertama kedalaman retak. Umur kelelahan berdasarkan pendekatan *fracture mechanics* adalah 101,028 tahun dengan *safety factor* 5,05, sedangkan berdasarkan metode SN *curve* (CFD) umur kelelahan sebesar 151,172 tahun. Hasil ini menunjukkan adanya penurunan umur kelelahan sebesar 33% jika mempertimbangkan perambatan retak.

2. Identifikasi Kegagalan Pada Sambungan Kritis Dari Struktur *Jacket* Menggunakan Metode *Fracture Mechanic*

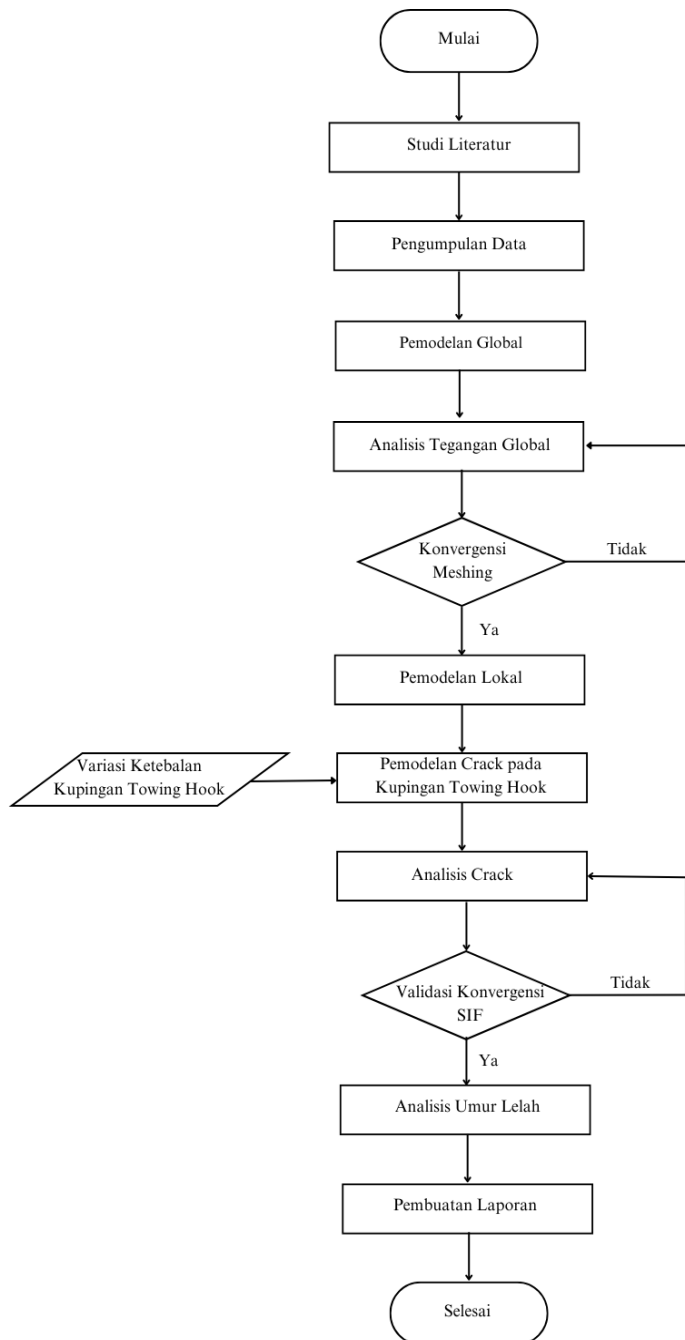
Andalan (2021) melakukan analisis kegagalan pada sambungan kritis struktur *jacket offshore* menggunakan pendekatan *Fracture Mechanics*, khususnya metode *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai *Stress Intensity Factor* (SIF), laju perambatan retak (*crack propagation rate*), dan umur kelelahan (*fatigue life*) pada sambungan tubular *joint* yang kritis. Analisis dilakukan dengan memodelkan sambungan kritis berbentuk *semi-elliptical crack* menggunakan perangkat lunak ANSYS dan metode elemen hingga.

Dari hasil analisis, nilai SIF pada retak awal ($a = 4,58$ mm) dengan ukuran mesh 90 mm adalah sebesar $22,34 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, sedangkan untuk ukuran mesh 120 mm adalah $20,52 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Kecepatan perambatan retak pada mesh 90 mm adalah $1,02 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$, sementara pada mesh 120 mm sebesar $1,76 \times 10^{-2} \text{ mm/cycle}$. Umur kelelahan struktur dengan mesh 90 mm diperoleh sebesar $1,89 \times 10^8$ siklus dan dengan mesh 120 mm sebesar $2,50 \times 10^8$ siklus. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar ukuran *mesh*, maka nilai SIF dan umur kelelahan menurun, sedangkan kecepatan perambatan retak meningkat. Penelitian ini menegaskan pentingnya analisis *fracture mechanics* dalam memperkirakan sisa umur struktur dan mencegah kegagalan mendadak pada platform lepas pantai.

BAB 3 METODOLOGI

3.1. Bagan Alir

Secara umum metodologi dalam pengerjaan penelitian ini dapat dilihat di Diagram alir pada Gambar 3.1 dan selanjutnya akan dijelaskan pada Sub-bab Metode Penelitian.



Gambar 3. 1 Bagan Alir

3.2. 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 perhitungan *fatigue life* dan *Fracture Mechanics*. Kemudian literatur tersebut digunakan sebagai acuan atau referensi dalam penelitian ini.

3.3. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang dibutuhkan terkait penelitian yang akan dilakukan. Pengumpulan data dilakukan guna mendapatkan data data penting penunjang berhasilnya penelitian. Data-data yang dibutuhkan meliputi ukuran utama *tugboat* dan *barge*, *general arrangement tugboat*, dan konstruksi struktur *towing hook*.

1. Ukuran utama *tugboat* dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Ukuran Utama *Tugboat*

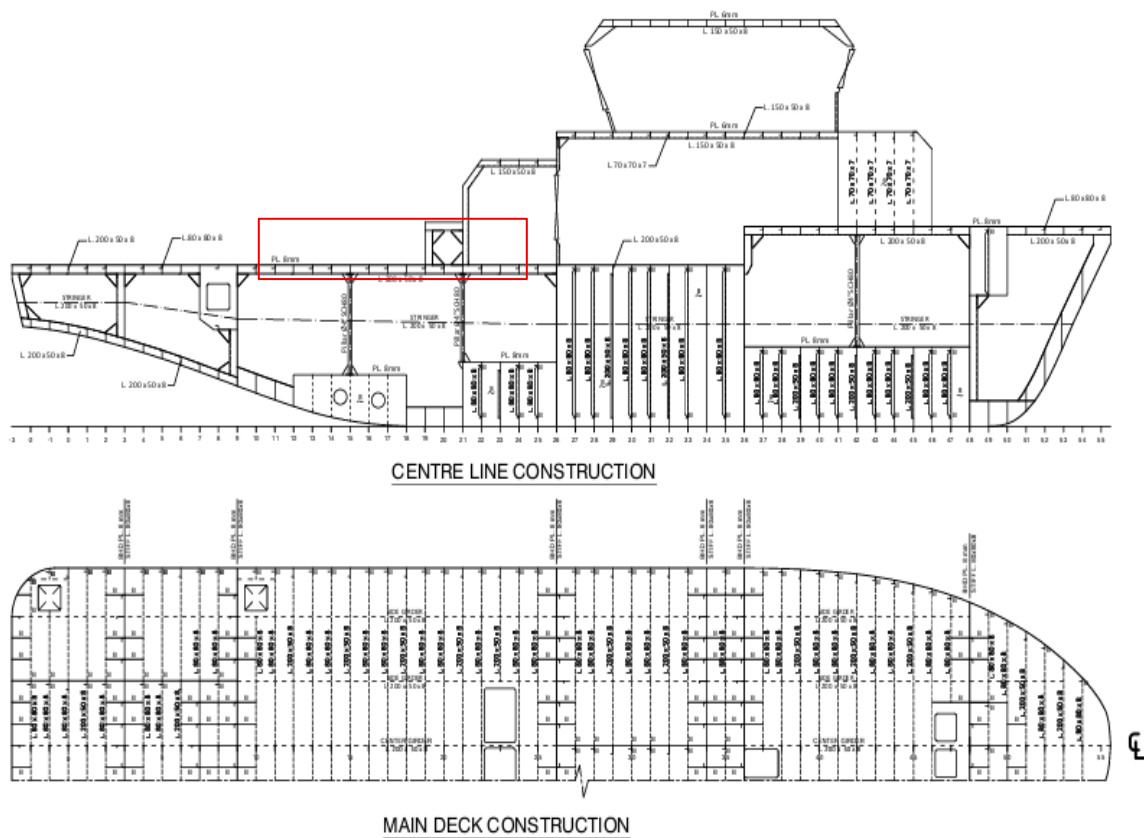
<i>Principal Dimention</i>		
LoA	29,25	m
LWL	28,06	m
LPP	26,83	m
B	8,25	m
H	3,75	m
T	2,50	m
Vs	5,00	knot
<i>Engine Power</i>	2 x 1100	HP

2. Ukuran utama *barge* dapat dilihat pada Tabel 3.2.

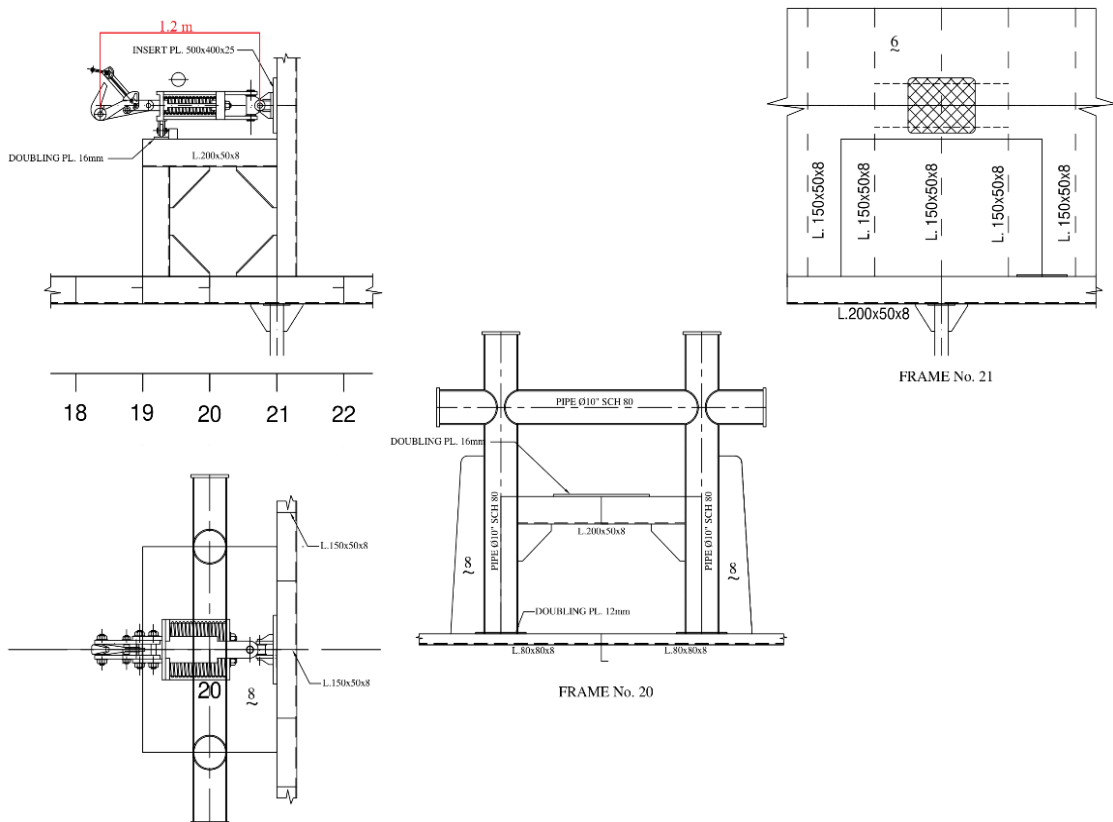
Tabel 3. 2 Ukuran Utama *Barge*

<i>Principal Dimention</i>		
LoA	55,06	m
B	9,54	m
H	3,24	m
T	2,57	m
DWT	947	ton

General Arrangement tugboat dan konstruksi struktur *towing hook* dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan 3.3.



Gambar 3. 2 General Arrangement Tugboat



Gambar 3. 3 Drawing Struktur Towing Hook

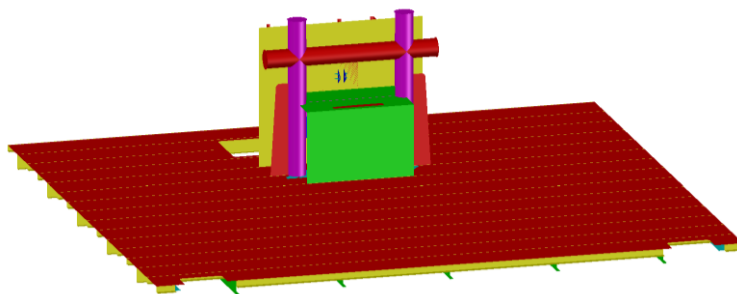
3.4. Pemodelan Global

Pemodelan global struktur dilakukan dengan menggunakan *Software AutoCAD*. Pemodelan global dilakukan untuk merepresentasikan keseluruhan sistem struktur utama kapal yang menerima gaya tarik dari *towing hook*, dengan cakupan area mulai dari *frame 10* hingga *frame 25*. Pemodelan ini bertujuan untuk menangkap distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi secara menyeluruh pada struktur kapal akibat beban operasional yang bekerja melalui *towing hook*, serta untuk mengidentifikasi area-area potensial dengan konsentrasi tegangan tinggi yang nantinya menjadi dasar untuk analisis lokal.

Struktur yang dimodelkan meliputi komponen *main deck*, pelat dasar, serta rangka penguat utama seperti *web frame*, *longitudinal stiffener*, dan *girder* yang terintegrasi dalam jalur rambatan beban tarik.

1. Pemodelan *software* AutoCad

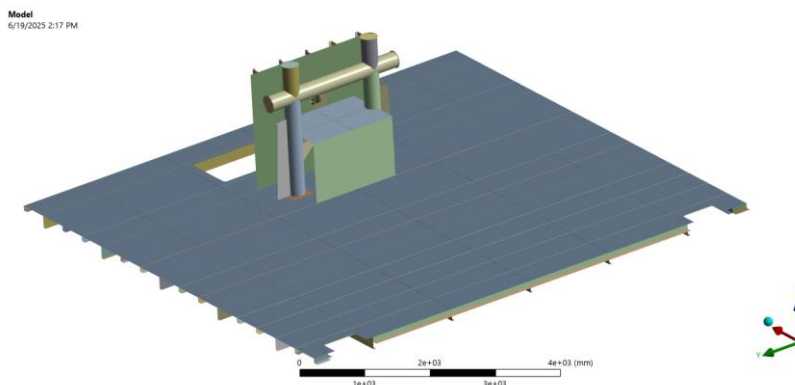
Pemodelan dibuat dengan pedoman *drawing* konstruksi struktur *towing hook* seperti pada Gambar 3.4, dengan menggunakan *tools* seperti *line*, *circle*, *extrude*, dan lainnya.



Gambar 3. 4 Pemodelan Global di *software* AutoCad

2. Import ke *Software* ANSYS

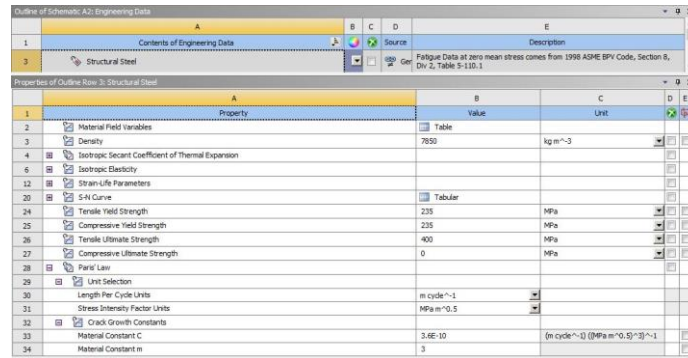
Setelah membuat model 3D pada *software* AutoCad, *import* 3D dengan format *.igs* ke *ANSYS Workbench*. Gambar pemodelan *software* ANSYS dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Pemodelan Global di *software* ANSYS

3. Mendefinisikan material geometri

Jenis material yang digunakan pada penelitian ini adalah *structural steel* ASTM-A36. Pada bagian *property*, dimasukkan nilai *Tensile Yield Strength* senilai 235 MPa, *Tensile Ultimate Strength* senilai 400 MPa, konstanta *C* sebesar $3,6 \times 10^{-10}$ dan *m* sebesar 3. Pendefinisian material geometri dapat dilihat pada Gambar 3.6.

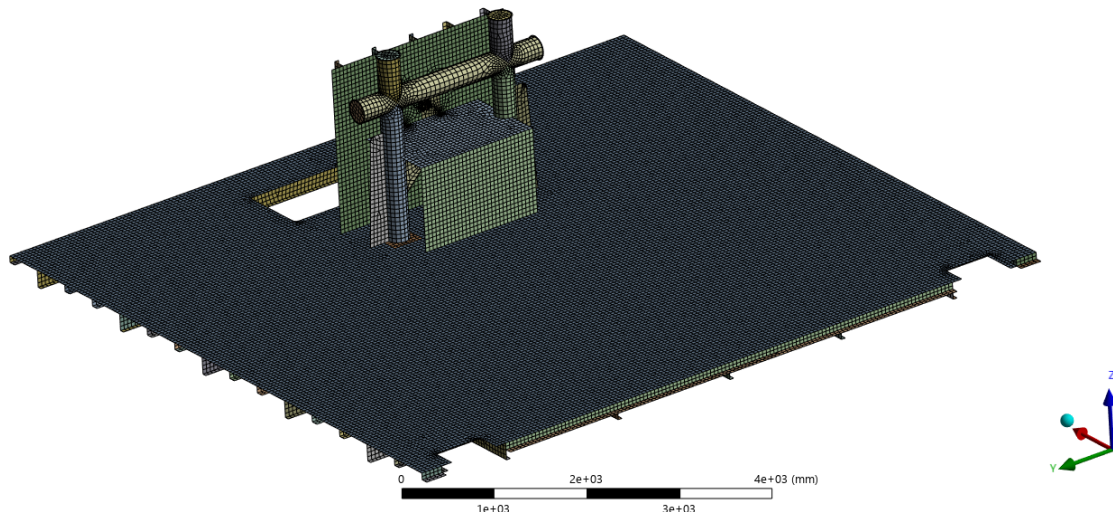


Property	Value	Unit
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	235	MPa
Compressive Yield Strength	235	MPa
Tensile Ultimate Strength	400	MPa
Compressive Ultimate Strength	0	MPa
Paris' Law		
Unit Selection		
Length Per Cycle Units	m cycle ⁻¹	
Stress Intensity Factor Units	MPa.m ^{0.5}	
Crack Growth Constants		
Material Constant C	3.6E-10	(m cycle ⁻¹) (MPa.m ^{0.5}) ⁻³
Material Constant m	3	

Gambar 3. 6 Pendefinisian Material Geometri

4. Mesh model

Proses *meshing* adalah proses pembentukan elemen hingga pada geometri model untuk mendukung akurasi simulasi numerik. Pemilihan ukuran dan jenis elemen *mesh* dilakukan agar hasil analisis memenuhi kebutuhan konvergensi dan efisiensi komputasi. *Mesh* model global dapat dilihat pada Gambar 3.7.



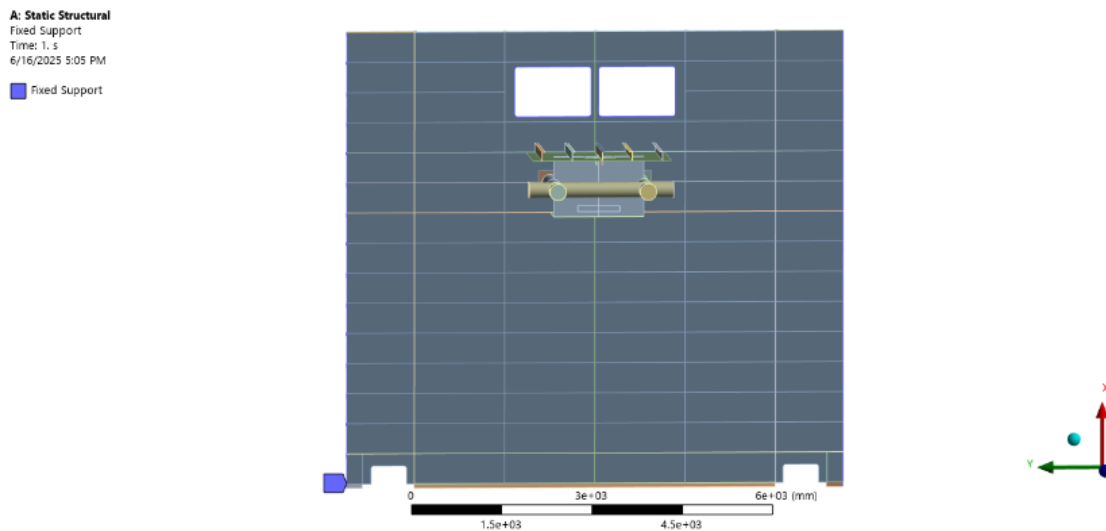
Gambar 3. 7 *Mesh* Model Global

5. Menentukan *boundary conditions*

Dilakukan dengan menetapkan kondisi batas yang merepresentasikan pembebanan dan pengekanan pada model sesuai dengan kondisi nyata, agar simulasi dapat mencerminkan perilaku struktur secara akurat.

- *Fixed Support*

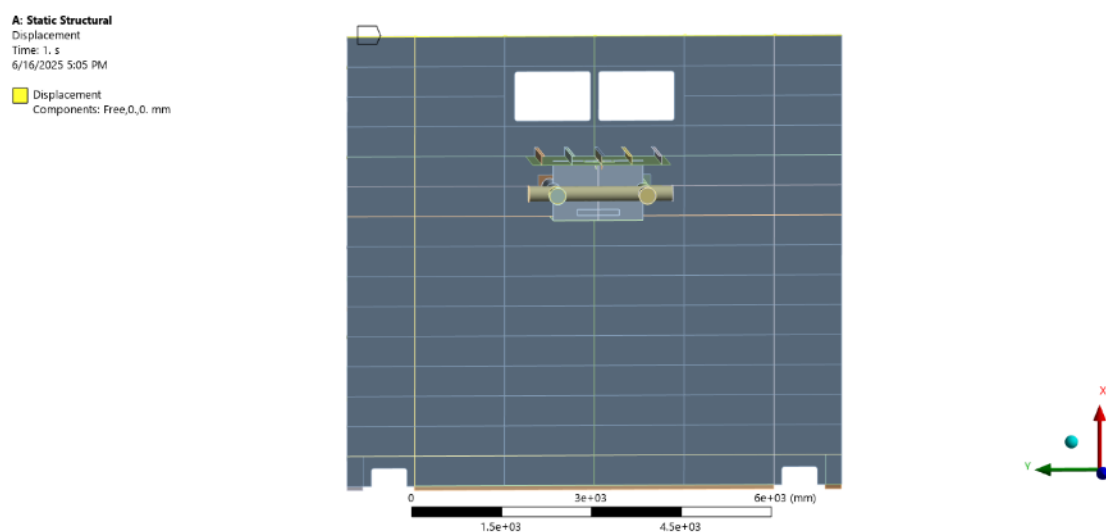
Fixed Support pada *boundary condition* di ANSYS merupakan kondisi batas yang digunakan untuk menahan semua derajat kebebasan pada titik atau area tertentu dalam model. Artinya, bagian yang diberikan *fixed support* tidak dapat mengalami perpindahan translasi maupun rotasi dalam arah X, Y, dan Z. Peletakkan *fixed support* dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 8 *Fixed Support* Model Global

- *Displacement*

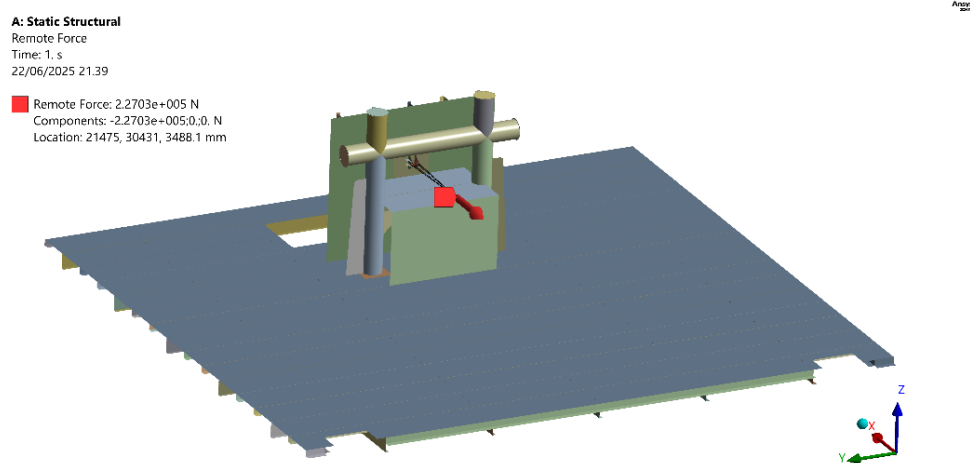
Displacement pada *boundary condition* adalah kondisi batas di mana bagian tertentu dari model diberi nilai perpindahan tertentu, baik dalam satu atau lebih arah sumbu koordinat. Artinya, titik atau permukaan tersebut tidak bebas bergerak sesuka arah, tetapi digerakkan atau ditahan sesuai nilai perpindahan yang telah ditentukan. Peletakkan *boundary condition displacement* dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 *Displacement* Model Global

6. Input *remote force*

Selanjutnya memasukkan besar beban tarik yang akan disimulasikan pada model global. Sesuai dengan 3 variasi yang didapatkan dari analisis AQWA, yaitu 227.027 N, 164.014 N, dan 236.847 N. *Remote point* diletakkan pada lubang kupingan *towing hook* dengan jarak 1,2 m dari lubangnya sesuai dengan *drawing* struktur *towing hook* pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Peng-input-an *Remote Force* Model Global

3.5. Analisis Tegangan Global

Analisis tegangan global dilakukan untuk memahami distribusi dan konsentrasi tegangan yang terjadi pada keseluruhan struktur kapal akibat gaya tarik (*towing load*) yang bekerja pada *towing hook* dan merambat hingga ke *main deck*. Tegangan Global Variasi Pembebanan 1 yaitu beban tarik diberikan dari hasil simulasi AQWA senilai 207.027 N dengan arah Sumbu X (horizontal) mengikuti arah tarikan *tugboat* terhadap *barge*. Pada kondisi pembebanan 2 beban tarik diberikan dari hasil simulasi AQWA dengan variasi lokasi penarikan *barge* 45° senilai 164.014 N dengan arah Sumbu X (horizontal) mengikuti arah tarikan *tugboat* terhadap *barge*. Pada kondisi pembebanan 3 beban tarik diberikan dari hasil simulasi AQWA dengan variasi *barge trim by stren* 0,15° senilai 236.847 N dengan arah Sumbu X (horizontal) mengikuti arah tarikan *tugboat* terhadap *barge*. Dan kondisi pembebanan 4 beban tarik diberikan dari hasil simulasi AQWA dengan variasi *barge trim by bow* 0,15° senilai 241.584 N dengan arah Sumbu X (horizontal) mengikuti arah tarikan *tugboat* terhadap *barge*.

3.6. Pemodelan Lokal

Model lokal dilakukan dengan metode *submodelling*, yaitu memanfaatkan hasil dari analisis global sebagai input pembebanan batas (*boundary condition*), yang kemudian diterapkan pada bagian struktur yang telah dipotong secara spesifik. Pendekatan ini

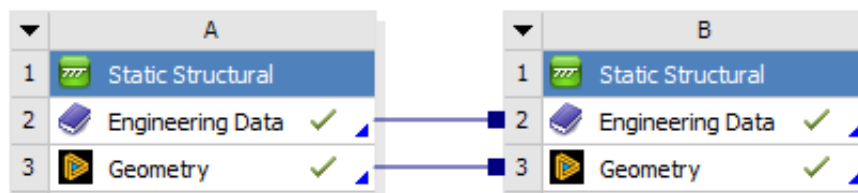
memungkinkan pemodelan lebih rinci terhadap interaksi antara beban tarik dan respon struktural lokal, serta mendukung evaluasi lebih lanjut terhadap potensi kegagalan seperti retak akibat tegangan tinggi atau kelelahan material.

3.6.1. Submodelling 1

Submodelling tahap awal dilakukan pada struktur *towing hook* tanpa melibatkan *main deck* dengan tujuan untuk memverifikasi bahwa distribusi tegangan global yang diperoleh tetap konsisten setelah penerapan teknik *submodelling*. Pendekatan ini digunakan sebagai langkah validasi awal guna memastikan bahwa pemisahan geometri dan pemodelan ulang pada domain lokal tidak mengubah respons tegangan utama dari sistem secara keseluruhan.

1. Meng-import *engineering data* dan geometri model global ke *Static Structural* baru

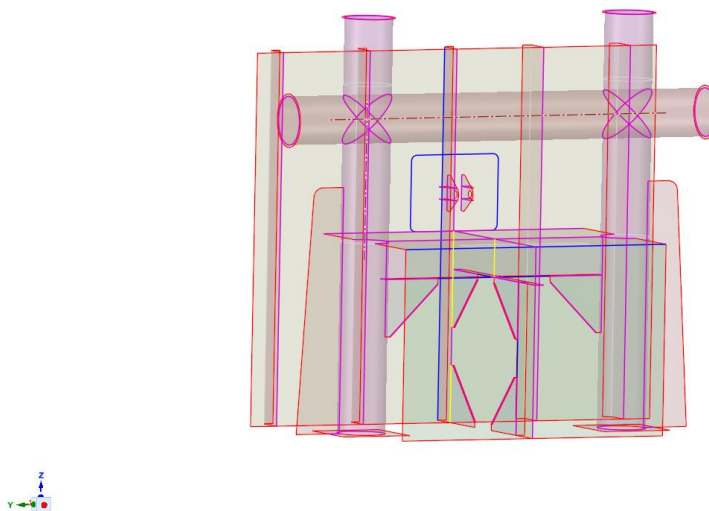
Langkah ini dilakukan untuk mentransfer properti material dan geometri dari model global ke analisis *static structural* baru guna mendukung proses *submodelling*. Input *engineering data* dan geometri ke *submodelling 1* dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Meng-input *Engineering Data* dan *Geometry* ke Submodel 1

2. Menghapus geometri yang tidak dibutuhkan untuk pemodelan lokal

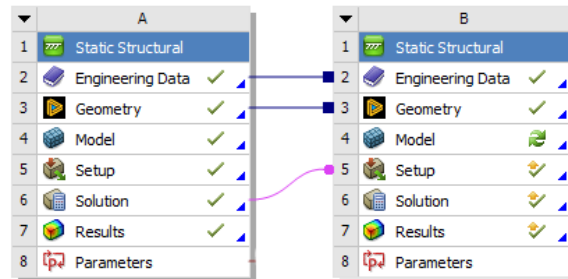
Langkah ini bertujuan untuk menyederhanakan domain analisis dengan menghapus bagian geometri yang tidak relevan terhadap area fokus pada pemodelan lokal. Model geometri submodel 1 dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Geometri Submodel 1

3. Mengimport "Solution" dari model global ke model lokal

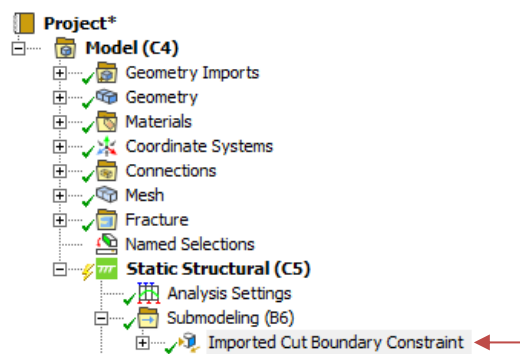
Langkah ini dilakukan untuk mengimpor hasil solusi, seperti perpindahan (*displacement*), dari model global ke model lokal guna menetapkan kondisi batas yang akurat dalam analisis submodel. *Input solution* ke submodel 1 dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3. 13 Meng-input *Solution* ke Submodel 1

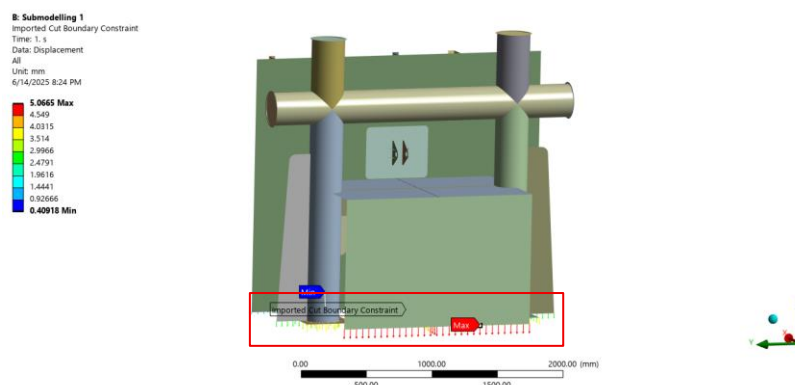
4. Mengimport *Boundary Constraint*

Agar model lokal (submodel) dapat merepresentasikan kondisi fisis yang akurat dari model global perlu dilakukan proses "*import boundary constrain*". *Input boundary condition* ke submodel 1 dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3. 14 Input *Boundary Constraint* Submodel 1

Import boundary constrain dari model global harus diletakkan pada batas (*boundary*) dari model lokal (submodel) yang berada tepat langsung dengan lokasi pemotongan dari model global. Lokasi penempatan *boundary constraint* submodel 1 dapat dilihat pada Gambar 3.15.



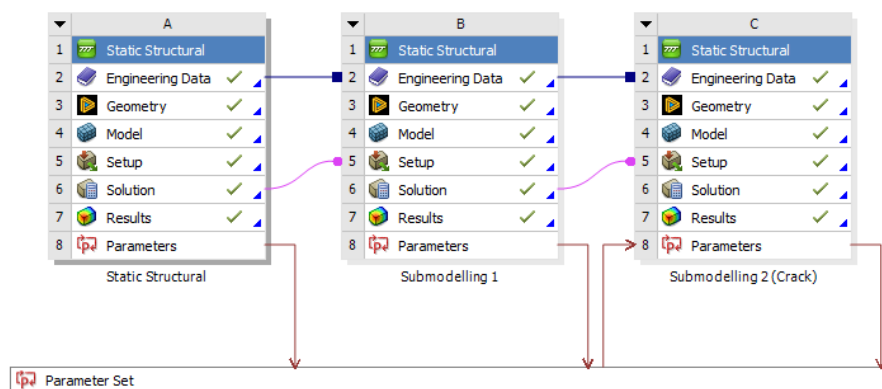
Gambar 3. 15 Lokasi Penempatan *Boundary Constraint* Submodel 1

3.6.2. Submodelling 2

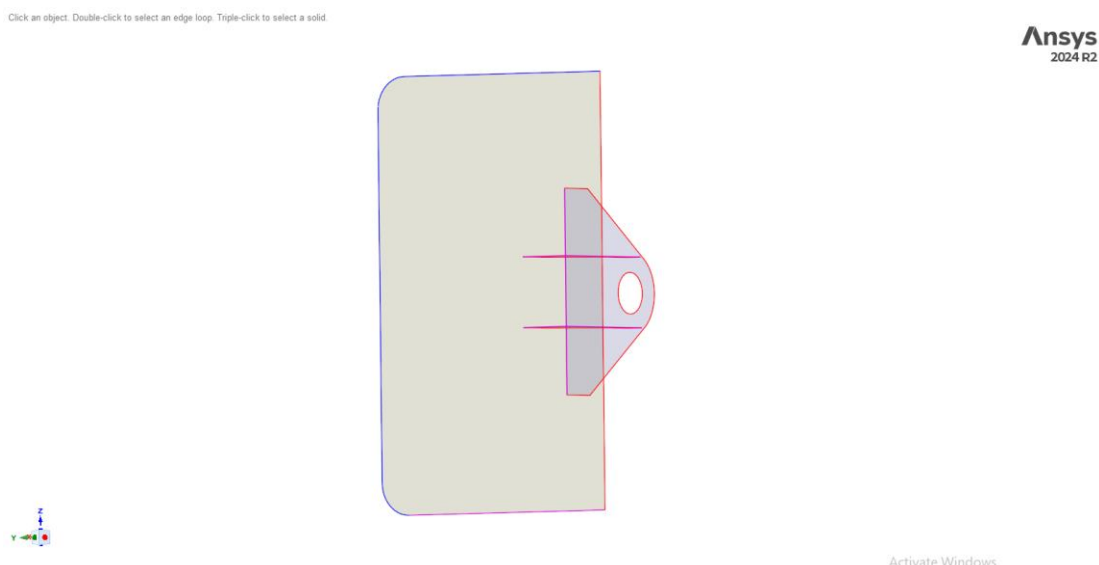
Submodelling tahap kedua difokuskan pada pemodelan area kritis, yaitu lokasi retak potensial. Berdasarkan hasil analisis tegangan sebelumnya, kupingan *towing hook* teridentifikasi sebagai salah satu area dengan konsentrasi tegangan tertinggi. Oleh karena itu, simulasi retak dilakukan pada area tersebut untuk mengevaluasi perilaku fraktur secara lebih rinci.

1. Pemodelan lokasi retak

Retak akan dimodelkan pada ujung bawah kupingan *towing hook* tepat pada area yang terhubung dengan *doubling plate* penyangga struktur. Pemodelan hanya akan dilakukan pada kupingan sebelah kiri beserta *bracket* dan separuh *doubling plate*. Geometri submodel diperoleh dari model global melalui metode yang sama seperti pada *submodelling* pertama, yaitu dengan mengimpor geometri dan mengeliminasi bagian yang tidak diperlukan menggunakan ANSYS *SpaceClaim*. Input *engineering data* dan *solution* dapat dilihat pada Gambar 3.16 dan geometri model lokal dapat dilihat pada Gambar 3.17.



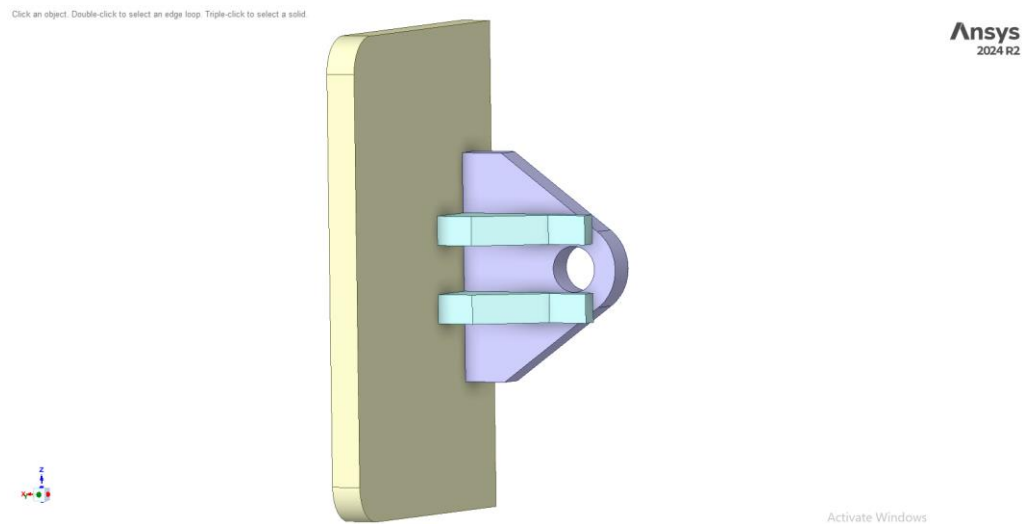
Gambar 3. 16 Meng-input *Engineering Data* dan *Solution* ke Submodel 2



Gambar 3. 17 Geometri Model Lokal

2. Mengubah geometri dari *surface* menjadi solid

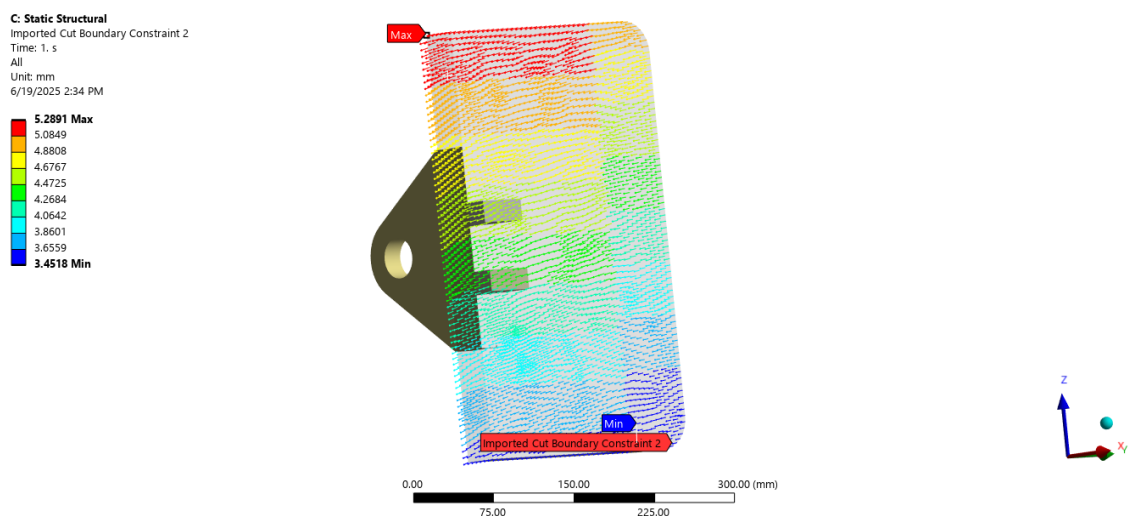
Untuk keperluan pemodelan retak, geometri harus dalam bentuk solid. Retakan merupakan fenomena volumetrik yang memerlukan geometri solid, karena ANSYS membutuhkan distribusi tegangan dalam volume material untuk menghitung SIF dan *Energy Release Rate*. Geometri *surface* tidak memiliki ketebalan, sehingga analisis retak menjadi tidak valid. Oleh karena itu, pemodelan dilakukan di ANSYS *SpaceClaim* dengan menambahkan ketebalan pada geometri model lokal seperti pada Gambar 3.18.



Gambar 3. 18 Model Lokal Solid

3. Meng-input *boundary constrain submodelling*

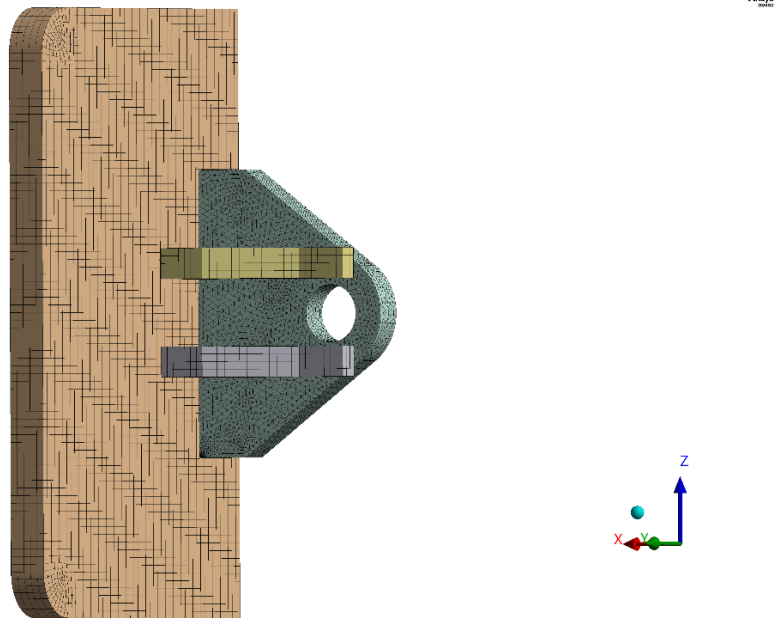
Sama seperti pada submodel pertama, model lokal submodel kedua juga harus diberikan *boundary constrain* agar kondisi pembebanan dan pengekangan pada area potongannya tetap merepresentasikan perilaku struktur global secara akurat. Letak *boundary constrain* model lokal dapat dilihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3. 19 Letak *Boundary Constrain* Model Lokal

4. Meshing

Selanjutnya *mesh* model lokal untuk membagi model menjadi elemen-elemen kecil agar analisis numerik dapat menghitung respons struktur secara lebih akurat. *Mesh* model lokal dapat dilihat pada Gambar 3.20.



Gambar 3. 20 *Mesh* Model Lokal

3.7. Analisis Tegangan Lokal

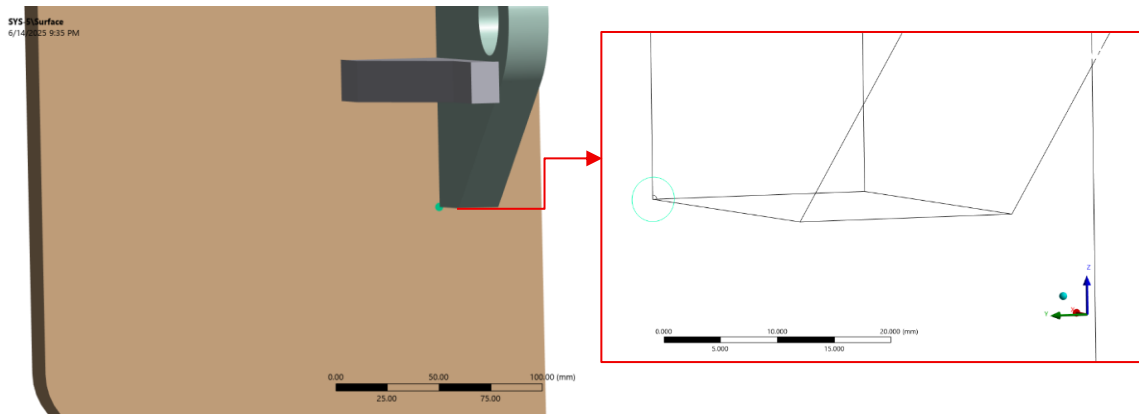
Analisis tegangan lokal dilakukan untuk mengevaluasi secara rinci distribusi tegangan pada area kritis struktur, khususnya pada kupingan *towing hook*, yang teridentifikasi sebagai lokasi dengan konsentrasi tegangan tinggi berdasarkan hasil analisis global. Pendekatan ini bertujuan untuk mengungkap perilaku mekanis secara lebih akurat di sekitar geometri kompleks dan potensi titik awal retak. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi distribusi tegangan pada area kupingan dengan tiga variasi ketebalan yaitu 20 mm, 22 mm dan 24 mm pada setiap variasi pembebanan yaitu 227.027 N, 164.014 N, 236.847 N dan 241.585 N.

3.8. Pemodelan *Crack*

Pemodelan retak pada *kupingan towing hook* bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh cacat struktural terhadap ketahanan lokal struktur terhadap beban tarik. Pada penelitian ini, digunakan pendekatan *arbitrary crack*, yaitu jenis retak yang tidak terbatas pada bentuk atau arah tertentu dan memungkinkan analisis perilaku retakan yang lebih realistis sesuai kondisi medan tegangan yang kompleks. Metode ini memungkinkan fleksibilitas dalam mendefinisikan geometri dan orientasi retak, sehingga dapat menggambarkan potensi kegagalan yang timbul dari proses manufaktur, kelelahan material, maupun beban dinamis yang terjadi selama operasi.

1. Membuat *crack surface*

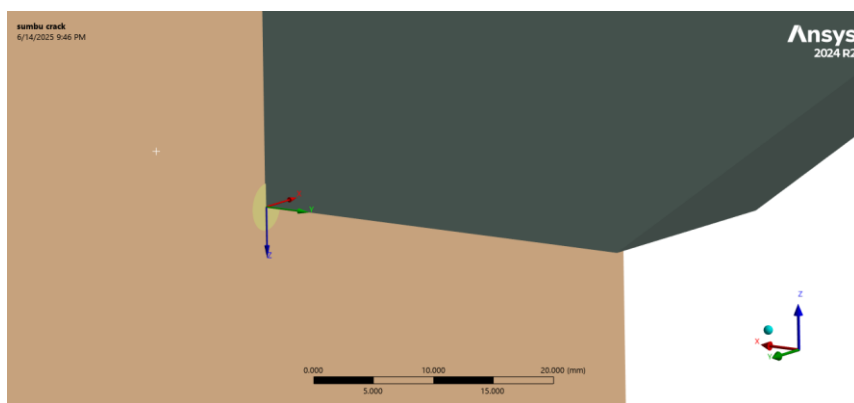
Pemodelan dilakukan dengan menanamkan *crack surface* pada area kritis *kupingan towing hook*, yang sebelumnya telah diidentifikasi melalui analisis tegangan lokal. *Crack surface* dibuat dengan tools “circle” pada ANSYS *SpaceClaim* dengan radius lingkaran sesuai dengan kedalaman retak rata-rata pada tiap rentan kedalaman. *Crack surface* dapat dilihat pada Gambar 3.21.



Gambar 3. 21 *Crack Surface*

2. Membuat koordinat *crack*

Koordinat *crack* digunakan untuk menentukan secara presisi lokasi, orientasi, dan titik retak dalam model sehingga simulasi retak dapat menggambarkan kondisi fisik yang realistis. Sumbu X menunjukkan arah perambatan retak dan Sumbu Y menunjukkan arah bukaan retak yang searah dengan arah pembebanan (Fathur R, 2023). Koordinat *crack* dapat dilihat pada Gambar 3.22.



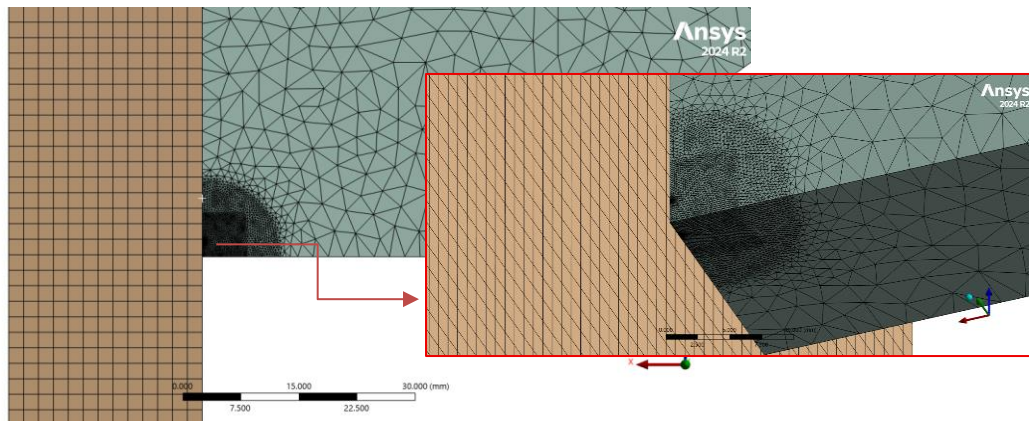
Gambar 3. 22 Koordinat *Crack*

3. Mengatur *mesh crack*

Mengatur *mesh* pada area *crack* bertujuan untuk memastikan ketelitian elemen di sekitar ujung retak guna menangkap gradien tegangan tinggi secara akurat dalam simulasi retak. *Mesh* pada *crack* harus berbentuk *tetrahedron* karena elemen ini memiliki kemampuan tinggi dalam

menyesuaikan diri terhadap geometri tiga dimensi yang kompleks, seperti bentuk retakan *arbitrary* dengan kontur tidak beraturan.

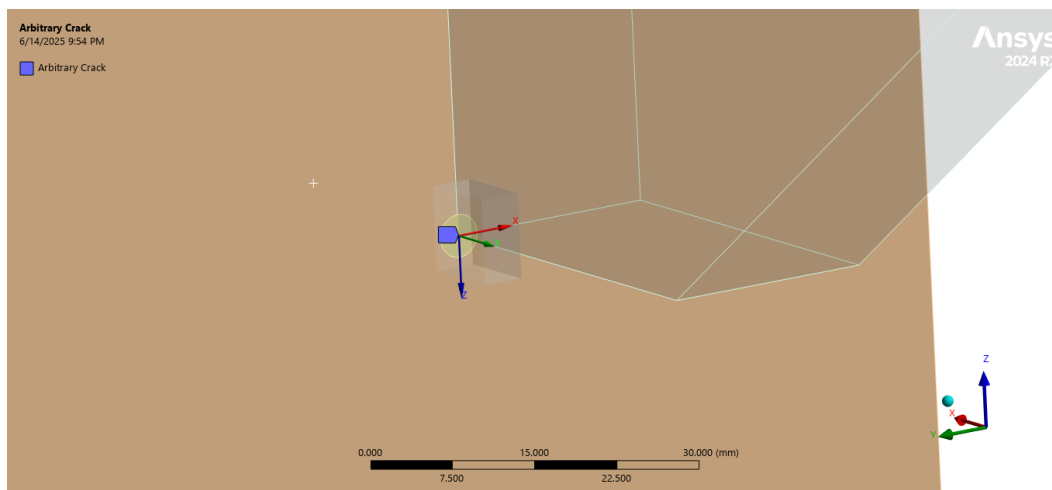
Elemen *tetrahedron* memungkinkan pembentukan *mesh* yang rapat dan halus di sekitar ujung retak, yang penting untuk menangkap gradien tegangan tinggi secara akurat dan memperoleh nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) yang konvergen. Elemen *mesh* yang digunakan sebesar 5 mm pada seluruh model, dan *body sizing* sebesar 0,2 mm pada titik awal *crack* dengan menggunakan tools "*sphere of influence*" untuk menghasilkan *mesh* yang lebih halus dan terkonsentrasi di sekitar ujung retak, sehingga distribusi tegangan dan medan intensitas tegangan di area kritis dapat dimodelkan secara lebih akurat. Hasil *meshing crack* dapat dilihat pada Gambar 3.23.



Gambar 3. 23 Meshing Crack

4. Meng-input *arbitrary crack*

Meng-input *arbitrary crack* dilakukan untuk mendefinisikan bentuk, lokasi, dan orientasi retak secara spesifik pada model solid, sehingga memungkinkan simulasi retak yang sesuai dengan kondisi retakan aktual pada struktur. Pengaplikasian *arbitrary crack* dapat dilihat pada Gambar 3.24.

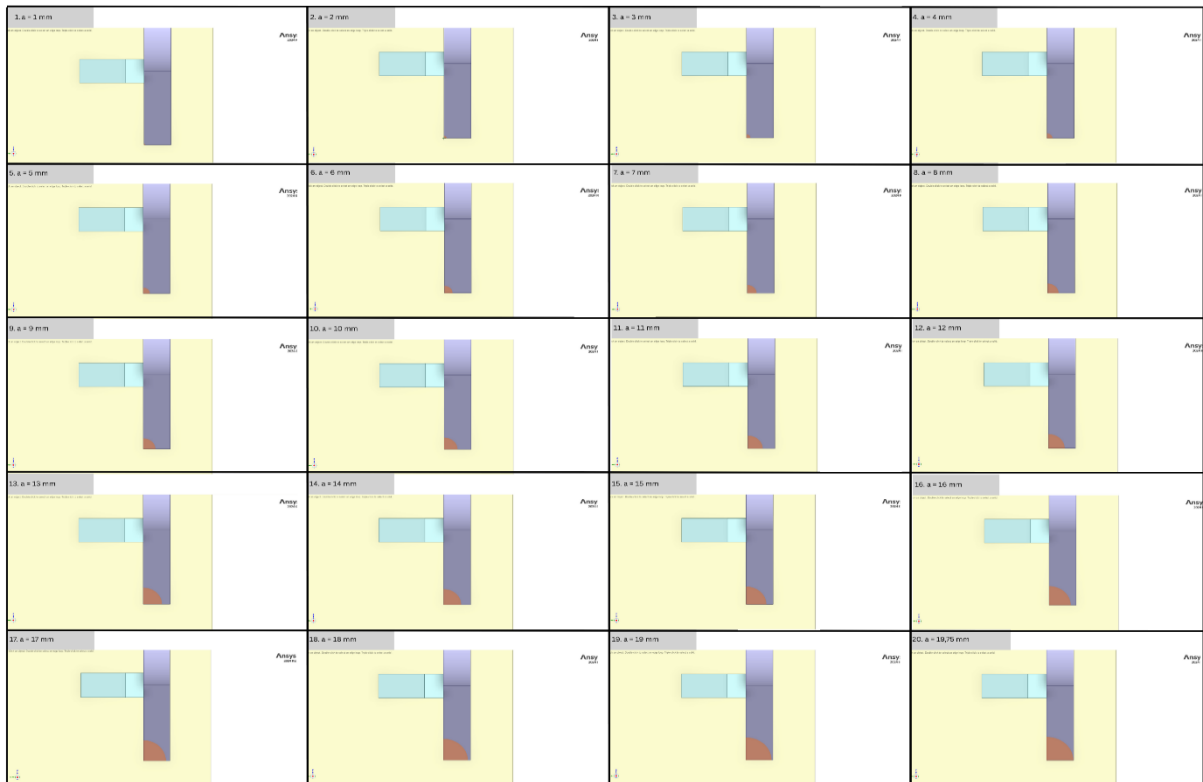


Gambar 3. 24 Arbitrary Crack

3.9. Analisis Crack

Analisis *crack* pada struktur kupingan *towing hook* dilakukan untuk mengkaji pengaruh keberadaan retakan *arbitrary* terhadap perilaku tegangan dan potensi perambatan retak di bawah beban kerja yang diterima. Kedalaman crack akan disesuaikan dengan tebal masing-masing variasi ketebalan kupingan. Pada ketebalan kupingan 20 mm, kedalaman final (a_f) yaitu 20 mm begitu pula dengan kedalaman *final* pada ketebalan 22 mm dan 24 mm sebesar 22 mm dan 24 mm. Hal ini dilakukan karena pendefinisian kegagalan adalah saat kedalaman retak sudah sama dengan ketebalan kupingan.

Analisis ini didasarkan pada pendekatan mekanika retak (*fracture mechanics*), dengan tujuan utama untuk menentukan parameter kritis seperti *Stress Intensity Factor* (SIF) yang digunakan sebagai indikator kestabilan retakan. Visualisasi perambatan retak dapat dilihat pada Gambar 3.25.



Gambar 3. 25 Tahapan Perambatan Retak

Pemodelan numerik dilakukan menggunakan *software* ANSYS, dengan memasukkan geometri retakan berupa *surface* $\frac{1}{4}$ lingkaran secara langsung pada model lokal yang telah dikembangkan sebelumnya. Radius lingkaran disesuaikan dengan rata-rata kedalaman retak awal dan kedalaman retak akhir (a_{avg}). Hal ini dilakukan karena diinginkan hasil dari proses perambatan retak pada saat rentang kedalaman tersebut. Retakan didefinisikan secara *arbitrary* untuk mensimulasikan kondisi cacat yang realistis akibat beban tarik yang bersifat dinamis.

Nilai SIF dihitung pada berbagai skenario pembebanan untuk mengevaluasi kecenderungan pertumbuhan retak serta batas aman terhadap kegagalan. Hasil dari analisis ini nantinya dijadikan sebagai dasar dalam evaluasi umur lelah (*fatigue life*) struktur.

3.10. Perhitungan Umur Lelah

Setelah mendapatkan data SIF dari masing-masing kedalaman retak, kemudian dilakukan penghitungan laju pertumbuhan retak sesuai persamaan 2.4 dengan memasukkan nilai C dan m masing-masing adalah $3,6 \times 10^{-10}$ dan 3 yang didapatkan dari pengujian untuk mencari koefisien dan konstanta material. Konstanta yang digunakan pada penelitian merupakan konstanta pada material *Structural Steel* ASTM - A36. Perhitungan da/dN dapat dilihat pada Persamaan 3.1.

$$\frac{da}{dN} = 3,6 \times 10^{-10} (\Delta K_1)^3 \quad (3.1)$$

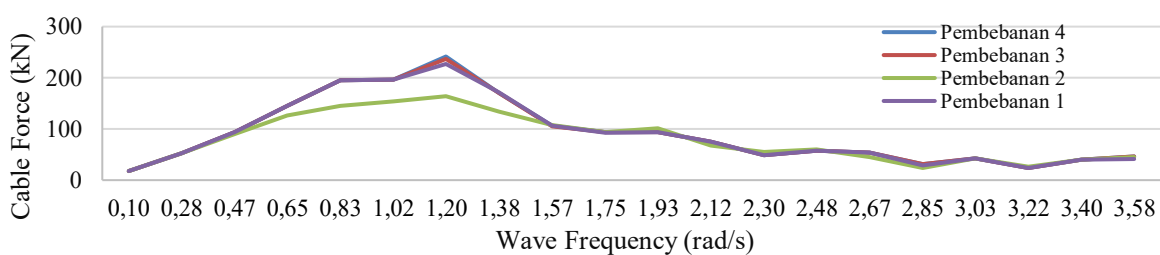
Setelah nilai da/dN didapatkan, maka dilanjutkan dengan penghitungan jumlah *cycle* pada tiap tahap perambatan retak dengan menggunakan Persamaan 2.6. Perhitungan ΔN dapat dilihat pada Persamaan 3.2.

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{3,6 \times 10^{-10} (\Delta K_1)^3} \quad (3.2)$$

Setelah didapatkannya nilai jumlah *cycle* ΔN , maka perhitungan total *cycle* dapat dilakukan dengan penjumlahan siklus. Penjumlahan tersebut dilakukan pada setiap akhir perambatan retak, siklus initial (N_i) dijumlahkan dengan rentang siklus yang dihitung selanjutnya (ΔN) dengan menggunakan Persamaan 2.7 yang dapat dilihat pada Persamaan 3.3.

$$\Sigma N = \Delta N + N_i \quad (3.3)$$

Selanjutnya umur kelelahan dalam satuan detik dapat dihitung dengan Persamaan 2.8 dengan memasukkan nilai periode gelombang yang telah didapatkan pada simulasi ANSYS AQWA dengan hasil pembebanan tertinggi pada setiap variasi berada pada frekuensi 1,19 rad/sec. Kemudian untuk mendapatkan nilai periode gelombang dilakukan konversi dari frekuensi satuan rad/sec menjadi periode satuan s didapatkan hasil periode gelombang sebesar 5,236 s. Grafik *cable force* pada tiap frekuensi dapat dilihat pada Gambar 3.26.



Gambar 3. 26 Grafik *Cable Force* dalam Setiap Frekuensi

Lalu umur lelah dalam satuan detik dapat dihitung dengan Persamaan 3.4.

$$Fatigue\ life\ (s) = \Sigma N \times 5,236 \quad (3.4)$$

Setelah mendapatkan hasil umur lelah dalam satuan detik, didapatkan umur lelah dalam satuan tahun dengan membagikannya dengan $3,154 \times 10^7$ yaitu banyak detik dalam 1 tahun.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

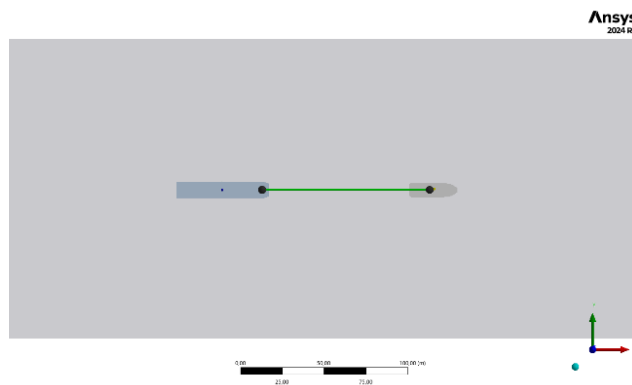
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pembebanan dari ANSYS AQWA

Setelah dilakukan simulasi tarikan *barge* oleh *towing hook* pada ANSYS AQWA. Didapatkan hasil beban tarik dengan 4 variasi posisi tarikan *barge* yaitu tarikan 0° atau lurus dengan *tugboat*, tarikan 45° dari *tugboat*, tarikan dengan kondisi *barge* yang *trim by stern* dan *trim by bow*.

1. Hasil Pembebanan 1

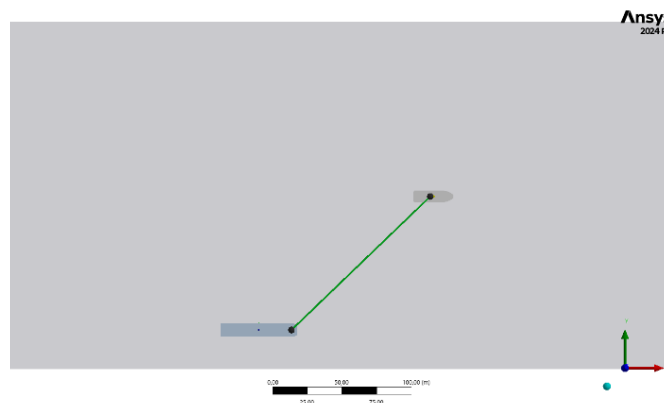
Setelah dilakukan simulasi penarikan *barge* oleh *tugboat* dengan kondisi posisi *barge* 0° terhadap *tugboat* (lurus) didapatkan hasil pembebanan sebesar 227.027 N. Visualisasi penarikan *barge* oleh *tugboat* pada pembebanan 1 dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Penarikan *Barge* oleh *Tugboat* Pembebanan 1

2. Hasil Pembebanan 2

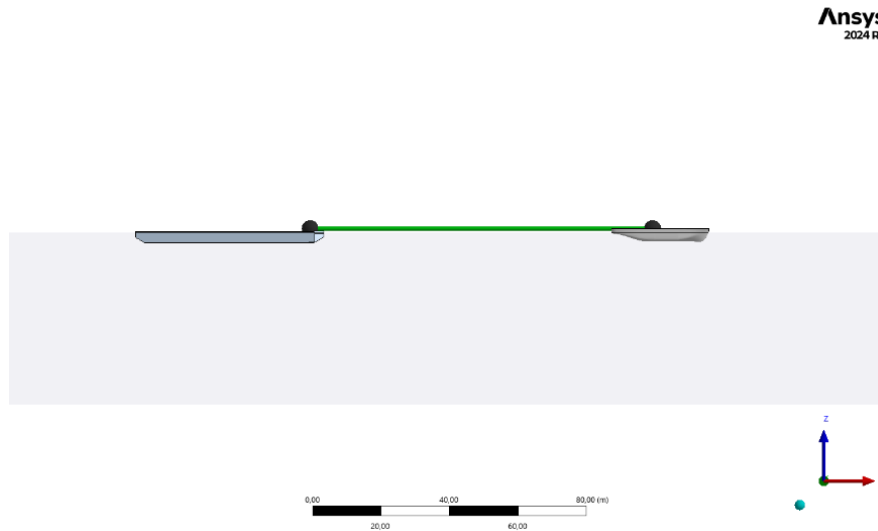
Setelah dilakukan simulasi penarikan *barge* oleh *tugboat* dengan kondisi posisi *barge* 45° terhadap *tugboat* didapatkan hasil pembebanan sebesar 164.014 N. Visualisasi penarikan *barge* oleh *tugboat* pada pembebanan 2 dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Penarikan *Barge* oleh *Tugboat* Pembebanan 2

3. Hasil Pembebanan 3

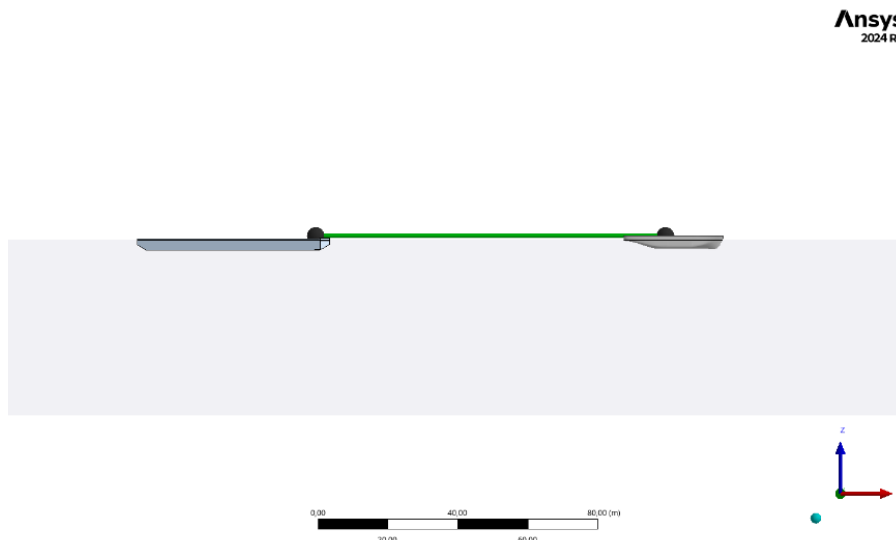
Setelah dilakukan simulasi penarikan *barge* oleh *tugboat* dengan kondisi *barge trim by stern* sebesar $0,15^\circ$ didapatkan hasil pembebanan sebesar 236.847 N. Visualisasi penarikan *barge* oleh *tugboat* pada pembebanan 3 dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Penarikan *Barge* oleh *Tugboat* Pembebanan 3

4. Hasil Pembebanan 4

Setelah dilakukan simulasi penarikan *barge* oleh *tugboat* dengan kondisi *barge trim by bow* sebesar $0,15^\circ$ didapatkan hasil pembebanan sebesar 241.584 N. Visualisasi penarikan *barge* oleh *tugboat* pada pembebanan 4 dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Penarikan *Barge* oleh *Tugboat* Pembebanan 4

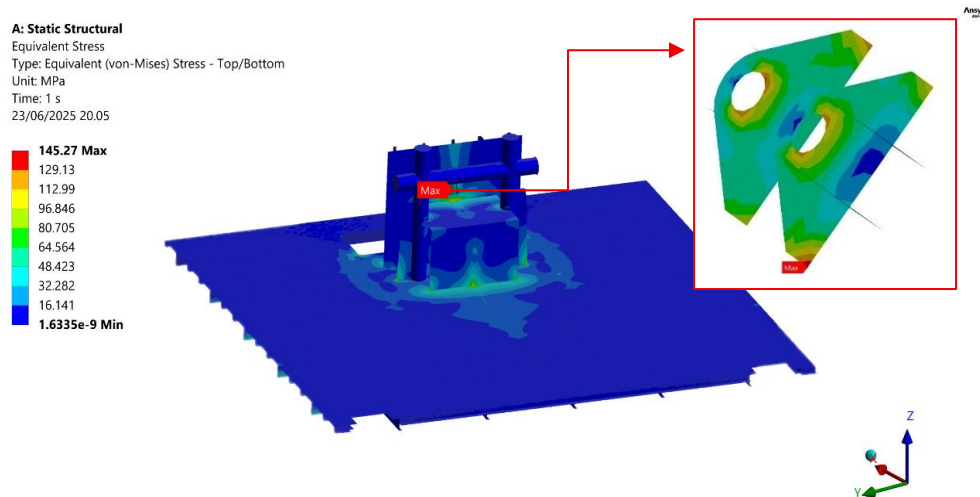
4.2. Analisis Tegangan Global

Setelah didapatkan besar pembebanan pada setiap variasi tarikan, selanjutnya menganalisis tegangan global. Tegangan yang dianalisis adalah tegangan tarik aksial pada struktur *towing hook* dengan memberikan *remote force* sebesar hasil pembebanan di tiap variasi

yang telah didapatkan. Hasil tegangan ini pada nantinya akan digunakan sebagai dasar pembebanan pada analisis tegangan lokal.

4.2.1. Analisis Tegangan Global Variasi Pembebanan 1

Pada kondisi pembebanan 1, dengan gaya tarik sebesar 227.027 N, diperoleh nilai tegangan ekuivalen maksimum sebesar 145,27 MPa yang terjadi pada bagian kupingan *towing hook*. Hasil analisis tegangan global pembebanan 1 dapat dilihat pada Gambar 4.5.



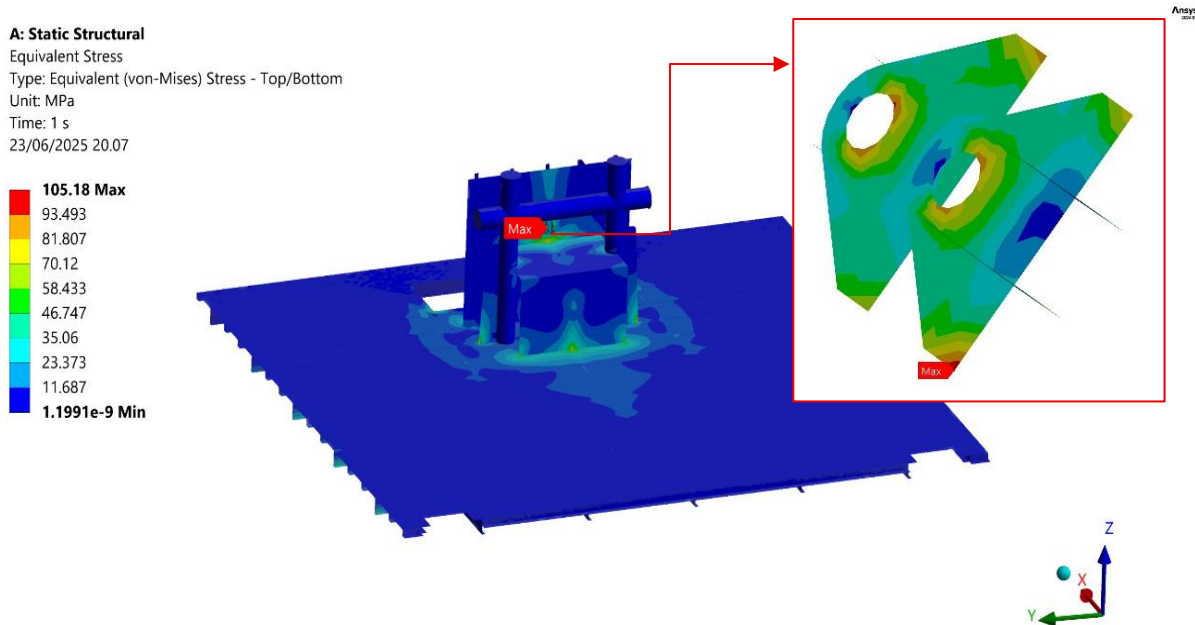
Gambar 4. 5 Tegangan Global Variasi Pembebanan 1

Tegangan yang muncul pada kondisi ini merupakan tegangan tarik yang memicu terjadinya deformasi mode 1 (*opening mode*). Hal ini disebabkan oleh gaya tarik aksial yang bekerja secara langsung searah sumbu longitudinal struktur, sehingga menghasilkan pembukaan atau pemisahan material pada area kritis. Berdasarkan gambar hasil simulasi, area berwarna merah menunjukkan lokasi dengan tegangan ekuivalen maksimum, yang mengindikasikan daerah kritis pada struktur. Meskipun beban yang diterapkan adalah beban tarik, distribusi tegangan tidak selalu merata di seluruh struktur. Hal ini disebabkan oleh adanya perubahan geometri yang tajam, seperti sudut, sambungan, atau lubang, yang dapat memicu terjadinya konsentrasi tegangan. Selain itu, kondisi pengekangan dan distribusi beban yang tidak seragam juga berkontribusi terhadap pembentukan tegangan lokal yang tinggi di area tertentu. Oleh karena itu, lokasi berwarna merah menjadi titik kritis karena mengalami akumulasi tegangan tertinggi, sehingga berpotensi menjadi area awal terjadinya retak atau kegagalan struktural.

4.2.2. Analisis Tegangan Global Variasi Pembebanan 2

Pada pembebanan variasi 2, didapatkan nilai beban tarik sebesar 164.014 N dari hasil simulasi ANSYS AQWA dengan variasi tarikan *barge* 45°. Tegangan yang muncul pada

kondisi ini merupakan tegangan tarik yang memicu terjadinya deformasi mode 1 (*opening mode*). Hal ini disebabkan oleh gaya tarik aksial yang bekerja secara langsung searah sumbu longitudinal struktur, sehingga menghasilkan pembukaan atau pemisahan material pada area kritis. Hasil analisis tegangan global pembebanan 2 dapat dilihat pada Gambar 4.6.

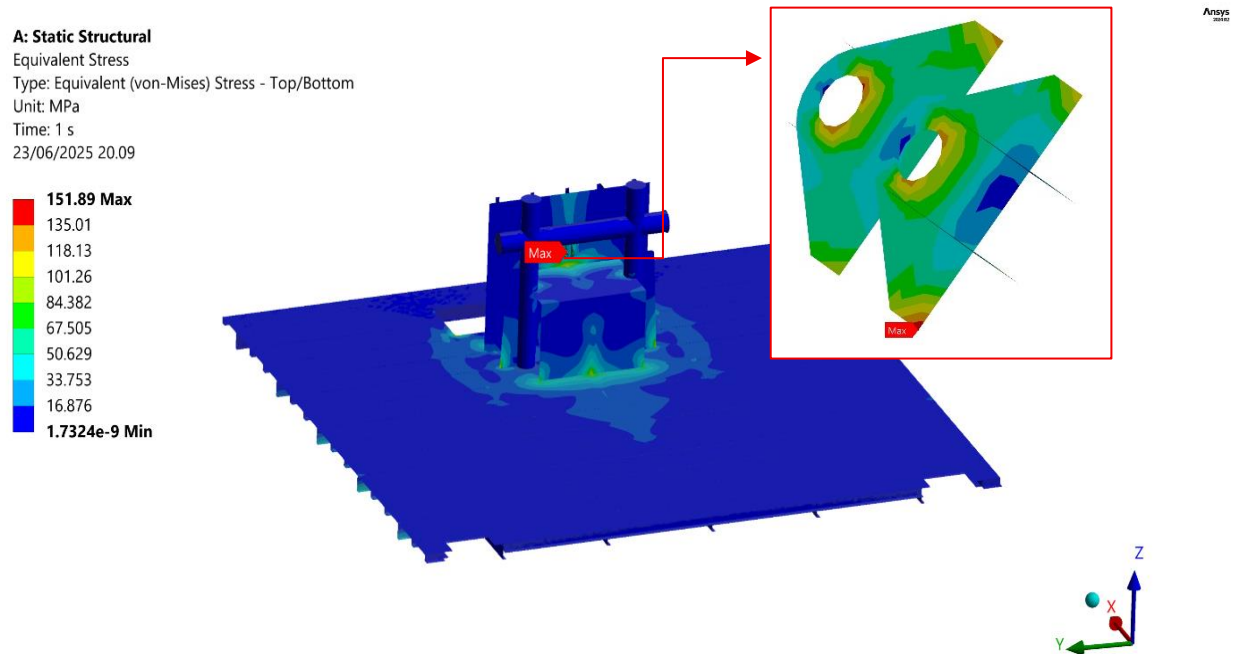


Gambar 4. 6 Tegangan Global Variasi Pembebanan 2

Dari analisis tegangan global dengan beban tarikan sebesar 164.014 N didapatkan tegangan ekuivalen maksimal sebesar 105,18 MPa pada kupingan *towing hook*. Berdasarkan hasil analisis tegangan global, terlihat bahwa penurunan beban tarik dari 227.027 N menjadi 164.014 N menyebabkan penurunan tegangan maksimum pada struktur *towing hook* dari 145,27 MPa menjadi 105,18 MPa. Hal ini menunjukkan adanya hubungan linier antara besar gaya tarik dan peningkatan tegangan pada area kritis. Tegangan tinggi yang berulang pada area tersebut berpotensi menyebabkan konsentrasi tegangan, yang dalam jangka panjang dapat memicu inisiasi retak, terutama jika struktur mengalami siklus pembebanan dinamis atau *fatigue*.

4.2.3. Analisis Tegangan Global Variasi Pembebanan 3

Pada pembebanan variasi 3, diberikan beban tarik sebesar 236.847 N dari hasil simulasi ANSYS AQWA dengan variasi *barge trim by stern*. Tegangan yang muncul pada kondisi ini merupakan tegangan tarik yang memicu terjadinya deformasi mode 1 (*opening mode*). Hal ini disebabkan oleh gaya tarik aksial yang bekerja secara langsung searah sumbu longitudinal struktur, sehingga menghasilkan pembukaan atau pemisahan material pada area kritis. Hasil analisis tegangan global pembebanan 3 dapat dilihat pada Gambar 4.7.

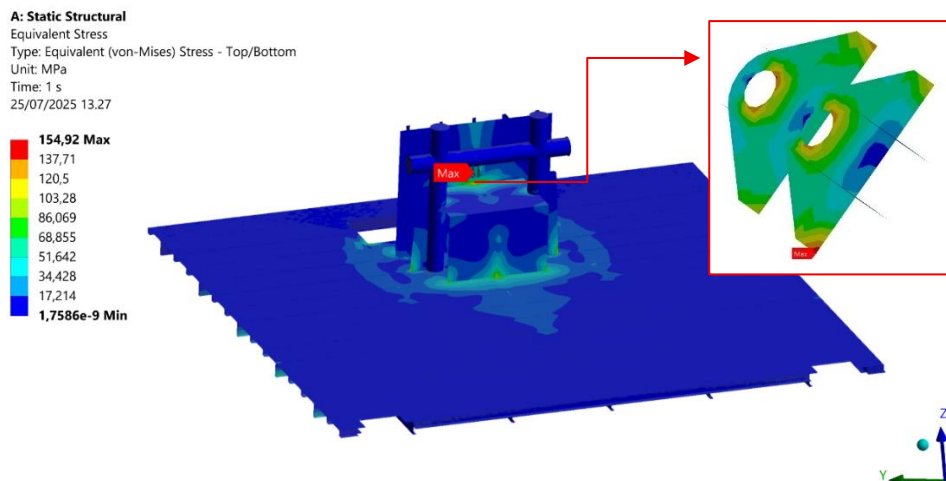


Gambar 4. 7 Tegangan Global Variasi Pembebanan 3

Dari analisis tegangan global yang dilakukan terhadap struktur *towing hook* dengan beban tarikan sebesar 236.847 N, diperoleh nilai tegangan ekuivalen maksimum sebesar 151,89 MPa. Tegangan maksimum ini mengindikasikan bahwa pada variasi tersebut terjadi konsentrasi tegangan yang signifikan, yang berpotensi memicu deformasi permanen atau inisiasi retak apabila tegangan mendekati atau melebihi batas elastis (*yield strength*) material. Oleh karena itu, variasi ke-3 perlu menjadi fokus utama dalam evaluasi keamanan dan ketahanan struktur *towing hook*, terutama dalam konteks analisis kelelahan dan mekanika retak. Jika tegangan ini bekerja secara berulang dalam kondisi nyata, maka risiko propagasi retak akan meningkat secara signifikan.

4.2.4. Analisis Tegangan Global Variasi Pembebanan 4

Pada pembebanan variasi 4, diberikan beban tarik sebesar 241.584 N dari hasil simulasi ANSYS AQWA dengan variasi *barge trim by bow*. Tegangan yang muncul pada kondisi ini merupakan tegangan tarik yang memicu terjadinya deformasi mode 1 (*opening mode*). Hal ini disebabkan oleh gaya tarik aksial yang bekerja secara langsung searah sumbu longitudinal struktur, sehingga menghasilkan pembukaan atau pemisahan material pada area kritis. Hasil analisis tegangan global pembebanan 4 dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Tegangan Global Variasi Pembebanan 4

Dari analisis tegangan global yang dilakukan terhadap struktur *towing hook* dengan beban tarikan sebesar 241.584 N, diperoleh nilai tegangan ekuivalen maksimum sebesar 154,92 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi ke-4 merupakan kondisi pembebanan paling kritis dibandingkan variasi lainnya, karena menghasilkan respons tegangan paling besar terhadap struktur.

4.2.5. Konvergensi *Mesh* Model Global

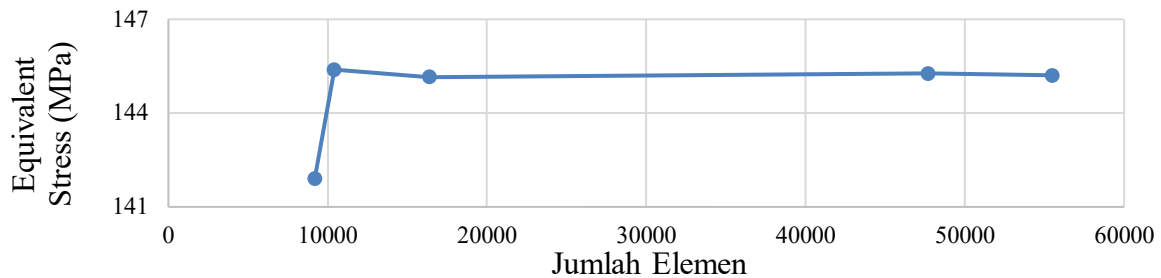
Konvergensi *mesh* adalah proses dalam analisis elemen hingga (FEA) untuk memastikan bahwa hasil simulasi seperti tegangan atau deformasi menjadi stabil dan tidak banyak berubah meskipun ukuran elemen *mesh* diperkecil. Artinya, model dianggap mencapai konvergensi jika hasilnya sudah cukup akurat dan tidak sensitif terhadap perubahan ukuran *mesh*, menandakan bahwa solusi numerik mendekati solusi eksak dari permasalahan fisik. Ukuran *mesh* yang digunakan adalah *element sizing* sebesar 300 mm hingga 45 mm. Hasil konvergensi *mesh* model global dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Konvergensi *Mesh* Model Global

Element Size (mm)	Jumlah Elemen	Equivalent Stress (MPa)	Different
300	9.191	141,91	
200	10.408	145,39	2,452%
100	16.382	145,15	0,165%
50	47.702	145,27	0,083%
45	55.492	145,2	0,048%

Dari tabel 4.1 dapat dilihat bahwa nilai *equivalent stress* mulai stabil seiring dengan semakin kecilnya ukuran elemen. Perbedaan nilai stres antara ukuran *mesh* 100 mm ke 50 mm

hanya 0,083%, dan dari 50 mm ke 45 mm hanya berubah sebesar 0,048%. Ini menunjukkan bahwa *mesh* berukuran 50 mm sudah menghasilkan hasil yang cukup konvergen, karena perubahan nilai stres berikutnya sangat kecil dan tidak signifikan. Oleh karena itu, *mesh* berukuran 50 mm dipilih sebagai ukuran optimal untuk analisis karena memberikan keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi. Grafik konvergensi *mesh* model global dapat dilihat pada Gambar 4.9.



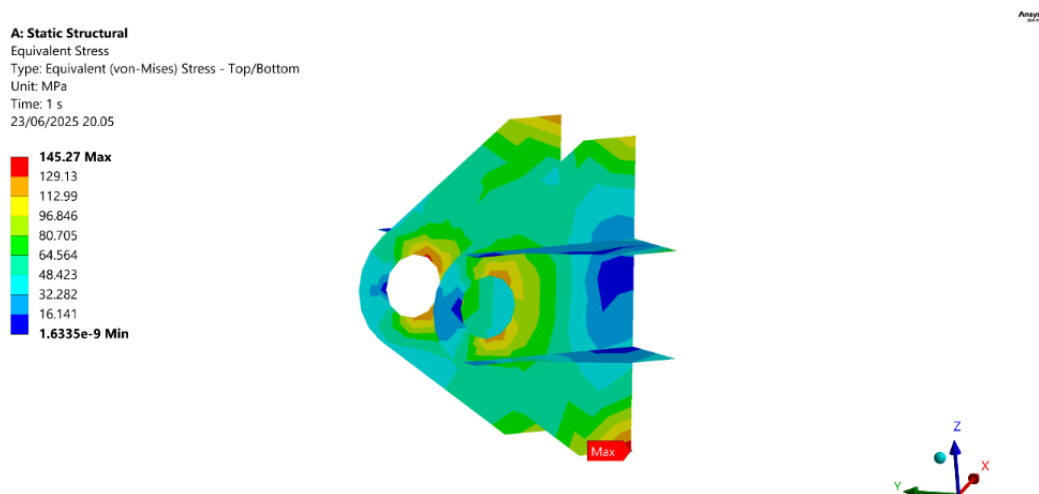
Gambar 4. 9 Grafik Konvergensi *Mesh* Model Global

4.3. Analisis Tegangan Lokal

Analisis tegangan lokal ditinjau pada kupingan *towing hook* dan *bracketnya*, hasil tegangan yang diperoleh menjadi acuan untuk skenario retak. Tegangan yang digunakan pada analisis lokal ini adalah tegangan normal ke arah horizontal (sumbu x), karena analisis perambatan retak menggunakan moda I (*opening mode*).

4.3.1. Analisis Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 1

Pada variasi pembebanan 1, dilakukan analisis tegangan lokal dengan gaya tarik sebesar 227.027 N yang diaplikasikan pada struktur *towing hook*. Hasil analisis tegangan lokal pembebanan 1 dapat dilihat Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 1

Tegangan ini memicu terjadinya deformasi mode 1 atau *opening mode*, yaitu suatu kondisi di mana gaya tarik menyebabkan pemisahan bidang retak secara tegak lurus terhadap arah tegangan. Mode deformasi ini merupakan bentuk awal dari potensi terjadinya kerusakan material, terutama pada area kritis seperti kupingan *towing hook* yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi. Oleh karena itu, analisis lebih lanjut terhadap distribusi tegangan lokal menjadi penting untuk mengidentifikasi kemungkinan inisiasi retak serta mengevaluasi ketahanan struktur terhadap beban tarik yang bekerja secara berulang. Pada bagian kupingan *towing hook*, tegangan terbesar berada pada ujung bawah kupingan. Hal ini dapat dijadikan pedoman untuk penempatan *crack* yang akan dianalisis karena ujung bawah kupingan mengalami konsentrasi tegangan tertinggi akibat gaya tarik yang diterima oleh *towing hook* saat beroperasi. Konsentrasi tegangan di area ini menyebabkan probabilitas inisiasi retak atau *crack initiation* lebih tinggi, menjadikannya lokasi kritis untuk analisis kerusakan.

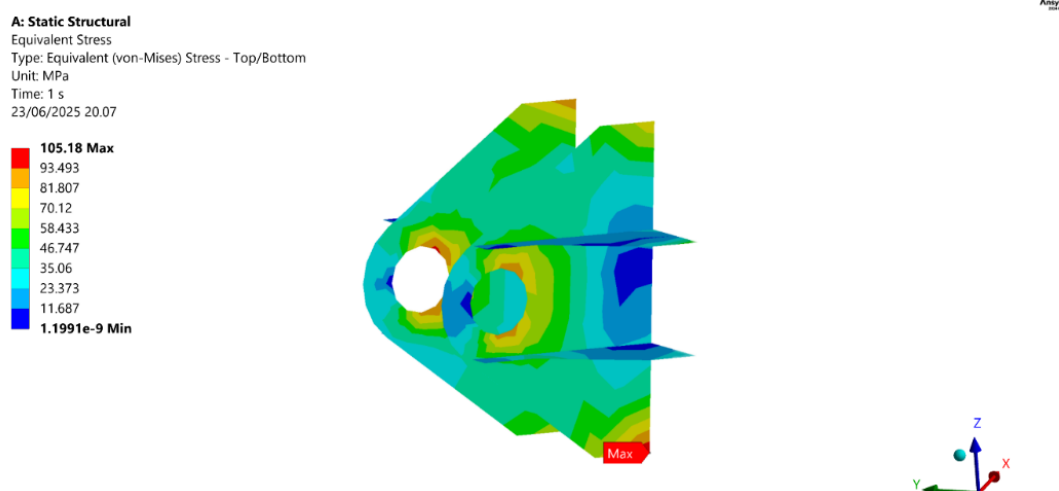
Besar tegangan ekuivalen maksimum pada setiap ketebalan kupingan *towing hook* dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Tegangan Maksimum Kupingan *Towing Hook* Variasi Pembebanan 1

Tebal Kupingan	<i>Equivalent Stress</i>	Satuan
20 mm	145,27	MPa
22 mm	130,52	MPa
24 mm	124,30	MPa

4.3.2. Analisis Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 2

Pada variasi pebebanan 2, dilakukan analisis tegangan lokal dengan besar beban tarikan 164.014 N. Hasil analisis tegangan lokal pembebanan 2 dapat dilihat Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 2

Tegangan ini memicu terjadinya deformasi mode 1 atau *opening mode*, yaitu suatu kondisi di mana gaya tarik menyebabkan pemisahan bidang retak secara tegak lurus terhadap arah tegangan. Mode deformasi ini merupakan bentuk awal dari potensi terjadinya kerusakan material, terutama pada area kritis seperti kupingan *towing hook* yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi.

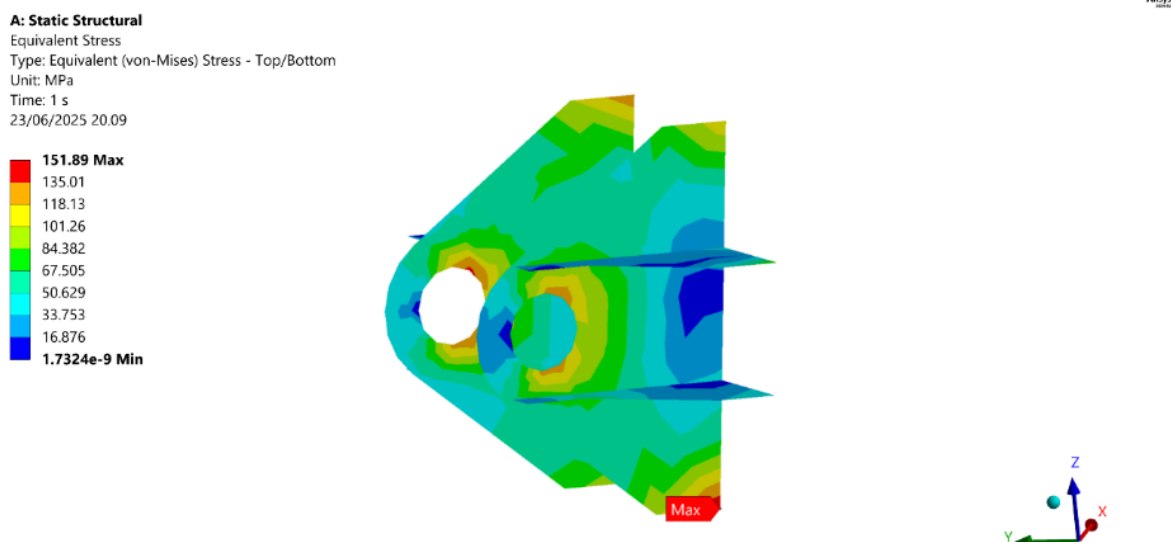
Besar tegangan maksimum pada setiap ketebalan kupingan *towing hook* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Tegangan Maksimum Kupingan *Towing Hook* Variasi Pembebanan 2

Tebal Kupingan	<i>Equivalent Stress</i>	Satuan
20 mm	105,18	MPa
22 mm	101,75	MPa
24 mm	95,793	MPa

4.3.3. Analisis Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 3

Pada variasi pebebanan 3, dilakukan analisis tegangan lokal dengan besar beban tarikan 236.847 N. Tegangan ini memicu terjadinya deformasi mode 1 atau *opening mode*, yaitu suatu kondisi di mana gaya tarik menyebabkan pemisahan bidang retak secara tegak lurus terhadap arah tegangan. Mode deformasi ini merupakan bentuk awal dari potensi terjadinya kerusakan material, terutama pada area kritis seperti kupingan *towing hook* yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi. Hasil analisis tegangan lokal pembebanan 3 dapat dilihat Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 3

Besar tegangan maksimum pada setiap ketebalan kupingan *towing hook* dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Tegangan Maksimum Kupingan *Towing Hook* Variasi Pembebanan 3

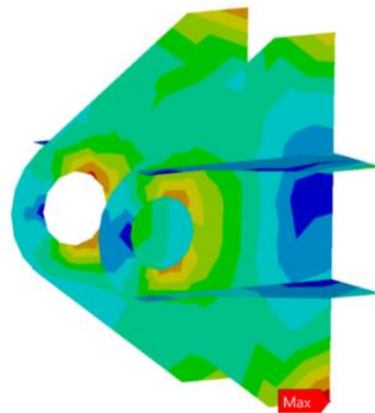
Tebal Kupingan	<i>Equivalent Stress</i>	Satuan
20 mm	151,89	MPa
22 mm	140,50	MPa
24 mm	136,16	MPa

4.3.4. Analisis Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 4

Pada variasi pebebanan 4, dilakukan analisis tegangan lokal dengan besar beban tarikan 241.584 N. Hasil analisis tegangan lokal pembebanan 4 dapat dilihat Gambar 4.13.

A: Static Structural
ES towing hook fondation
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
25/07/2025 13:28

154,92 Max
140,84
126,76
112,67
98,588
84,504
70,42
56,336
42,252
28,168
14,084
1,7586e-9 Min



Gambar 4. 13 Tegangan Lokal Variasi Pembebanan 4

Tegangan ini memicu terjadinya deformasi mode 1 atau *opening mode*, yaitu suatu kondisi di mana gaya tarik menyebabkan pemisahan bidang retak secara tegak lurus terhadap arah tegangan. Mode deformasi ini merupakan bentuk awal dari potensi terjadinya kerusakan material, terutama pada area kritis seperti kupingan *towing hook* yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi. Besar tegangan maksimum pada setiap ketebalan kupingan *towing hook* dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Tegangan Maksimum Kupingan *Towing Hook* Variasi Pembebanan 4

Tebal Kupingan	<i>Equivalent Stress</i>	Satuan
20 mm	154,92	MPa
22 mm	144,77	MPa
24 mm	139,22	MPa

4.4. Tegangan Izin Menurut *Rules BKI*

Untuk mengetahui tingkat keamanan dari komponen yang dianalisis terhadap kemungkinan kegagalan akibat tegangan kerja yang diterima, perlu dilakukan perbandingan

dengan tegangan izin BKI. Aturan yang dijadikan acuan adalah BKI *Permissible for towing gear* (Pt 1 Vol II Sec 27 B.7). Setelah dihitung nilai *permissible* pada lampiran B, didapatkan besar *permissible* senilai 199,75 MPa. Hasil perhitungan *factor of safety* pada tiap tegangan dapat dilihat Tabel 4.6 hingga 4.9.

Tabel 4. 6 *Factor of Safety* Rules BKI Variasi Pembebanan 1

<i>Object</i>	<i>Stress Max</i>	<i>Permissible</i>	<i>Factor of Safety</i>	Ket
Struktur <i>Towing Hook</i>	145,27	199,75	1,375	Pass
Kupingan 20 mm	145,27	199,75	1,375	Pass
Kupingan 22 mm	130,52	199,75	1,530	Pass
Kupingan 24 mm	124,30	199,75	1,606	Pass

Tabel 4. 7 *Factor of Safety* Rules BKI Variasi Pembebanan 2

<i>Object</i>	<i>Stress Max</i>	<i>Permissible</i>	<i>Factor of Safety</i>	Ket
Struktur <i>Towing Hook</i>	105,18	199,75	1,899	Pass
Kupingan 20 mm	105,18	199,75	1,899	Pass
Kupingan 22 mm	101,75	199,75	1,963	Pass
Kupingan 24 mm	95,793	199,75	2,085	Pass

Tabel 4. 8 *Factor of Safety* Rules BKI Variasi Pembebanan 3

<i>Object</i>	<i>Stress Max</i>	<i>Permissible</i>	<i>Factor of Safety</i>	Ket
Struktur <i>Towing Hook</i>	151,89	199,75	1,315	Pass
Kupingan 20 mm	151,89	199,75	1,315	Pass
Kupingan 22 mm	140,50	199,75	1,421	Pass
Kupingan 24 mm	136,16	199,75	1,467	Pass

Tabel 4. 9 *Factor of Safety* Rules BKI Variasi Pembebanan 4

<i>Object</i>	<i>Stress Max</i>	<i>Permissible</i>	<i>Factor of Safety</i>	Ket
Struktur <i>Towing Hook</i>	154,92	199,75	1,289	Pass
Kupingan 20 mm	154,92	199,75	1,289	Pass
Kupingan 22 mm	144,77	199,75	1,379	Pass
Kupingan 24 mm	139,22	199,75	1,434	Pass

Pada keseluruhan struktur dari *frame* 10 hingga *frame* 25 yang dianalisis dapat bekerja dengan baik dilihat dari nilai tegangan maksimal yang tidak melewati nilai izin dari badan klasifikasi (BKI).

4.5. Analisis Perambatan Retak

Setelah menentukan lokasi awal retak pada kupingan *towing hook*, maka pada lokasi tersebut dilakukan pemodelan keretakan antara kupingan *towing hook* dan *doubling plate*

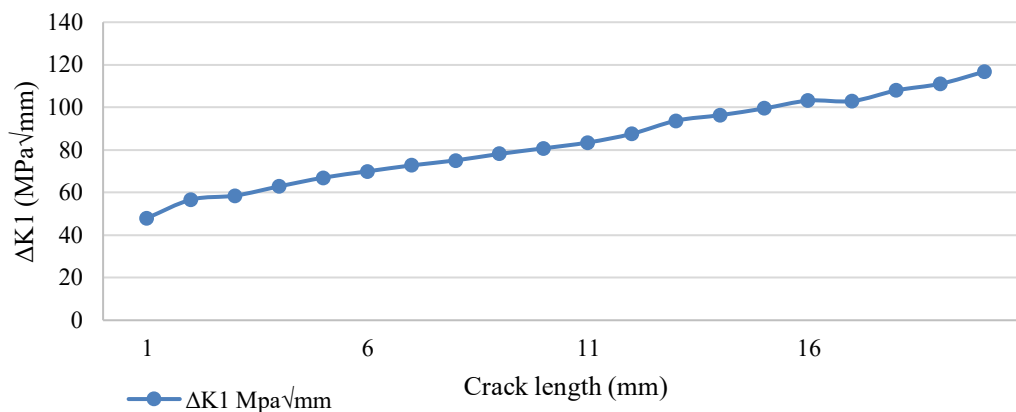
penyangga sesuai dengan Gambar 3.21. melalui pemodelan lokal tersebut, nilai *stress intensity factor* mode 1 (K_I) pada tiap iterasi kedalaman retak dianalisis. Ukuran retak awal dalam penelitian ini merupakan dimensi asumsi sesuai dengan standar *Rule American Bureau of Shipping* (ABS) yaitu 0,5 mm. Untuk nilai kedalaman retak akhir, digunakan kedalaman retak hingga 20 mm, 22 mm, dan 24 mm sesuai dengan radius retak yang didefinisikan sebagai kegagalan struktur. Lokasi retak tersebut ditentukan berdasarkan hasil tegangan maksimum pada analisis tegangan lokal.

4.5.1. Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 1

Dengan gaya tarik sebesar 207.027 N, didapatkan nilai *Stress Intensity Factor* atau ΔK_I pada setiap kedalaman sebagai berikut.

1. Ketebalan 20 mm

Berdasarkan data ΔK_I yang telah diperoleh, diketahui bahwa nilai SIF meningkat seiring pertambahan panjang retak, menunjukkan kecenderungan percepatan perambatan retak. Pada fase awal $a = 0,5-5$ mm, pertumbuhan ΔK_I bersifat relatif lambat, namun setelah $a > 5$ mm, terjadi peningkatan signifikan hingga mencapai 116,82 $\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ pada $a = 19,75$ mm. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur *towing hook* memasuki fase kritis perambatan retak, di mana risiko kegagalan meningkat dan diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap ketahanan struktur terhadap retak lanjut. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.14.

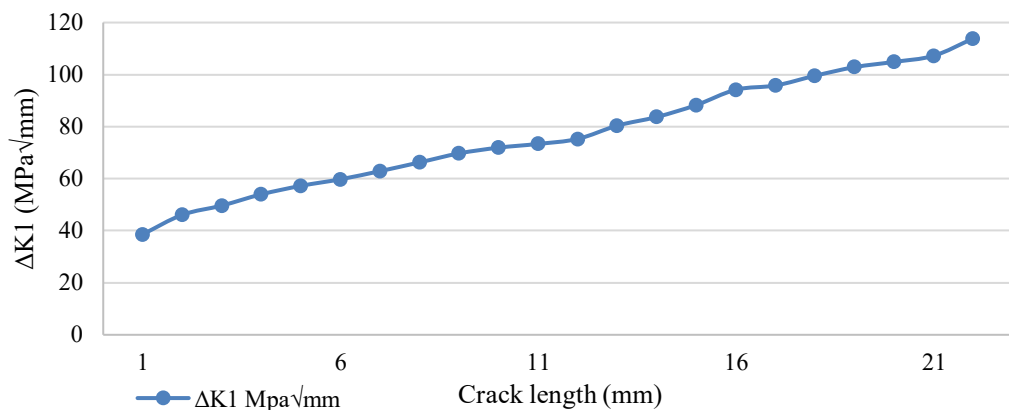


Gambar 4. 14 Grafik SIF Pembebanan 1 Ketebalan 20 mm

2. Ketebalan 22 mm

Berdasarkan data ΔK_I yang telah diperoleh, terlihat bahwa nilai SIF mengalami kenaikan seiring dengan pertambahan panjang retak. Pada tahap awal, peningkatan SIF terjadi secara bertahap dengan laju yang masih relatif rendah. Namun, setelah panjang retak melebihi 5 mm, nilai SIF menunjukkan kecenderungan meningkat lebih cepat, hingga mencapai 113,891

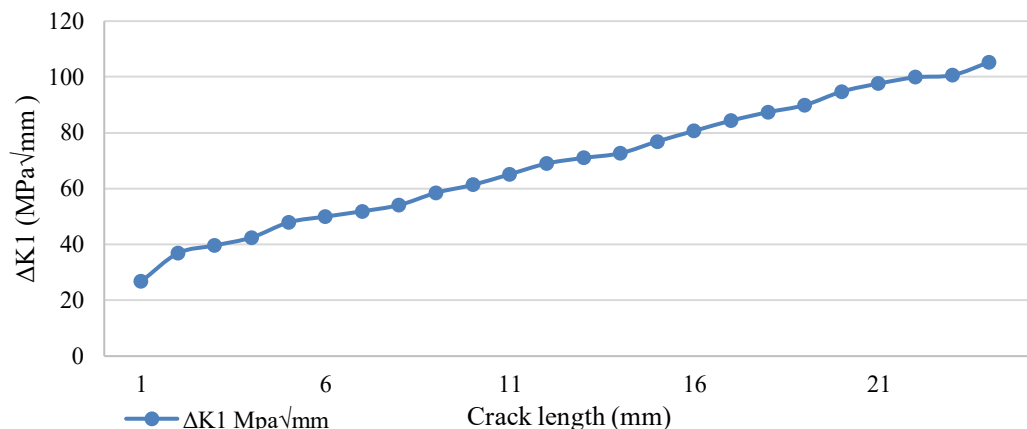
MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pada $a = 21,75$ mm. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Grafik SIF Pembebanan 1 Ketebalan 22 mm

3. Ketebalan 24 mm

Data ΔK_I yang telah diperoleh menunjukkan tren kenaikan yang konsisten seiring pertambahan panjang retak. Pada fase awal, saat retak masih pendek (0,5–5 mm), nilai SIF bertambah secara perlahan, mengindikasikan bahwa laju pertumbuhan retak masih rendah. Nilai SIF tertinggi tercatat sebesar 105,319 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pada panjang retak 23,75 mm. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4. 16 Grafik SIF Pembebanan 1 Ketebalan 24 mm

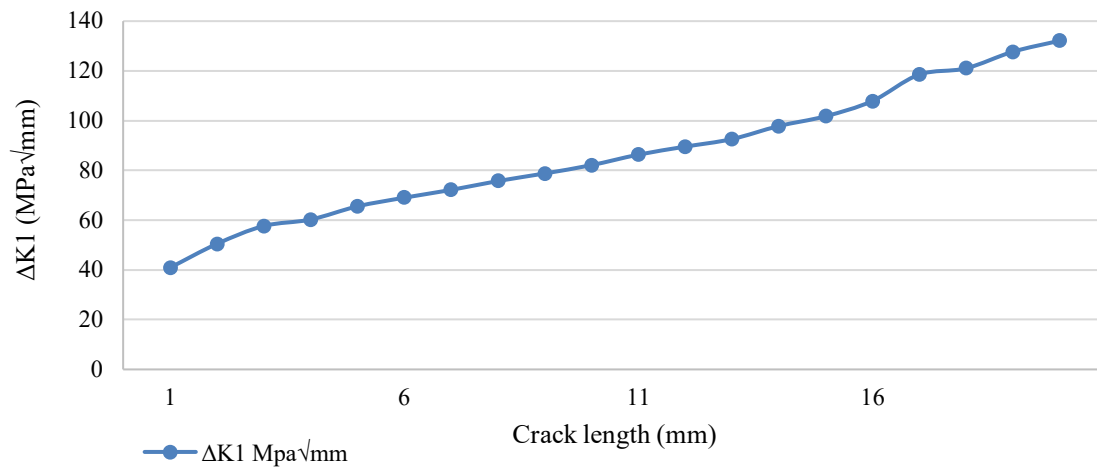
4.5.2. Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 2

Dengan gaya tarik sebesar 164.014 N, didapatkan nilai *Stress Intensity Factor* atau ΔK_I pada setiap kedalaman sebagai berikut.

1. Ketebalan 20 mm

Nilai SIF yang diperoleh mencapai 132,12 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pada panjang retak 19,75 mm, yang menunjukkan bahwa struktur telah memasuki fase kritis propagasi retak. Kenaikan ini mencerminkan bertambahnya kecenderungan retak untuk tumbuh lebih cepat, sehingga

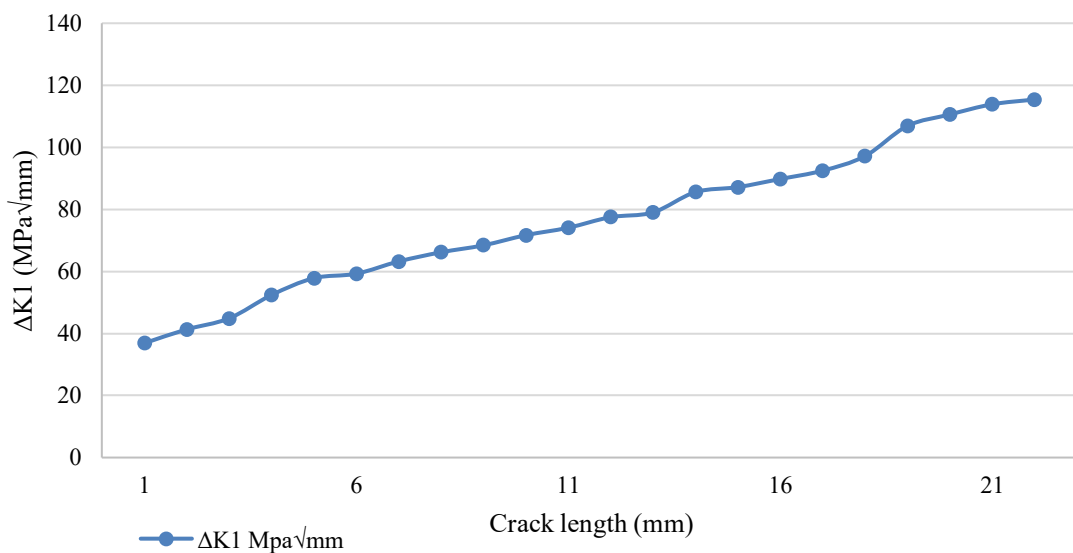
meningkatkan potensi kegagalan struktural. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4. 17 Grafik SIF Pembebanan 2 Ketebalan 20 mm

2. Ketebalan 22 mm

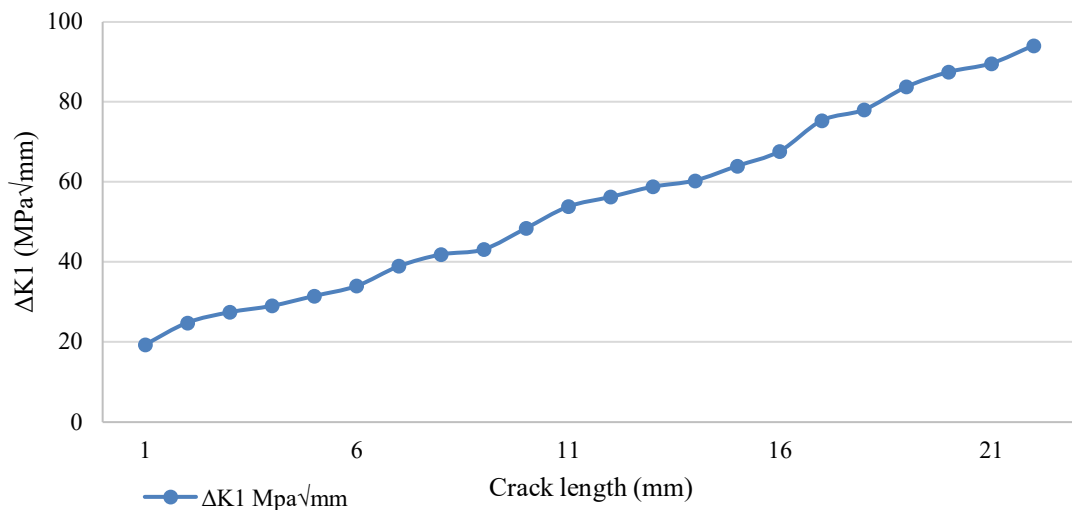
Nilai SIF yang diperoleh terus meningkat hingga mencapai 115,412 MPa√mm pada panjang retak 21,75 mm. Kenaikan ini menunjukkan bahwa struktur berada dalam kondisi kritis, dengan risiko kegagalan yang semakin tinggi jika retak dibiarkan berkembang lebih lanjut. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 18 Grafik SIF Pembebanan 2 Ketebalan 22 mm

3. Ketebalan 24 mm

Nilai SIF yang diperoleh mencapai 104,811 MPa√mm pada $a = 23,75$ mm. Pola ini menunjukkan bahwa struktur semakin rentan terhadap kegagalan seiring bertambahnya retak, sehingga pengawasan dan evaluasi rutin penting dilakukan. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.19.



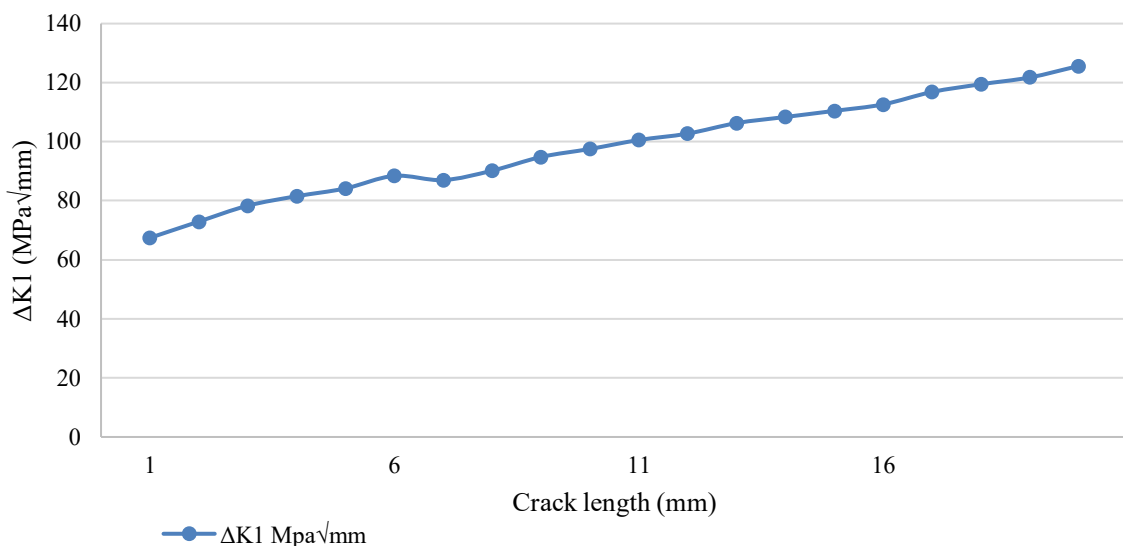
Gambar 4. 19 Grafik SIF Pembebanan 2 Ketebalan 24 mm

4.5.3. Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 3

Dengan gaya tarik sebesar 236.847 N, didapatkan nilai *Stress Intensity Factor* atau ΔK_I pada setiap kedalaman sebagai berikut.

1. Ketebalan 20 mm

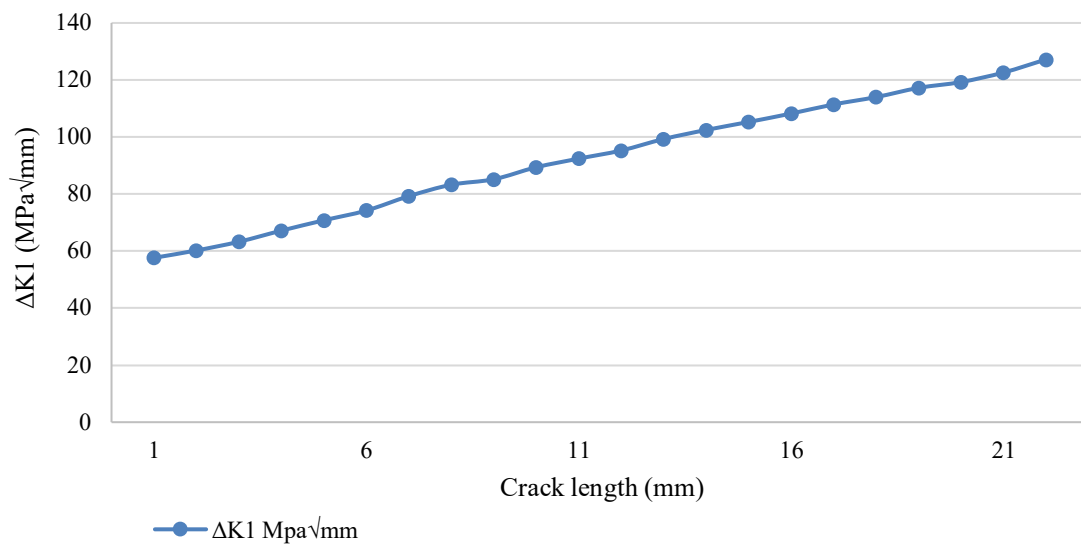
Nilai ΔK_I yang diperoleh menunjukkan tren kenaikan dari 67,44 MPa√mm pada panjang retak rata-rata 1 mm hingga mencapai 125,63 MPa√mm pada panjang retak 19,75 mm. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.20.



Gambar 4. 20 Grafik SIF Pembebanan 3 Ketebalan 20 mm

2. Ketebalan 22 mm

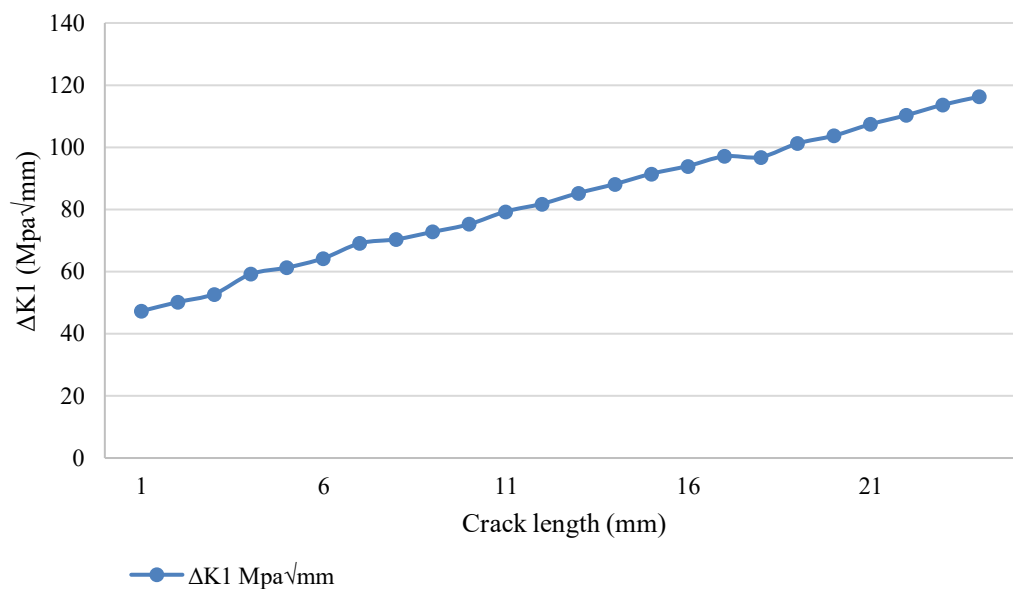
Nilai ΔK_I yang diperoleh meningkat dari 57,638 MPa√mm pada panjang retak rata-rata 1 mm hingga mencapai 127,202 MPa√mm pada panjang retak rata-rata 21,75 mm. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4. 21 Grafik SIF Pembebanan 3 Ketebalan 22 mm

3. Ketebalan 24 mm

Nilai SIF yang diperoleh meningkat secara bertahap mulai dari 47,274 Mpa√mm pada kedalaman retak rata-rata 1 mm hingga mencapai 116,288 Mpa√mm pada kedalaman retak rata-rata 23,75 mm. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.22.



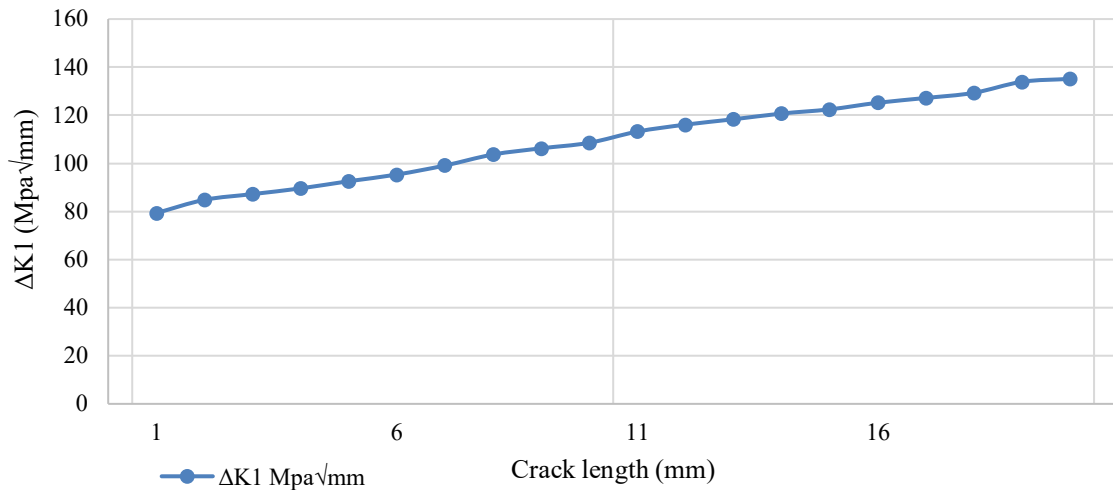
Gambar 4. 22 Grafik SIF Pembebanan 3 Ketebalan 24 mm

4.5.4. Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 4

Dengan gaya tarik sebesar 241.584 N, didapatkan nilai *Stress Intensity Factor* atau ΔK_I pada setiap kedalaman sebagai berikut.

1. Ketebalan 20 mm

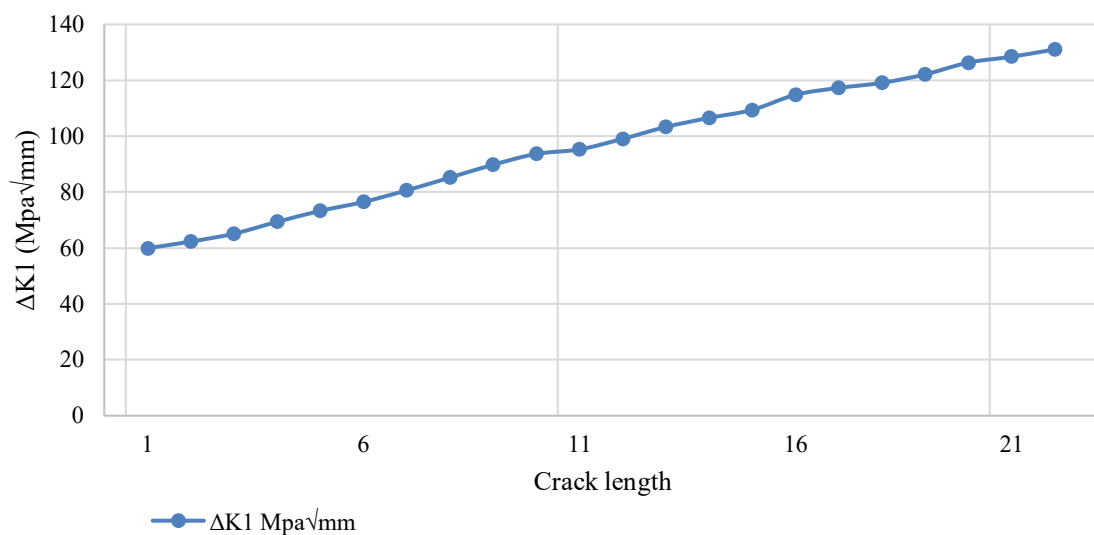
Nilai ΔK_I yang diperoleh menunjukkan tren kenaikan dari 79,33 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pada panjang retak rata-rata 1 mm hingga mencapai 135,127 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pada panjang retak 19,75 mm. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4. 23 Grafik SIF Pembebanan 4 Ketebalan 20 mm

2. Ketebalan 22 mm

Nilai ΔK_I yang diperoleh meningkat dari 59,93 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pada panjang retak rata-rata 1 mm hingga mencapai 131,027 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pada panjang retak rata-rata 21,75 mm. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.24.

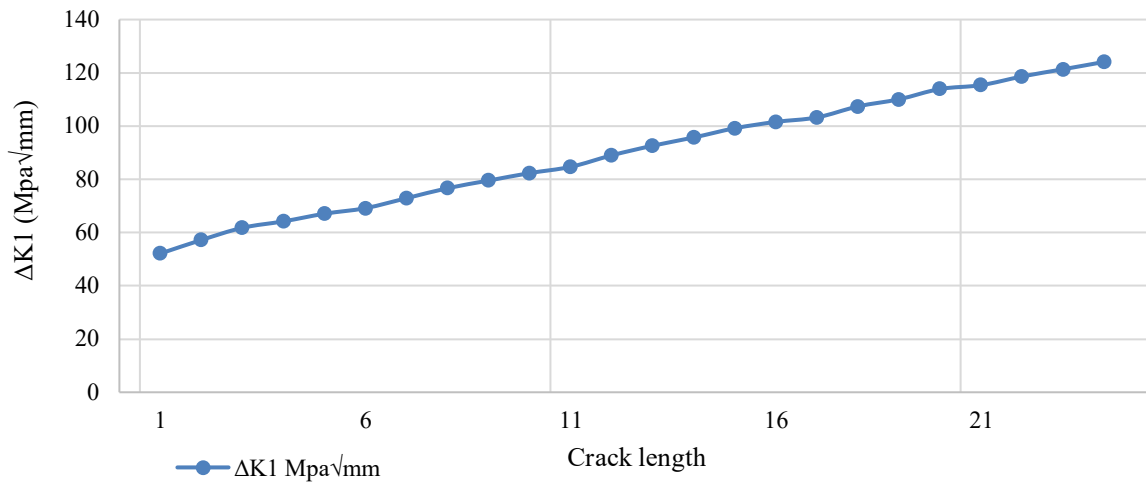


Gambar 4. 24 Grafik SIF Pembebanan 4 Ketebalan 22 mm

3. Ketebalan 24 mm

Nilai SIF yang diperoleh meningkat secara bertahap mulai dari 52,118 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pada kedalaman retak rata-rata 1 mm hingga mencapai 124,093 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pada kedalaman retak rata-

rata 23,75 mm. Perbandingan antara nilai SIF dan kedalaman retak dapat dilihat pada Gambar 4.25.



Gambar 4. 25 Grafik SIF Pembebanan 4 Ketebalan 24 mm

4.5.5. Konvergensi SIF

Analisis konvergensi dilakukan untuk menentukan ukuran elemen *mesh* yang optimal, sehingga hasil simulasi retak pada perangkat lunak ANSYS dapat merepresentasikan nilai yang mendekati kondisi sebenarnya secara akurat dan stabil. Parameter input berupa ukuran elemen *mesh* dalam *elemen sizing* divariasikan secara bertahap, dimulai dari ukuran awal 7 mm. Hasil konvergensi SIF dapat dilihat pada Tabel 4.10.

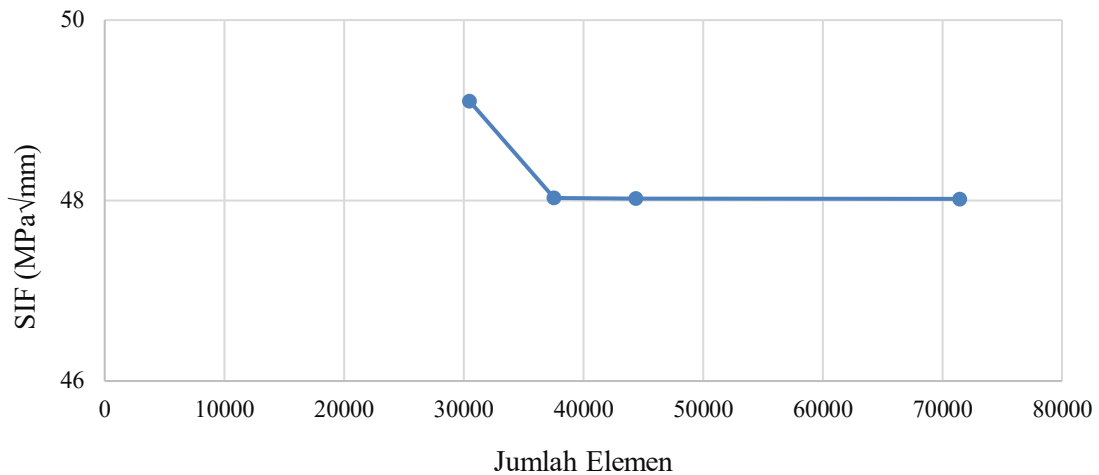
Tabel 4. 10 Konvergensi SIF

<i>Element Size</i> (mm)	Jumlah Elemen	SIF <i>max</i> (MPa)	<i>Different</i>
7	30.489	49,102	
6	37.532	48,030	2,608%
5	44.350	48,025	0,012%
4	71.425	48,019	0,015%

Berdasarkan tabel konvergensi 4.8, dilakukan analisis sensitivitas terhadap ukuran elemen *mesh* untuk menentukan nilai maksimal *Stress Intensity Factor* (SIF) yang stabil dan akurat. Ukuran elemen divariasikan dari 7 mm hingga 4 mm. Hasil menunjukkan bahwa pada ukuran elemen 7 mm, nilai SIF maksimum adalah 49,102 MPa. Namun, nilai ini mengalami penurunan signifikan ketika ukuran elemen diperkecil menjadi 6 mm, dengan SIF sebesar 48,03 MPa dan selisih sebesar 2,608%.

Pengurangan ukuran elemen menjadi 5 mm dan 4 mm menghasilkan nilai SIF yang mendekati satu sama lain, yaitu masing-masing 48,025 MPa dan 48,019 MPa, dengan

perbedaan hanya 0,012% dan 0,015%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi telah mencapai konvergensi pada ukuran elemen 5 mm, karena variasi lebih lanjut tidak memberikan perubahan signifikan terhadap nilai SIF. Grafik konvergensi SIF dapat dilihat pada Gambar 4.26.



Gambar 4. 26 Grafik Konvergensi SIF

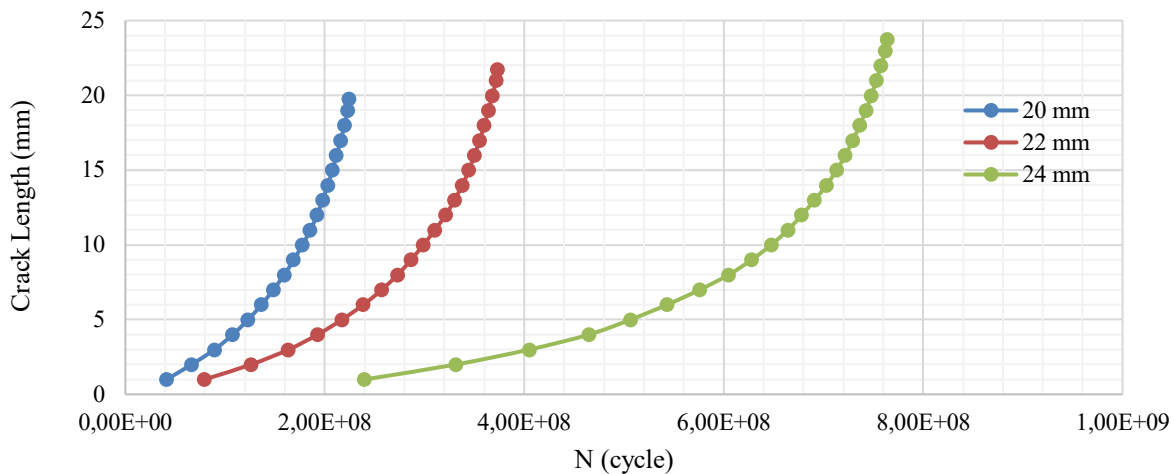
Dengan demikian, ukuran elemen 5 mm dapat dianggap sebagai ukuran *mesh* yang optimal untuk simulasi ini, karena memberikan hasil yang stabil dengan jumlah elemen yang masih efisien secara komputasi.

4.6. Perhitungan Laju Perambatan Retak

Setelah nilai faktor intensitas tegangan didapatkan, maka dilakukan perhitungan jumlah siklus kelelahan dengan menggunakan variabel laju perambatan retak (da/dN). Langkah ini dilakukan untuk mengetahui seberapa cepat retak akan berkembang pada material setiap siklus pembebanan (*fatigue cycle*). Selanjutnya, jumlah siklus yang diperoleh digunakan untuk memperkirakan umur lelah struktur berdasarkan periode pembebanan yang telah ditentukan sebelumnya. Nilai da/dN dapat dihitung dengan Persamaan (2.4) dan jumlah *cycle* perambatan retak dapat dihitung dengan Persamaan (2.6).

4.6.1. Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 1

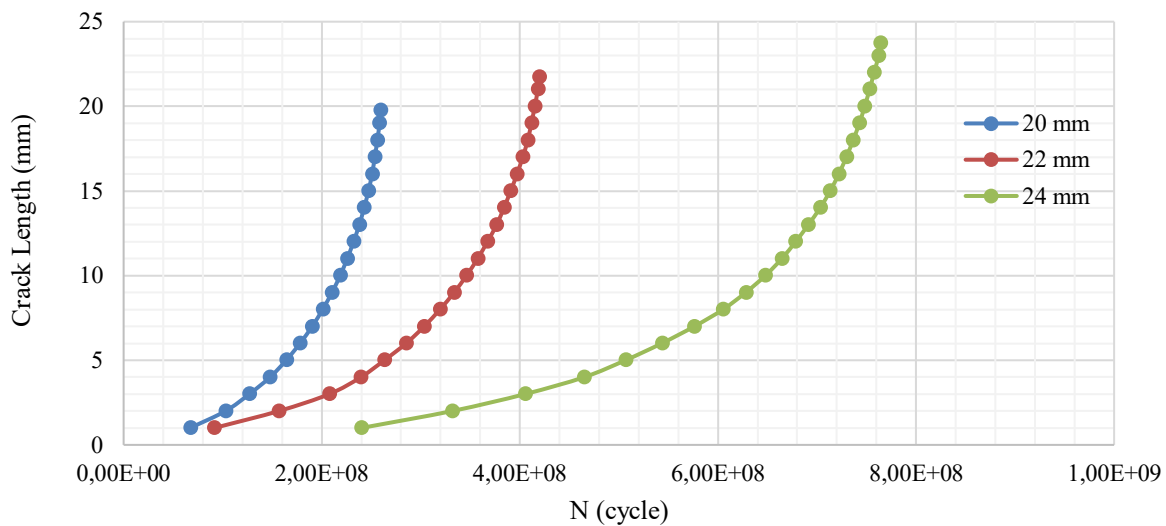
Dengan memasukkan nilai ΔK_I yang telah dikonversi dari satuan MPa√mm menjadi satuan Ksi√in ke dalam persamaan 2.5, maka didapatkan laju perambatan retak pada setiap tahapan retak yang terjadi. Laju perambatan retak tersebut lalu digunakan untuk menghitung jumlah *cycle* (ΔN) pada setiap tahap perambatan retak sesuai pada persamaan 2.6. Laju perambatan retak pada tiap ketebalan kupingan pada kondisi pembebanan 1 dapat dilihat pada Gambar 4.27.



Gambar 4. 27 Grafik Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 1

4.6.2. Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 2

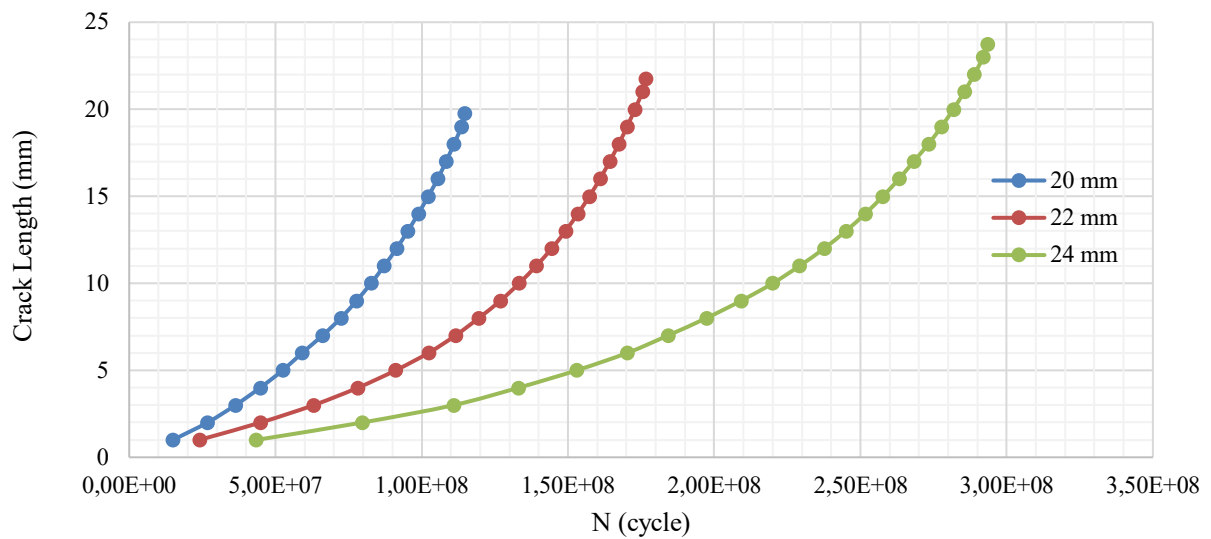
Dengan memasukkan nilai ΔK_I yang telah dikonversi dari satuan $\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ menjadi satuan $\text{Ksi}\sqrt{\text{in}}$ ke dalam persamaan 2.5, maka didapatkan laju perambatan retak pada setiap tahapan retak yang terjadi. Laju perambatan retak pada tiap ketebalan kupingan pada kondisi pembebanan 2 dapat dilihat pada Gambar 4.28.



Gambar 4. 28 Grafik Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 2

4.6.3. Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 3

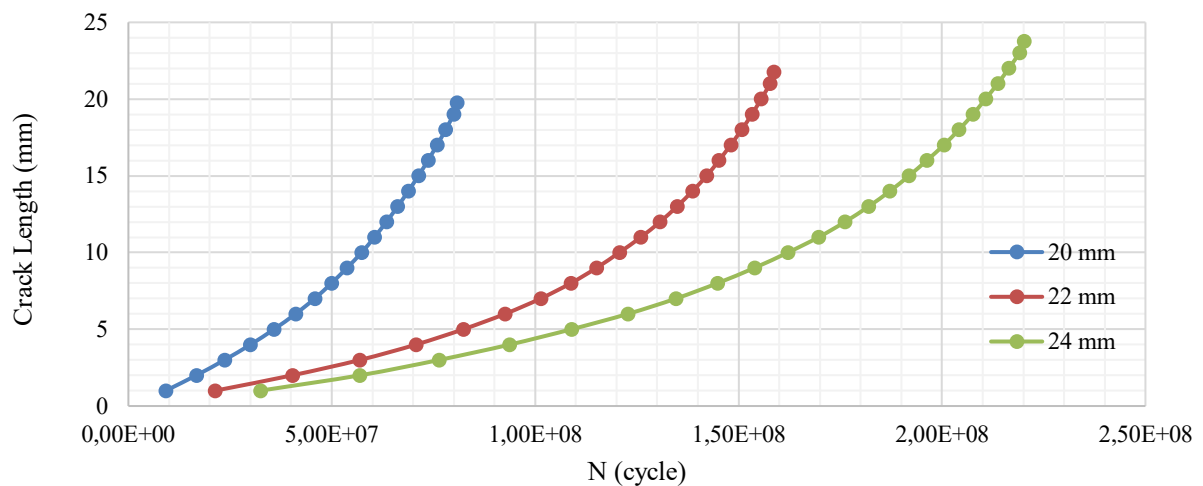
Dengan memasukkan nilai ΔK_I yang telah dikonversi dari satuan $\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ menjadi satuan $\text{Ksi}\sqrt{\text{in}}$ ke dalam persamaan 2.5, maka didapatkan laju perambatan retak pada setiap tahapan retak yang terjadi. Laju perambatan retak pada tiap ketebalan kupingan pada kondisi pembebanan 3 dapat dilihat pada Gambar 4.29.



Gambar 4. 29 Grafik Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 3

4.6.4. Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 3

Dengan memasukkan nilai ΔK_I yang telah dikonversi dari satuan $\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ menjadi satuan $\text{Ksi}\sqrt{\text{in}}$ ke dalam persamaan 2.5, maka didapatkan laju perambatan retak pada setiap tahapan retak yang terjadi. Laju perambatan retak pada tiap ketebalan kupingan pada kondisi pembebanan 4 dapat dilihat pada Gambar 4.30.



Gambar 4. 30 Grafik Laju Perambatan Retak Kondisi Pembebanan 4

4.7. Perhitungan *Fatigue*

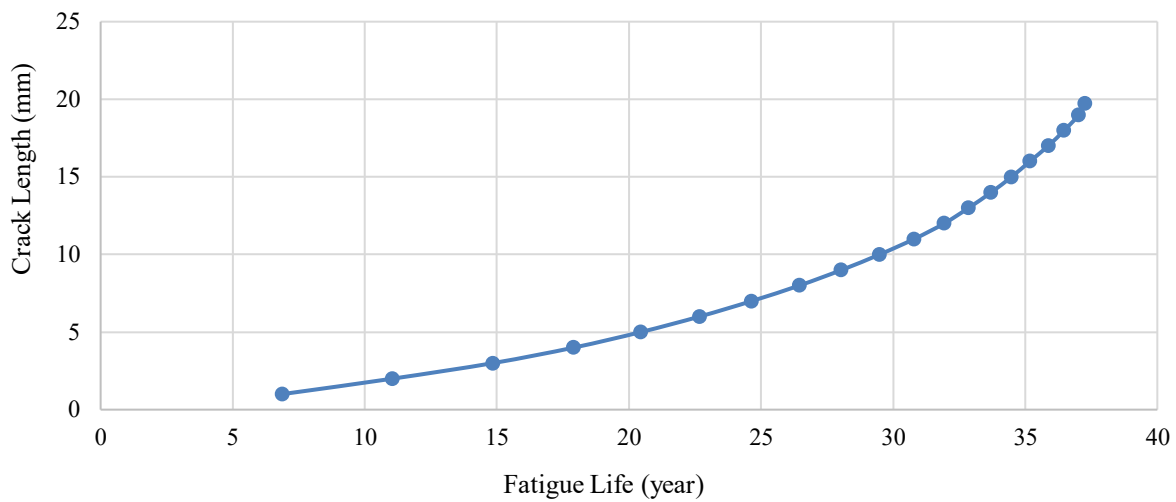
Sebelum menentukan umur kelelahan struktur, maka harus ditentukan terlebih dahulu nilai periode gelombang pada struktur. Berdasarkan analisis pada ANSYS AQWA didapat nilai periode gelombang yaitu sebesar 5,236 s. Nilai periode ini akan digunakan pada perhitungan umur kelelahan setelah jumlah *cycle* lelah telah diketahui.

4.7.1. Kondisi Pembebanan 1

Dengan mengalikan nilai periode gelombang dengan akumulasi tiap perhitungan *cycle*, maka dapat diketahui umur lelah dari struktur pada kondisi pembebanan 1 yang dicari.

1. Ketebalan 20 mm

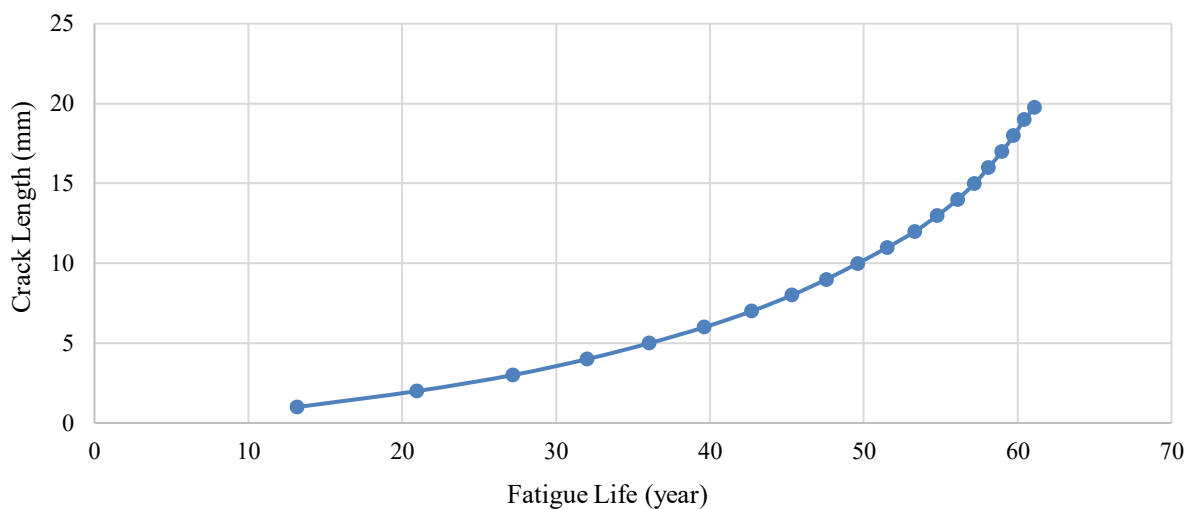
Hasil perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 1 ketebalan kupingan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.31. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 37,27 tahun.



Gambar 4. 31 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 1 Ketebalan 20 mm

2. Ketebalan 22 mm

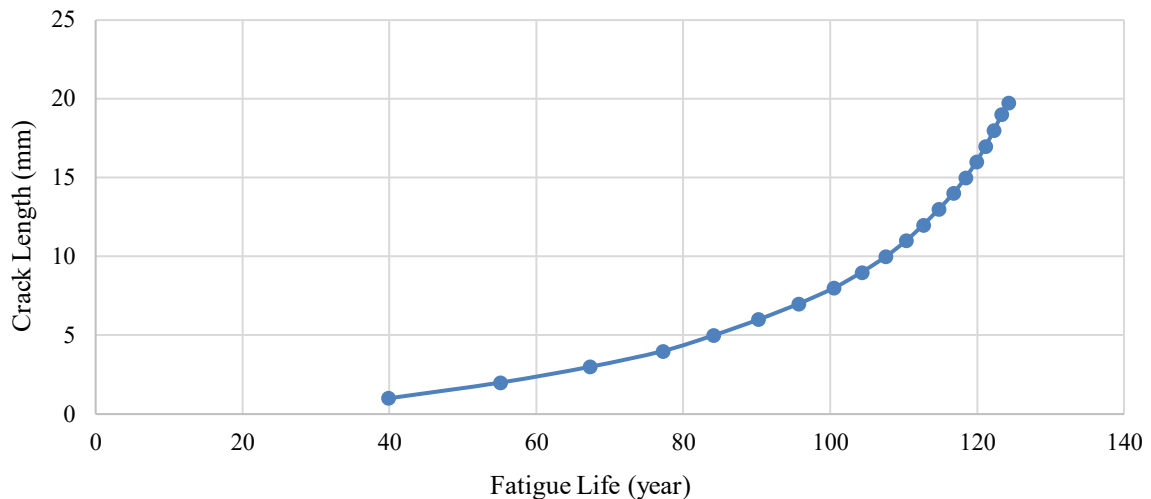
Perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 1 ketebalan kupingan 22 mm dapat dilihat pada Gambar 4.32. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 62 tahun.



Gambar 4. 32 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 1 Ketebalan 22 mm

3. Ketebalan 24 mm

Hasil perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 1 ketebalan kupingan 24 mm dapat dilihat pada Gambar 4.33. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 126,88 tahun.



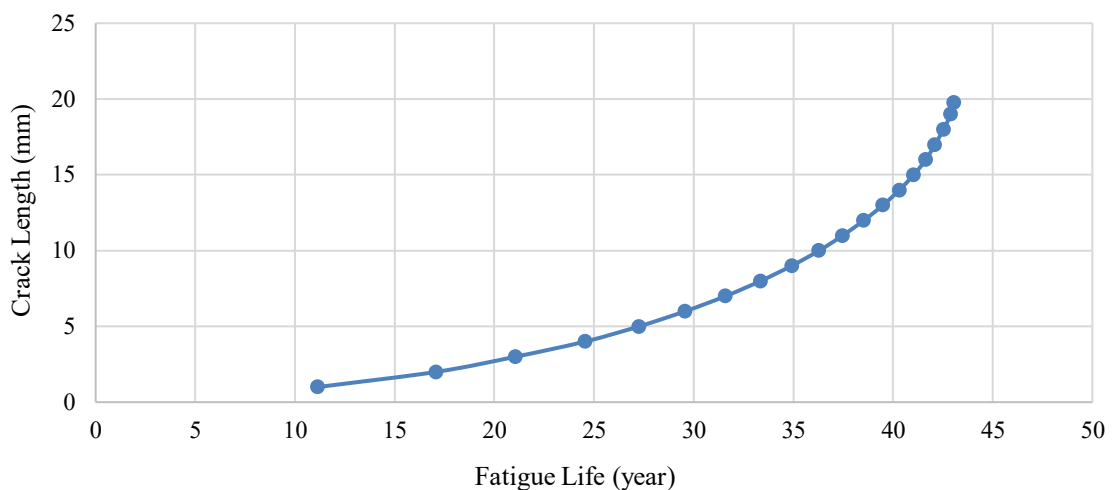
Gambar 4. 33 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 1 Ketebalan 24 mm

4.7.2. Kondisi Pembebanan 2

Dengan mengalikan nilai periode gelombang dengan akumulasi tiap perhitungan *cycle*, maka dapat diketahui umur lelah dari struktur pada kondisi pembebanan 2 yang dicari.

1. Ketebalan 20 mm

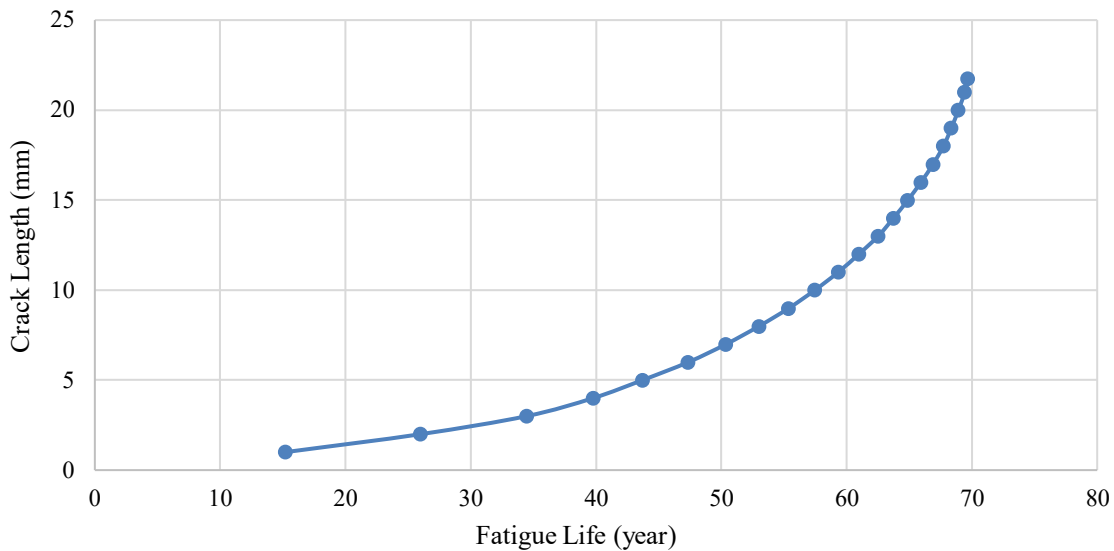
Hasil perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 2 ketebalan kupingan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.34. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 43,06 tahun.



Gambar 4. 34 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 2 Ketebalan 20 mm

2. Ketebalan 22 mm

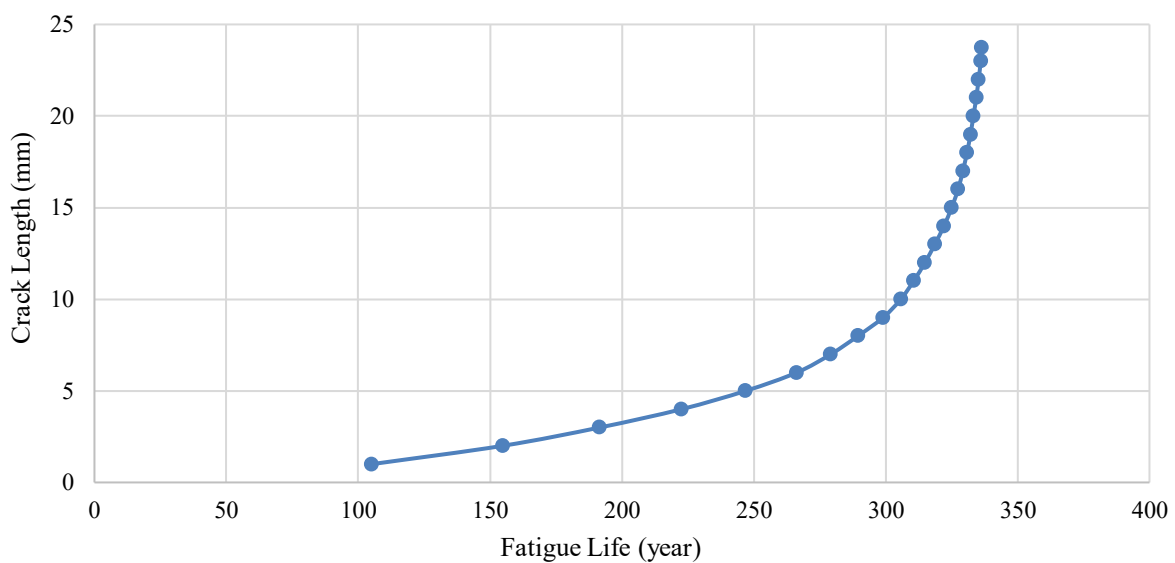
Hasil perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 2 ketebalan kupingan 22 mm dapat dilihat pada Gambar 4.35. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 69,69 tahun.



Gambar 4. 35 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 2 Ketebalan 22 mm

3. Ketebalan 24 mm

Hasil perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 2 ketebalan kupingan 24 mm dapat dilihat pada Gambar 4.36. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 336,36 tahun.



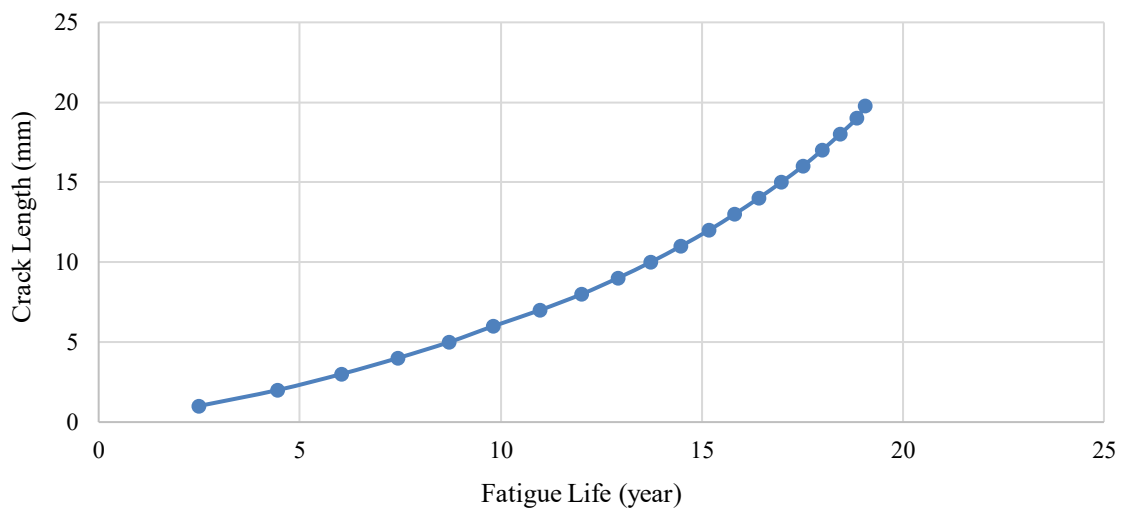
Gambar 4. 36 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 2 Ketebalan 24 mm

4.7.3. Kondisi Pembebanan 3

Dengan mengalikan nilai periode gelombang dengan akumulasi tiap perhitungan *cycle*, maka dapat diketahui umur lelah dari struktur pada kondisi pembebanan 3 yang dicari.

1. Ketebalan 20 mm

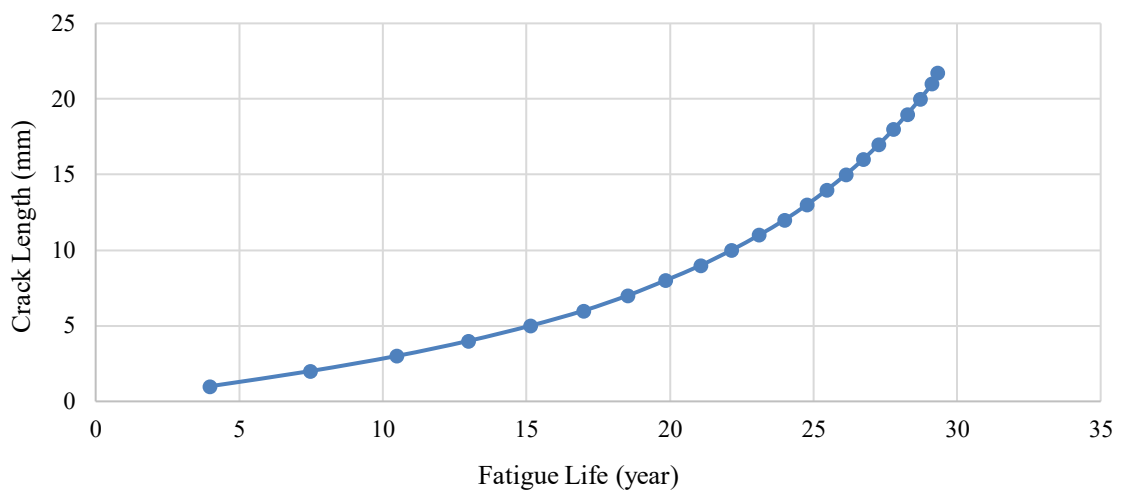
Hasil perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 3 ketebalan kupingan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.37. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 19,05 tahun.



Gambar 4. 37 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 3 Ketebalan 20 mm

2. Ketebalan 22 mm

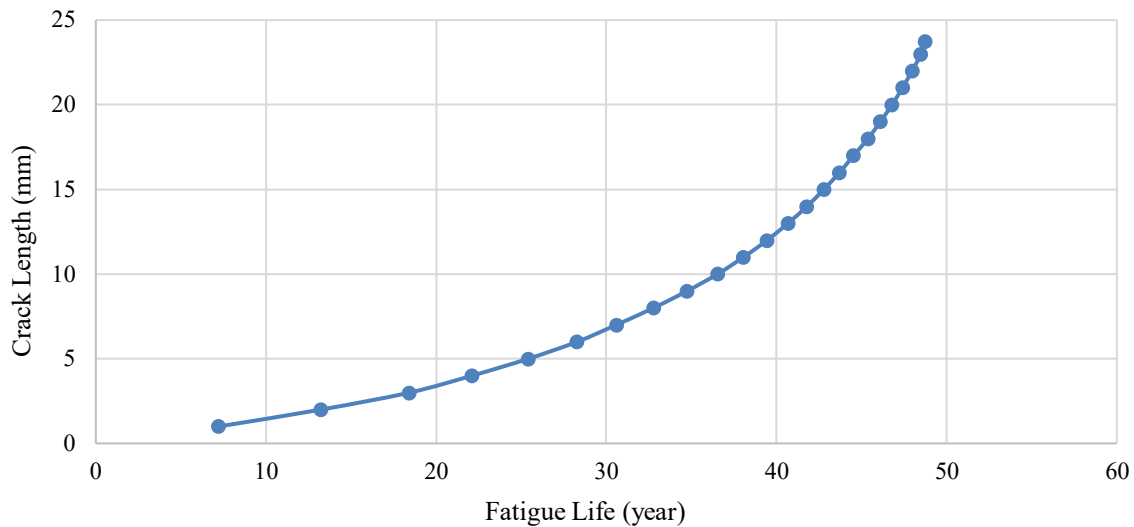
Perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 3 ketebalan kupingan 22 mm dapat dilihat pada Gambar 4.38. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 29,31 tahun.



Gambar 4. 38 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 3 Ketebalan 22 mm

3. Ketebalan 24 mm

Perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 3 ketebalan kupingan 24 mm dapat dilihat pada Gambar 4.39. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 48,73 tahun.



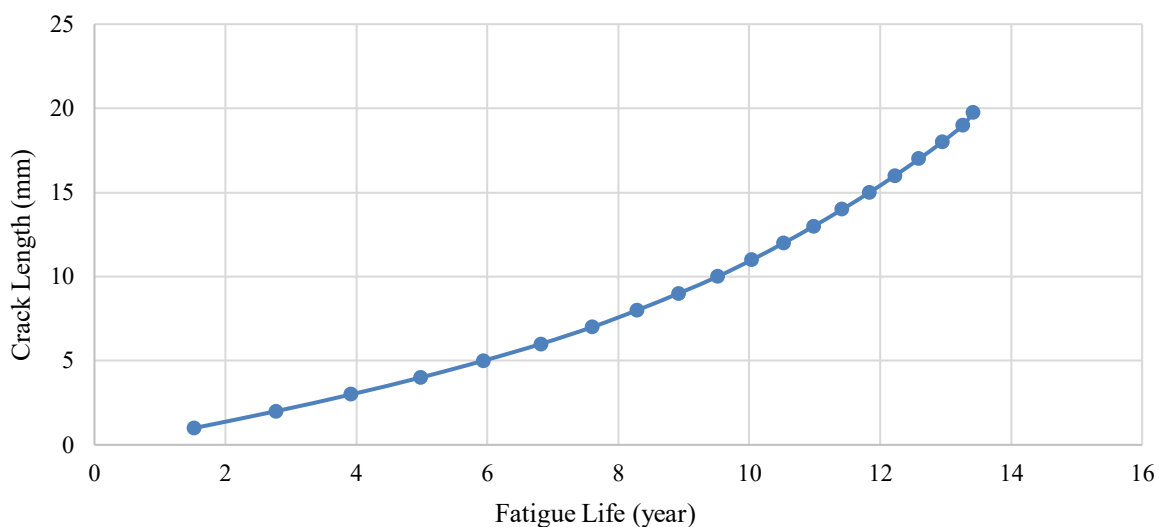
Gambar 4. 39 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 3 Ketebalan 24 mm

4.7.4. Kondisi Pembebanan 4

Dengan mengalikan nilai periode gelombang dengan akumulasi tiap perhitungan *cycle*, maka dapat diketahui umur lelah dari struktur pada kondisi pembebanan 4 yang dicari.

1. Ketebalan 20 mm

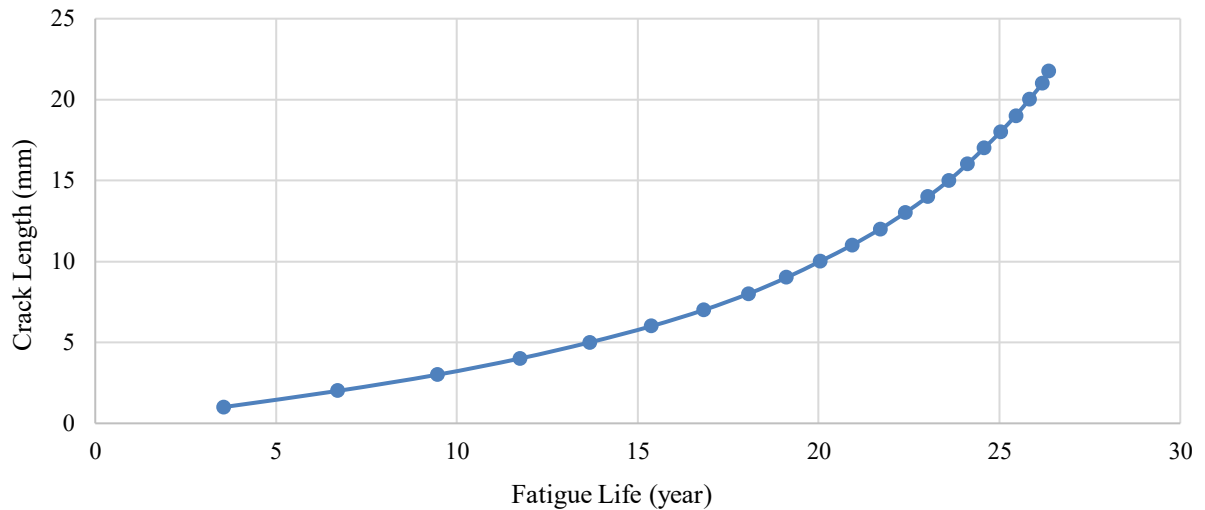
Hasil perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 4 ketebalan kupingan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.40. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 13,42 tahun.



Gambar 4. 40 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 4 Ketebalan 20 mm

2. Ketebalan 22 mm

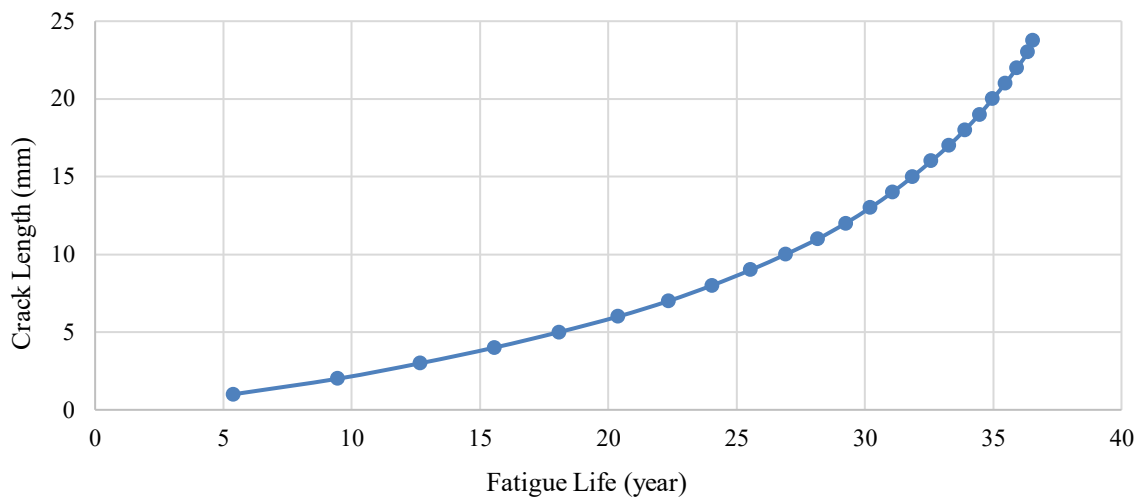
Hasil perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 4 ketebalan kupingan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.41. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 26,35 tahun.



Gambar 4. 41 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 4 Ketebalan 22 mm

3. Ketebalan 24 mm

Hasil perhitungan *fatigue life* pada kondisi pembebanan 4 ketebalan kupingan 20 mm dapat dilihat pada Gambar 4.42. Berdasarkan perhitungan, didapatkan umur lelah kupingan yaitu selama 36,56 tahun.



Gambar 4. 42 Grafik Panjang Retak Terhadap Umur Lelah Kondisi 4 Ketebalan 24 mm

4.7.5. Rekapitulasi Perhitungan *Fatigue*

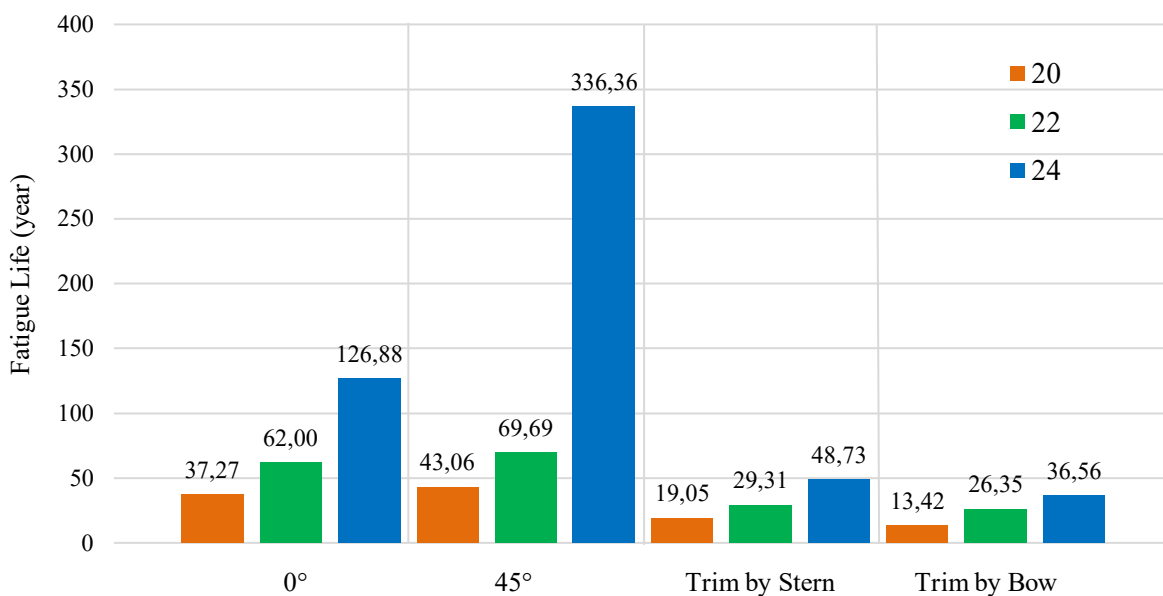
Setelah analisis selesai, maka hasil umur lelah tiap konfigurasi dibandingkan untuk mendapatkan ketebalan kupingan yang optimal. Menurut analisis yang telah dilakukan, dengan ketiga pembebanan didapatkan masing-masing umur lelah yang berbanding lurus dengan besar

ketebalannya. Semakin tebal kupingan struktur *towing hook*, maka semakin besar umur lelahnya. Maka dapat disimpulkan bahwa, ketebalan kupingan dapat berpengaruh sangat besar pada umur struktur *towing hook*. Besar umur lelah pada masing-masing ketebalan pada setiap pembebanan dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Umur Lelah pada Setiap Ketebalan pada Masing-Masing Pembebanan

<i>Load Case</i>	Tebal Kupingan (mm)	ΣN (cycle)	F (s)	F (day)	F (year)
0°	20	2,24E+08	1,18E+09	1,36E+04	37,27
	22	3,73E+08	1,96E+09	2,26E+04	62,00
	24	7,64E+08	4,00E+09	4,63E+04	126,88
45°	20	2,59E+08	1,36E+09	1,57E+04	43,06
	22	4,20E+08	2,20E+09	2,54E+04	69,69
	24	2,03E+09	1,06E+10	1,23E+05	336,36
<i>Trim by Stern</i>	20	1,15E+08	6,01E+08	6,95E+03	19,05
	22	1,77E+08	9,24E+08	1,07E+04	29,31
	24	2,93E+08	1,54E+09	1,78E+04	48,73
<i>Trim by Bow</i>	20	8,08E+07	4,23E+08	4,90E+03	13,42
	22	1,59E+08	8,31E+08	9,62E+03	26,35
	24	2,20E+08	1,15E+09	1,33E+04	36,56

Dari Tabel 4.11 dapat disimpulkan bahwa pada ketebalan 24 mm, umur lelah yang didapatkan lebih besar dibanding dengan ketebalan 20 mm dan 22 mm pada masing-masing pembebanan. Hal ini dikarenakan kupingan yang lebih tebal dapat membantu menahan beban tarik yang lebih kuat. Perbandingan umur lelah pada setiap ketebalan di masing-masing pembebanan dapat dilihat pada grafik pada Gambar 4.43.



Gambar 4. 43 Grafik Perbandingan Umur Lelah Pada Setiap *Load Case*

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan simulasi menggunakan *software* elemen hingga dan perhitungan numerik, maka kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan beban dilakukan melalui simulasi numerik menggunakan ANSYS AQWA untuk memperoleh tiga variasi gaya tarik yang bekerja pada struktur *towing hook*. Beban tersebut kemudian diterapkan pada model global dan lokal menggunakan metode elemen hingga (FEM) guna memperoleh distribusi tegangan, khususnya pada area kupingan yang mengalami konsentrasi tegangan tertinggi. Gaya tarik yang bekerja secara aksial menghasilkan tegangan tarik dominan yang memicu deformasi mode I (*opening mode*), yaitu pembukaan material tegak lurus terhadap bidang retak. Mode deformasi ini umum terjadi pada kasus kelelahan material dan berpotensi menyebabkan inisiasi serta propagasi retak pada area kritis.
2. Penentuan umur lelah dilakukan dengan pendekatan *Fracture Mechanics*, yaitu melalui pemodelan retak secara *arbitrary* pada area kritis (kupingan *towing hook*), perhitungan nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) pada berbagai kedalaman retak, dan laju perambatan retak menggunakan Persamaan Paris. Hasil perhitungan tersebut kemudian digunakan untuk memperkirakan umur lelah dalam satuan tahun berdasarkan jumlah siklus tahunan.
3. Umur lelah dari kupingan struktur *towing hook* pada pembebanan 1 dengan ketebalan 20 mm yaitu selama 37,55 tahun, ketebalan 22 mm selama 62,47 tahun dan ketebalan 24 mm 126,88 tahun. Pada kondisi pembebanan 2, didapatkan umur lelah kupingan struktur *towing hook* pada ketebalan 20 mm selama 43,31 tahun, ketebalan 22 mm selama 69,56 tahun dan ketebalan 24 mm selama 336,36 tahun. Pada kondisi pembebanan 3 dengan ketebalan kupingan 20 mm didapat umur lelah 19,08 tahun, ketebalan 22 mm selama 29,31 tahun dan ketebalan 24 mm selama 48,73 tahun. Dan pada kondisi pembebanan 4 dengan ketebalan kupingan 20 mm didapat umur lelah 13,42 tahun, ketebalan 22 mm selama 26,35 tahun dan ketebala kupingan 24 mm selama 36,56 tahun.

5.2. Saran

Penelitian lanjutan disarankan untuk memasukkan efek beban dinamis yang lebih kompleks, seperti gelombang laut acak dan manuver kapal.

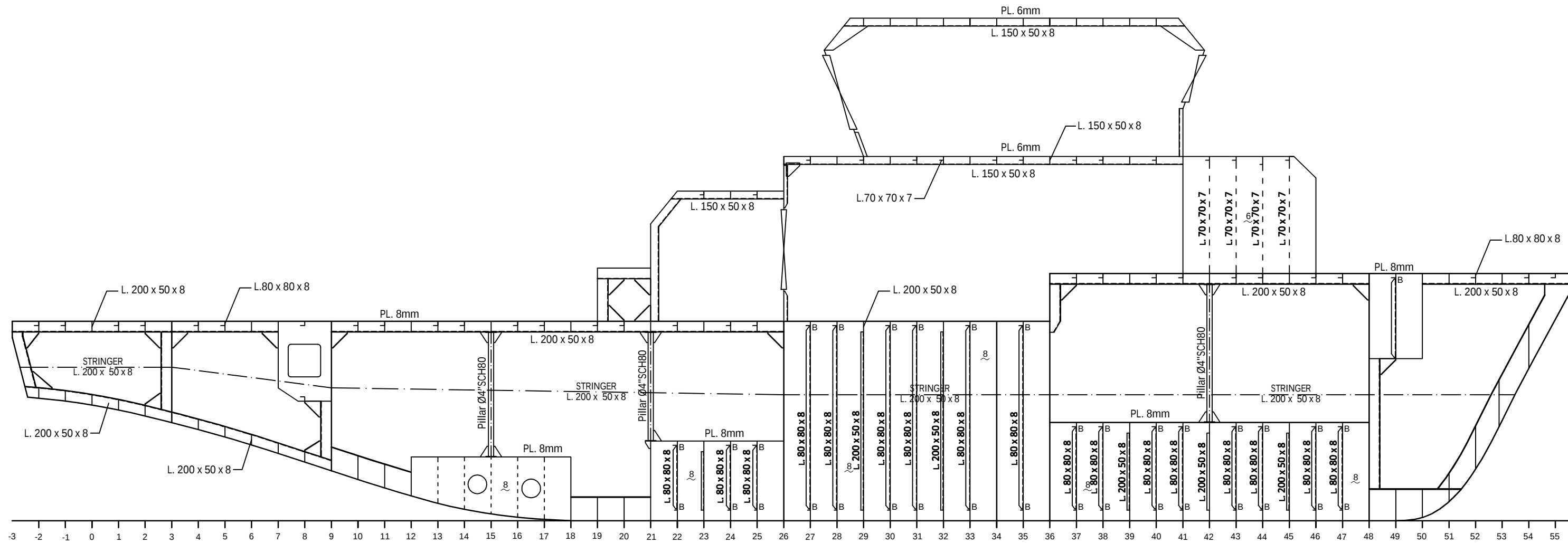
DAFTAR PUSTAKA

- Alford, D. (2004). *Tugboat Handbook*. Maritime Press.
- American Bureau of Shipping (ABS). (2014). *Rules for Building and Classing Steel Vessels*. ABS.
- Anderson, T. L. (1995). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications (2nd ed.)*. CRC Press.
- Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications (4th ed.)*. CRC Press.
- Andalan, R. (2021). Identifikasi Kegagalan Pada Sambungan Kritis Dari Struktur *Jacket* Menggunakan Metode *Fracture Mechanic*. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- ASTM International. (2004). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products (ASTM A370)*. ASTM International.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2012). *Mechanics of Materials (7th ed.)*. McGraw-Hill Education.
- Benasciutti, D. (2015). *An analytical approach to measure the accuracy of various definitions of the "equivalent von Mises stress" in vibration multiaxial fatigue*. Proceedings of the International Conference on Engineering Vibration.
- Bitty, E., Balamba, R., & Sarayar, A. (2015). Analisis Kelelahan Struktur pada Tiang Pancang di Dermaga Amurang dengan Metode *S-N Curve*. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). (2025). *Rules for Hull Construction: Volume II – Strength Assessment and Materials*. Jakarta.
- Rahman, F. (2023). Perkiraan Umur Lelah Sambungan Profil *Bulb* Dan Siku Pada Struktur Alas Kapal. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2012). *Mechanics of Materials (8th ed.)*. Cengage Learning.
- Hibbeler, R. C. (2017). *Mechanics of Materials (10th ed.)*. Pearson Education.
- Hidayah, N., Rosyid, A., & Dwito, W. (2016). Transportasi Laut Nusantara. Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia.
- Kosasih, D. (2012). Metode Elemen Hingga. Bandung: Penerbit Teknik Sipil Nusantara.
- Nemati, N., Metrovich, B., & Nanni, A. (2011). *Fatigue and fracture assessment of cracks in steel elements using acoustic emission*. In *Proc. SPIE 7984, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2011*.
- Pangestu, A., Misbah, M. N., & Setiawan, D. (2019). Analisis *Fatigue Life* Konstruksi Kapal *Tanker* 17500 DWT Menggunakan Metode *Simplified Fatigue Analysis*. Jurnal Ilmiah Teknik Perkapalan.
- Prakoso, A., & Misbah, M. N. (2019). Analisis Umur Kelelahan Sambungan *Bracket Topside Module FPSO* Menggunakan *Fracture Mechanics*. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sorensen, T. (2005). *Towing and Lashing*. Maritime Press, Copenhagen.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of Materials (2nd ed.)*. Cambridge University Press.

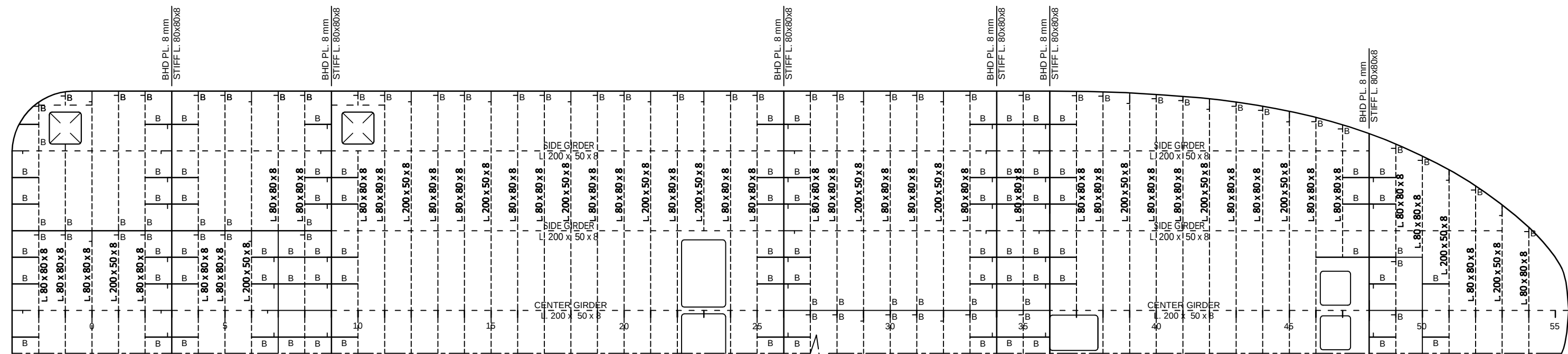
LAMPIRAN

- Lampiran A *General Arrangement Tugboat*
- Lampiran B Perhitungan *Permissible* Menurut BKI *Rules*
- Lampiran C Hasil Analisis Tegangan
- Lampiran D Hasil SIF
- Lampiran E Perhitungan *Fatigue*

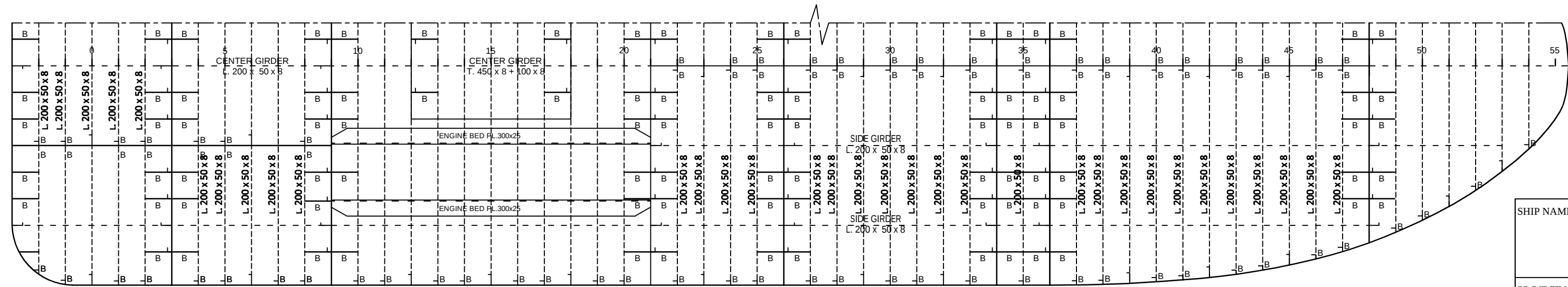
LAMPIRAN A
GENERAL ARRANGEMENT TUGBOAT & STRUKTUR
TOWING HOOK



CENTRE LINE CONSTRUCTION



MAIN DECK CONSTRUCTION

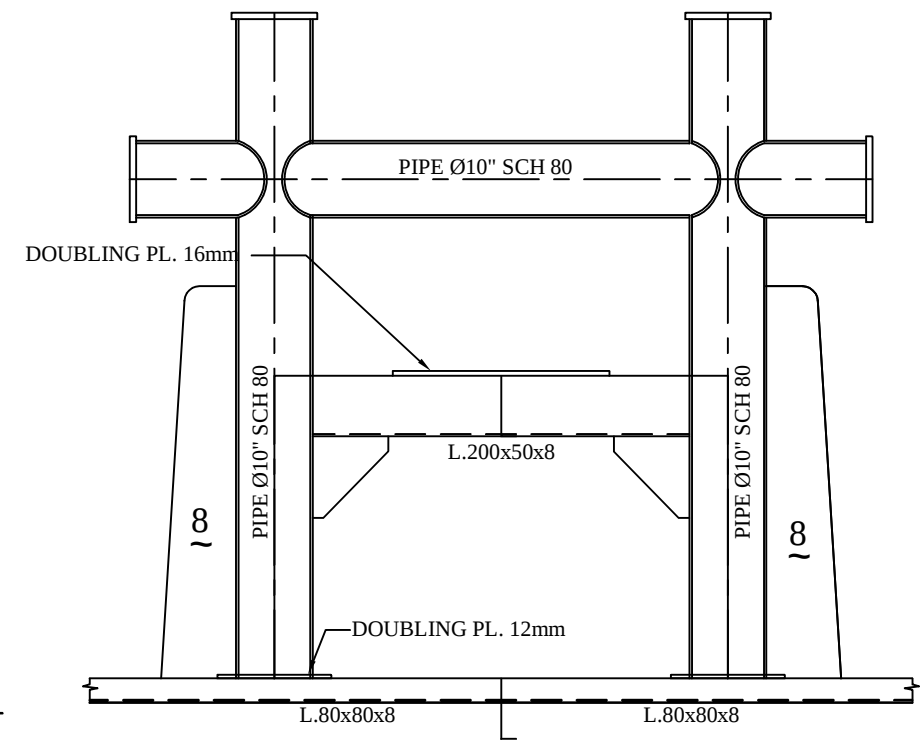
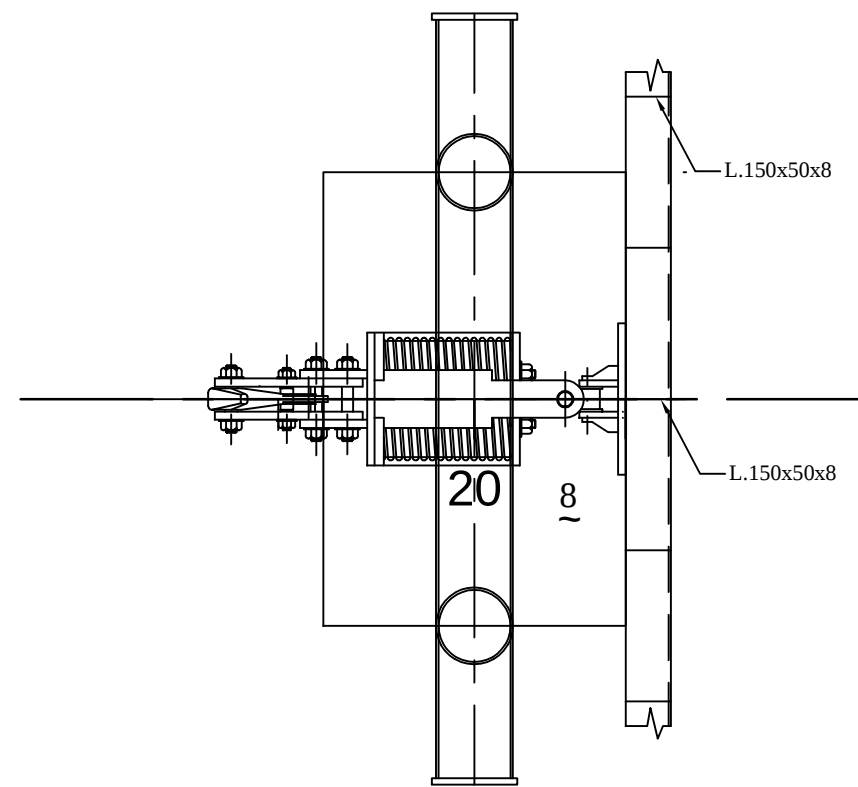
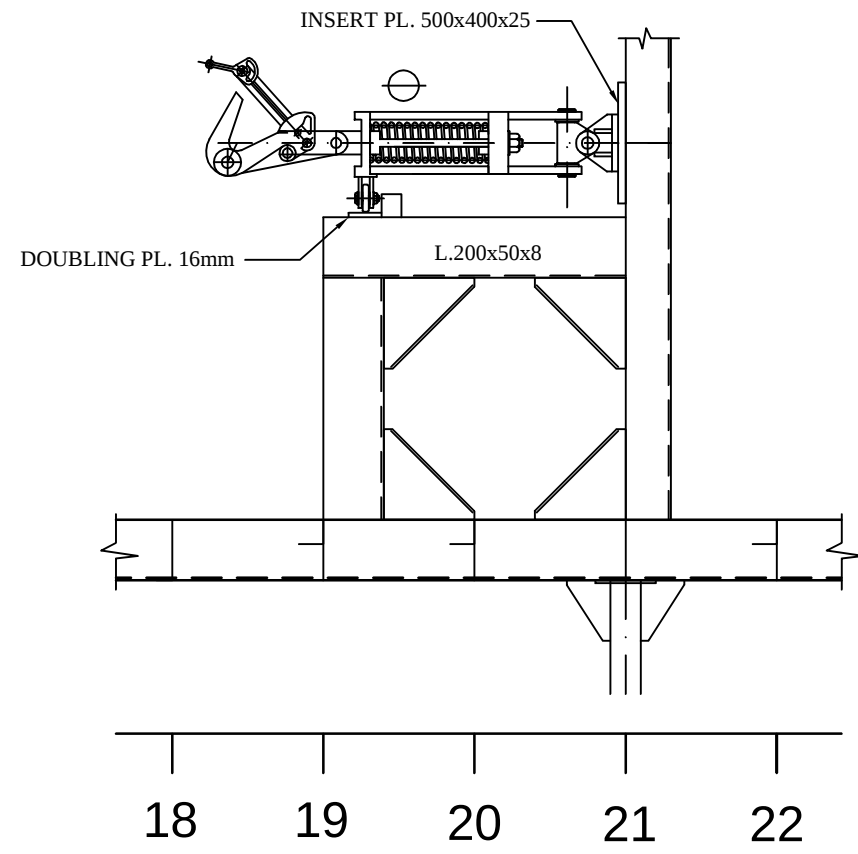


BOTTOM CONSTRUCTION

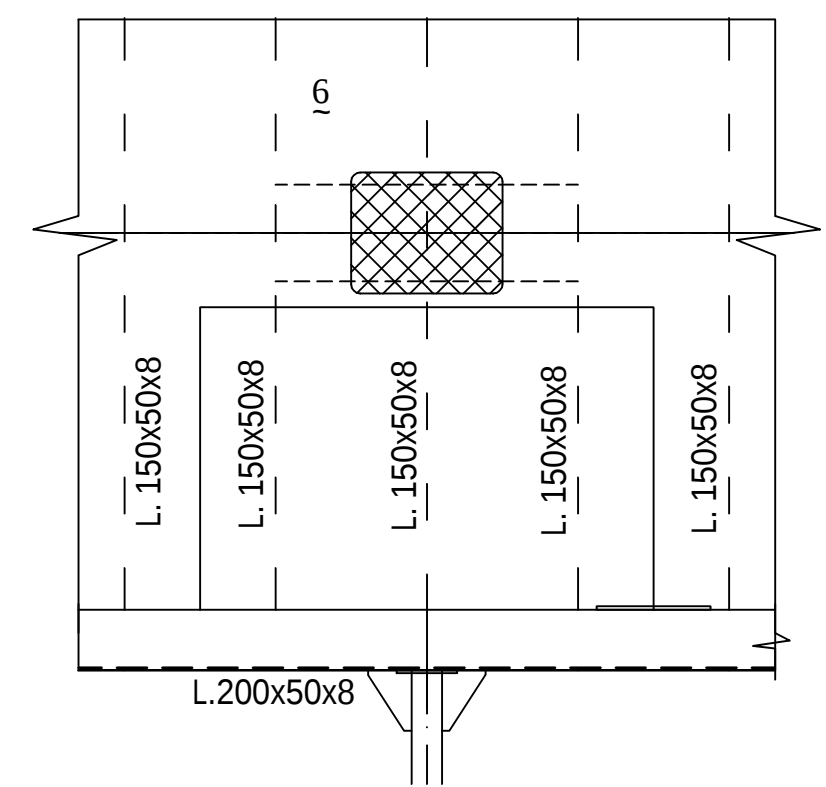
PRINCIPAL PARTICULARS

L.O.A _____ 29.25 m
BREADTH MOULDED _____ 8.25 m
DEPTH MOULDED _____ 3.75 m

SHIP NAME :			
HULL. 39			
PROJECT NO.	-	DATE	OWNER :
DESIGNED BY			
DRAWN BY			DWG TITLE
CHECKED BY			PROFILE CONSTRUCTION
APPROVED BY			
SCALE	1 : 75		DWG NO. REV.



FRAME No. 20



FRAME No. 21

SHIP NAME :				
HULL. 39				
PROJECT NO.	-	DATE	OWNER :	
DESIGNED BY			DWG TITLE TOWING & BOLDER CONSTRUCTION	
DRAWN BY				
CHECKED BY				
APPROVED BY				
SCALE	1 : 25		DWG NO.	REV.

LAMPIRAN B

PERHITUNGAN *PERMISSIBLE* MENURUT BKI *RULES*

- Permissible for towing gear (BKI Pt 1 Vol II Sec 27 B.7)

The stresses in the foundations and fastening elements shall not exceed the permissible stresses shown in Table 27.2, assuming a load equal to the test load of the towing hook in case of hook arrangements, and a load of the winch holding capacity in case of towing winches, see also C.3.5 and C.5.3

Table 27.2 Permissible stresses

Type of stress	Permissible stress
Axial and bending tension and axial and bending compression with box type girders and tubes	$\sigma = 0,83 \cdot R_{eH}$
Axial and bending compression with girders of open cross sections or with girders consisting of several members	$\sigma = 0,72 \cdot R_{eH}$
Shear	$\tau = 0,48 \cdot R_{eH}$
Equivalent stress	$\sigma_v = 0,85 \cdot R_{eH}$
$R_{eH} = \text{yield strength or } 0,2\% \text{ (proof stress)}$	

so that,

- 1 Axial and bending tension and axial and bending compression with box type girders and tubes

$$\sigma = 0.83 \times R_{eH} = 195.05 \text{ N/mm}^2$$
- 2 Axial and bending compression with girders of open cross sections or with girders consisting of several members

$$\sigma = 0.72 \times R_{eH} = 169.2 \text{ N/mm}^2$$
- 3 Shear

$$\tau = 0.48 \times R_{eH} = 112.8 \text{ N/mm}^2$$
- 4 Equivalent stress

$$\sigma_v = 0.85 \times R_{eH} = 199.75 \text{ N/mm}^2$$

- Permissible for shell plating (BKI Pt 1 Vol II Sec 6 A.2)

$$\begin{aligned} \sigma_{perm} &= \text{permissible design stress [N/mm}^2 \text{]} \\ \sigma_{perm} &= \left(0.8 + \frac{L}{450}\right) \frac{230}{K} \text{ [N/mm}^2 \text{]} \text{ For } L < 90 \text{ m} \\ \sigma_{perm} &= 197.77 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

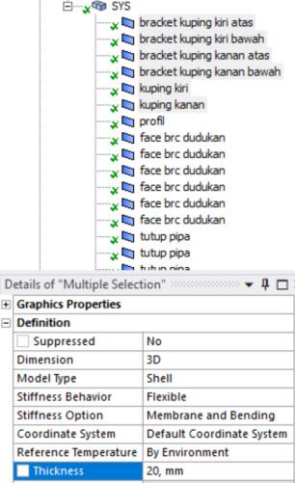
LAMPIRAN C

HASIL ANALISIS TEGANGAN

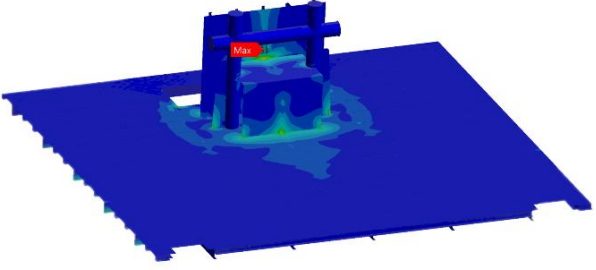
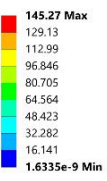
A. PEMBEBANAN 1

227.27 N

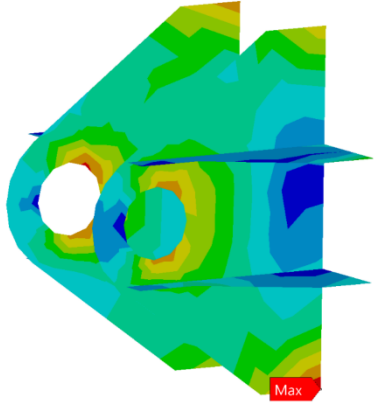
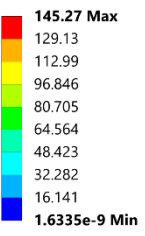
1. Ketebalan 20 mm



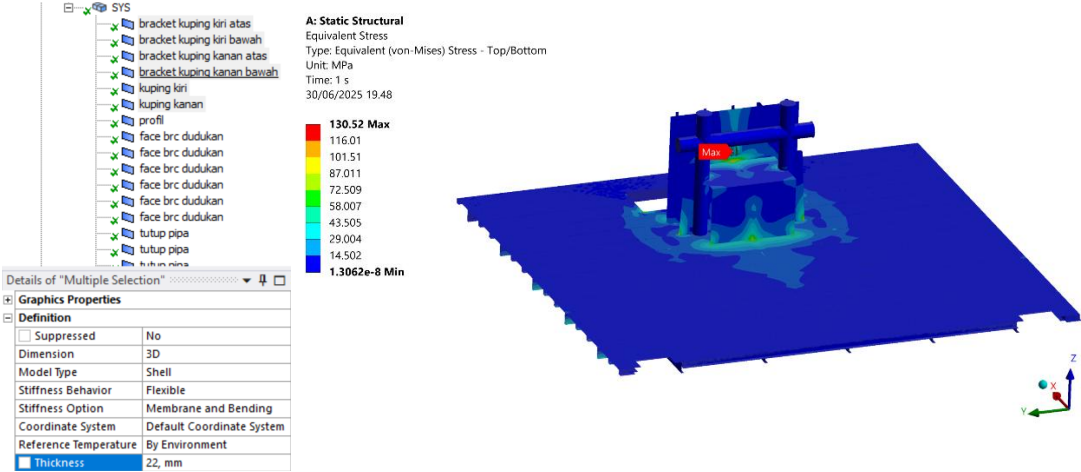
A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
23/06/2025 20.05



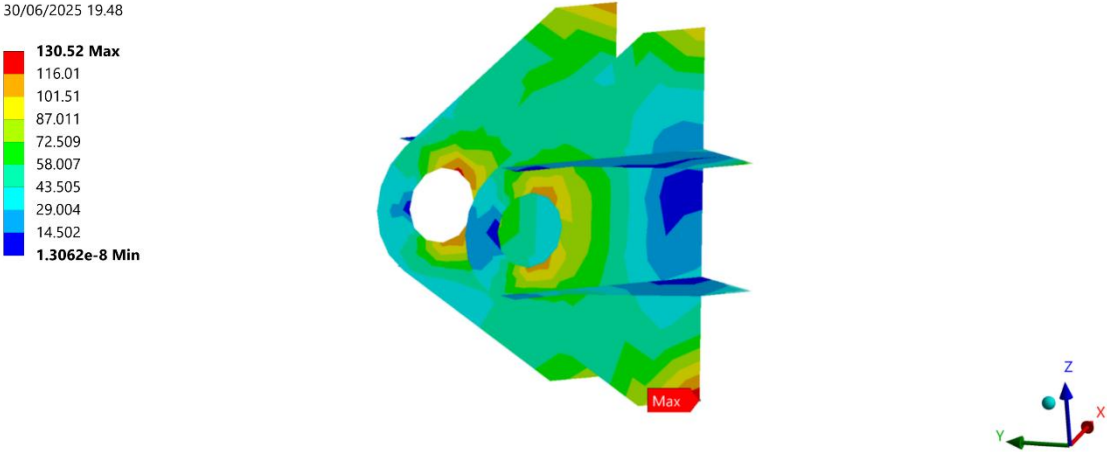
A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
23/06/2025 20.05



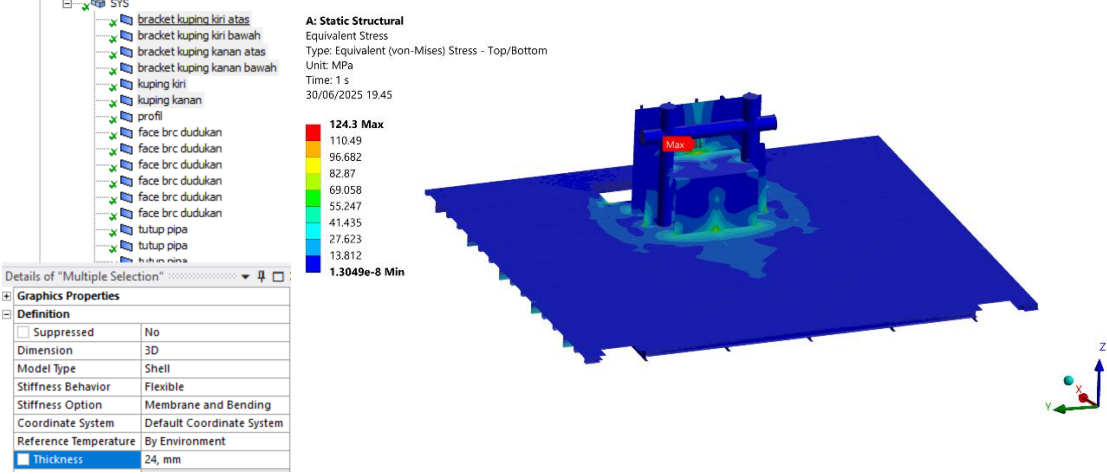
2. Ketebalan 22 mm



A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
30/06/2025 19:48



3. Ketebalan 24 mm



A: Static Structural

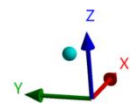
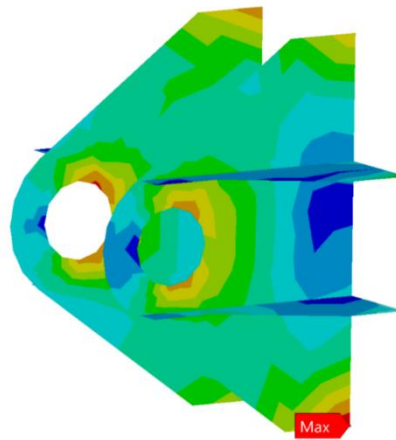
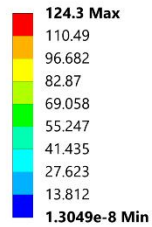
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1 s

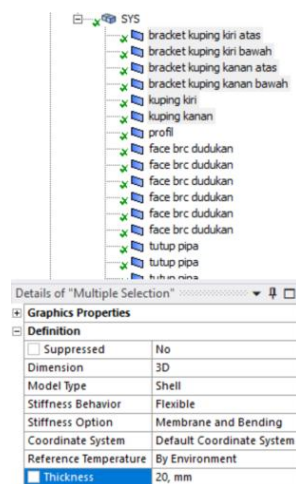
30/06/2025 19.45



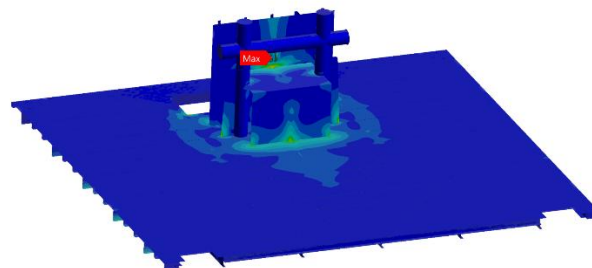
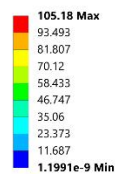
B. PEMBEBANAN 2

164.14 N

1. Ketebalan 20 mm



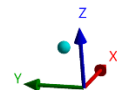
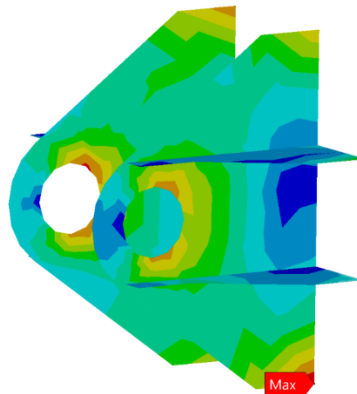
A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
23/06/2025 20:07



A: Static Structural

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
23/06/2025 20:07

105.18 Max
93.493
81.807
70.12
58.433
46.747
35.06
23.373
11.687
1.1991e-9 Min



2. Ketebalan 22 mm

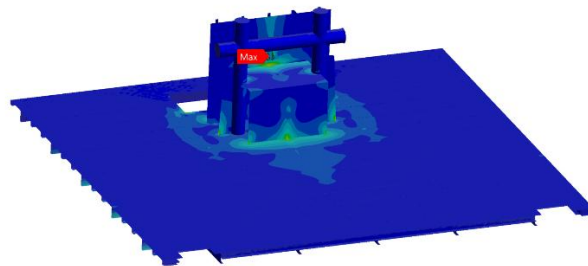
Details of "Multiple Selection"

Graphics Properties	
Definition	
Suppressed	No
Dimension	3D
Model Type	Shell
Stiffness Behavior	Flexible
Stiffness Option	Membrane and Bending
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	22, mm

A: Static Structural

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
30/06/2025 19:41

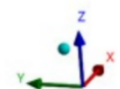
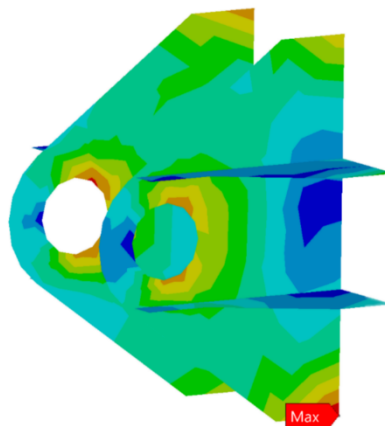
101.75 Max
90.446
79.141
67.835
56.529
45.223
33.917
22.612
11.306
9.6066e-9 Min



A: Static Structural

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
30/06/2025 19:41

101.75 Max
90.446
79.141
67.835
56.529
45.223
33.917
22.612
11.306
9.6066e-9 Min



3. Ketebalan 24 mm

bracket kuping kiri atas

bracket kuping kiri bawah

bracket kuping kanan atas

bracket kuping kanan bawah

kuping kiri

kuping kanan

profil

face brc dudukan

face brc dudukan

face brc dudukan

face brc dudukan

face brc dudukan

face brc dudukan

tutup pipa

tutup pipa

tutup pipa

Details of "Multiple Selection"

Graphics Properties

Definition

Suppressed

No

Dimension

3D

Model Type

Shell

Stiffness Behavior

Flexible

Stiffness Option

Membrane and Bending

Coordinate System

Default Coordinate System

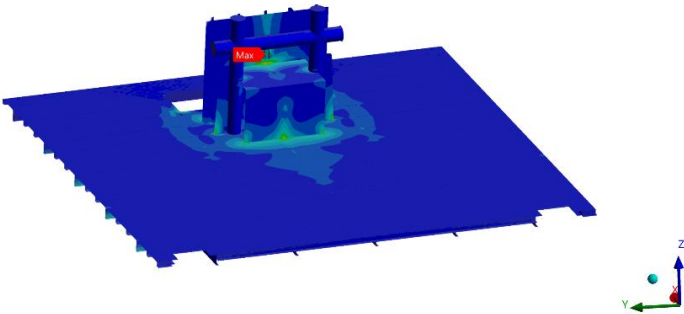
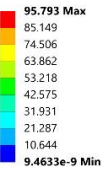
Reference Temperature

By Environment

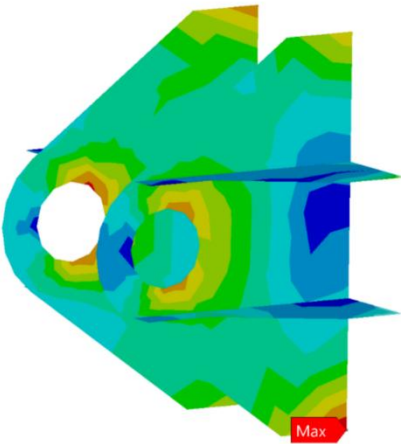
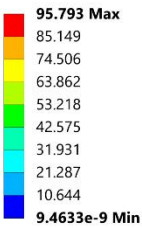
Thickness

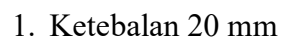
24, mm

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
30/06/2025 19.43

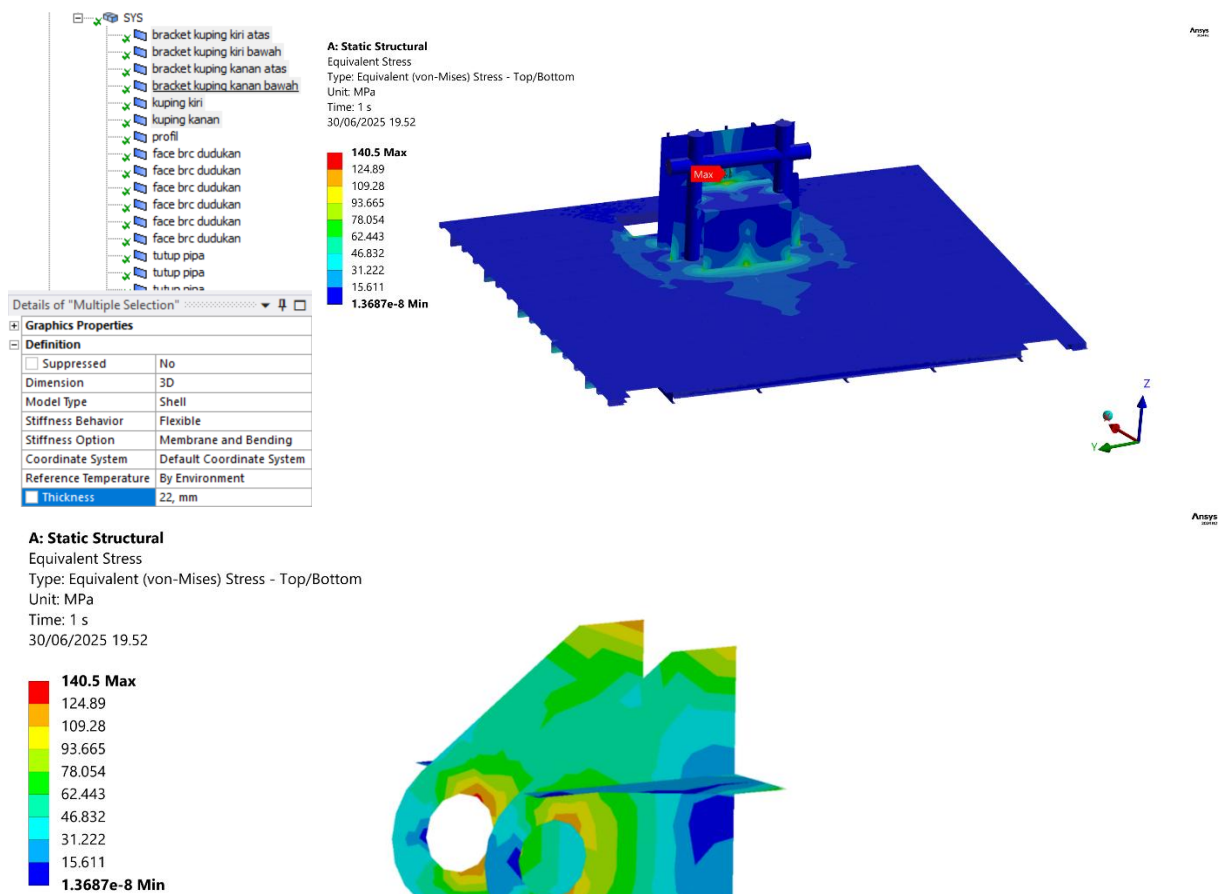


A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
30/06/2025 19.43

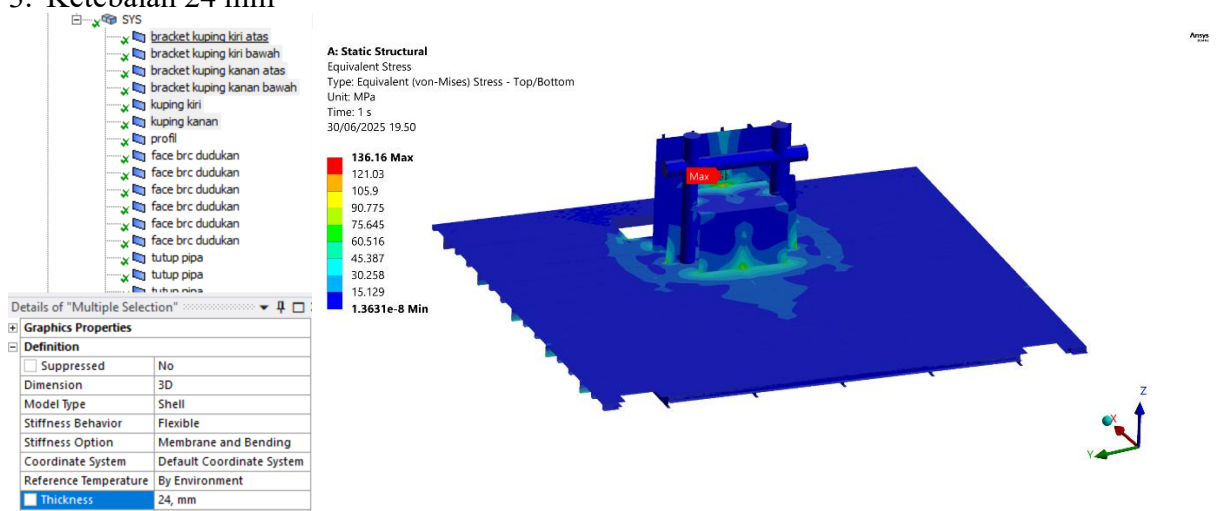




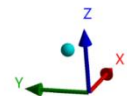
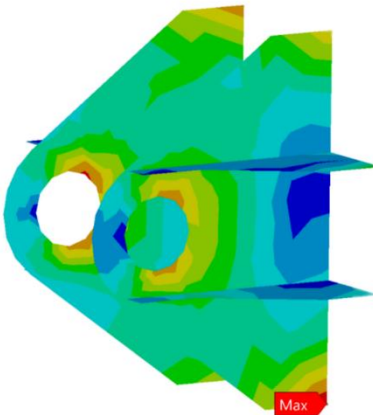
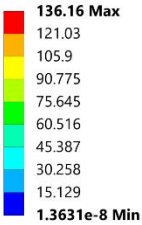
2. Ketebalan 22 mm



3. Ketebalan 24 mm

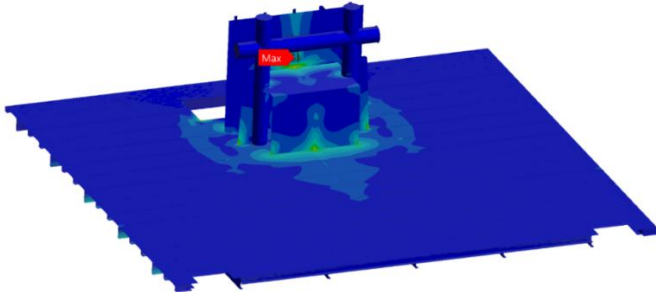
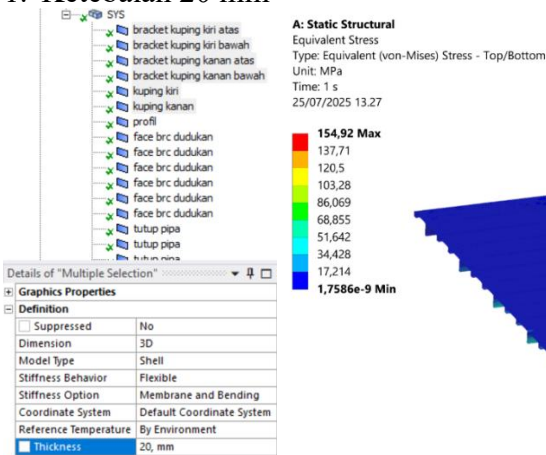


A: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 30/06/2025 19:50

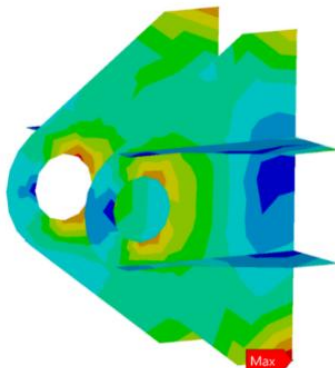
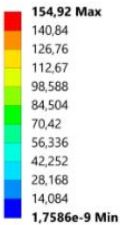


D. Pembebanan 4 241.584 N

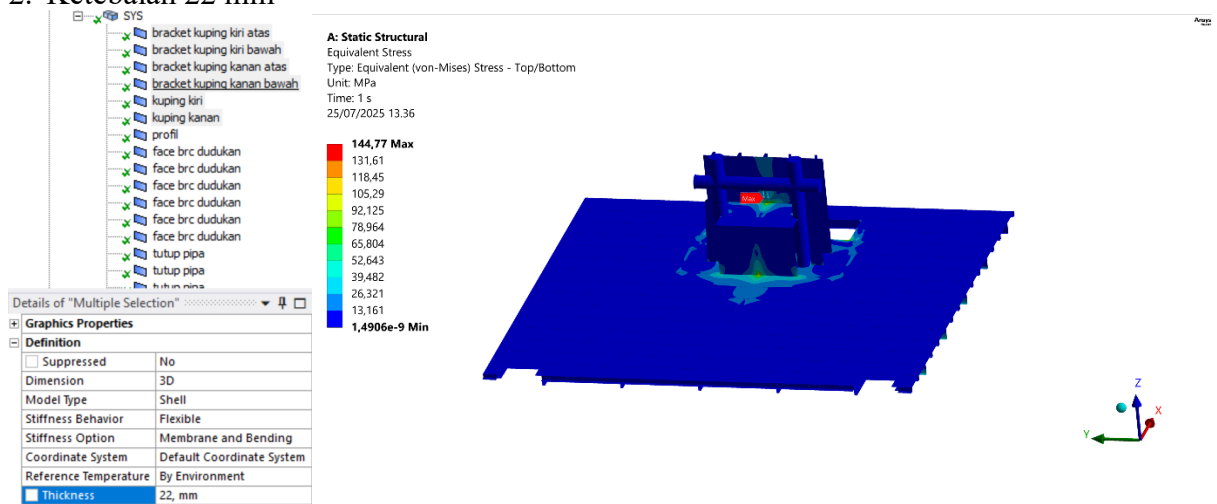
1. Ketebalan 20 mm



A: Static Structural
 ES towing hook fondation
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 25/07/2025 13:28

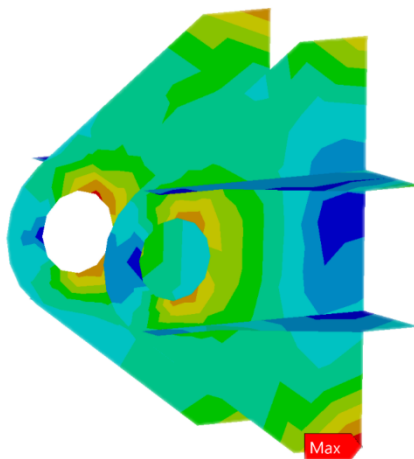


2. Ketebalan 22 mm

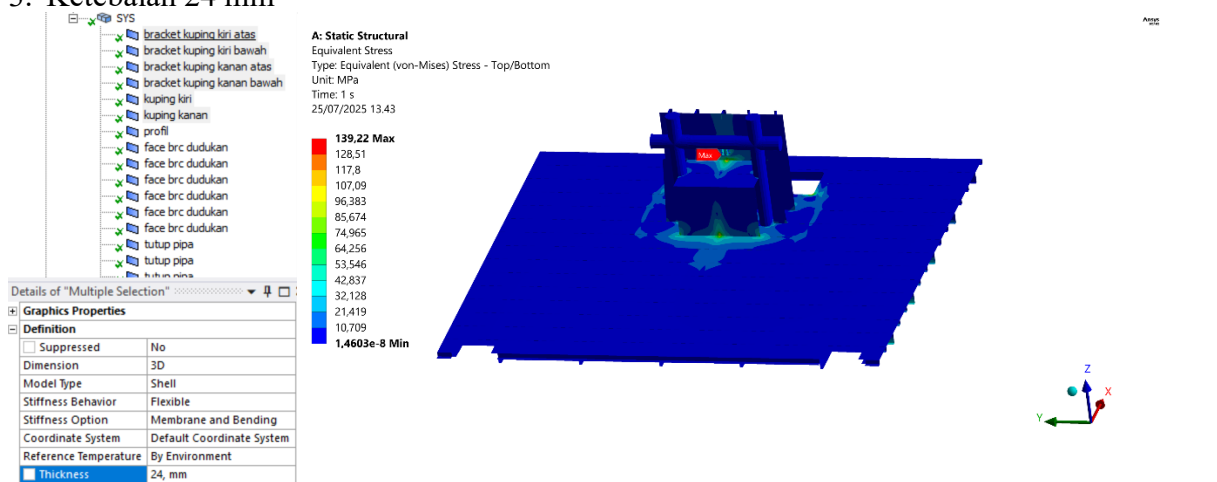


A: Static Structural
ES towing hook fondation
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
25/07/2025 13.37

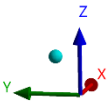
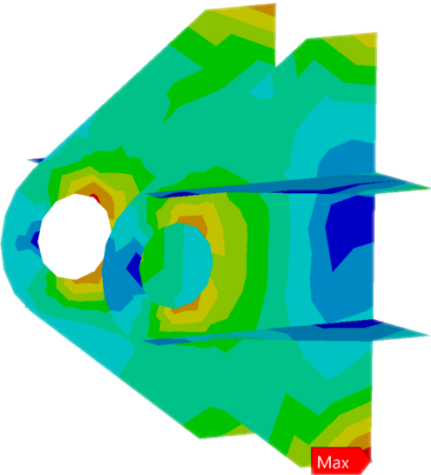
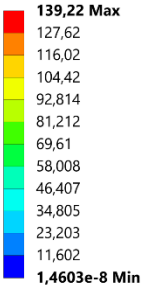
144,77 Max
131,61
118,45
105,29
92,125
78,964
65,804
52,643
39,482
26,321
13,161
1,4906e-9 Min



3. Ketebalan 24 mm



A: Static Structural
ES towing hook fondation
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1 s
25/07/2025 13:45



LAMPIRAN D

HASIL SIF

1. Pembebana 1

a. Ketebalan 20 mm

a_0	a_f	Δa	a avg	ΔK_I Mpa $\sqrt{\text{mm}}$
0.5	1.5	1	1	48.025
1.5	2.5	1	2	56.674
2.5	3.5	1	3	58.555
3.5	4.5	1	4	62.908
4.5	5.5	1	5	66.990
5.5	6.5	1	6	69.941
6.5	7.5	1	7	72.758
7.5	8.5	1	8	75.098
8.5	9.5	1	9	78.154
9.5	10.5	1	10	80.776
10.5	11.5	1	11	83.496
11.5	12.5	1	12	87.598
12.5	13.5	1	13	93.749
13.5	14.5	1	14	96.342
14.5	15.5	1	15	99.502
15.5	16.5	1	16	103.184
16.5	17.5	1	17	102.967
17.5	18.5	1	18	107.992
18.5	19.5	1	19	111.098
19.5	20	0.5	19.75	116.820

b. Ketebalan 22 mm

a_0	a_f	Δa	a avg	ΔK_I Mpa $\sqrt{\text{mm}}$
0.5	1.5	1	1	38.634
1.5	2.5	1	2	46.115
2.5	3.5	1	3	49.671
3.5	4.5	1	4	54.001
4.5	5.5	1	5	57.25
5.5	6.5	1	6	59.773
6.5	7.5	1	7	62.902
7.5	8.5	1	8	66.265
8.5	9.5	1	9	69.724
9.5	10.5	1	10	71.933
10.5	11.5	1	11	73.361

a ₀	a _f	Δa	a avg	ΔK _I Mpa√mm
11.5	12.5	1	12	75.278
12.5	13.5	1	13	80.398
13.5	14.5	1	14	83.727
14.5	15.5	1	15	88.310
15.5	16.5	1	16	94.209
16.5	17.5	1	17	95.812
17.5	18.5	1	18	99.561
18.5	19.5	1	19	102.871
19.5	20.5	1	20	104.887
20.5	21.5	1	21	107.230
21.5	22	0.5	21.75	113.891

c. Ketebalan 24 mm

a ₀	a _f	Δa	a avg	ΔK _I Mpa√mm
0.5	1.5	1	1	26.733
1.5	2.5	1	2	36.861
2.5	3.5	1	3	39.666
3.5	4.5	1	4	42.501
4.5	5.5	1	5	47.921
5.5	6.5	1	6	49.992
6.5	7.5	1	7	51.893
7.5	8.5	1	8	54.129
8.5	9.5	1	9	58.52
9.5	10.5	1	10	61.372
10.5	11.5	1	11	65.172
11.5	12.5	1	12	69.014
12.5	13.5	1	13	70.997
13.5	14.5	1	14	72.682
14.5	15.5	1	15	76.921
15.5	16.5	1	16	80.691
16.5	17.5	1	17	84.375
17.5	18.5	1	18	87.382
18.5	19.5	1	19	89.926
19.5	20.5	1	20	94.782
20.5	21.5	1	21	97.629
21.5	22.5	1	22	99.887
22.5	23.5	1	23	100.628
23.5	24	0.5	23.75	105.319

2. Pembebanan 2
a. Ketebalan 20 mm

a_0	a_f	Δa	a avg	ΔK_I Mpa $\sqrt{\text{mm}}$
0.5	1.5	1	1	40.88
1.5	2.5	1	2	50.44
2.5	3.5	1	3	57.64
3.5	4.5	1	4	60.23
4.5	5.5	1	5	65.53
5.5	6.5	1	6	69.02
6.5	7.5	1	7	72.14
7.5	8.5	1	8	75.71
8.5	9.5	1	9	78.76
9.5	10.5	1	10	82.10
10.5	11.5	1	11	86.31
11.5	12.5	1	12	89.53
12.5	13.5	1	13	92.57
13.5	14.5	1	14	97.8
14.5	15.5	1	15	101.75
15.5	16.5	1	16	107.86
16.5	17.5	1	17	118.49
17.5	18.5	1	18	121.02
18.5	19.5	1	19	127.68
19.5	20	0.5	19.75	132.12

b. Ketebalan 22 mm

a_0	a_f	Δa	a avg	ΔK_I Mpa $\sqrt{\text{mm}}$
0.5	1.5	1	1	36.851
1.5	2.5	1	2	41.315
2.5	3.5	1	3	44.845
3.5	4.5	1	4	52.375
4.5	5.5	1	5	57.814
5.5	6.5	1	6	59.253
6.5	7.5	1	7	63.207
7.5	8.5	1	8	66.161
8.5	9.5	1	9	68.413
9.5	10.5	1	10	71.666
10.5	11.5	1	11	74.078
11.5	12.5	1	12	77.491
12.5	13.5	1	13	79.018
13.5	14.5	1	14	85.545
14.5	15.5	1	15	87.165
15.5	16.5	1	16	89.784
16.5	17.5	1	17	92.467

a ₀	a _f	Δa	a avg	ΔK _I Mpa√mm
17.5	18.5	1	18	97.149
18.5	19.5	1	19	106.863
19.5	20.5	1	20	110.577
20.5	21.5	1	21	113.87
21.5	22	0.5	21.75	115.412

c. Ketebalan 24 mm

a ₀	a _f	Δa	a avg	ΔK _I Mpa√mm
0.5	1.5	1	1	19.350
1.5	2.5	1	2	24.850
2.5	3.5	1	3	27.454
3.5	4.5	1	4	29.058
4.5	5.5	1	5	31.531
5.5	6.5	1	6	34.003
6.5	7.5	1	7	38.952
7.5	8.5	1	8	41.902
8.5	9.5	1	9	43.155
9.5	10.5	1	10	48.408
10.5	11.5	1	11	53.834
11.5	12.5	1	12	56.261
12.5	13.5	1	13	58.820
13.5	14.5	1	14	60.379
14.5	15.5	1	15	64.024
15.5	16.5	1	16	67.670
16.5	17.5	1	17	75.370
17.5	18.5	1	18	78.070
18.5	19.5	1	19	83.786
19.5	20.5	1	20	87.503
20.5	21.5	1	21	89.629
21.5	22.5	1	22	94.098
22.5	23.5	1	23	98.779
23.5	24	0.5	23.75	104.811

3. Pembebanan 3

a. Ketebalan 20 mm

a ₀	a _f	Δa	a avg	ΔK _I Mpa√mm
0.5	1.5	1	1	67.440
1.5	2.5	1	2	72.940
2.5	3.5	1	3	78.320
3.5	4.5	1	4	81.530
4.5	5.5	1	5	84.160
5.5	6.5	1	6	88.430

a ₀	a _f	Δa	a avg	ΔK _I Mpa√mm
6.5	7.5	1	7	87.000
7.5	8.5	1	8	90.180
8.5	9.5	1	9	94.810
9.5	10.5	1	10	97.530
10.5	11.5	1	11	100.550
11.5	12.5	1	12	102.730
12.5	13.5	1	13	106.290
13.5	14.5	1	14	108.365
14.5	15.5	1	15	110.429
15.5	16.5	1	16	112.623
16.5	17.5	1	17	116.827
17.5	18.5	1	18	119.453
18.5	19.5	1	19	121.743
19.5	20	0.5	19.75	125.628

b. Ketebalan 22 mm

a ₀	a _f	Δa	a avg	ΔK _I Mpa√mm
0.5	1.5	1	1	57.638
1.5	2.5	1	2	60.227
2.5	3.5	1	3	63.275
3.5	4.5	1	4	67.176
4.5	5.5	1	5	70.798
5.5	6.5	1	6	74.227
6.5	7.5	1	7	79.256
7.5	8.5	1	8	83.275
8.5	9.5	1	9	85.187
9.5	10.5	1	10	89.402
10.5	11.5	1	11	92.427
11.5	12.5	1	12	95.280
12.5	13.5	1	13	99.305
13.5	14.5	1	14	102.482
14.5	15.5	1	15	105.285
15.5	16.5	1	16	108.229
16.5	17.5	1	17	111.428
17.5	18.5	1	18	114.008
18.5	19.5	1	19	117.226
19.5	20.5	1	20	119.288
20.5	21.5	1	21	122.628
21.5	22	0.5	21.75	127.202

c. Ketebalan 24 mm

a ₀	a _f	Δa	a avg	ΔK _I Mpa√mm
0.5	1.5	1	1	47.274
1.5	2.5	1	2	50.172
2.5	3.5	1	3	52.772
3.5	4.5	1	4	59.175
4.5	5.5	1	5	61.284
5.5	6.5	1	6	64.281
6.5	7.5	1	7	69.112
7.5	8.5	1	8	70.382
8.5	9.5	1	9	72.782
9.5	10.5	1	10	75.240
10.5	11.5	1	11	79.335
11.5	12.5	1	12	81.827
12.5	13.5	1	13	85.283
13.5	14.5	1	14	88.183
14.5	15.5	1	15	91.494
15.5	16.5	1	16	93.982
16.5	17.5	1	17	97.092
17.5	18.5	1	18	96.871
18.5	19.5	1	19	101.221
19.5	20.5	1	20	103.729
20.5	21.5	1	21	107.392
21.5	22.5	1	22	110.356
22.5	23.5	1	23	113.702
23.5	24	0.5	23.75	116.288

4. Pembebanan 4

a. Ketebalan 20 mm

a ₀	a _f	Δ a	a avg	ΔK _I Mpa√mm
0.5	1.5	1	1	79.33
1.5	2.5	1	2	84.82
2.5	3.5	1	3	87.22
3.5	4.5	1	4	89.59
4.5	5.5	1	5	92.58
5.5	6.5	1	6	95.34
6.5	7.5	1	7	99.10
7.5	8.5	1	8	103.66
8.5	9.5	1	9	106.25
9.5	10.5	1	10	108.54
10.5	11.5	1	11	113.20
11.5	12.5	1	12	116.09

a0	af	Δa	a avg	$\Delta K1 \text{ Mpa}\sqrt{\text{mm}}$
12.5	13.5	1	13	118.32
13.5	14.5	1	14	120.712
14.5	15.5	1	15	122.448
15.5	16.5	1	16	125.186
16.5	17.5	1	17	127.18
17.5	18.5	1	18	129.321
18.5	19.5	1	19	133.92
19.5	20	0.5	19.75	135.127

b. Ketebalan 22 mm

a0	af	Δa	a avg	$\Delta K1 \text{ Mpa}\sqrt{\text{mm}}$
0.5	1.5	1	1	59.932
1.5	2.5	1	2	62.298
2.5	3.5	1	3	65.121
3.5	4.5	1	4	69.345
4.5	5.5	1	5	73.28
5.5	6.5	1	6	76.482
6.5	7.5	1	7	80.629
7.5	8.5	1	8	85.189
8.5	9.5	1	9	89.782
9.5	10.5	1	10	93.669
10.5	11.5	1	11	95.278
11.5	12.5	1	12	99.056
12.5	13.5	1	13	103.309
13.5	14.5	1	14	106.557
14.5	15.5	1	15	109.418
15.5	16.5	1	16	114.825
16.5	17.5	1	17	117.28
17.5	18.5	1	18	119.098
18.5	19.5	1	19	122.109
19.5	20.5	1	20	126.325
20.5	21.5	1	21	128.445
21.5	22	0.5	21.75	131.027

c. Ketebalan 24 mm

a0	af	Δa	a avg	$\Delta K1 \text{ Mpa}\sqrt{\text{mm}}$
0.5	1.5	1	1	52.118
1.5	2.5	1	2	57.209
2.5	3.5	1	3	61.794
3.5	4.5	1	4	64.201
4.5	5.5	1	5	67.067

a0	af	Δa	a avg	$\Delta K1 \text{ Mpa}\sqrt{\text{mm}}$
5.5	6.5	1	6	69.178
6.5	7.5	1	7	72.903
7.5	8.5	1	8	76.665
8.5	9.5	1	9	79.529
9.5	10.5	1	10	82.333
10.5	11.5	1	11	84.688
11.5	12.5	1	12	89.011
12.5	13.5	1	13	92.629
13.5	14.5	1	14	95.722
14.5	15.5	1	15	99.177
15.5	16.5	1	16	101.566
16.5	17.5	1	17	103.239
17.5	18.5	1	18	107.381
18.5	19.5	1	19	110.066
19.5	20.5	1	20	113.927
20.5	21.5	1	21	115.362
21.5	22.5	1	22	118.634
22.5	23.5	1	23	121.337
23.5	24	0.5	23.75	124.093

LAMPIRAN E
PERHITUNGAN *FATIGUE*

Load case 4 = 241584 N
t = 24 mm

1

Mpa√m

=

0.02878

Ksi√inch

1 cycle

5.236 s

C

=

3.6E-10

1 mm

0.03937 inc

m

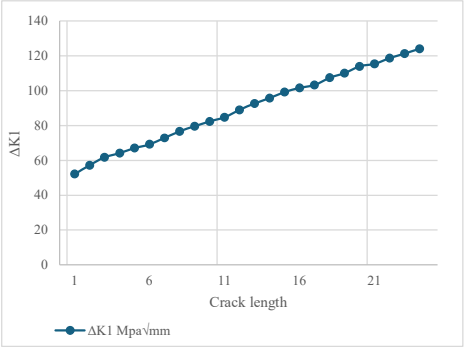
=

3

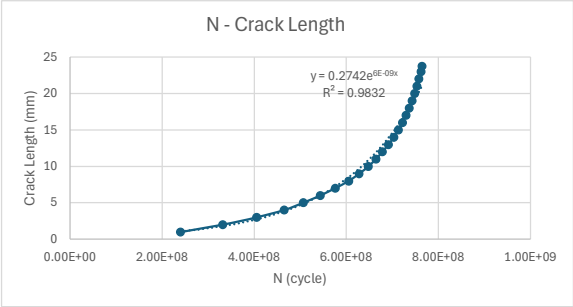
1 Mpa

0.145038 Ksi

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	52.118
2	1.5	2.5	1	2	57.209
3	2.5	3.5	1	3	61.794
4	3.5	4.5	1	4	64.201
5	4.5	5.5	1	5	67.067
6	5.5	6.5	1	6	69.178
7	6.5	7.5	1	7	72.903
8	7.5	8.5	1	8	76.665
9	8.5	9.5	1	9	79.529
10	9.5	10.5	1	10	82.333
11	10.5	11.5	1	11	84.688
12	11.5	12.5	1	12	89.011
13	12.5	13.5	1	13	92.629
14	13.5	14.5	1	14	95.722
15	14.5	15.5	1	15	99.177
16	15.5	16.5	1	16	101.566
17	16.5	17.5	1	17	103.239
18	17.5	18.5	1	18	107.381
19	18.5	19.5	1	19	110.066
20	19.5	20.5	1	20	113.927
21	20.5	21.5	1	21	115.362
22	21.5	22.5	1	22	118.634
23	22.5	23.5	1	23	121.337
24	23.5	24	0.5	23.75	124.093



No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.03937	1.49995604	1.2149E-09	32406224	32406223.56	169678987	1963.88	5.38
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.07874	1.64647502	1.6068E-09	24501833	5.69E+07	297970585	3448.73	9.45
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.11811	1.77843132	2.0249E-09	19442528	7.64E+07	399771659	4626.99	12.68
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.15748	1.84770478	2.2709E-09	17336693	9.37E+07	490546586	5677.62	15.56
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.196851	1.93018826	2.5888E-09	15207752	1.09E+08	570174373	6599.24	18.08
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236221	1.99094284	2.841E-09	13857588	1.23E+08	642732703	7439.04	20.38
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.275591	2.09814834	3.3251E-09	11840102	1.35E+08	704727478	8156.57	22.35
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.314961	2.2064187	3.8669E-09	10181230	1.45E+08	758036396	8773.57	24.04
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354331	2.28884462	4.3167E-09	9120425	1.54E+08	805790942	9326.28	25.55
10	0.374	0.413386	0.03937	0.393701	2.36954374	4.7896E-09	8219962	1.62E+08	848830665	9824.43	26.92
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433071	2.43732064	5.2124E-09	7553114	1.70E+08	888378768	10282.16	28.17
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472441	2.56173658	6.0521E-09	6505199	1.76E+08	922439991	10676.39	29.25
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.511811	2.66586262	6.8205E-09	5772324	1.82E+08	952663881	11026.20	30.21
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551181	2.75487916	7.5268E-09	5230658	1.87E+08	980051609	11343.19	31.08
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.590552	2.85431406	8.3716E-09	4702824	1.92E+08	1.005E+09	11628.19	31.86
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.629922	2.92306948	8.9912E-09	4378714	1.96E+08	1.028E+09	11893.55	32.59
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669292	2.97121842	9.4429E-09	4169272	2.00E+08	1.049E+09	12146.21	33.28
18	0.689	0.728347	0.03937	0.708662	3.09042518	1.0626E-08	3705180	2.04E+08	1.069E+09	12370.75	33.89
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748032	3.16769948	1.1443E-08	3440583	2.08E+08	1.087E+09	12579.26	34.46
20	0.7677	0.807087	0.03937	0.787402	3.27881906	1.269E-08	3102499	2.11E+08	1.103E+09	12767.28	34.98
21	0.8071	0.846457	0.03937	0.826772	3.32011836	1.3175E-08	2988156	2.14E+08	1.119E+09	12948.37	35.47
22	0.8465	0.885827	0.03937	0.866142	3.41428652	1.4329E-08	2747667	2.16E+08	1.133E+09	13114.88	35.93
23	0.8858	0.925197	0.03937	0.905512	3.49207886	1.533E-08	2568100	2.19E+08	1.147E+09	13270.51	36.36
24	0.9252	0.944882	0.019685	0.93504	3.57139654	1.6399E-08	1200383	2.20E+08	1.153E+09	13343.26	36.56

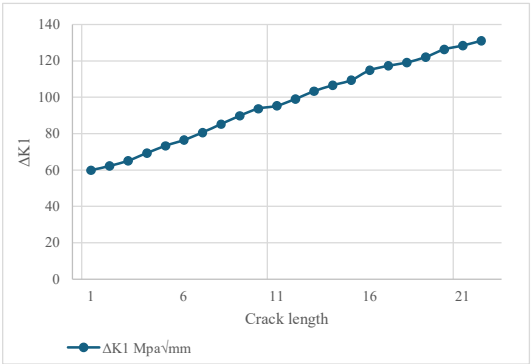


time
1.15E+09 s
1.92E+07 min
3.20E+05 h
1.33E+04 day
36.56 year

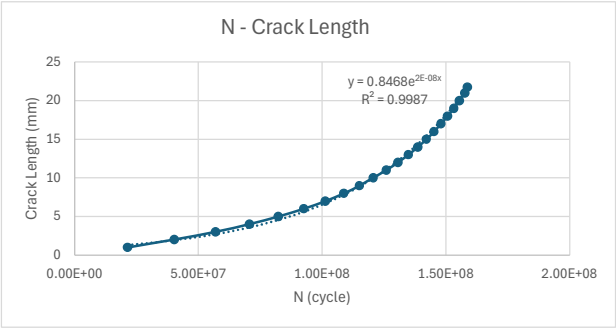
Load case 4 = 241584 N
t = 22 mm

1	Mpa√m	=	0.02878	Ksi√inch	1 cycle	5.236	s
C		=	3.6E-10		1 mm	0.03937	inc
m		=	3		1 Mpa	0.145038	Ksi

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	59.932
2	1.5	2.5	1	2	62.298
3	2.5	3.5	1	3	65.121
4	3.5	4.5	1	4	69.345
5	4.5	5.5	1	5	73.28
6	5.5	6.5	1	6	76.482
7	6.5	7.5	1	7	80.629
8	7.5	8.5	1	8	85.189
9	8.5	9.5	1	9	89.782
10	9.5	10.5	1	10	93.669
11	10.5	11.5	1	11	95.278
12	11.5	12.5	1	12	99.056
13	12.5	13.5	1	13	103.309
14	13.5	14.5	1	14	106.557
15	14.5	15.5	1	15	109.418
16	15.5	16.5	1	16	114.825
17	16.5	17.5	1	17	117.28
18	17.5	18.5	1	18	119.098
19	18.5	19.5	1	19	122.109
20	19.5	20.5	1	20	126.325
21	20.5	21.5	1	21	128.445
22	21.5	22	0.5	21.75	131.027



No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.03937	1.72484296	1.8474E-09	21311565	21311564.65	111587352.5	1291.52	3.54
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.07874	1.79293644	2.0749E-09	18974456	4.03E+07	210937604.5	2441.41	6.69
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.11811	1.87418238	2.3699E-09	16612250	5.69E+07	297919346.9	3448.14	9.45
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.15748	1.9957491	2.8617E-09	13757711	7.07E+07	369954723.1	4281.88	11.73
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.196851	2.1089984	3.377E-09	11658301	8.23E+07	430997587.5	4988.40	13.67
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236221	2.20115196	3.8393E-09	10254487	9.26E+07	484690081.6	5609.84	15.37
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.275591	2.32050262	4.4983E-09	8752212	1.01E+08	530516663.5	6140.24	16.82
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.314961	2.45173942	5.3055E-09	7420635	1.09E+08	569371109.9	6589.94	18.05
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354331	2.58392596	6.2107E-09	6339045	1.15E+08	602562348.5	6974.10	19.11
10	0.374	0.413386	0.03937	0.393701	2.69579382	7.0528E-09	5582182	1.21E+08	631790653.8	7312.39	20.03
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433071	2.74210084	7.4225E-09	5304125	1.26E+08	659563052.4	7633.83	20.91
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472441	2.85083168	8.341E-09	4720079	1.31E+08	684277387.2	7919.88	21.70
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.511811	2.97323302	9.4621E-09	4160803	1.35E+08	706063352.8	8172.03	22.39
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551181	3.06671046	1.0383E-08	3791802	1.39E+08	725917230	8401.82	23.02
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.590552	3.14905004	1.1242E-08	3502074	1.42E+08	744254090	8614.05	23.60
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.629922	3.3046635	1.2992E-08	3030277	1.45E+08	760120618.8	8797.69	24.10
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669292	3.3753184	1.3844E-08	2843936	1.48E+08	775011466.2	8970.04	24.58
18	0.689	0.728347	0.03937	0.708662	3.42764044	1.4497E-08	2715678	1.51E+08	789230755.2	9134.62	25.03
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748032	3.51429702	1.5625E-08	2519699	1.53E+08	802423898	9287.31	25.44
20	0.7677	0.807087	0.03937	0.787402	3.6356335	1.73E-08	2275746	1.56E+08	814339702.4	9425.23	25.82
21	0.8071	0.846457	0.03937	0.826772	3.6966471	1.8186E-08	2164911	1.58E+08	825675176.2	9556.43	26.18
22	0.8465	0.866142	0.019685	0.8563	3.77095706	1.9304E-08	1019716	1.59E+08	831014409.5	9618.22	26.35



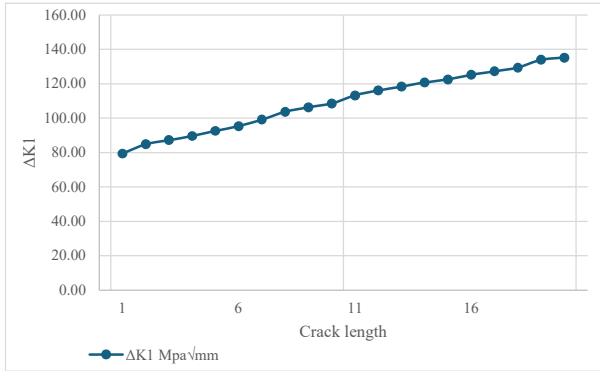
time
8.31E+08 s
1.39E+07 min
2.31E+05 h
9.62E+03 day
26.35 year

Load case 4 = 241584 N

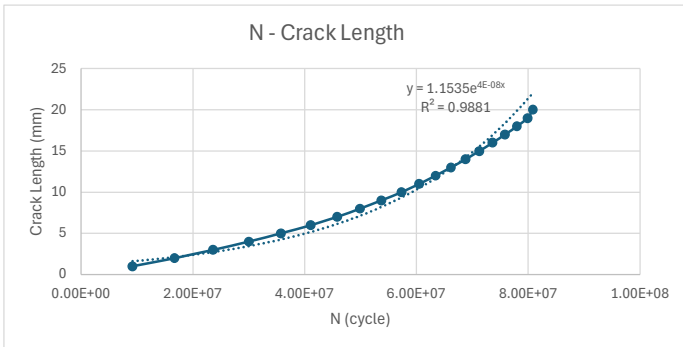
t = 20 mm

1	Mpa√m	=	0.02878	Ksi√inch	1 cycle	5.236	s
C		=	3.6E-10		1 mm	0.03937	inc
m		=	3		1 Mpa	0.145038	Ksi

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	79.33
2	1.5	2.5	1	2	84.82
3	2.5	3.5	1	3	87.22
4	3.5	4.5	1	4	89.59
5	4.5	5.5	1	5	92.58
6	5.5	6.5	1	6	95.34
7	6.5	7.5	1	7	99.10
8	7.5	8.5	1	8	103.66
9	8.5	9.5	1	9	106.25
10	9.5	10.5	1	10	108.54
11	10.5	11.5	1	11	113.20
12	11.5	12.5	1	12	116.09
13	12.5	13.5	1	13	118.32
14	13.5	14.5	1	14	120.712
15	14.5	15.5	1	15	122.448
16	15.5	16.5	1	16	125.186
17	16.5	17.5	1	17	127.18
18	17.5	18.5	1	18	129.321
19	18.5	19.5	1	19	133.92
20	19.5	20	0.5	19.75	135.127



No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.03937	2.28303106	4.284E-09	9190276	9190276.06	48120285.47	556.95	1.53
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.07874	2.44114838	5.237E-09	7517639	1.67E+07	87482644.77	1012.53	2.77
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.11811	2.5100477	5.693E-09	6915413	2.36E+07	123691744.8	1431.62	3.92
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.15748	2.57845776	6.171E-09	6379461	3.00E+07	157094600	1818.22	4.98
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.196851	2.66436606	6.809E-09	5782057	3.58E+07	187369448.4	2168.63	5.94
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236221	2.74382764	7.437E-09	5294117	4.11E+07	215089445.2	2489.46	6.82
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.275591	2.85215556	8.353E-09	4713510	4.58E+07	239769381.1	2775.11	7.60
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.314961	2.98344992	9.56E-09	4118203	4.99E+07	261332292.5	3024.68	8.29
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354331	3.05784622	1.029E-08	3824874	5.37E+07	281359331	3256.47	8.92
10	0.374	0.413386	0.03937	0.393701	3.12372364	1.097E-08	3587949	5.73E+07	300145829.5	3473.91	9.52
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433071	3.25795356	1.245E-08	3162491	6.05E+07	316704634.3	3665.56	10.04
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472441	3.34112776	1.343E-08	2932140	6.34E+07	332057321.7	3843.26	10.53
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.511811	3.40519204	1.421E-08	2769741	6.62E+07	346559686.6	4011.11	10.99
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551181	3.47409136	1.509E-08	2608197	6.88E+07	360216203.6	4169.17	11.42
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.590552	3.52405344	1.576E-08	2498829	7.13E+07	373300072.9	4320.60	11.84
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.629922	3.60285308	1.684E-08	2338430	7.36E+07	385544092	4462.32	12.23
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669292	3.6602404	1.765E-08	2230156	7.59E+07	397221187.3	4597.47	12.60
18	0.689	0.728347	0.03937	0.708662	3.72185838	1.856E-08	2121214	7.80E+07	408327863.8	4726.02	12.95
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748032	3.8542176	2.061E-08	1910097	7.99E+07	418329129.5	4841.77	13.27
20	0.7677	0.787402	0.019685	0.777559	3.88895506	2.117E-08	929683.8	8.08E+07	423196953.7	4898.11	13.42



time
4.23E+08 s
7.05E+06 min
1.18E+05 h
4.90E+03 day
13.42 year

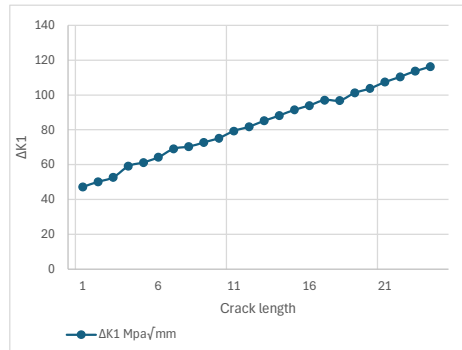
Load case 3 = 236847 N

t = 24 mm

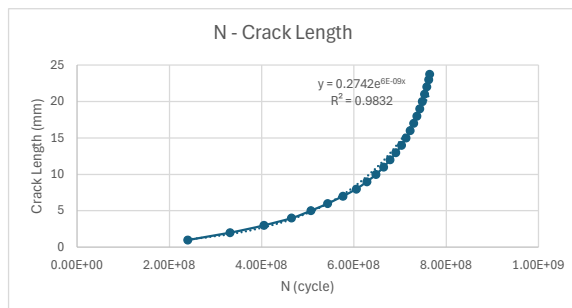
threshold

k1c	90 Ksi√inch	1	Mpa√mm	=	0.02878 Ksi√inch	1 cycle	5.236 s
	3127 Mpa√mm		C	=	3.6E-10	1 mm	0.03937 inc
kth	3.3 Ksi√inch		m	=	3	1 Mpa	0.145038 Ksi
	114.67 Mpa√mm						

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	47.274
2	1.5	2.5	1	2	50.172
3	2.5	3.5	1	3	52.772
4	3.5	4.5	1	4	59.175
5	4.5	5.5	1	5	61.284
6	5.5	6.5	1	6	64.281
7	6.5	7.5	1	7	69.112
8	7.5	8.5	1	8	70.382
9	8.5	9.5	1	9	72.782
10	9.5	10.5	1	10	75.24
11	10.5	11.5	1	11	79.335
12	11.5	12.5	1	12	81.827
13	12.5	13.5	1	13	85.283
14	13.5	14.5	1	14	88.183
15	14.5	15.5	1	15	91.494
16	15.5	16.5	1	16	93.982
17	16.5	17.5	1	17	97.092
18	17.5	18.5	1	18	96.871
19	18.5	19.5	1	19	101.221
20	19.5	20.5	1	20	103.729
21	20.5	21.5	1	21	107.392
22	21.5	22.5	1	22	110.356
23	22.5	23.5	1	23	113.702
24	23.5	24	0.5	23.75	116.288



No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.03937	1.36054572	9.0665E-10	43423477	43423477.04	227365326	2631.54	7.21
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.07874	1.44395016	1.0838E-09	36325149	7.97E+07	417563807	4832.91	13.24
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.11811	1.51877816	1.2612E-09	31216268	1.11E+08	581012189	6724.68	18.42
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.15748	1.7030565	1.7782E-09	22139961	1.33E+08	696937024	8066.40	22.10
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.196851	1.76375352	1.9752E-09	19931975	1.53E+08	801300846	9274.32	25.41
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236221	1.85000718	2.2794E-09	17272046	1.70E+08	891737276	10321.03	28.28
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.275591	1.98904336	2.8329E-09	13897327	1.84E+08	964503679	11163.24	30.58
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.314961	2.02559396	2.992E-09	13158514	1.97E+08	1.033E+09	11960.67	32.77
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354331	2.09466596	3.3086E-09	11899253	2.09E+08	1.096E+09	12681.78	34.74
10	0.374	0.413386	0.03937	0.393701	2.1654072	3.6553E-09	10770734	2.20E+08	1.152E+09	13334.51	36.53
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433071	2.2832613	4.2852E-09	9187496	2.29E+08	1.2E+09	13891.29	38.06
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472441	2.35498106	4.7018E-09	8373399	2.38E+08	1.244E+09	14398.73	39.45
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.511811	2.45444474	5.3231E-09	7396125	2.45E+08	1.283E+09	14846.95	40.68
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551181	2.53790674	5.8848E-09	6690168	2.52E+08	1.318E+09	15252.39	41.79
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.590552	2.63319732	6.5728E-09	5989820	2.58E+08	1.349E+09	15615.38	42.78
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.629922	2.70480196	7.1238E-09	5526594	2.63E+08	1.378E+09	15950.30	43.70
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669292	2.79430776	7.8546E-09	5012349	2.68E+08	1.404E+09	16254.06	44.53
18	0.689	0.728347	0.03937	0.708662	2.78794738	7.8011E-09	5046733	2.73E+08	1.431E+09	16559.90	45.37
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748032	2.91314038	8.8999E-09	4423640	2.78E+08	1.454E+09	16827.98	46.10
20	0.7677	0.807087	0.03937	0.787402	2.98532062	9.578E-09	4110466	2.82E+08	1.475E+09	17077.09	46.79
21	0.8071	0.846457	0.03937	0.826772	3.09074176	1.0629E-08	3704042	2.85E+08	1.495E+09	17301.56	47.40
22	0.8465	0.885827	0.03937	0.866142	3.17604568	1.1534E-08	3413531	2.89E+08	1.513E+09	17508.42	47.97
23	0.8858	0.925197	0.03937	0.905512	3.27234356	1.2615E-08	3120954	2.92E+08	1.529E+09	17697.56	48.49
24	0.9252	0.944882	0.019685	0.93504	3.34676864	1.3495E-08	1458670	2.93E+08	1.537E+09	17785.96	48.73



time
1.54E+09 s
2.56E+07 min
4.27E+05 h
1.78E+04 day
48.73 year

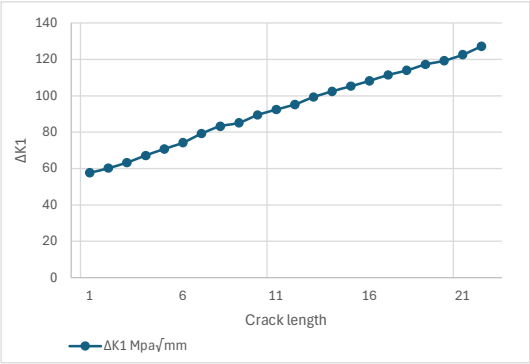
Load case 3 = 236847 N

t = 22 mm

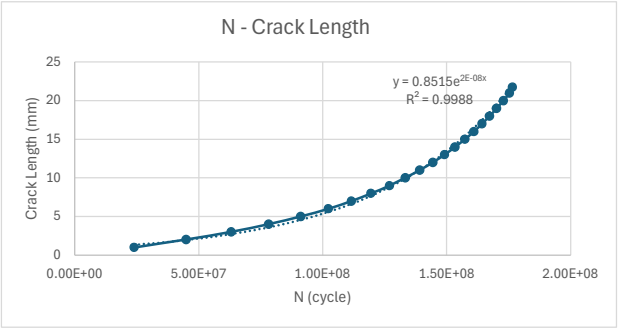
threshold

k1c	90 Ksi√inch	1	Mpa√mm	=	0.02878 Ksi√inch	1 cycle	5.236 s
	3127 Mpa√mm		C	=	3.6E-10	1 mm	0.03937 inc
kth	3.3 Ksi√inch		m	=	3	1 Mpa	0.145038 Ksi
	114.67 Mpa√mm						

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	57.638
2	1.5	2.5	1	2	60.227
3	2.5	3.5	1	3	63.275
4	3.5	4.5	1	4	67.176
5	4.5	5.5	1	5	70.798
6	5.5	6.5	1	6	74.227
7	6.5	7.5	1	7	79.256
8	7.5	8.5	1	8	83.275
9	8.5	9.5	1	9	85.187
10	9.5	10.5	1	10	89.402
11	10.5	11.5	1	11	92.427
12	11.5	12.5	1	12	95.28
13	12.5	13.5	1	13	99.305
14	13.5	14.5	1	14	102.482
15	14.5	15.5	1	15	105.285
16	15.5	16.5	1	16	108.229
17	16.5	17.5	1	17	111.428
18	17.5	18.5	1	18	114.008
19	18.5	19.5	1	19	117.226
20	19.5	20.5	1	20	119.288
21	20.5	21.5	1	21	122.628
22	21.5	22	0.5	21.75	127.202



No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.03937	1.65882164	1.6432E-09	23958793	23958793.28	125448241.6	1451.95	3.98
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.07874	1.73333306	1.8748E-09	20999935	4.50E+07	235403902.6	2724.58	7.46
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.11811	1.8210545	2.1741E-09	18109030	6.31E+07	330222783.4	3822.02	10.47
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.15748	1.93332528	2.6015E-09	15133843	7.82E+07	409463586	4739.16	12.98
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.196851	2.03756644	3.0454E-09	12927921	9.11E+07	477154178.9	5522.62	15.13
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236221	2.13625306	3.5096E-09	11217754	1.02E+08	535890340.5	6202.43	16.99
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.275591	2.28098768	4.2724E-09	9214997	1.12E+08	584140064.8	6760.88	18.52
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.314961	2.3966545	4.9559E-09	7944155	1.20E+08	625735661.8	7242.31	19.84
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354331	2.45168186	5.3051E-09	7421158	1.27E+08	664592844.9	7692.05	21.07
10	0.374	0.413386	0.03937	0.393701	2.57298956	6.1322E-09	6420221	1.33E+08	698209119.5	8081.12	22.14
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433071	2.66004906	6.776E-09	5810253	1.39E+08	728631606.6	8433.24	23.10
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472441	2.7421584	7.423E-09	5303791	1.44E+08	756402256.3	8754.66	23.99
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.511811	2.8579979	8.404E-09	4684662	1.49E+08	780931148.8	9038.55	24.76
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551181	2.94943196	9.2367E-09	4262348	1.53E+08	803248801.2	9296.86	25.47
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.590552	3.0301023	1.0016E-08	3930901	1.57E+08	823831000.6	9535.08	26.12
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.629922	3.11483062	1.0879E-08	3618768	1.61E+08	842778868.5	9754.39	26.72
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669292	3.20689784	1.1873E-08	3315955	1.64E+08	860141209.5	9955.34	27.27
18	0.689	0.728347	0.03937	0.708662	3.28115024	1.2717E-08	3095891	1.67E+08	876351294.9	10142.95	27.79
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748032	3.37376428	1.3824E-08	2847868	1.70E+08	891262730.2	10315.54	28.26
20	0.7677	0.807087	0.03937	0.787402	3.43310864	1.4567E-08	2702722	1.73E+08	905414182.6	10479.33	28.71
21	0.8071	0.846457	0.03937	0.826772	3.52923384	1.5825E-08	2487842	1.75E+08	918440520.8	10630.10	29.12
22	0.8465	0.866142	0.019685	0.8563	3.66087356	1.7663E-08	1114499	1.77E+08	924276039.6	10697.64	29.31



time	
9.24E+08	s
1.54E+07	min
2.57E+05	h
1.07E+04	day
29.31	year

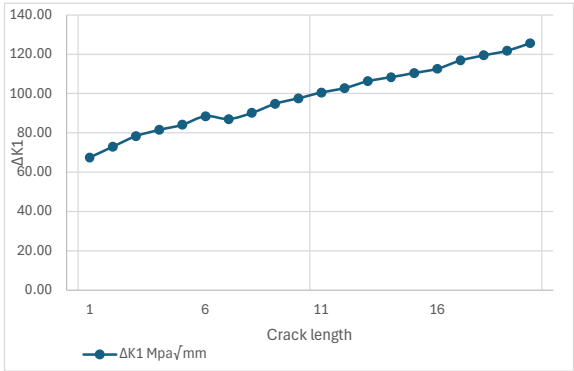
Load case 3 = 236847 N

t = 20 mm

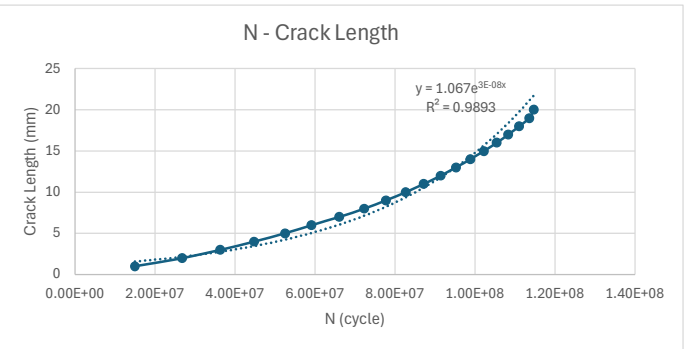
threshold

k1c	90 Ksi√inch	1	Mpa√mm	=	0.02878 Ksi√inch	1 cycle	5.236 s
	3127 Mpa√mm		C	=	3.6E-10	1 mm	0.0393701 inc
kth	3.3 Ksi√inch		m	=	3	1 Mpa	0.1450377 Ksi
	114.67 Mpa√mm						

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	67.44
2	1.5	2.5	1	2	72.94
3	2.5	3.5	1	3	78.32
4	3.5	4.5	1	4	81.53
5	4.5	5.5	1	5	84.16
6	5.5	6.5	1	6	88.43
7	6.5	7.5	1	7	87.00
8	7.5	8.5	1	8	90.18
9	8.5	9.5	1	9	94.81
10	9.5	10.5	1	10	97.53
11	10.5	11.5	1	11	100.55
12	11.5	12.5	1	12	102.73
13	12.5	13.5	1	13	106.29
14	13.5	14.5	1	14	108.365
15	14.5	15.5	1	15	110.429
16	15.5	16.5	1	16	112.623
17	16.5	17.5	1	17	116.827
18	17.5	18.5	1	18	119.453
19	18.5	19.5	1	19	121.743
20	19.5	20	0.5	19.75	125.628



No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.03937	1.94098076	2.632E-09	14955479	14955478.9	78306887.76	906.33	2.48
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.07874	2.09929954	3.331E-09	11820634	2.68E+07	140199729.5	1622.68	4.45
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.11811	2.25396326	4.122E-09	9550443	3.63E+07	190205849.3	2201.46	6.03
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.15748	2.34640462	4.651E-09	8465552	4.48E+07	234531481.6	2714.48	7.44
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.196851	2.42221114	5.116E-09	7695344	5.25E+07	274824301.6	3180.84	8.71
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236221	2.54490028	5.934E-09	6635165	5.91E+07	309566024	3582.94	9.82
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.275591	2.50377366	5.651E-09	6967530	6.61E+07	346048008.7	4005.19	10.97
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.314961	2.59526528	6.293E-09	6256317	7.23E+07	378806084.6	4384.33	12.01
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354331	2.72874692	7.315E-09	5382379	7.77E+07	406988218.8	4710.51	12.91
10	0.374	0.413386	0.03937	0.393701	2.80685584	7.961E-09	4945426	8.27E+07	432882468.5	5010.21	13.73
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433071	2.89388656	8.725E-09	4512524	8.72E+07	456510043.3	5283.68	14.48
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472441	2.95654062	9.304E-09	4231677	9.14E+07	478667101.8	5540.13	15.18
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.511811	3.0588823	1.03E-08	3820988	9.52E+07	498673797	5771.69	15.81
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551181	3.1187447	1.092E-08	3605160	9.88E+07	517550414.7	5990.17	16.41
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.590552	3.17814662	1.156E-08	3406765	1.02E+08	535388238.4	6196.62	16.98
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.629922	3.24128994	1.226E-08	3211518	1.05E+08	552203747.2	6391.25	17.51
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669292	3.36228106	1.368E-08	2877146	1.08E+08	567268486.2	6565.61	17.99
18	0.689	0.728347	0.03937	0.708662	3.43785734	1.463E-08	2691538	1.11E+08	581361377.5	6728.72	18.43
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748032	3.50376354	1.548E-08	2542492	1.14E+08	594673867.3	6882.80	18.86
20	0.7677	0.787402	0.019685	0.777559	3.61557384	1.702E-08	1156917	1.15E+08	600731486.3	6952.91	19.05



time
6.01E+08 s
1.00E+07 min
1.67E+05 h
6.95E+03 day
19.05 year

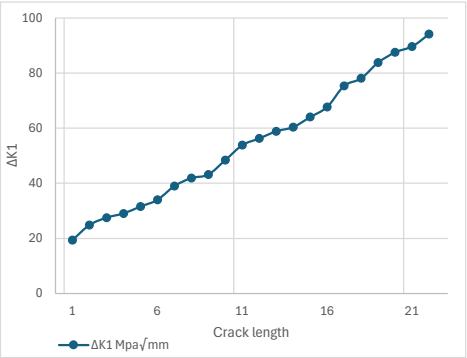
Load case 2 = 164014 N

t = 24 mm

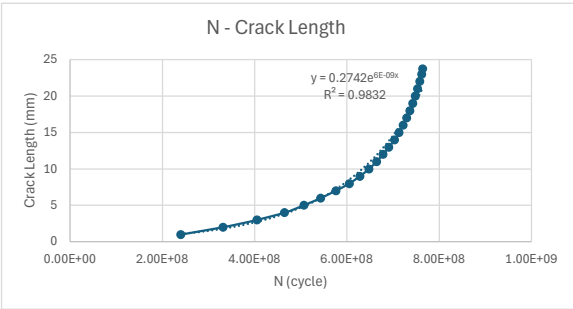
threshold

k1c	90 Ksi√inch	1	Mpa√mm	=	0.02878 Ksi√inch	1 cycle	5.236 s
	3127 Mpa√mm		C	=	3.6E-10	1 mm	0.03937 inc
kth	3.3 Ksi√inch		m	=	3	1 Mpa	0.145038 Ksi
	114.67 Mpa√mm						

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	19.35
2	1.5	2.5	1	2	24.85
3	2.5	3.5	1	3	27.454
4	3.5	4.5	1	4	29.058
5	4.5	5.5	1	5	31.531
6	5.5	6.5	1	6	34.003
7	6.5	7.5	1	7	38.952
8	7.5	8.5	1	8	41.902
9	8.5	9.5	1	9	43.155
10	9.5	10.5	1	10	48.408
11	10.5	11.5	1	11	53.834
12	11.5	12.5	1	12	56.261
13	12.5	13.5	1	13	58.82
14	13.5	14.5	1	14	60.379
15	14.5	15.5	1	15	64.024
16	15.5	16.5	1	16	67.67
17	16.5	17.5	1	17	75.37
18	17.5	18.5	1	18	78.07
19	18.5	19.5	1	19	83.786
20	19.5	20.5	1	20	87.503
21	20.5	21.5	1	21	89.629
22	21.5	22.5	1	22	94.098
23	22.5	23.5	1	23	98.779
24	23.5	24	0.5	23.75	104.811



No	a0	af	Δ a	a avg (in)	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.03937	0.556893	6.2175E-11	6.33E+08	633211422	3.315E+09	38373.78	105.13
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.07874	0.715183	1.3169E-10	2.99E+08	9.32E+08	4.881E+09	56491.29	154.77
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.11811	0.79012612	1.7758E-10	2.22E+08	1.15E+09	6.042E+09	69927.00	191.58
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.15748	0.83628924	2.1056E-10	1.87E+08	1.34E+09	7.021E+09	81258.32	222.63
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.196851	0.90746218	2.6902E-10	1.46E+08	1.49E+09	7.787E+09	90127.11	246.92
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236221	0.97860634	3.3739E-10	1.17E+08	1.60E+09	8.398E+09	97198.84	266.30
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.275591	1.12103856	5.0718E-10	77625134	1.68E+09	8.804E+09	101903.07	279.19
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.314961	1.20593956	6.3136E-10	62357313	1.74E+09	9.131E+09	105682.03	289.54
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354331	1.2420009	6.8971E-10	57081882	1.80E+09	9.43E+09	109141.30	299.02
10	0.374	0.413386	0.03937	0.393701	1.39318224	9.7348E-10	40442708	1.84E+09	9.642E+09	111592.20	305.73
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433071	1.54934252	1.3389E-09	29405035	1.87E+09	9.796E+09	113374.20	310.61
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472441	1.61919158	1.5283E-09	25761391	1.90E+09	9.93E+09	114935.39	314.89
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.511811	1.6928396	1.7464E-09	22543253	1.92E+09	1.005E+10	116301.55	318.63
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551181	1.73770762	1.889E-09	20841736	1.94E+09	1.016E+10	117564.60	322.09
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.590552	1.84261072	2.2522E-09	17480878	1.96E+09	1.025E+10	118623.98	325.00
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.629922	1.9475426	2.6593E-09	14804820	1.97E+09	1.033E+10	119521.18	327.46
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669292	2.1691486	3.6743E-09	10715097	1.98E+09	1.038E+10	120170.53	329.23
18	0.689	0.728347	0.03937	0.708662	2.2468546	4.0835E-09	9641378	1.99E+09	1.043E+10	120754.82	330.84
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748032	2.41136108	5.0477E-09	7799689	2.00E+09	1.047E+10	121227.49	332.13
20	0.7677	0.807087	0.03937	0.787402	2.51833634	5.7497E-09	6847355	2.01E+09	1.051E+10	121642.45	333.27
21	0.8071	0.846457	0.03937	0.826772	2.57952262	6.179E-09	6371563	2.01E+09	1.054E+10	122028.58	334.32
22	0.8465	0.885827	0.03937	0.866142	2.70814044	7.1502E-09	5506181	2.02E+09	1.057E+10	122362.27	335.24
23	0.8858	0.925197	0.03937	0.905512	2.84285962	8.2712E-09	4759899	2.02E+09	1.06E+10	122650.73	336.03
24	0.9252	0.944882	0.019685	0.93504	3.01646058	9.8809E-09	1992237	2.03E+09	1.061E+10	122771.46	336.36

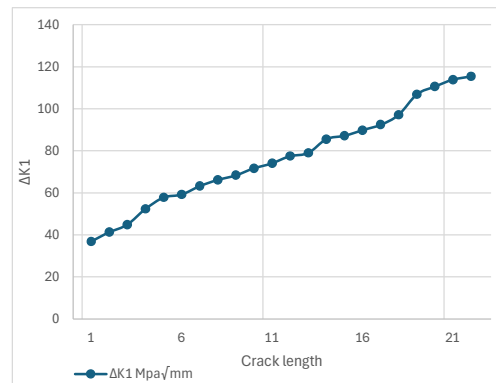


time
1.06E+10 s
1.77E+08 min
2.95E+06 h
1.23E+05 day
336.36 year

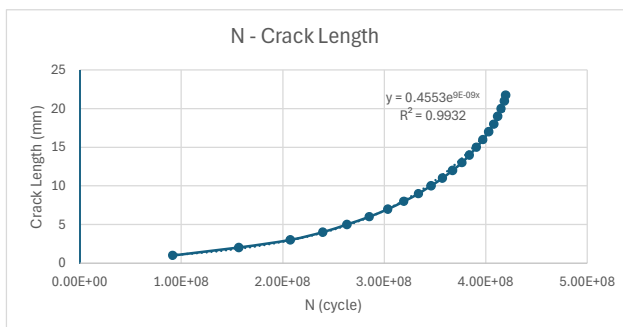
treshold

k1c	90 Ksi√inch	1	Mpa√mm	=	0.02878	Ksi√inch	1 cycle	5.236 s
	3127 Mpa√mm		C	=	3.6E-10		1 mm	0.03937 inc
kth	3.3 Ksi√inch		m	=	3		1 Mpa	0.145038 Ksi
	114.67 Mpa√mm							

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	36.851
2	1.5	2.5	1	2	41.315
3	2.5	3.5	1	3	44.845
4	3.5	4.5	1	4	52.375
5	4.5	5.5	1	5	57.814
6	5.5	6.5	1	6	59.253
7	6.5	7.5	1	7	63.207
8	7.5	8.5	1	8	66.161
9	8.5	9.5	1	9	68.413
10	9.5	10.5	1	10	71.666
11	10.5	11.5	1	11	74.078
12	11.5	12.5	1	12	77.491
13	12.5	13.5	1	13	79.018
14	13.5	14.5	1	14	85.545
15	14.5	15.5	1	15	87.165
16	15.5	16.5	1	16	89.784
17	16.5	17.5	1	17	92.467
18	17.5	18.5	1	18	97.149
19	18.5	19.5	1	19	106.863
20	19.5	20.5	1	20	110.577
21	20.5	21.5	1	21	113.87
22	21.5	22	0.5	21.75	115.412



No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.039	1.061	4.2946E-10	91673500.68	91673500.68	480002450	5555.58	15.22
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.079	1.189	6.052E-10	65053156.93	1.57E+08	820620779	9497.93	26.02
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.118	1.291	7.7396E-10	50868574.01	2.08E+08	1086968633	12580.66	34.47
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.157	1.507	1.233E-09	31931516.19	2.40E+08	1254162051	14515.76	39.77
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.197	1.664	1.6583E-09	23740649.37	2.63E+08	1378468092	15954.49	43.71
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236	1.705	1.7853E-09	22056341.49	2.85E+08	1493935722	17290.92	47.37
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.276	1.819	2.1671E-09	18167539.57	3.03E+08	1589060960	18391.91	50.39
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.315	1.904	2.4853E-09	15841104.76	3.19E+08	1672004984	19351.91	53.02
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354	1.969	2.7478E-09	14327675.69	3.34E+08	1747024694	20220.19	55.40
10	0.374	0.413386	0.03937	0.394	2.063	3.1587E-09	12463848.25	3.46E+08	1812285404	20975.53	57.47
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433	2.132	3.4885E-09	11285580.5	3.57E+08	1871376703	21659.45	59.34
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472	2.230	3.9933E-09	9859113.179	3.67E+08	1922999020	22256.93	60.98
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.512	2.274	4.234E-09	9298513.989	3.77E+08	1971686039	22820.44	62.52
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551	2.462	5.3723E-09	7328376.213	3.84E+08	2010057417	23264.55	63.74
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.591	2.509	5.6833E-09	6927319.92	3.91E+08	2046328864	23684.36	64.89
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.630	2.584	6.2111E-09	6338621.197	3.97E+08	2079517884	24068.49	65.94
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669	2.661	6.7848E-09	5802716.4	4.03E+08	2109900907	24420.15	66.90
18	0.689	0.728347	0.03937	0.709	2.796	7.665E-09	5003531.574	4.08E+08	2136099399	24723.37	67.74
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748	3.076	1.0473E-08	3759322.309	4.12E+08	2155783210	24951.19	68.36
20	0.7677	0.807087	0.03937	0.787	3.182	1.1603E-08	3393104.529	4.15E+08	2173549506	25156.82	68.92
21	0.8071	0.846457	0.03937	0.827	3.277	1.2671E-08	3071160.494	4.18E+08	2189818598	25345.12	69.44
22	0.8465	0.866142	0.019685	0.856	3.322	1.3193E-08	1492137.178	4.20E+08	2197631428	25435.55	69.63



time	
2.20E+09	s
3.66E+07	min
6.10E+05	h
2.54E+04	day
69.69	year

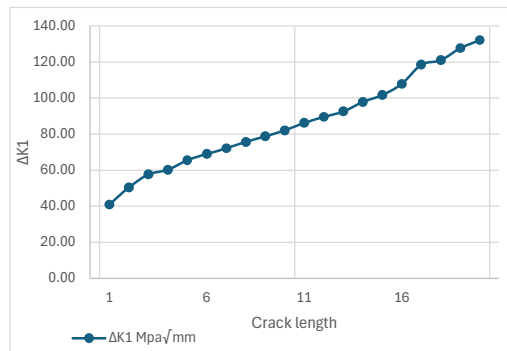
Load case 2 = 164014 N

t = 20mm

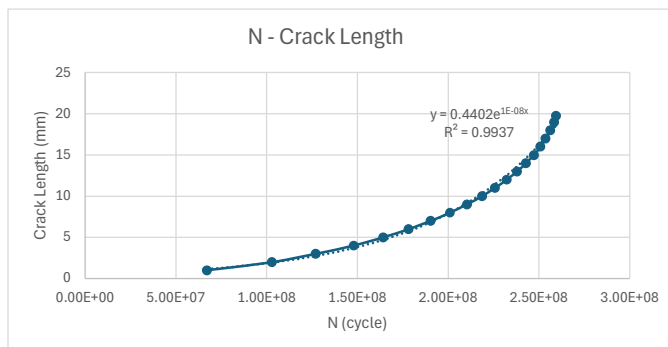
threshold

k1c	90 Ksi√inch	1	Mpa√mm	=	0.02878 Ksi√inch	1 cycle	5.236 s
	3127 Mpa√mm		C	=	3.6E-10	1 mm	0.03937 inc
kth	3.3 Ksi√inch		m	=	3	1 Mpa	0.145038 Ksi
	114.67 Mpa√mm						

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	40.88
2	1.5	2.5	1	2	50.44
3	2.5	3.5	1	3	57.64
4	3.5	4.5	1	4	60.23
5	4.5	5.5	1	5	65.53
6	5.5	6.5	1	6	69.02
7	6.5	7.5	1	7	72.14
8	7.5	8.5	1	8	75.71
9	8.5	9.5	1	9	78.76
10	9.5	10.5	1	10	82.10
11	10.5	11.5	1	11	86.31
12	11.5	12.5	1	12	89.53
13	12.5	13.5	1	13	92.57
14	13.5	14.5	1	14	97.8
15	14.5	15.5	1	15	101.75
16	15.5	16.5	1	16	107.86
17	16.5	17.5	1	17	118.49
18	17.5	18.5	1	18	121.02
19	18.5	19.5	1	19	127.68
20	19.5	20	0.5	19.75	132.12



No	a0	af	Δ a	a avg (in)	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.039	1.176	5.8607E-10	67176651.4	67176651.38	3.52E+08	4071.03	11.15
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.079	1.452	1.1015E-09	35742829.2	1.03E+08	5.39E+08	6237.11	17.09
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.118	1.659	1.6434E-09	23956299.4	1.27E+08	6.64E+08	7688.91	21.07
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.157	1.733	1.8751E-09	20996797.5	1.48E+08	7.74E+08	8961.35	24.55
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.197	1.886	2.4149E-09	16303135.7	1.64E+08	8.6E+08	9949.35	27.26
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236	1.986	2.8216E-09	13952974	1.78E+08	9.33E+08	10794.93	29.58
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.276	2.076	3.2218E-09	12219775.7	1.90E+08	9.97E+08	11535.47	31.60
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.315	2.179	3.7242E-09	10571385.5	2.01E+08	1.05E+09	12176.11	33.36
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354	2.267	4.1927E-09	9390193.16	2.10E+08	1.1E+09	12745.18	34.92
10	0.374	0.413386	0.03937	0.394	2.363	4.749E-09	8290145.96	2.19E+08	1.14E+09	13247.58	36.29
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433	2.484	5.5177E-09	7135235.28	2.26E+08	1.18E+09	13679.98	37.48
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472	2.577	6.1586E-09	6392723.12	2.32E+08	1.22E+09	14067.40	38.54
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.512	2.664	6.8075E-09	5783368.39	2.38E+08	1.25E+09	14417.88	39.50
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551	2.815	8.0277E-09	4904278.04	2.43E+08	1.27E+09	14715.09	40.32
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.591	2.928	9.0402E-09	4355002.36	2.47E+08	1.29E+09	14979.01	41.04
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.630	3.104	1.0769E-08	3656035.47	2.51E+08	1.31E+09	15200.57	41.65
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669	3.410	1.4276E-08	2757697.02	2.54E+08	1.33E+09	15367.69	42.10
18	0.689	0.728347	0.03937	0.709	3.483	1.5211E-08	2588333.32	2.56E+08	1.34E+09	15524.55	42.53
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748	3.675	1.7863E-08	2204058.04	2.58E+08	1.35E+09	15658.12	42.90
20	0.7677	0.787402	0.019685	0.778	3.802	1.9792E-08	994617.182	2.59E+08	1.36E+09	15718.40	43.06



time
1.36E+09 s
2.26E+07 min
3.77E+05 h
1.57E+04 day
43.06 year

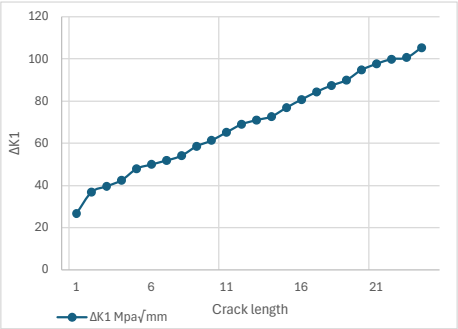
Load case 1 = 227027 N

t = 24mm

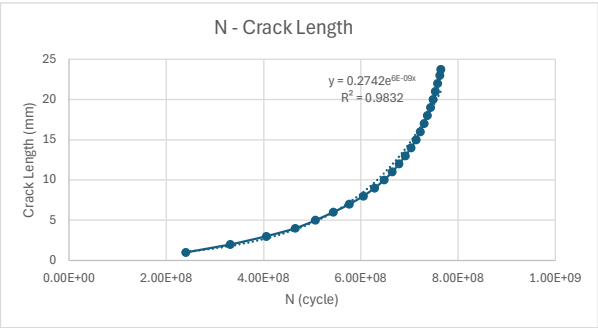
threshold

k1c	90 Ksi√inch	1	Mpa√mm	=	0.02878 Ksi√inch	1 cycle	5.236 s
	3127 Mpa√mm		C	=	3.6E-10	1 mm	0.03937 inc
kth	3.3 Ksi√inch		m	=	3	1 Mpa	0.145038 Ksi
	114.67 Mpa√mm						

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	26.733
2	1.5	2.5	1	2	36.861
3	2.5	3.5	1	3	39.666
4	3.5	4.5	1	4	42.501
5	4.5	5.5	1	5	47.921
6	5.5	6.5	1	6	49.992
7	6.5	7.5	1	7	51.893
8	7.5	8.5	1	8	54.129
9	8.5	9.5	1	9	58.52
10	9.5	10.5	1	10	61.372
11	10.5	11.5	1	11	65.172
12	11.5	12.5	1	12	69.014
13	12.5	13.5	1	13	70.997
14	13.5	14.5	1	14	72.682
15	14.5	15.5	1	15	76.921
16	15.5	16.5	1	16	80.691
17	16.5	17.5	1	17	84.375
18	17.5	18.5	1	18	87.382
19	18.5	19.5	1	19	89.926
20	19.5	20.5	1	20	94.782
21	20.5	21.5	1	21	97.629
22	21.5	22.5	1	22	99.887
23	22.5	23.5	1	23	100.628
24	23.5	24	0.5	23.75	105.319



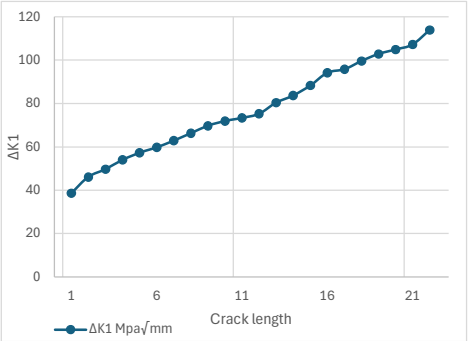
No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.0197	0.059055	0.03937	0.039	0.769	1.6395E-10	2.4E+08	240131179	1257326853	14552.394	39.87
2	0.0591	0.098425	0.03937	0.079	1.061	4.2981E-10	91598911	3.32E+08	1736938750	20103.458	55.08
3	0.0984	0.137795	0.03937	0.118	1.142	5.3559E-10	73508308	4.05E+08	2121828250	24558.197	67.28
4	0.1378	0.177165	0.03937	0.157	1.223	6.5883E-10	59757745	4.65E+08	2434719804	28179.627	77.20
5	0.1772	0.216536	0.03937	0.197	1.379	9.4439E-10	41688285	5.07E+08	2652999666	30706.015	84.13
6	0.2165	0.255906	0.03937	0.236	1.439	1.0722E-09	36718938	5.43E+08	2845260026	32931.250	90.22
7	0.2559	0.295276	0.03937	0.276	1.493	1.1992E-09	32829579	5.76E+08	3017155701	34920.784	95.67
8	0.2953	0.334646	0.03937	0.315	1.558	1.361E-09	28926883	6.05E+08	3168616860	36673.806	100.48
9	0.3346	0.374016	0.03937	0.354	1.684	1.7198E-09	22891734	6.28E+08	3288477980	38061.088	104.28
10	0.374	0.413386	0.03937	0.394	1.766	1.9837E-09	19846358	6.48E+08	3392393510	39263.814	107.57
11	0.4134	0.452756	0.03937	0.433	1.876	2.3755E-09	16573281	6.64E+08	3479171211	40268.185	110.32
12	0.4528	0.492126	0.03937	0.472	1.986	2.8209E-09	13956613	6.78E+08	3552248039	41113.982	112.64
13	0.4921	0.531496	0.03937	0.512	2.043	3.0711E-09	12819517	6.91E+08	3619371029	41890.868	114.77
14	0.5315	0.570866	0.03937	0.551	2.092	3.295E-09	11948435	7.03E+08	3681933037	42614.966	116.75
15	0.5709	0.610237	0.03937	0.591	2.214	3.9058E-09	10079915	7.13E+08	3734711473	43225.827	118.43
16	0.6102	0.649607	0.03937	0.630	2.322	4.5087E-09	8732053	7.22E+08	3780432502	43755.006	119.88
17	0.6496	0.688977	0.03937	0.669	2.428	5.1549E-09	7637484	7.30E+08	3820422366	44217.851	121.14
18	0.689	0.728347	0.03937	0.709	2.515	5.7259E-09	6875839	7.37E+08	3856424260	44634.540	122.29
19	0.7283	0.767717	0.03937	0.748	2.588	6.2407E-09	6308641	7.43E+08	3889456305	45016.855	123.33
20	0.7677	0.807087	0.03937	0.787	2.728	7.3072E-09	5387832	7.48E+08	3917666993	45343.368	124.23
21	0.8071	0.846457	0.03937	0.827	2.810	7.9857E-09	4930093	7.53E+08	3943480961	45642.141	125.05
22	0.8465	0.885827	0.03937	0.866	2.875	8.5527E-09	4603252	7.58E+08	3967583587	45921.106	125.81
23	0.8858	0.925197	0.03937	0.906	2.896	8.7444E-09	4502307	7.62E+08	3991157668	46193.954	126.56
24	0.9252	0.944882	0.019685	0.935	3.031	1.0025E-08	1963548	7.64E+08	4001438804	46312.949	126.88



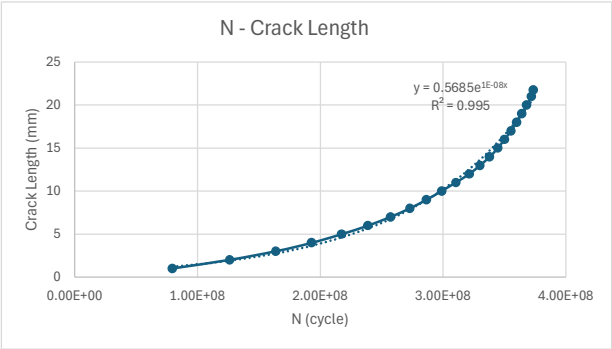
time
4.00E+09 s
6.67E+07 min
1.11E+06 h
4.63E+04 day
126.88 year

t = 22mm
threshold
k1c 90 Ksi√inch 1 Mpa√mm = 0.02878 Ksi√inch 1 cycle 5.236 s
 3127 Mpa√mm C = 3.6E-10 1 mm 0.03937 inc
kth 3.3 Ksi√inch m = 3 1 Mpa 0.145038 Ksi
 114.67 Mpa√mm

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	38.634
2	1.5	2.5	1	2	46.115
3	2.5	3.5	1	3	49.671
4	3.5	4.5	1	4	54.001
5	4.5	5.5	1	5	57.25
6	5.5	6.5	1	6	59.773
7	6.5	7.5	1	7	62.902
8	7.5	8.5	1	8	66.265
9	8.5	9.5	1	9	69.724
10	9.5	10.5	1	10	71.933
11	10.5	11.5	1	11	73.361
12	11.5	12.5	1	12	75.278
13	12.5	13.5	1	13	80.398
14	13.5	14.5	1	14	83.727
15	14.5	15.5	1	15	88.31
16	15.5	16.5	1	16	94.209
17	16.5	17.5	1	17	95.812
18	17.5	18.5	1	18	99.561
19	18.5	19.5	1	19	102.871
20	19.5	20.5	1	20	104.887
21	20.5	21.5	1	21	107.23
22	21.5	22	0.5	21.75	113.891



No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
1	0.020	0.059	0.039	0.039	1.112	4.95E-10	79557774	79557774	4.17E+08	4821.348	13.21
2	0.059	0.098	0.039	0.079	1.327	8.42E-10	46780516	1.26E+08	6.62E+08	7656.334	20.98
3	0.098	0.138	0.039	0.118	1.430	1.05E-09	37435440	1.64E+08	8.58E+08	9924.991	27.19
4	0.138	0.177	0.039	0.157	1.554	1.35E-09	29133069	1.93E+08	1.01E+09	11690.51	32.03
5	0.177	0.217	0.039	0.197	1.648	1.61E-09	24449229	2.17E+08	1.14E+09	13172.18	36.09
6	0.217	0.256	0.039	0.236	1.720	1.83E-09	21482088	2.39E+08	1.25E+09	14474.03	39.65
7	0.256	0.295	0.039	0.276	1.810	2.14E-09	18433096	2.57E+08	1.35E+09	15591.11	42.72
8	0.295	0.335	0.039	0.315	1.907	2.5E-09	15766636	2.73E+08	1.43E+09	16546.6	45.33
9	0.335	0.374	0.039	0.354	2.007	2.91E-09	13534579	2.87E+08	1.5E+09	17366.82	47.58
10	0.374	0.413	0.039	0.394	2.070	3.19E-09	12325573	2.99E+08	1.57E+09	18113.77	49.63
11	0.413	0.453	0.039	0.433	2.111	3.39E-09	11619727	3.11E+08	1.63E+09	18817.95	51.56
12	0.453	0.492	0.039	0.472	2.167	3.66E-09	10754431	3.21E+08	1.68E+09	19469.69	53.34
13	0.492	0.531	0.039	0.512	2.314	4.46E-09	8827870	3.30E+08	1.73E+09	20004.67	54.81
14	0.531	0.571	0.039	0.551	2.410	5.04E-09	7816189	3.38E+08	1.77E+09	20478.35	56.11
15	0.571	0.610	0.039	0.591	2.542	5.91E-09	6661346	3.45E+08	1.8E+09	20882.04	57.21
16	0.610	0.650	0.039	0.630	2.711	7.18E-09	5486741	3.50E+08	1.83E+09	21214.55	58.12
17	0.650	0.689	0.039	0.669	2.757	7.55E-09	5215932	3.55E+08	1.86E+09	21530.64	58.99
18	0.689	0.728	0.039	0.709	2.865	8.47E-09	4648618	3.60E+08	1.88E+09	21812.36	59.76
19	0.728	0.768	0.039	0.748	2.961	9.34E-09	4214177	3.64E+08	1.91E+09	22067.74	60.46
20	0.768	0.807	0.039	0.787	3.019	9.9E-09	3975819	3.68E+08	1.93E+09	22308.68	61.12
21	0.807	0.846	0.039	0.827	3.086	1.06E-08	3720855	3.72E+08	1.95E+09	22534.17	61.74
22	0.846	0.866	0.020	0.856	3.278	1.27E-08	1552721	3.73E+08	1.96E+09	22628.27	62.00



time
1.96E+09 s
3.26E+07 min
5.43E+05 h
2.26E+04 day
62.00 year

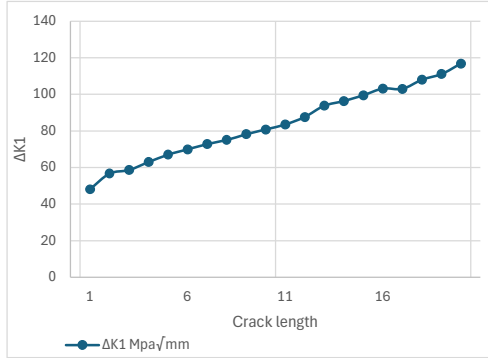
Load case 1 = 227027 N

t = 20mm

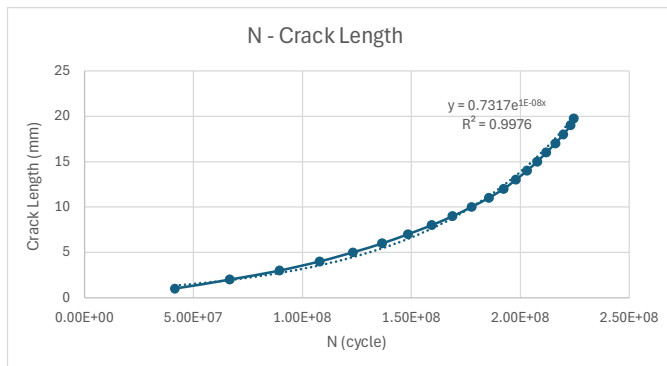
threshold

k1c	90 Ksi√inch	1	Mpa√mm	=	0.02878 Ksi√inch	1 cycle	5.236 s
	3127 Mpa√mm		C	=	3.6E-10	1 mm	0.03937 inc
kth	3.3 Ksi√inch	m		=	3	1 Mpa	0.145038 Ksi
	114.67 Mpa√mm						

No	a0	af	Δ a	a avg	ΔK1 Mpa√mm
1	0.5	1.5	1	1	48.025
2	1.5	2.5	1	2	56.674
3	2.5	3.5	1	3	58.555
4	3.5	4.5	1	4	62.908
5	4.5	5.5	1	5	66.99
6	5.5	6.5	1	6	69.941
7	6.5	7.5	1	7	72.758
8	7.5	8.5	1	8	75.098
9	8.5	9.5	1	9	78.154
10	9.5	10.5	1	10	80.776
11	10.5	11.5	1	11	83.496
12	11.5	12.5	1	12	87.598
13	12.5	13.5	1	13	93.749
14	13.5	14.5	1	14	96.342
15	14.5	15.5	1	15	99.502
16	15.5	16.5	1	16	103.184
17	16.5	17.5	1	17	102.967
18	17.5	18.5	1	18	107.992
19	18.5	19.5	1	19	111.098
20	19.5	20	0.5	19.75	116.82



a0	af	Δ a	a avg (in)	ΔK1 Ksi√inch	da/dN	ΔN	ΣN	F (s)	F (day)	F (year)
0.020	0.059	0.039	0.039	1.382	9.5055E-10	41418039	41418039	216864850	2510.01	6.88
0.059	0.098	0.039	0.079	1.631	1.5622E-09	25202293	6.66E+07	348824054	4037.32	11.06
0.098	0.138	0.039	0.118	1.685	1.7229E-09	22850710	8.95E+07	468470370	5422.11	14.86
0.138	0.177	0.039	0.157	1.810	2.1364E-09	18427822	1.08E+08	564958447	6538.87	17.91
0.177	0.217	0.039	0.197	1.928	2.5799E-09	15260252	1.23E+08	644861128	7463.67	20.45
0.217	0.256	0.039	0.236	2.013	2.9361E-09	13408992	1.37E+08	715070611	8276.28	22.67
0.256	0.295	0.039	0.276	2.094	3.3053E-09	11911032	1.48E+08	777436775	8998.11	24.65
0.295	0.335	0.039	0.315	2.161	3.6346E-09	10831947	1.59E+08	834152850	9654.55	26.45
0.335	0.374	0.039	0.354	2.249	4.0966E-09	9610324	1.69E+08	884472505	10237	28.05
0.374	0.413	0.039	0.394	2.325	4.523E-09	8704516	1.78E+08	930049350	10764.5	29.49
0.413	0.453	0.039	0.433	2.403	4.9954E-09	7881242	1.86E+08	971315531	11242.1	30.80
0.453	0.492	0.039	0.472	2.521	5.7684E-09	6825101	1.92E+08	1.007E+09	11655.7	31.93
0.492	0.531	0.039	0.512	2.698	7.0709E-09	5567904	1.98E+08	1.036E+09	11993.1	32.86
0.531	0.571	0.039	0.551	2.773	7.674E-09	5130323	2.03E+08	1.063E+09	12304	33.71
0.571	0.610	0.039	0.591	2.864	8.4542E-09	4656893	2.08E+08	1.087E+09	12586.2	34.48
0.610	0.650	0.039	0.630	2.970	9.4278E-09	4175943	2.12E+08	1.109E+09	12839.3	35.18
0.650	0.689	0.039	0.669	2.963	9.3685E-09	4202401	2.16E+08	1.131E+09	13094	35.87
0.689	0.728	0.039	0.709	3.108	1.0808E-08	3642645	2.20E+08	1.15E+09	13314.7	36.48
0.728	0.768	0.039	0.748	3.197	1.1768E-08	3345592	2.23E+08	1.168E+09	13517.5	37.03
0.768	0.787	0.020	0.778	3.362	1.3681E-08	1438832	2.24E+08	1.175E+09	13604.7	37.27



time
1.18E+09 s
1.96E+07 min
3.27E+05 h
1.36E+04 day
37.27 year

BIODATA PENULIS



Hana Bahesti Rachima, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Taliwang pada 9 November 2002 silam, Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Darul Mujahidin Ketangan, kemudian melanjutkan ke SDN 2 Taliwang, SMPN 1 Taliwang dan SMAN 1 Taliwang. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2021 melalui jalur SNMPTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Struktur Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi staff Departemen KOMINFO BEM FTK ITS 2022/2023 serta Sekretaris Departemen KOMINFO BEM FTK ITS 2023/2024. Selain itu, Penulis juga pernah menjadi peserta PKM Tingkat ITS, LKMM Pra-TD, LKMM TD, serta PKMW ITS

Email: 5018211026@student.its.ac.id/hanabahestirachima@gmail.com