



**TUGAS AKHIR - MN 184802**

## **ANALISIS TEGANGAN HALUAN KAPAL AKIBAT TUBRUKAN**

**Nur Ahmad Dzikron  
NRP 0411154000051**

**Dosen Pembimbing  
Totok Yulianto, S.T., M.T.**

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



**TUGAS AKHIR - MN 184802**

**ANALISIS TEGANGAN HALUAN KAPAL AKIBAT  
TUBRUKAN**

**Nur Ahmad Dzikron  
NRP 0411154000051**

**Dosen Pembimbing  
Totok Yulianto, S.T., M.T.**

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



---

**FINAL PROJECT - MN 184802**

**STRESS ANALYSIS OF SHIP BOW DUE TO COLLISION**

**Nur Ahmad Dzikron  
NRP 0411154000051**

**Supervisor  
Totok Yulianto, S.T., M.T.**

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

# LEMBAR PENGESAHAN

## ANALISIS TEGANGAN HALUAN KAPAL AKIBAT TUBRUKAN

### 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:

**NUR AHMAD DZIKRON**  
NRP 0411154000051

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing



Totok Yulianto, S.T., M.T.  
NIP 19700731199512 1 001

Mengetahui,  
Kepala Departemen Teknik Perkapalan



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

SURABAYA, 11 JULI 2019

## LEMBAR REVISI

# ANALISIS TEGANGAN HALUAN KAPAL AKIBAT TUBRUKAN

### TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir  
Tanggal 4 Juli 2019

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

Oleh:

**NUR AHMAD DZIKRON**  
NRP 0411154000051

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

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



2. Muhammad Nurul Misbah, S.T., M.T.



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



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Totok Yulianto, S.T., M.T



SURABAYA, 11 JULI 2019

Dipersembahkan kepada kedua orang tua atas segala dukungan dan doanya serta telah mengajarkan untuk tidak putus asa dan terus berjuang

## **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. Totok Yulianto, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Desain Kapal Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS sekaligus Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya serta atas izin pemakaian fasilitas laboratorium selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
2. Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T., Dony Setyawan, S.T., M.Eng., Muhammad Nurul Misbah, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan sarannya untuk perbaikan Laporan Tugas Akhir ini;
3. Ayah dan mama selaku kedua orang tua Penulis serta kakak-kakak dan adik-adik Penulis yang telah memberikan dukungan baik moral maupun materi;
4. Iqbal Permana, Sholichatul Ilmiah, Fajar Rachmanul, Tyo Dwiki, dan seluruh teman serta senior yang telah berdiskusi dan membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini;

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

Surabaya, 11 Juli 2019

Nur Ahmad Dzikron

# ANALISIS TEGANGAN HALUAN KAPAL AKIBAT TUBRUKAN

Nama Mahasiswa : Nur Ahmad Dzikron  
NRP : 0411154000051  
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan  
Dosen Pembimbing : Totok Yulianto, S.T., M.T.

## ABSTRAK

Tubrukan dan karam merupakan salah satu penyebab kecelakaan yang sering terjadi pada kapal. Tubrukan kapal dapat mengancam kehidupan manusia, kesehatan lingkungan, dan kerugian investasi ekonomi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui respon struktur konstruksi haluan kapal akibat tubrukan berupa tegangan, energi yang diserap, serta deformasi dengan menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan awal haluan 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s selama waktu 0,05 detik. Haluan kapal mengalami deformasi total pada saat nilai tegangan melebihi *yield strength* dan mencapai *ultimate strength*, yaitu pada sekitar waktu 0,018 detik; 0,009 detik; dan 0,0056 untuk kecepatan awal 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s. *Internal Energy* yang diserap oleh haluan kapal pada waktu 0,05 detik untuk kecepatan 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s adalah 118,01 KJ; 672,39 KJ; dan 1501,3 KJ. Gaya maksimal yang dihasilkan pada waktu 0,05 detik untuk kecepatan awal 1 m/s adalah 10,597 MN dengan penetrasi yang terjadi adalah 39,574 mm. Untuk kecepatan awal 2 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 25,221 MN dengan penetrasi 86,998 mm. Kemudian untuk kecepatan awal 3 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 29,35 MN dengan penetrasi 134,42 mm. Nilai tegangan, *internal energy*, gaya, dan penetrasi yang dihasilkan selalu lebih besar apabila kecepatan awal semakin tinggi.

Kata kunci: *ship collision*, *bow crushing*, FEM



# **STRESS ANALYSIS OF SHIP BOW DUE TO COLLISION**

Author : Nur Ahmad Dzikron  
Student Number : 0411154000051  
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology  
Supervisor : Totok Yulianto, S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

Collision and shipwreck are one of the causes of accidents that often occur on ships. ship collisions can threaten human life, environmental health, and loss of economic investment. This study was conducted to understand the structural response of ship bow construction due to collision such in the form of stress, absorbed energy, and deformation using Finite Element Method (FEM). The simulation is done with variations in the initial speed of bow 1 m/s, 2 m/s, and 3 m/s for a time of 0.05 seconds. The bow of the ship experiences total deformation when the stress value exceeds yield strength and reaches ultimate strength, which is around 0.018 seconds, 0.009 seconds, and 0.0056 for the initial speed of 1 m/s, 2 m/s, and 3 m/s. Internal Energy is absorbed by the ship bow at 0.05 seconds for a speed of 1 m/s; 2 m/s; and 3 m/s is 118.01 KJ, 672.39 KJ, and 1501.3 KJ. The maximum force at 0.05 seconds for an initial velocity of 1 m/s is 10.597 MN with 39.574 mm penetration. For the initial velocity of 2 m/s, the maximum force is 25,221 MN with 86,998 mm penetration. Then for the initial speed of 3 m/s, the maximum force is 29.35 MN with 134.42 mm penetration. The results of stress, internal energy, force, and penetration are always larger if the initial speed is higher.

Keywords: ship collision, bow crushing, FEM

# DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
LEMBAR REVISI.....	ii
HALAMAN PERUNTUKAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT .....	vi
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL .....	x
DAFTAR SIMBOL .....	xi
Bab I PENDAHULUAN .....	1
I.1. Latar Belakang Masalah.....	1
I.2. Perumusan Masalah.....	2
I.3. Tujuan.....	2
I.4. Batasan Masalah.....	2
I.5. Manfaat.....	3
I.6. Hipotesis.....	3
Bab II STUDI LITERATUR .....	5
II.1. Dasar Teori.....	5
II.1.1. Momentum.....	5
II.1.2. Impuls .....	6
II.1.3. Konservasi Momentum.....	6
II.1.4. Tubrukan.....	6
II.1.5. <i>Impact</i> dan Energi.....	8
II.1.6. Kapal Tanker .....	8
II.1.7. Tegangan .....	9
II.1.8. Tegangan Von Mises .....	11
II.1.9. <i>Finite Element Method</i> (Metode Elemen Hingga) .....	11
II.1.10. <i>Meshing</i> .....	12
II.1.11. Deformasi.....	13
II.2. Tinjauan Pustaka .....	14
II.2.1. Tubrukan Kapal .....	14
II.2.2. Analisis Tubrukan Kapal Dengan Metode Empiris.....	15
II.2.3. Analisis Tubrukan Kapal Dengan <i>Finite Element Method</i> (FEM).....	16
Bab III METODOLOGI .....	19
III.1. Studi Literatur .....	19
III.2. Pengumpulan Data .....	19
III.2.1. Ukuran Utama.....	19
III.2.2. <i>Construction Profile</i> .....	20
III.2.3. <i>Midship Section</i> .....	22
III.2.4. <i>Mechanical Properties</i> .....	22
III.3. Pemodelan Elemen Hingga .....	23
III.3.1. Proses Pengerjaan Geometry .....	23
III.3.2. <i>Dynamic Finite Element Software</i> .....	24

III.4.	Konvergensi Model .....	25
III.5.	Simulasi Pengaruh Berat .....	30
III.6.	Pembebanan dan Kondisi Batas .....	32
III.6.1.	Pembebanan .....	32
III.6.2.	Kondisi Batas .....	32
III.7.	Analisis Tegangan .....	36
III.8.	Bagan Alir .....	37
Bab IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
IV.1.	Hasil Perhitungan Analisis .....	39
IV.2.	Hasil dan Analisis FEM .....	40
IV.2.1.	Tegangan.....	40
IV.2.2.	<i>Internal Energy</i> .....	46
IV.2.3.	Gaya dan Penetrasi.....	47
IV.3.	Komparasi Hasil.....	55
Bab V	KESIMPULAN DAN SARAN .....	57
V.1.	Kesimpulan.....	57
V.2.	Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....		59
LAMPIRAN		
	LAMPIRAN A PERHITUNGAN <i>MAXIMUM BOW COLLISION LOAD</i>	
	LAMPIRAN B PERHITUNGAN <i>END TIME</i>	
	LAMPIRAN C PERHITUNGAN KEDALAMAN PENETRASI	
	LAMPIRAN D HASIL TEGANGAN UNTUK KECEPATAN 1 M/S	
	LAMPIRAN E HASIL TEGANGAN UNTUK KECEPATAN 2 M/S	
	LAMPIRAN F HASIL TEGANGAN UNTUK KECEPATAN 3 M/S	
	BIODATA PENULIS	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Ilustrasi Tubrukan Elastis.....	7
Gambar II.2 Ilustrasi Tubrukan Elastis.....	7
Gambar II.3 Ilustrasi Tubrukan inelastis Sempurna.....	8
Gambar II.4 Kapal Tanker.....	9
Gambar II.5 Komponen Tegangan Normal dan Tegangan Geser .....	10
Gambar II.6 Ilustrasi Kerusakan Haluan Kapal Pada <i>Head-on Collision</i> .....	14
Gambar II.7 Pola Kerusakan Struktur Kotak Di Bawah Beban Axial .....	15
Gambar II.8 Kurva $E-R_T$ Berdasarkan Formula Minorsky.....	16
Gambar II.9 Perbandingan Hasil FEM dan Eksperimen Untuk <i>Impacted Corrugated Panel</i> oleh Silinder.....	17
Gambar III.1 <i>Centerline Profile</i> Tanker 3500 LTDW .....	20
Gambar III.2 <i>Horizontal Web @4700 mm A.B.L</i> Tanker 5300 LTDW .....	20
Gambar III.3 <i>Horizontal Web @2400 mm A.B.L</i> Tanker 3500 LTDW .....	21
Gambar III.4 <i>Frame Section</i> Haluan Kapal Tanker 5300 LTDW .....	21
Gambar III.5 <i>Midship Section</i> Kapal Tanker 17500 LTDW .....	22
Gambar III.6 Geometri 3D Haluan <i>Striking Ship</i> dan <i>Wing Tank Struck Ship</i> .....	24
Gambar III.7 Beberapa Modul pada <i>Dynamic Finite Element Software</i> .....	24
Gambar III.8 <i>Input Material Properties</i> Pada <i>Software</i> FEM.....	25
Gambar III.9 Pemberian Beban Pada Ujung <i>Bulbous Bow</i> .....	27
Gambar III.10 Pendefinisian <i>Fixed Support</i> Pada Sekat Tubrukan.....	28
Gambar III.11 Parameter Titik Tinjauan Beban .....	28
Gambar III.12 Kurva Konvergensi Ukuran Meshing.....	29
Gambar III.13 <i>Mechanical Properties</i> Alumunium .....	30
Gambar III.14 Kurva Tegangan Pada Material yang Berbeda .....	32
Gambar III.15 Contoh Pendefinisian <i>Connections</i> .....	33
Gambar III.16 <i>Meshing</i> Model Geometri .....	34
Gambar III.17 <i>Meshing</i> Pada Konstruksi Haluan.....	35
Gambar III.18 Diagram Alir Tugas Akhir .....	37
Gambar IV.1 Kurva <i>Time-Stress</i> .....	41
Gambar IV.2 Hasil Tegangan Von Miseses Untuk $V = 1$ m/s .....	42
Gambar IV.3 Hasil Tegangan Pada Pelat Untuk $V = 1$ m/s .....	42
Gambar IV.4 Hasil Tegangan Untuk $V = 2$ m/s .....	43
Gambar IV.5 Hasil Tegangan Pada Pelat Untuk $V = 2$ m/s .....	44
Gambar IV.6 Hasil Tegangan Von Miseses Untuk $V = 3$ m/s .....	45
Gambar IV.7 Hasil Tegangan Pada Pelat Untuk $V = 3$ m/s .....	45
Gambar IV.8 Kurva <i>Internal Energy</i> .....	47
Gambar IV.9 Kurva Penetrasi-Gaya.....	48
Gambar IV.10 Hasil Deformasi Untuk $V = 1$ m/s.....	49
Gambar IV.11 Perubahan Bentuk Haluan Untuk $V = 1$ m/s .....	50
Gambar IV.12 Hasil Deformasi Untuk $V = 2$ m/s.....	51
Gambar IV.13 Perubahan Bentuk Haluan Untuk $V = 2$ m/s .....	52
Gambar IV.14 Hasil Deformasi Untuk $V = 3$ m/s.....	53
Gambar IV.15 Perubahan Bentuk Haluan Untuk $V = 3$ m/s .....	54

## DAFTAR TABEL

Tabel III-1 Data Ukuran Utama Kapal Tanker 3500 LTDW dan 17500 LTDW .....	19
Tabel III-2 <i>Mechanical Properties</i> baja A36 .....	23
Tabel III-3 Parameter Konvergensi .....	25
Tabel III-4 Tabel Konvergensi Ukuran Meshing .....	29
Tabel III-5 Perbandingan Tegangan Dengan Material yang Berbeda .....	31
Tabel IV-1 Hasil Perhitungan Analisis.....	40
Tabel IV-2 Hasil Tegangan .....	40
Tabel IV-3 Hasil <i>Internal Energy</i> .....	46
Tabel IV-4 Hasil <i>Penetration-Force</i> .....	47
Tabel IV-5 Perbandingan Nilai Penetrasi .....	55

## DAFTAR SIMBOL

$p$	=	Momentum (Kg.m.s <sup>-1</sup> )
$m$	=	Massa benda (Kg)
$v$	=	Kecepatan benda (m.s <sup>-1</sup> )
$F$	=	Gaya (N)
$dv$	=	Perubahan Kecepatan (m.s <sup>-1</sup> )
$dt$	=	Perubahan waktu (s)
$dp$	=	Perubahan momentum (Kg.m.s <sup>-1</sup> )
$J$	=	Impuls (N.s)
$\sigma_{vm}$	=	Tegangan von mises (N.m <sup>-2</sup> )
$\sigma_x ; \sigma_y$	=	Tegangan normal elemen (N.m <sup>-2</sup> )
$\tau_{xy}$	=	Tegangan geser elemen (N.m <sup>-2</sup> )
$E$	=	<i>Energy absorbed</i> (Joule)
$R_T$	=	<i>Resistance Factor</i> (m <sup>3</sup> )

Halaman ini sengaja dikosongkan

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1. Latar Belakang Masalah

Berdasarkan data (Allianz Global Corporate & Specialty, 2017), jumlah kecelakaan kapal di dunia selama satu dekade sejak tahun 2007 hingga tahun 2016 sebanyak 1186 kasus. Laut China, Indonesia, dan Filipina menempati peringkat pertama wilayah yang mengalami kecelakaan kapal paling banyak, yaitu sebesar 249 kasus. Adapun tipe kapal yang paling banyak mengalami kecelakaan adalah kapal kargo sebanyak 481 kasus. Dari semua kasus kecelakaan yang terjadi karam, ledakan/kebakaran, tubrukan, dan kerusakan mesin merupakan penyebab utamanya. Kecelakaan yang terjadi akibat karam sebanyak 598 kasus dan akibat tubrukan sebanyak 72 kasus. Dengan demikian tubrukan dan karam merupakan salah satu penyebab kecelakaan yang banyak terjadi pada kapal.

Penelitian tentang tubrukan kapal sudah dilakukan oleh beberapa peneliti karena karena kerusakan yang terjadi selama tubrukan kapal dapat mengancam kehidupan manusia, lingkungan, dan investasi ekonomi. Tubrukan berdampak langsung pada kekuatan struktur kapal sehingga apabila tubrukan terjadi pada kapal pembawa zat berbahaya seperti oil tanker atau LNG/LPG maka akan menyebabkan kerusakan lingkungan yang cukup serius. Berdasarkan data statistic dari *International Oil Pollution Compensation Fund* (IOPCF, 2006) tubrukan dan karam bertanggung jawab atas 50% kerusakan lingkungan akibat kebocoran minyak. Selain itu kerusakan yang disebabkan oleh tubrukan juga bisa menyebabkan kerugian yang sangat besar. Sebagai contoh, yaitu kasus tubrukan yang terjadi di Selat Sunda pada 3 Mei 2014, di antara Pulau Sumatra dan Jawa antara Ro-Ro passenger ship Marisa Nusantara dan reefer Qi Hang yang mengakibatkan kerusakan parah pada ceruk haluan dengan robek sepanjang tujuh meter dan kerugian material lainnya. Oleh karena itu untuk mengurangi resiko polusi lingkungan dan kerugian ekonomi tersebut, dibutuhkan konstruksi kapal yang mampu menerima beban akibat tubrukan.

Adapun skenario tubrukan dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *side collision* (tubrukan sisi) dan *head-on collision* (tubrukan haluan). Kasus *head-on collision* merupakan situasi haluan kapal menabrak objek/bangunan seperti dermaga ataupun menabrak kapal lain. Walaupun *head-on collision* memiliki kemungkinan resiko kerusakan tidak separah *side*



*collision* atau karam, bagaimanapun juga tetap dibutuhkan pencegahan. Oleh karena itu penelitian ini akan menganalisis kekuatan struktur haluan kapal akibat tubrukan.

## **I.2. Perumusan Masalah**

Ditinjau dari latar belakang yang sudah dijelaskan sebelumnya, terdapat beberapa permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian ini yaitu :

- Bagaimana perilaku tegangan yang terjadi pada konstruksi haluan kapal akibat tubrukan?
- Berapa besar energi yang diserap oleh konstruksi haluan kapal akibat tubrukan?
- Bagaimana perilaku penetrasi/displasemen yang terjadi pada konstruksi haluan kapal akibat tubrukan?

## **I.3. Tujuan**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Mengetahui perilaku tegangan yang terjadi pada konstruksi haluan kapal akibat tubrukan.
- Mengetahui besar energi yang diserap oleh konstruksi haluan kapal akibat tubrukan
- Mengetahui perilaku deformasi yang terjadi pada konstruksi haluan kapal akibat tubrukan.

## **I.4. Batasan Masalah**

Batasan – batasan yang digunakan dalam pengerjaan Penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Kedua kapal tanker dalam kondisi muatan penuh.
- Dilakukan di perairan tenang.
- Penelitian dilakukan dengan menggunakan software *Finite Element Analysis* (FEA).
- Penelitian dilakukan pada model haluan *striking ship*.
- Skenario tubrukan dilakukan dengan tiga variasi kecepatan, yaitu 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s
- Bagian lambung kapal yang ditabrak (*struck ship*) dianggap sebagai *rigid body*.

### **I.5. Manfaat**

Dengan penelitian ini, diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut :

- Membantu mendapatkan solusi dalam melakukan analisis tegangan haluan kapal tanker akibat tubrukan serta memberikan pemahaman
- Memberikan pemahaman tentang respon struktur haluan kapal akibat tubrukan

### **I.6. Hipotesis**

Dengan penelitian ini akan didapatkan nilai tegangan yang terjadi pada konstruksi haluan kapal akan semakin besar apabila kapal menabrak dengan kecepatan awal yang lebih tinggi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB II STUDI LITERATUR

### II.1. Dasar Teori

Dasar teori menjelaskan tentang pengertian dan acuan dari variabel yang digunakan dalam penelitian ini. Dalam penelitian ini variabel – variabel tersebut meliputi teori momentum, impuls, konservasi momentum, dan tumbukan, impact serta pengertian kapal tanker, tegangan, dan *finite element method*.

#### II.1.1. Momentum

Saat suatu benda dengan massa  $m$  dan bergerak dengan kecepatan  $v$  maka benda tersebut akan memiliki momentum. Momentum adalah suatu besaran vektor yang memiliki arah dan arah tersebut selalu searah dengan kecepatan suatu benda yang bergerak. Notasi/symbol yang digunakan untuk merepresentasikan momentum adalah  $p$ . Persamaan yang digunakan untuk menghitung momentum suatu benda yang bergerak adalah sebagai berikut:

$$p = mv \tag{II.1}$$

di mana  $m$  adalah massa benda dan  $v$  adalah kecepatan benda. Satuan standar untuk momentum adalah kgm/s. Dari persamaan di atas dapat diketahui bahwa semakin besar massa atau kecepatan suatu benda maka semakin besar momentum yang dimiliki.

Hukum Newton II menyatakan bahwa total gaya yang Bekerja pada suatu objek sama dengan massa dikali percepatan benda tersebut. Percepatan adalah laju perubahan kecepatan sehingga percepatan adalah turunan dari kecepatan terhadap satuan waktu  $dv/dt$ . Dengan demikian didapatkan suatu persamaan hubungan antara momentum dengan gaya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} F &= m \cdot a \\ F &= m \cdot \frac{dv}{dt} \\ F &= \frac{d(mv)}{dt} \\ F &= \frac{dp}{dt} \end{aligned} \tag{II.2}$$

Dari persamaan di atas didapatkan bahwa total gaya yang bekerja pada suatu objek merupakan fungsi turunan dari momentum terhadap satuan waktu. (McGill & King, 1995)

### II.1.2. Impuls

Impuls adalah istilah yang digunakan untuk mengukur efek keseluruhan dari gaya yang bekerja dalam suatu interval waktu. Simbol yang digunakan untuk impuls adalah  $J$  dengan satuan Newton-seconds (Ns). Persamaan yang digunakan untuk mengukur impuls dengan gaya konstan adalah sebagai berikut

$$J = F \cdot dt \quad (\text{II.3})$$

Seperti bagian sebelumnya, persamaan di atas sama dengan perubahan momentum  $dp$ . Persamaan ini disebut sebagai teori impuls-momentum. Teori ini dapat diaplikasikan pada massa konstan ataupun massa yang berubah. (McGill & King, 1995)

### II.1.3. Konservasi Momentum

Salah satu sifat penting dari momentum adalah konservasi. Konservasi momentum artinya total momentum dari suatu sistem akan selalu sama. Hal ini memungkinkan peneliti untuk melakukan pengukuran pada sistem baik sebelum maupun sesudah terjadi perubahan pada sistem tersebut dan membuat kesimpulan tentang hal itu tanpa harus benar-benar mengetahui setiap detail spesifik dari peristiwa yang terjadi. (McGill & King, 1995)

Konservasi momentum merupakan konsekuensi langsung dari Hukum Gerak Newton ketiga. Terdapat gaya aksi-reaksi yang terjadi antara objek yang menabrak objek lainnya yang dapat dituliskan sebagai:

$$F_{AB} = -F_{BA} \quad (\text{II.4})$$

Panjang durasi kedua objek saat kontak adalah sama dan tergantung situasi spesifik yang terjadi.

$$t_{AB} = t_{BA} \quad (\text{II.5})$$

Dari persamaan di atas maka dapat disimpulkan besar impuls yang terjadi adalah sama dengan arah yang berlawanan.

$$F_{AB} \cdot t_{AB} = F_{BA} \cdot t_{BA} \quad (\text{II.6})$$

Karena impuls sama dengan perubahan momentum maka perubahan momentum pada suatu objek adalah sama dan dengan arah yang berlawanan. Sehingga dapat ditulis sebagai:

$$m_A \cdot \Delta v_A = m_B \cdot \Delta v_B \quad (\text{II.7})$$

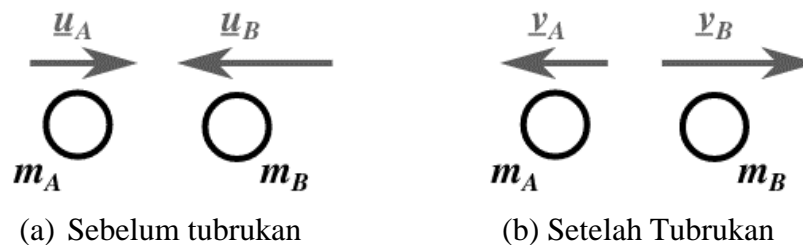
### II.1.4. Tubrukan

Tubrukan atau *Collision* merupakan kondisi saat suatu objek menabrak objek lainnya. Terdapat tiga jenis tubrukan, yaitu tubrukan elastis, tubrukan inelastis, dan tubrukan inelastis

sempurna. Pada peristiwa tubrukan dalam suatu sistem, terdapat konservasi momentum. Total momentum dari sistem tersebut akan sama saat sebelum maupun sesudah tubrukan terjadi. Apabila  $p_i$  dan  $p_f$  menunjukkan momentum awal dan akhir dari suatu objek dalam suatu sistem, maka konservasi momentum dapat ditulis sebagai berikut:

$$p_{1i} + p_{2i} + \dots = p_{1f} + p_{2f} + \dots \quad (\text{II.8})$$

Tubrukan terbagi menjadi tiga jenis, yaitu tubrukan elastis, inelastis, dan inelastis sempurna. Tubrukan Elastis adalah kondisi tubrukan dimana terdapat konservasi momentum dan energi. Hal ini disebabkan karena tidak ada energi kinetik yang hilang dalam sistem setelah tubrukan terjadi. Dalam dunia nyata kondisi tubrukan seperti ini sangat jarang ditemukan karena kebanyakan kasus tubrukan menghasilkan energi kinetik yang hilang.

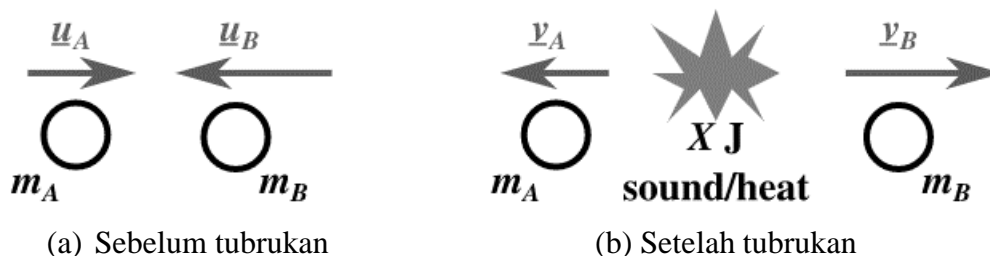


**Gambar II.1 Ilustrasi Tubrukan Elastis**

(Sumber: isaacphysics.org)

Gambar II.1 menunjukkan kondisi partikel A dan partikel B yang saling bertubrukan dengan nilai kecepatan sebelum tubrukan setelah tubrukan adalah sama. Hal tersebut menandakan adanya konservasi energi dan momentum. Sehingga kondisi tersebut merupakan kasus tubrukan elastis.

Tubrukan inelastis adalah suatu kasus tubrukan dimana terdapat konservasi momentum, tetapi memiliki energi kinetik yang berbeda saat sebelum dan sesudah terjadi tubrukan. Dalam situasi ini, sebagian energi kinetis yang ada berubah menjadi bentuk panas atau suara, hal itu disebabkan oleh getaran atom pada saat tubrukan.

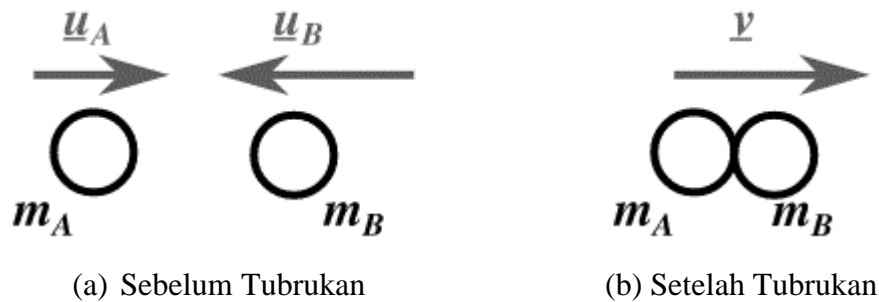


**Gambar II.2 Ilustrasi Tubrukan Elastis**

(Sumber: isaacphysics.org)

Gambar II.2 menunjukkan contoh tubrukan inelastis antara dua partikel, dengan massa  $m$  dan perubahan energi kinetik  $\Delta E_k = X$  Joule yang berupa panas atau suara yang dihasilkan akibat tubrukan.

Tubrukan inelastis sempurna adalah peristiwa di mana maksimum energi kinetik hilang selama tubrukan terjadi. Kasus tubrukan seperti ini bisaanya terjadi apabila seluruh objek yang berada dalam tubrukan menjadi satu. (Nave, 2010)



**Gambar II.3 Ilustrasi Tubrukan inelastis Sempurna**

(Sumber: isaacphysics.org)

Gambar II.3 menunjukkan kondisi tubrukan inelastis sempurna. Sebelum tubrukan, partikel A dengan massa  $m_A$  bergerak menuju partikel B dengan kecepatan  $u_A$ , sedangkan partikel B dengan massa  $m_B$  bergerak menuju partikel A dengan kecepatan  $u_B$ . Setelah terjadi tubrukan, massa kedua partikel menjadi satu dan bergerak dengan kecepatan dan arah yang sama.

### II.1.5. *Impact* dan Energi

*Impact* adalah gaya besar yang diaplikasikan pada periode waktu yang sangat singkat ketika dua objek atau lebih bertubrukan. Dilihat dari perspektif konservasi energi, dalam kasus tubrukan tersebut tidak ada konservasi energi kinetik melainkan konservasi total energi. Energi kinetik hilang saat tubrukan dikonversi menjadi bentuk lain seperti panas, suara, dan lain-lain. Selain itu terdapat energi yang diserap oleh objek yang disebut energi serap atau *absorbed energy*. (Goldsmith, 1960)

### II.1.6. Kapal Tanker

Kapal Tanker merupakan kapal yang dibangun atau diadaptasi dengan fungsi utama untuk membawa minyak dalam jumlah besar di dalam ruang muatnya; seluruh kapal “*NLS Tanker*” seperti yang didefinisikan pada MARPOL Annex II; dan seluruh *gas carrier* yang didefinisikan dalam SOLAS 74 Chapter II-1 Reg. 3.20.

Dalam MARPOL Annex II Chapter I Reg. 1, kapal tanker dibagi menjadi dua, yaitu:

- *Chemical Tanker*, yaitu kapal yang dibangun untuk membawa semua produk cairan dalam bentuk curah yang disebutkan dalam International Bulk Chemical Code Chapter 17. Gambar II.4 merupakan contoh kapal *chemical tanker*.



**Gambar II.4 Kapal Tanker**

(Sumber: kisspng.com)

- *NLS Tanker*, yaitu kapal yang dibangun untuk membawa muatan berupa substansi cairan noxious (*Noxious Liquid Substances*)

Adapun definisi *gas carrier* dalam SOLAS 74 Chapter II-1 Reg. 3.20 adalah kapal kargo yang dibangun dan digunakan untuk membawa seluruh gas cair dan produk lain yang tercantum dalam:

- *The International Gas Carrier Code* Chapter 19
- *The Gas Carrier Code* Chapter XIX

### II.1.7. Tegangan

Gaya internal yang bekerja pada sebuah potongan dengan luasan yang sangat kecil akan bervariasi baik besarnya maupun arahnya. Pada umumnya gaya-gaya tersebut berubah-ubah dari suatu titik ke titik yang lain, umumnya berarah miring pada bidang perpotongan. Dalam praktek keteknikan intensitas gaya diuraikan menjadi tegak lurus dan sejajar dengan irisan. Dalam praktek, kata tegangan sering memberi dua pengertian:

1. Gaya per satuan luas atau intensitas tegangan, yang umumnya ditunjukkan sebagai tegangan satuan.
2. Gaya dalam total suatu batang tunggal yang umumnya dikatakan sebagai tegangan total.

Secara sederhana tegangan dapat didefinisikan sebagai besaran gaya yang bekerja pada satu satuan luas permukaan benda yang dikenakan oleh gaya. (Timoshenko, 1980)



Secara matematis definisi tegangan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{II.9})$$

Tegangan dianggap positif jika menimbulkan suatu tarikan (*tensile*) dan dianggap negatif jika menimbulkan penekanan (*compression*). Tegangan dapat diketahui dengan melakukan pengujian, dan besarnya kekuatan sangat tergantung pada jenis material yang diuji. Bahan yang sering dan umum digunakan adalah baja.

Tegangan dibagi dua macam berdasarkan tegangan yang terjadi pada suatu material yaitu :

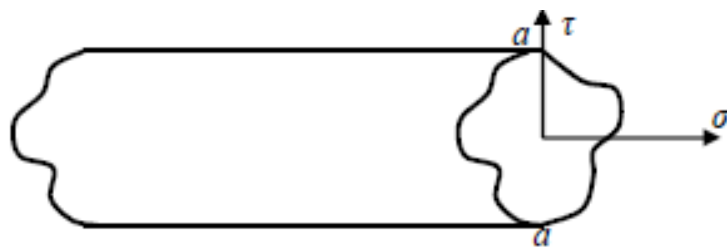
1. Tegangan Normal

Tegangan normal adalah intensitas gaya yang bekerja normal (tegak lurus) terhadap irisan yang mengalami tegangan. Bila gaya-gaya luar yang bekerja pada suatu batang yang sejajar terhadap sumbu utamanya dan potongan batang penampang tersebut konstan, tegangan internal yang dihasilkan adalah sejajar pada sumbu-sumbu tersebut.

2. Tegangan Geser

Tegangan geser adalah tegangan yang bekerja sejajar dengan bidang pembebanan. Tegangan geser terjadi jika suatu benda bekerja dengan dua gaya yang berlawanan arah, lurus sumbu batang, tidak segaris gaya namun pada penampangnya tidak terjadi momen. Tegangan ini banyak terjadi pada konstruksi.

Penerapan tegangan normal dapat dilihat pada Gambar II.5 dimana arah tegak lurus dengan irisan bekerja tegangan normal ( $\sigma$ ) dan arah sejajar dengan bidang pembebanan bekerja tegangan geser ( $\tau$ ).



**Gambar II.5 Komponen Tegangan Normal dan Tegangan Geser**

Ketika suatu kapal mendapatkan beban, hal tersebut mempengaruhi tegangan yang terjadi pada kapal. Apabila tegangan yang terjadi melebihi batas tegangan yang diizinkan maka akan membahayakan dan akan merusak struktur kapal tersebut. Berdasarkan (Biro Klasifikasi Indonesia, 2014) tegangan izin akibat beban yang diberikan adalah sbb :

- a. Untuk penilaian tegangan dengan teori balok atau *grillage analysis* adalah :

*Normal stress* :  $\sigma_N \leq R_{eH}$

*Sheer stress* :  $\tau \leq 0.6 R_{eH}$

b. Untuk penilaian tegangan dengan *finite element analysis* adalah :

*Equivalent stress* :  $\sigma_V \leq R_{eH}$

$R_{eH}$  : *nominal upper yield stress*

### II.1.8. Tegangan Von Mises

Tegangan *von mises* merupakan kombinasi dari semua tegangan, yaitu tegangan normal pada tiga arah dan juga tegangan geser yang bereaksi pada tempat tertentu. Jika tegangan *von mises* yang dihasilkan melebihi *yield strength*, maka material akan memberikan kekuatan sebesar *yield strength*, dan jika tegangan *von mises* yang dihasilkan melebihi *ultimate strength* maka material akan pecah. Tegangan *von mises* menurut (IACS, 2014) dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{(\sigma_x)^2 - (\sigma_x \sigma_y)^2 + (\sigma_y)^2 + 3(\tau_{xy})^2} \quad (II.10)$$

dengan

$\sigma_{vm}$  = tegangan von mises (N/m<sup>2</sup>)

$\sigma_x$  dan  $\sigma_y$  = tegangan normal elemen (N/m<sup>2</sup>)

$\tau_{xy}$  = tegangan geser elemen (N/m<sup>2</sup>)

### II.1.9. Finite Element Method (Metode Elemen Hingga)

*Finite element method* adalah suatu metode numerik yang digunakan dalam memecahkan permasalahan teknik (matematika dan fisika) khususnya dalam memecahkan analisa struktur. Persoalan perancangan dapat diselesaikan dengan cara matematis dan numerik. Untuk benda-benda yang mempunyai bentuk yang tidak teratur, penyelesaiannya akan sulit menggunakan cara matematis. Sehingga perlu digunakan cara numerik, yang dalam perkembangannya disebut sebagai Metode Elemen Hingga (*Finite Elements Method*) (Hasanudin, Aryawan, Zubaydi, & Putranto, 2017).

Dinamakan elemen hingga karena ukuran elemen kecil ini berhingga dan umumnya mempunyai bentuk geometri yang lebih sederhana dibandingkan kontinunya (Weaver & Johnston, 1993). Pemilihan tipe elemen diutamakan bergantung pada tujuan dari analisis. Karakteristik dari elemen yang dipilih harus dapat merepresentasikan secara akurat terkait kekakuan dari sebuah struktur dan tegangan yang akan dianalisis. Ketika melakukan analisis tegangan, pengetahuan terkait karakteristik elemen harus memadai mengingat karakteristik

elemen adalah sebuah prasyarat dari suatu pengerjaan analisis struktur (Biro Klasifikasi Indonesia, 2014).

Metode elemen hingga adalah sebuah metode yang menggunakan pendekatan numerik untuk menganalisis sebuah struktur untuk mendapatkan solusi pendekatan dari suatu masalah. Pada dasarnya, langkah awal pada setiap simulasi menggunakan elemen hingga adalah membagi (*to discretize*) geometri dari struktur sesungguhnya menggunakan sekumpulan elemen-elemen yang berhingga. Sekumpulan titik nodal dan suatu elemen hingga disebut dengan *mesh*. Banyaknya elemen per satuan panjang, area, atau pada suatu *mesh* disebut dengan *mesh density*. Pada suatu analisis statik mekanika benda padat (*solid*), perpindahan (*displacements*) dari titik nodal adalah variabel dasar yang akan dikalkulasi oleh analisis (dengan bantuan perangkat lunak). Tegangan, regangan, gaya dalam, serta gaya luar dapat ditentukan setelah perpindahan pada setiap titik nodal diketahui. (Popov, 1978)

Suatu analisis menggunakan elemen hingga merupakan analisis pendekatan sehingga hasil yang didapatkan bukanlah suatu hasil analitis/tepat. Terdapat ketidaksesuaian (*error*) dari hasil yang didapat dengan hasil yang seharusnya. Namun terdapat suatu batasan yang dapat ditoleransi sehingga hasil dari analisis menggunakan elemen hingga dapat dinyatakan valid. Persamaan metode elemen hingga secara umum adalah sebagai berikut:

$$\{f\} = [k] \cdot \{d\} \quad (\text{II.11})$$

dengan,  $\{f\}$  adalah matrik gaya,  $[k]$  adalah matrik kekakuan,  $\{d\}$  adalah matrik deformasi.

Analisis kekuatan dengan metode elemen hingga digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan *von mises*. Suatu konstruksi dinyatakan memenuhi apabila besarnya nilai *von mises stress* ( $\sigma_{vm}$ ) kurang dari *yield stress material* ( $\sigma_y$ ). (Hoque, 2013).

#### II.1.10. Meshing

*Meshing* merupakan proses pembuatan elemen berbentuk poligonal atau polihedral yang mendekati domain geometris model. Atau dapat disebut membagi model menjadi beberapa elemen dengan ukuran yang lebih kecil. *Meshing* merupakan tahap penting pada analisis menggunakan metode elemen hingga untuk perhitungan numerik menurut (Hoque, 2013) pada tesisnya. Tipe meshing dibagi menjadi beberapa bagian berdasarkan pertemuan antar elemen yaitu

##### 1. Structure Mesh

Jenis *meshing* ini adalah jenis *meshing* yang dapat dilihat pada interior *node* yang memiliki jumlah elemen sama pada setiap titik pertemuannya. Jenis *meshing* ini bisaanya berbentuk *quad* atau *hexagonal*. *Meshing* ini memiliki ciri-ciri bentuk yang teratur.

#### 2. *Unstructure Mesh*

Jenis *meshing* ini digunakan untuk model yang bentuknya tidak teratur. Jenis dari *meshing* ini bisaanya berbentuk *tetrahedral* atau *triangle*.

Pemilihan ukuran *meshing* juga ditentukan berdasarkan lokasinya. Menurut (IACS, 2014) mengatakan bahwa beberapa bagian dari kapal harus menggunakan *fine mesh zone* yaitu pada daerah yang memiliki tegangan tinggi. Pemilihan dari ukuran *mesh* pada daerah tersebut tidak boleh kurang dari 50 mm. Hal ini dilakukan agar hasil solusi yang dihasilkan dengan menggunakan perhitungan elemen hingga dapat dikatakan mendekati dari penyelesaian yang sebenarnya. Seperti contoh *meshing* di daerah *manhole* dan *scallop*.

### II.1.11. Deformasi

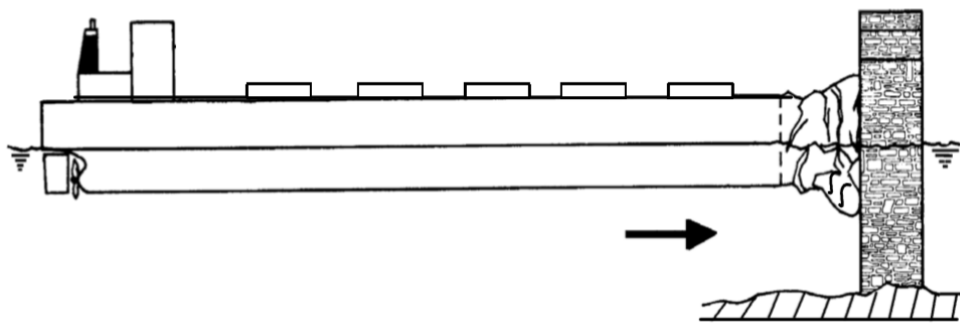
Deformasi terjadi sebagai respon dari material yang mendapatkan beban. Selama proses deformasi berlangsung, material menyerap energi akibat adanya gaya yang bekerja. Besar gaya yang bekerja memberi efek pada perubahan bentuk dan dimensi suatu material. Perubahan bentuk secara fisik pada benda dibagi menjadi dua, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis terjadi saat beban yang diberikan pada material diadukan, material kembali seperti ukuran dan bentuk semula. Deformasi elastis ditandai dengan nilai tegangan yang dihasilkan tidak melebihi *yield strength*. Deformasi plastis adalah deformasi yang bersifat permanen, yaitu ketika beban yang diberikan kepada suatu material diadukan maka material tidak kembali ke ukuran dan bentuk semula. Deformasi plastis ditandai dengan nilai tegangan yang dihasilkan melebihi *yield strength*. (Hibeller, 1997).

Pada awal pembebanan material akan mengalami deformasi elastis sampai besar tegangan mencapai *yield strength*. Apabila tegangan tidak mencapai *yield strength* maka material akan kembali ke bentuk semula. Selanjutnya setelah melebihi *yield strength*, material akan mengalami deformasi plastis. Penambahan beban pada material yang telah mengalami deformasi plastis akan terjadi penguatan regangan pada material yang disebut *strain hardening*. Setelah material mengalami *strain hardening* dan mencapai *ultimate strength*, penambahan beban akan menyebabkan material pecah. (Singer & Pytel, 1995)

## II.2. Tinjauan Pustaka

### II.2.1. Tubrukan Kapal

Menurut (Kim, 2000) *Collision* atau tubrukan kapal adalah kecelakaan yang melibatkan kerusakan antar kapal atau satu kapal saja. Kasus tubrukan dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *side collision* (tubrukan sisi) dan *head-on collision* (tubrukan haluan). Kasus *head-on collision* merupakan situasi haluan kapal menabrak objek/bangunan seperti dermaga ataupun menabrak kapal lain. Gambar II.6 merupakan contoh kasus *head-on collision* antara kapal dengan *rigid wall*.

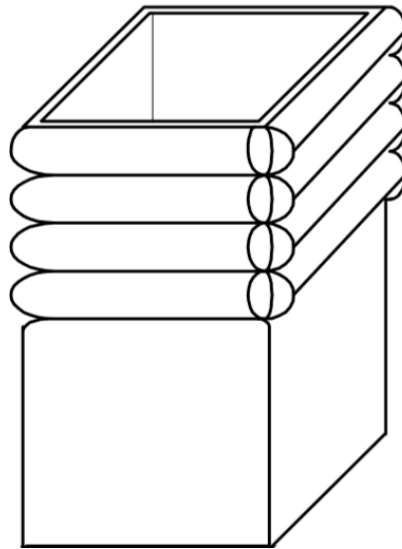


**Gambar II.6 Ilustrasi Kerusakan Haluan Kapal Pada *Head-on Collision***

(Sumber: Kim, 2000)

Saat tubrukan antar kapal terjadi, kapal-kapal yang terlibat diklasifikasikan sebagai *struck ship* dan *striking ship*. *Struck ship* adalah kapal yang ditabrak, sedangkan *striking ship* adalah kapal yang menabrak. Dalam kasus *head-on collision* seperti pada Gambar II.6, bagian dari *striking ship* yang mengalami kerusakan adalah struktur haluan. Salah satu kerusakan yang dialami dapat berupa penetrasi pelat. (K. Wisniewski, 2002)

Saat kapal menabrak kapal lain atau suatu struktur seperti dermaga atau *rigid wall*, haluan kapal akan mengalami kerusakan seperti suatu struktur menyerupai balok yang diberi beban axial. Struktur tersebut akan mengalami deformasi berpola lipatan seperti yang diperlihatkan pada Gambar II.7. (Zhang, Ocakli, & Pedersen, 2004)



**Gambar II.7 Pola Kerusakan Struktur Kotak Di Bawah Beban Axial**

(Sumber: Ocakli, 2004)

(Zhang S. , 1999) melakukan penelitian dengan membagi masalah tubrukan dalam dua bagian, yaitu *External Dynamics* dan *Internal Mechanics*. *External Dynamics* membahas tentang gerakan pada kapal dan energi yang tersebar, sedangkan *Internal Mechanics* membahas tentang respon kegagalan struktur kapal. Penelitian tersebut dilakukan untuk mendapatkan formula yang disederhanakan dari metode analitis yang pernah ada sebelumnya. Metode yang sudah ada untuk menganalisis kerusakan struktur kapal akibat tubrukan dapat dibagi menjadi empat kategori:

- Metode Empiris
- *Finite Element Method*
- Eksperimen
- Metode penyederhanaan

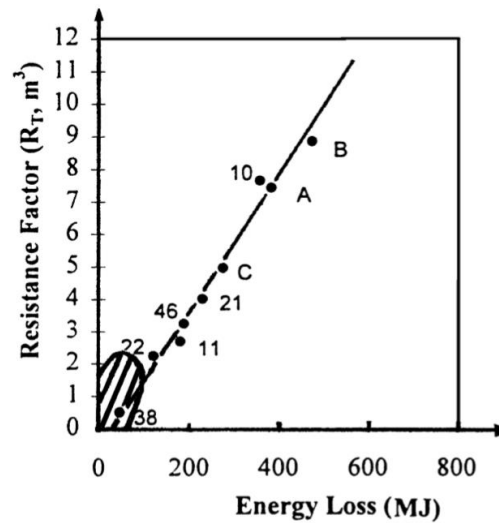
### **II.2.2. Analisis Tubrukan Kapal Dengan Metode Empiris**

Metode empiris sudah diperkenalkan dan dikembangkan oleh beberapa peneliti, salah satunya adalah Minorsky. (Minorsky, 1959) menganalisis 26 kasus tubrukan kapal dan mengembangkan formula empiris untuk menghitung energi serapan dan kaitannya dengan volume material yang hancur yang dituliskan sebagai berikut:

$$E = 47.2 R_T + 32.7 \quad (\text{MJ}) \quad (\text{II.13})$$

dengan  $R_T$  adalah *resistance factor*, yaitu volume material yang hancur dari kedua kapal yang menabrak dan ditabrak dan  $E$  adalah *absorbed energy*, yaitu energi total yang diserap

akibat tubrukan kapal. Gambar II.8 menunjukkan kurva hubungan energi dan volume dari formula di atas.



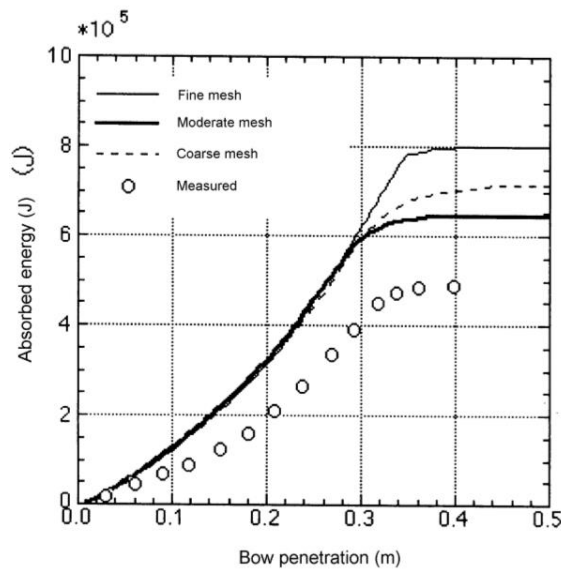
**Gambar II.8 Kurva E- $R_T$  Berdasarkan Formula Minorsky**

(Sumber: Minorsky, 1959)

Kurva di atas menunjukkan hasil untuk 18 kasus tubrukan *low-energy* dari 26 kasus tubrukan sangat tersebar, sedangkan hasil untuk 8 kasus tubrukan *high-energy* sisanya sangat bagus. Oleh karena itu formula Minorsky dapat dianggap valid untuk kasus *high-energy collisions*. Karena kemudahan formula Minorsky, beberapa peneliti lain mengembangkannya lagi untuk *low-energy collision*. (Woisin, 1979) mengembangkan formula empiris untuk *low-energy collision* berdasarkan eksperimen, sedangkan formula oleh (Jones & Wierzbicki, 1983) dikembangkan berdasarkan teori plastis subjek balok ke *point load*.

### **II.2.3. Analisis Tubrukan Kapal Dengan *Finite Element Method* (FEM)**

*Finite Element Method* (FEM) adalah salah satu metode yang akurat untuk menganalisis respon struktur kapal akibat tubrukan. Banyak peneliti yang menggunakan pendekatan FEM untuk menganalisis permasalahan tubrukan dan karam. Metode ini dianggap dapat memberikan hasil yang akurat dan menggantikan model eksperimen dalam beberapa kasus. (Kitamura, 1996). Gambar II.9 menunjukkan suatu contoh perbedaan yang signifikan antara hasil simulasi FEM dan eksperimen. Karena besarnya jumlah elemen dan keharusan untuk menyelesaikan permasalahan dinamis dengan beberapa langkah menyebabkan simulasi *collision* dan *grounding* menggunakan FEM memerlukan waktu yang sangat lama.



**Gambar II.9 Perbandingan Hasil FEM dan Eksperimen Untuk *Impacted Corrugated Panel* oleh Silinder**

(Sumber: Kitamura, 1996)

(Haris & Amdahl, 2013) melakukan penelitian dengan metode FEM untuk mendapatkan respon struktur kapal akibat tubrukan dengan membagi tiga tipe tubrukan, yaitu tubrukan antara sisi kapal dengan haluan kapal yang rigid, haluan kapal dengan sisi kapal yang rigid, dan tubrukan dengan kedua objek dapat deformasi. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil berupa energi dan gaya tubrukan serta kedalaman penetrasi.

Penelitian dengan metode FEM juga dilakukan oleh (Hasanudin, Aryawan, Zubaydi, & Putranto, 2017). Penelitian dilakukan untuk mengkaji penentuan lebar *double skin* untuk kapal *bulk carrier* ditinjau dari *damage collision* dalam rangka untuk tidak mempertimbangkan ruang muat sebagai *damage zone* untuk perhitungan *damage stability*. Hasil yang didapatkan dari simulasi tersebut adalah memahami pengaruh variasi kecepatan terhadap energy dalam yang dihasilkan antara kapal yang bertubrukan. Untuk menentukan lebar penetrasi akhir yang terbentuk, digunakan teori hukum kekekalan energi bahwa energi kinetik kapal yang menabrak sama dengan energi dalam kapal yang ditabrak.



Halaman ini sengaja dikosongkan

# BAB III METODOLOGI

## III.1. Studi Literatur

Studi literatur pada penelitian ini dilakukan untuk mengumpulkan berbagai referensi yang dibutuhkan dalam proses analisis kekuatan lambung kapal. Studi literatur terbagi kedalam dua bagian, yaitu dasar teori dan tinjauan pustaka. Dasar teori berisikan pengertian dan acuan dari variabel yang digunakan dalam penelitian ini, sedangkan tinjauan pustaka digunakan untuk memperoleh pengalaman dari penelitian yang sudah pernah dilakukan sebelumnya. Hal ini dapat berupa metode serta langkah penyelesaian masalah dan informasi yang dibutuhkan.

## III.2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini berupa data kapal yang akan dianalisis berkaitan dengan rumusan masalah dan tujuan. Data yang diperlukan meliputi ukuran utama, *construction profile*, *frame section*, *midship section*, dan *mechanical properties*. Data-data tersebut digunakan untuk pemodelan haluan dari *striking ship* dan lambung kapal dari *struck ship*.

### III.2.1. Ukuran Utama

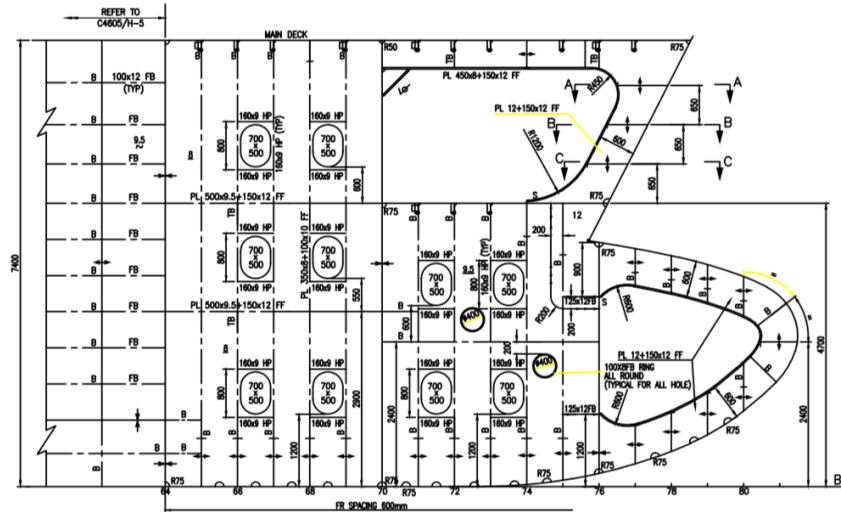
Kapal yang akan dianalisis dalam penelitian ini adalah kapal tanker 3500 LTDW. Kapal ini diasumsikan sebagai kapal yang menabrak (*Striking Ship*). Selain itu dibutuhkan data kapal lain yang diasumsikan sebagai kapal yang ditabrak (*Struck Ship*) dengan ukuran 17500 LTDW. Data ukuran utama dari kedua kapal tersebut tertera pada Tabel III-1.

**Tabel III-1 Data Ukuran Utama Kapal Tanker 3500 LTDW dan 17500 LTDW**

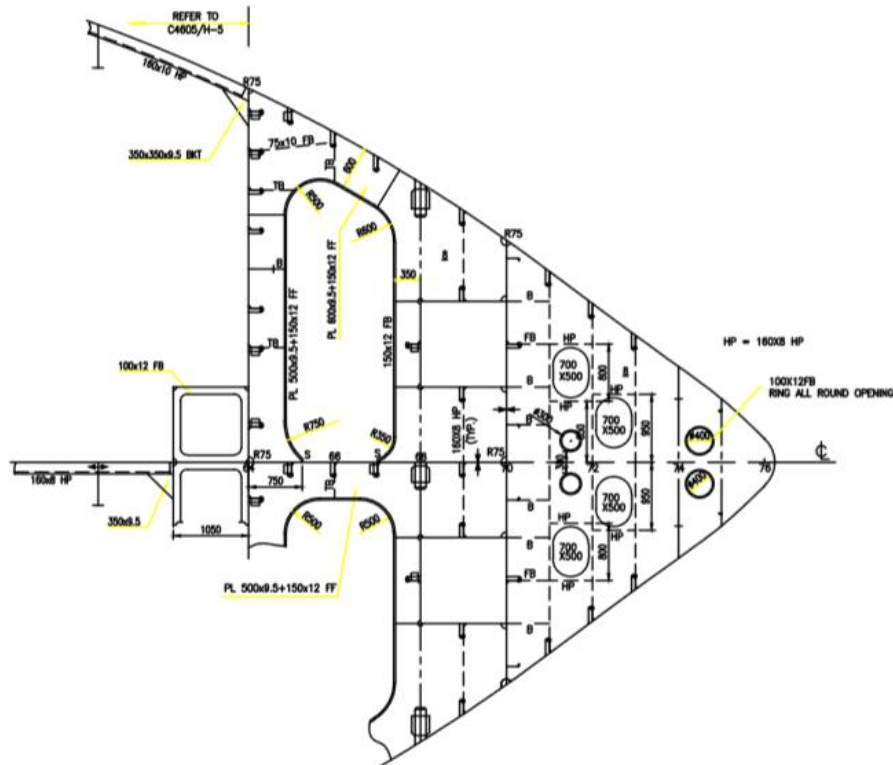
Ukuran Utama Kapal	3500 LTDW	17500 LTDW
<i>Length Overall (LOA)</i>	90 m	157.5 m
<i>Length Between Perpendicular (LBP)</i>	84 m	149.5 m
Lebar <i>Moulded (B)</i>	15.2 m	27.7 m
Tinggi <i>Moulded (D)</i>	7.2 m	12 m
<i>Draft (T)</i>	5 m	7.5 m
Kecepatan Dinas ( <i>Vs</i> )	11 knots	13 knots

### III.2.2. Construction Profile

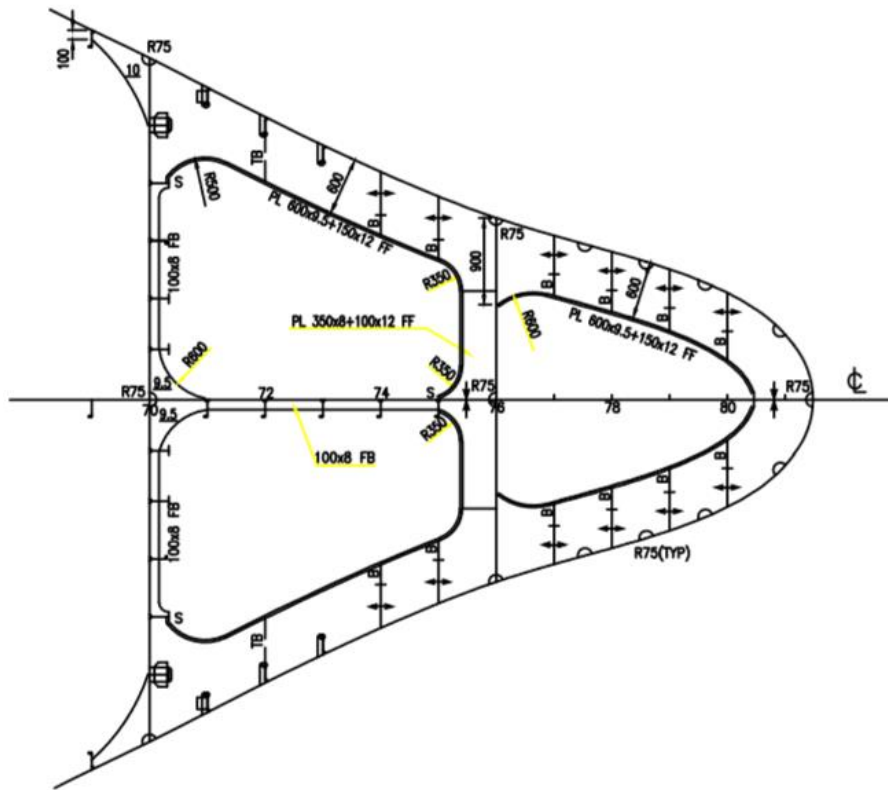
Gambar konstruksi kapal merupakan gambar keseluruhan konstruksi pada suatu kapal. Pada gambar tersebut terdapat informasi mengenai ukuran profil, tebal pelat, dan dimensi konstruksi lainnya yang digunakan pada kapal. Gambar konstruksi kapal Tanker 3500 LTDW (*striking ship*) yang dibutuhkan terdiri dari *centerline profile*, *Horizontal Web* 4700 mm dan 2400 mm di atas *baseline*, serta *frame section*.



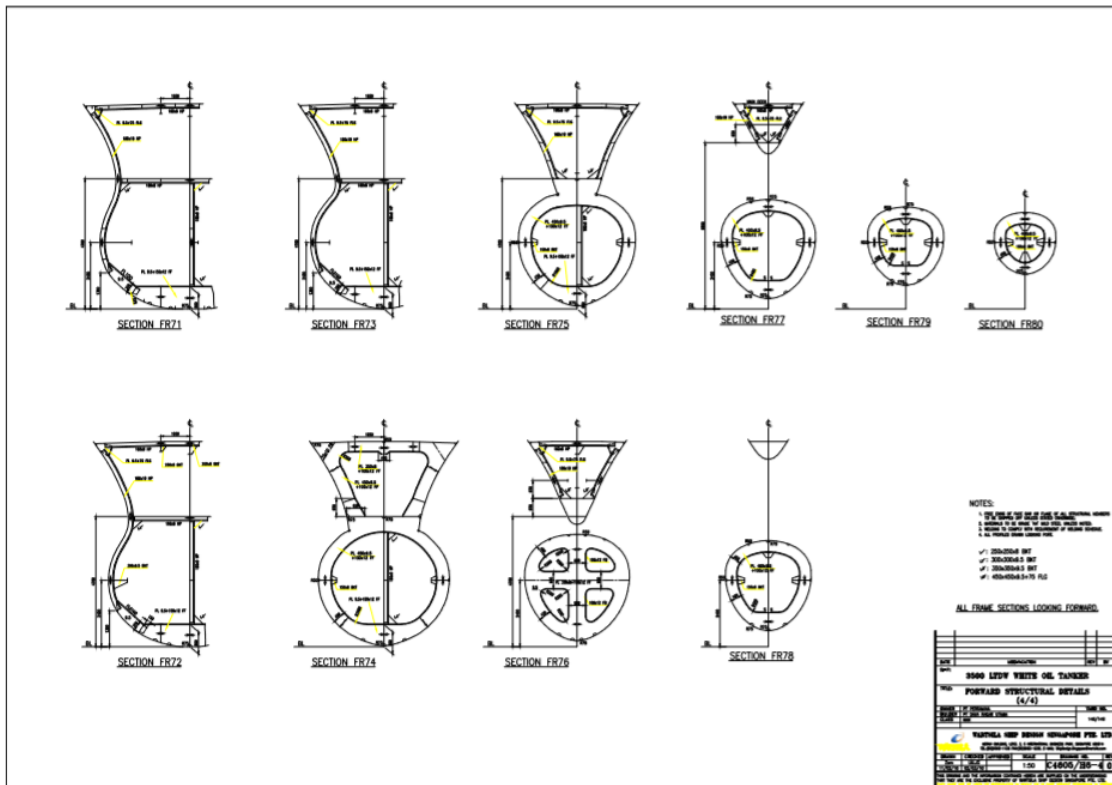
Gambar III.1 Centerline Profile Tanker 3500 LTDW



Gambar III.2 Horizontal Web @4700 mm A.B.L Tanker 5300 LTDW



Gambar III.3 Horizontal Web @2400 mm A.B.L Tanker 3500 LTDW

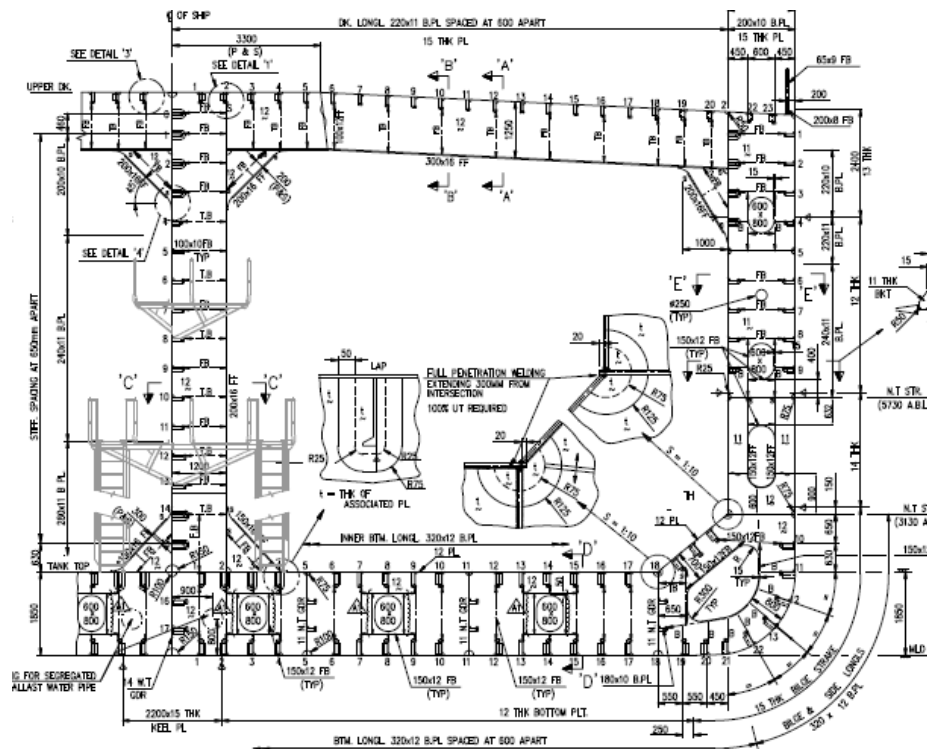


Gambar III.4 Frame Section Haluan Kapal Tanker 5300 LTDW

Gambar III.1 merupakan gambar *centerline profile* dari *striking ship*. Gambar III.2 adalah gambar *horizontal web* dari *striking ship* yang berada pada 4700 mm di atas *baseline*. Gambar III.3 adalah gambar *horizontal web* dari *striking ship* yang berada pada 2400 mm di atas *baseline*. Gambar III.4 menunjukkan beberapa *frame section* haluan *striking ship* mulai dari *section 70* hingga *section 80*.

### III.2.3. Midship Section

Adapun data konstruksi kapal tanker 17500 DWT sebagai *struck ship* yang dibutuhkan adalah *Midship Section*. *Midship Section* menggambarkan penampang melintang sebuah kapal. Gambar III.5 menunjukkan gambar *midship section* pada bagian *parallel middle body* kapal Tanker 17500 LTDW.



Gambar III.5 Midship Section Kapal Tanker 17500 LTDW

### III.2.4. Mechanical Properties

Material yang digunakan pada *striking ship* dan *struck ship* adalah baja A36. Berdasarkan (ASTM A370, 2004) karakteristik baja A36 sesuai dengan yang tertera pada Tabel III-2. Dari *mechanical properties* material tersebut, perlu diperhatikan nilai *ultimate tensile strength* berada antara nilai 400 hingga 550 MPa. Pada penelitian ini, nilai *ultimate tensile strength* yang digunakan adalah 550 MPa.

**Tabel III-2 Mechanical Properties baja A36**

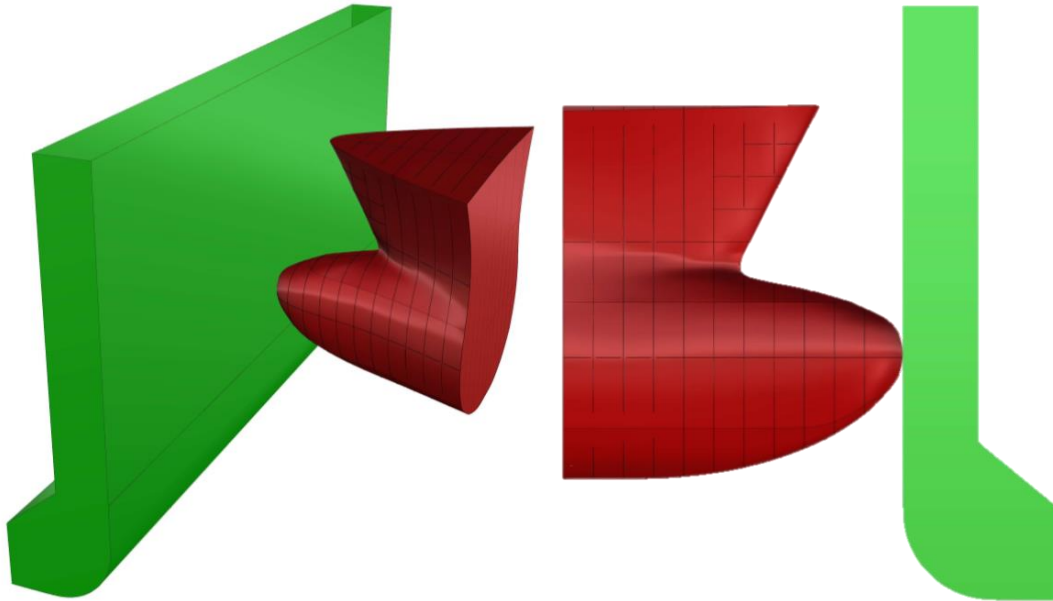
<i>Mechanical Properties</i>	
Deskripsi	Ukuran
Massa jenis	7850 kg/m <sup>3</sup>
Modulus Young	200 GPa
Poisson's ratio	0.26
Shear modulus	79.3 GPa
Bulk Modulus	140 GPa
Compressive Yield Strength	152 MPa
Tensile Strength, Yield	250 MPa (Reh)
Tensile Strength, Ultimate	400 - 550 MPa

### **III.3. Pemodelan Elemen Hingga**

#### **III.3.1. Proses Pengerjaan Geometry**

Terdapat dua geometri tiga dimensi yang dibuat dalam penelitian ini, yaitu haluan kapal 3500 LTDW sebagai *striking ship* dan *wing tank* lambung kapal 17500 LTDW sebagai *struck ship*. Kedua geometri dibuat dengan menggunakan *software 3D modelling*. Geometri haluan kapal dibuat berdasarkan data gambar konstruksi yang didapat sebelumnya. Panjang model haluan adalah 9.75 m yang merupakan jarak dari sekat tubrukan hingga ujung *bulbous bow*. Konstruksi yang digambar pada model 3D mulai dari *frame 70* hingga *frame 80*. *Frame 70* merupakan sekat tubrukan. Pada *frame 71* hingga *frame 73*, konstruksi lambung menggunakan gading kecil. Kemudian pada *frame 74* hingga *frame 80* konstruksi pada haluan sudah menunjukkan perbedaan antara konstruksi lambung dan *bulbousbow*. Konstruksi pada *bulbousbow* berbentuk gading besar dengan profil T yang melingkar pada *bulbousbow*. Tebal pelat yang digunakan pada haluan kapal adalah 14 mm.

Geometri *wing tank* dibuat berdasarkan data *midship section*. Karena dalam penelitian ini *struck ship* dianggap sebagai *rigid body* maka geometri *wing tank* hanya berupa pelat tanpa konstruksi. Panjang model *wing tank* adalah 21.75 m dengan tebal pelat sebesar 12 mm. Kedua model geometri tersebut diletakkan pada posisi sarat masing-masing tanpa ada jarak antara haluan dengan *wing tank*. Arah haluan kapal yang menabrak tegak lurus *wing tank* kapal yang ditabrak seperti pada Gambar III.6. Format yang digunakan untuk model geometri 3D tersebut bisa ACIS dengan ekstensi (.sat) atau IGES dengan ekstensi (.igs). Namun, pada penelitian ini, format yang digunakan adalah ACIS.

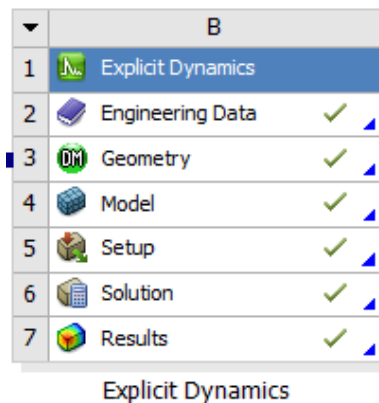


**Gambar III.6 Geometri 3D Haluan *Striking Ship* dan *Wing Tank Struck Ship***

Gambar III.6 merupakan hasil pemodelan 3D dari *striking ship* dan *struck ship*. Dapat dilihat pada gambar tersebut posisi *striking ship* tegak lurus terhadap *struck ship*. Selain itu tidak ada jarak antara kedua model kapal tersebut.

### III.3.2. *Dynamic Finite Element Software*

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis menggunakan *software* berbasis *dynamic finite element*. Setelah geometri 3D dibuat maka selanjutnya dimasukkan ke dalam pemodelan *software* FEM pada modul geometri. Seluruh komponen *geometry* dipastikan bisa terdefinisi sebagai *solid geometry*. Setelah itu geometri diberikan *material properties* sesuai dengan data yang sudah didapatkan sebelumnya. Untuk mengatur *material properties* pada *software*, dilakukan perubahan variabel pada modul *engineering data*.



**Gambar III.7 Beberapa Modul pada *Dynamic Finite Element Software***

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modu...		
8	Young's Modulus	2E+11	Pa	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.26		<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1.3889E+11	Pa	<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	7.9365E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		<input type="checkbox"/>
16	Strain-Life Parameters			<input type="checkbox"/>
24	Tensile Yield Strength	250	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
25	Compressive Yield Strength	152	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
26	Tensile Ultimate Strength	550	MPa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
28	Isotropic Thermal Conductivity	60.5	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
29	Specific Heat, C <sub>p</sub>	434	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
30	Isotropic Relative Permeability	10000		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
31	Isotropic Resistivity	1.7E-07	ohm m	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

**Gambar III.8 Input Material Properties Pada Software FEM**

Gambar III.7 menunjukkan beberapa modul yang ada pada *software dynamic finite element*. Gambar III.8 menunjukkan pendefinisian *material properties* yang digunakan dalam *software FEM* pada modul *engineering data*.

### III.4. Konvergensi Model

Konvergensi merupakan cara untuk menentukan ukuran elemen yang tepat untuk digunakan dalam simulasi FEM. Parameter konvergensi dapat dilihat pada Tabel III-3.

**Tabel III-3 Parameter Konvergensi**

Parameter	Tinjauan
Kecepatan	1 m/s
Beban	<i>Maximum Bow Collision Load</i>
<i>Fixed Support</i>	Sekat tubrukan
Titik tinjauan beban	<i>Center Girder Bulbous bow</i>

Pada Tabel III-3, parameter dan tinjauan konvergensi digunakan sebagai input untuk mendapatkan nilai . Pada penelitian ini, nilai yang ditinjau adalah *Stress Equivalent Von-Misses*. Beban yang digunakan adalah *maximum bow collision load* yang didapatkan dengan menggunakan persamaan empiris yang dirumuskan oleh (Pedersen, Valsgaard, Olsen, & Spangenberg, 1993) sebagai berikut



$$P_{bow} = \begin{cases} P_0 \cdot \bar{L} [\bar{E}_{imp} + (5 - \bar{L})\bar{L}^{1.6}]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} \geq \bar{L}^{2.6} \\ 2.24 \cdot P_0 [\bar{E}_{imp} \bar{L}]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6} \end{cases} \quad (III.1)$$

Dengan

$$\bar{L} = L_{pp}/275 \text{ m}$$

$$\bar{E}_{imp} = E_{imp}/1425 \text{ MNm}$$

$$E_{imp} = \frac{1}{2} m_x V_0^2$$

Dan

$P_{bow}$  adalah *maximum bow collision load* (MN)

$P_0$  adalah *reference collision load*, yaitu 210 (MN)

$E_{imp}$  adalah energi yang diserap oleh haluan (MJ)

$L_{pp}$  adalah panjang kapal (m)

$m_x$  adalah massa kapal dan *added mass* (5%)

$V$  adalah kecepatan awal kapal (m/s)

Dari data ukuran utama kapal yang sudah diketahui, nilai  $\bar{L}$  dapat diketahui dengan memasukkan nilai  $L_{pp}$  ke dalam persamaan, yaitu

$$\bar{L} = \frac{84}{275}$$

$$\bar{L} = 0,305455 \text{ m}$$

Kemudian dengan data ukuran utama kapal yang sudah disebutkan sebelumnya maka massa kapal 3500 LTDW dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$\Delta = L_{wl} \times B \times T \times C_b \times \rho$$

Dengan

$$L_{wl} = 104\% \times L_{pp} \text{ (m)}$$

$$\rho = 1.025 \text{ (ton/m}^3\text{)}$$

Karena  $C_B$  kapal 3500 LTDW adalah 0.781 maka dari persamaan di atas didapatkan massa kapal adalah sebagai berikut

$$\Delta = (104\% \times 84) \times 15.2 \times 5 \times 0.781 \times 1.025$$

$$\Delta = 5314,974 \text{ ton}$$

Setelah mengetahui massa kapal maka nilai  $m_x$  dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut

$$m_x = \Delta + 5\% \Delta$$

$$m_x = 5317,974 + 5\% (5314,974)$$

$$m_x = 5580722 \text{ ton}$$

Selanjutnya dengan nilai  $m_x$  yang sudah diketahui dan kecepatan 2 m/s didapatkan nilai  $E_{imp}$  sebagai berikut

$$E_{imp} = \frac{1}{2} \times 5580722 \times 1^2$$

$$E_{imp} = 2790361,174 \text{ J}$$

$$E_{imp} = 2,790361174 \text{ MJ}$$

Setelah memasukkan nilai  $E_{imp}$  yang sudah diketahui ke dalam persamaan  $\bar{E}_{imp}$  maka didapatkan nilai  $\bar{E}_{imp}$  adalah sebagai berikut

$$\bar{E}_{imp} = 2,790361174/1425$$

$$\bar{E}_{imp} = 0,001958148 \text{ MNm}$$

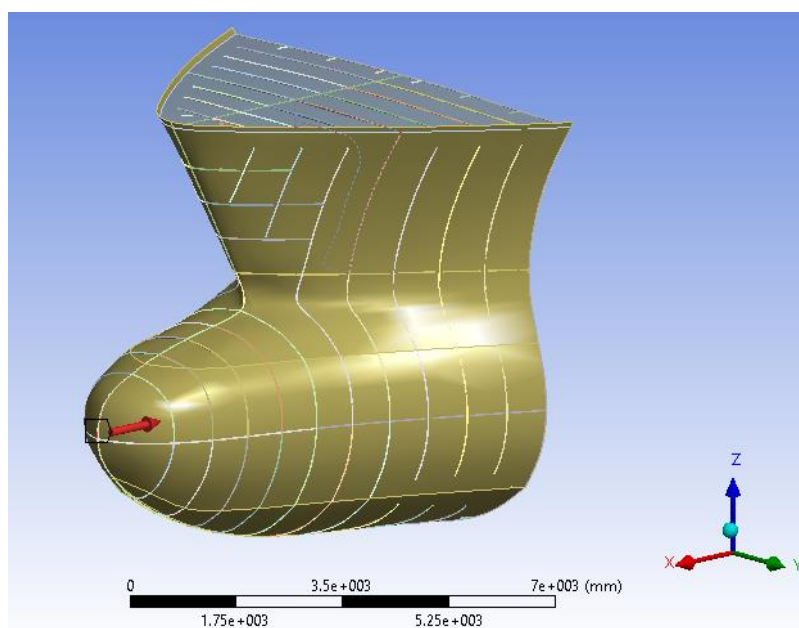
Dengan nilai  $\bar{L}^{2,6} = 0,0458$  maka nilai  $\bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2,6}$  sehingga untuk mencari *maximum bow collision load* digunakan persamaan kedua, yaitu sebagai berikut

$$P_{bow} = 2,24 \cdot P_0 [\bar{E}_{imp} \bar{L}]^{0,5}$$

$$P_{bow} = 2,24 \cdot 210 [0,001958147 \times 0,305455]^{0,5}$$

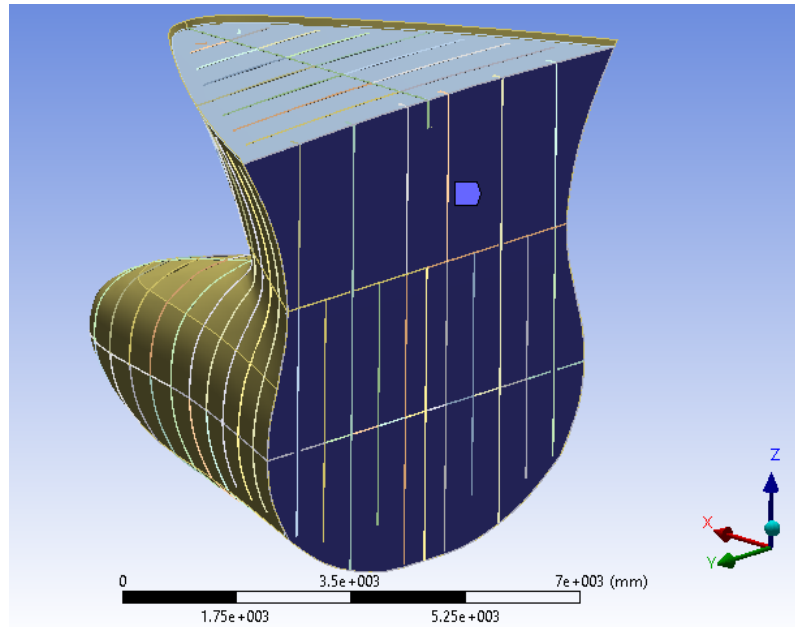
$$P_{bow} = 11,50438447 \text{ MN}$$

Nilai *maximum bow collision load* yang telah didapatkan di atas merupakan besar beban yang dijadikan parameter untuk mencari nilai konvergensi *mesh*. Dalam pencarian nilai konvergensi *mesh*, beban diberikan pada ujung *bulbous bow* pada koordinat x: 9459,84 m; y: 0 m; dan z: 2465,51 m.



**Gambar III.9 Pemberian Beban Pada Ujung *Bulbous Bow***

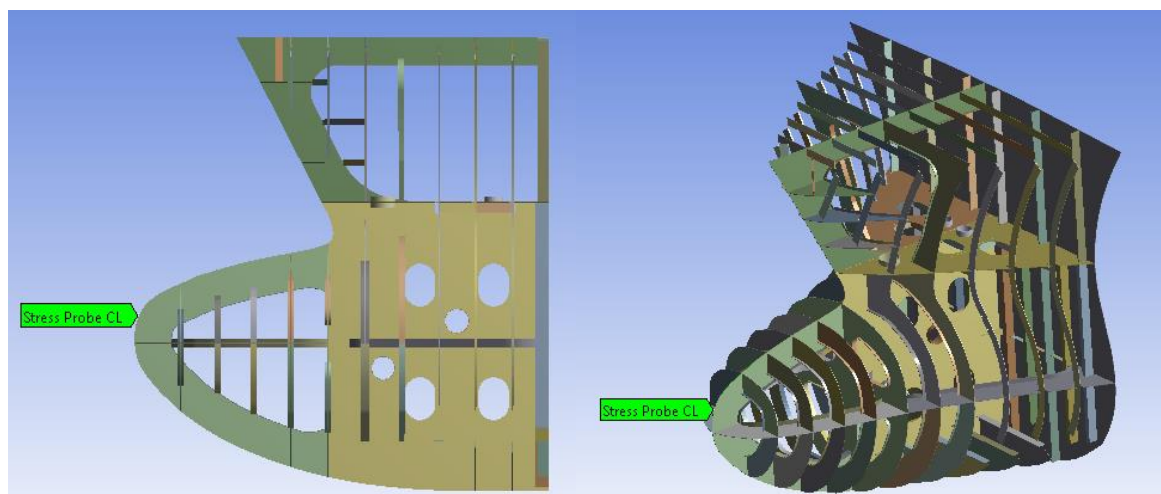
Gambar III.9 menunjukkan pendefinisian beban pada ujung haluan *striking ship* pada *software* FEM. Beban sebesar 11,50438447 MN diberikan di ujung haluan ke arah sumbu X negatif.



**Gambar III.10 Pendefinisian *Fixed Support* Pada Sekat Tubrukan**

Gambar III.10 menunjukkan pendefinisian *fixed support* (tumpuan jepit) pada sekat tubrukan dari *striking ship* di *software* FEM. Pemberian *fixed support* bertujuan agar *striking ship* tidak bergerak ke arah manapun sehingga bisa didapatkan nilai tegangan pada ujung haluan kapal.

Gambar III.11 menunjukkan parameter titik tinjauan beban pada *striking ship*. Hasil tegangan dilihat dari titik tinjauan tersebut. Untuk mengetahui nilai tegangan pada titik tinjauan tersebut digunakan *stress probe*.



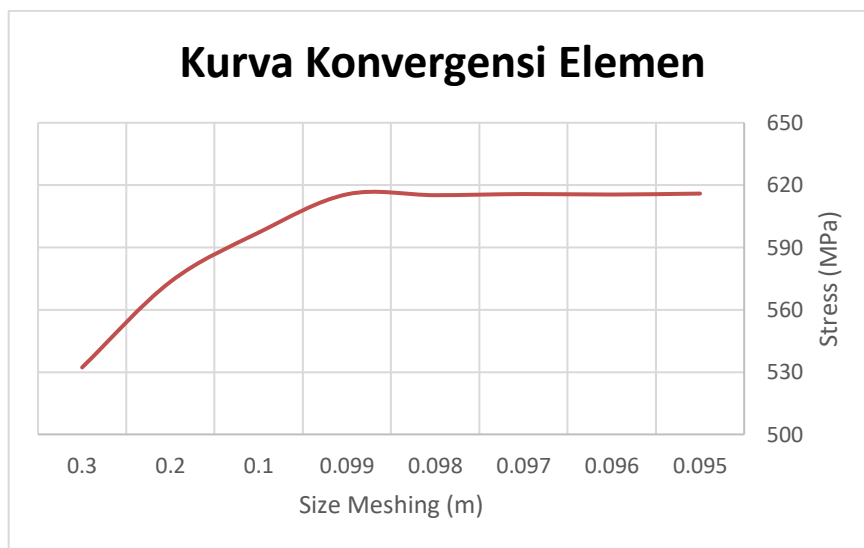
**Gambar III.11 Parameter Titik Tinjauan Beban**

Berdasarkan hasil konvergensi yang dilakukan pada model didapatkan hasil konvergensi terhadap pelat yang dapat dilihat pada Tabel III-4

**Tabel III-4 Tabel Konvergensi Ukuran Meshing**

Ukuran Mesh	Jumlah Elemen	Jumlah Node	Tegangan (Mpa)	Margin (%)
0,3	48641	40466	532,25	-
0,2	65925	55820	573,47	7,188%
0,1	155711	130312	597,16	3,967%
0,099	161699	137218	615,57	2,991%
0,098	163509	139033	615,15	0,068%
0,097	165754	140468	615,69	0,088%
0,096	167274	142078	615,47	0,036%
0,095	169560	144050	615,92	0,073%

Pada Tabel III-4, jumlah *node* dan jumlah *element* bertambah secara terus menerus. Namun, perubahan nilai tegangan hanya sedikit. Selisih antar simulasi sebesar 7,188% dan terus mengecil hingga 0,073% saat ukuran mesh 0,095 m. Selanjutnya, konvergensi elemen untuk beban diplot dalam bentuk kurva, sehingga mudah untuk dianalisis.



**Gambar III.12 Kurva Konvergensi Ukuran Meshing**

Pada Gambar III.12, sumbu x adalah besar ukuran elemen dari 0,3 m hingga 0,095 m dan sumbu y adalah nilai tegangan dengan satuan MPa. Pada kurva, nilai tegangan cenderung konstan mulai dari ukuran mesh 0,099 m dengan selisih yang ditunjukkan pada tabel. Karena selisih antar simulasi kurang dari 0,1% mulai dari ukuran mesh 0,099 m dan seterusnya maka ukuran mesh yang seharusnya digunakan adalah 0,099 m. Namun, dalam penelitian ini ukuran mesh yang kecil dapat membuat perhitungan siklus simulasi semakin kecil sehingga

menyebabkan *time step too small error*. Selain itu juga dibutuhkan ukuran mesh yang dapat menghasilkan waktu simulasi yang cukup singkat. Dengan alasan tersebut maka digunakan ukuran mesh 0,2 m dengan selisih hasil dengan ukuran mesh 0,099 adalah 6,84%.

### III.5. Simulasi Pengaruh Berat

Simulasi tubrukan menggunakan *finite element method* membutuhkan waktu yang lama. Oleh karena itu pada penelitian ini, simulasi tubrukan tidak dimodelkan dengan geometri kapal seutuhnya melainkan hanya bagian haluan saja untuk mempercepat waktu simulasi. Namun, karena model yang digunakan hanya bagian haluan maka berat yang digunakan untuk simulasi adalah berat haluan tersebut dan bukan total berat kapal. Dengan demikian dibutuhkan simulasi yang menunjukkan apakah berat kapal berpengaruh terhadap hasil simulasi tubrukan dengan FEM.

Simulasi dilakukan dengan membandingkan tegangan pada haluan yang menggunakan material baja A36 dengan haluan dengan material aluminium. Mengubah material sama dengan mengubah massa jenis sehingga dengan mengubah material haluan yang semula baja menjadi aluminium dapat mengubah berat model haluan kapal. Simulasi dilakukan dengan menggunakan kecepatan awal 1 m/s.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2770	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
6	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
7	Derive from	Young's Modulus...			
8	Young's Modulus	71000	MPa	<input type="checkbox"/>	
9	Poisson's Ratio	0.33			<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	6.9608E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	2.6692E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
12	Alternating Stress R-Ratio	Tabular		<input type="checkbox"/>	
16	Tensile Yield Strength	2.8E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Compressive Yield Strength	2.8E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	Tensile Ultimate Strength	3.1E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	Isotropic Thermal Conductivity	Tabular		<input type="checkbox"/>	
23	Specific Heat, C <sub>p</sub>	875	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	Isotropic Relative Permeability	1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	Isotropic Resistivity	Tabular		<input type="checkbox"/>	

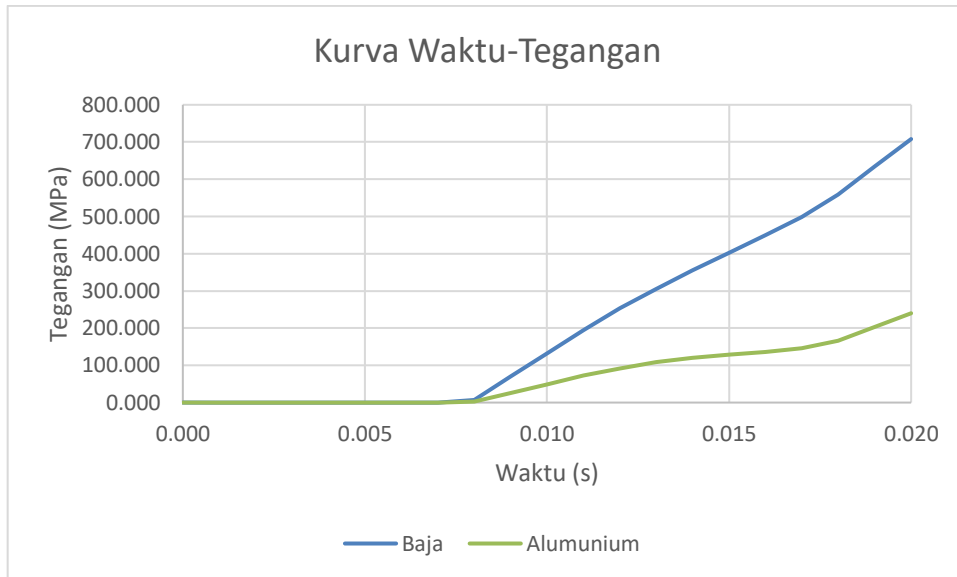
Gambar III.13 Mechanical Properties Aluminium

Gambar III.13 menunjukkan *mechanical properties* dari alumunium yang digunakan pada haluan kapal di simulasi ini. *Mechanical properties* untuk material baja ditunjukkan pada Tabel III-2. Dengan menggunakan material alumunium maka berat pada model haluan kapal akan berbeda dengan haluan kapal yang menggunakan material baja. Pada simulasi ini *end time* yang digunakan adalah 0,02 detik.

**Tabel III-5 Perbandingan Tegangan Dengan Material yang Berbeda**

Baja		Alumunium	
Waktu (s)	Tegangan (MPa)	Waktu (s)	Tegangan (MPa)
0,000	0,000	0,000	0,000
0,001	0,015	0,001	0,015
0,002	0,014	0,002	0,014
0,003	0,014	0,003	0,014
0,004	0,014	0,004	0,014
0,005	0,014	0,005	0,014
0,006	0,014	0,006	0,014
0,007	0,014	0,007	0,014
0,008	7,542	0,008	2,583
0,009	69,591	0,009	25,174
0,010	132,110	0,010	48,982
0,011	195,120	0,011	73,364
0,012	252,880	0,012	92,092
0,013	305,600	0,013	109,010
0,014	354,930	0,014	119,980
0,015	402,300	0,015	128,180
0,016	449,380	0,016	135,920
0,017	498,150	0,017	146,100
0,018	559,300	0,018	166,500
0,019	634,700	0,019	203,050
0,020	707,930	0,020	239,940

Tabel III-5 menunjukkan perbedaan tegangan yang dihasilkan pada simulasi tubrukan pada haluan dengan material baja A36 dan haluan dengan material alumunium. Tegangan yang dihasilkan pada haluan dengan material alumunium cenderung lebih kecil dikarenakan massa haluan juga lebih kecil dibandingkan massa haluan dengan material baja. Dari hasil tersebut dibuat kurva yang menunjukkan perbedaan hasil tegangan pada Gambar III.14



**Gambar III.14 Kurva Tegangan Pada Material yang Berbeda**

Gambar III.14 menunjukkan kurva perbedaan hasil tegangan pada haluan kapal dengan material baja dan alumunium. Pada kurva tersebut dapat dilihat perbedaan tegangan yang signifikan antara haluan kapal baja dengan haluan kapal alumunium. Dari simulasi ini dapat disimpulkan bahwa berat pada model memengaruhi hasil simulasi tubrukan sehingga hasil yang didapatkan pada simulasi sebelumnya akan berbeda apabila kapal dimodelkan keseluruhan. Oleh karena itu pada penelitian ini hasil yang didapatkan hanya diakibatkan oleh berat model haluan kapal saja.

### **III.6. Pembebanan dan Kondisi Batas**

#### **III.6.1. Pembebanan**

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *dynamic finite element*. Sehingga beban yang digunakan adalah beban eksternal yang disebabkan oleh model haluan kapal 3500 LTDW dengan kecepatan tertentu. Kondisi kapal dianggap *even keel*.

#### **III.6.2. Kondisi Batas**

Terdapat beberapa kondisi batas yang diterapkan pada metode FEM yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu *rigid body*, *connections*, *mesh*, *initial velocity*, *fixed support*, dan *end time*.

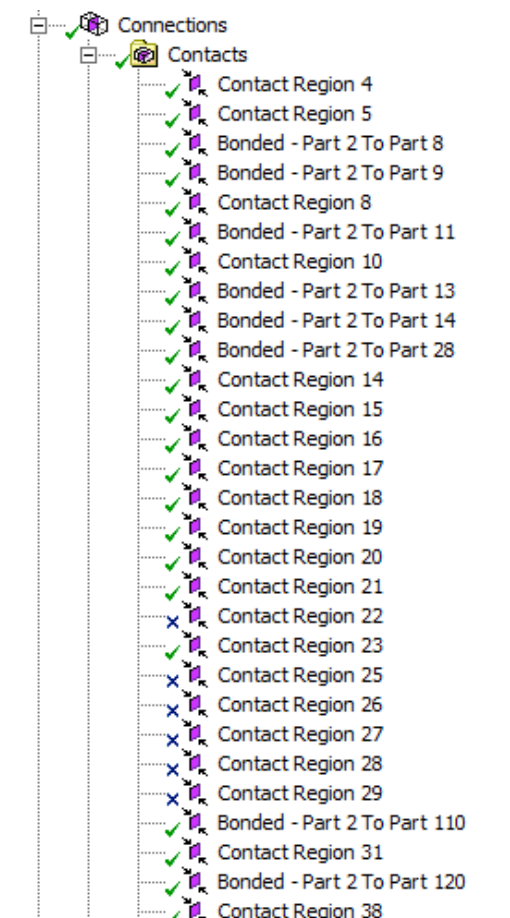
##### **1. Rigid Body**

Suatu geometri yang dikategorikan sebagai *rigid body* tidak akan mengalami deformasi. Dengan kata lain jarak antar partikel penyusun *rigid body* tersebut tidak berubah di bawah

pengaruh gaya eksternal. *Rigid body* biasanya dianggap sebagai distribusi massa yang berkelanjutan. Pada penelitian ini, kasus tubrukan yang diterapkan adalah haluan kapal 3500 LTDW menabrak lambung kapal 17500 LTDW yang didefinisikan sebagai *rigid body*. Hal ini dilakukan agar saat tubrukan terjadi, energi yang diserap oleh konstruksi haluan kapal adalah 100% dan lambung kapal yang ditabrak tidak terjadi deformasi. Perubahan material pada benda yang didefinisikan sebagai *rigid body* tidak akan memengaruhi hasil pada benda yang didefinisikan sebagai *deformable*.

## 2. Connections

Pada penelitian ini, koneksi antar bagian konstruksi model geometri didefinisikan. Jenis koneksi yang digunakan adalah *bonded*, yaitu menyerupai las-lasan pada kondisi sebenarnya. Pendefinisian koneksi dilakukan otomatis oleh *software*, tetapi ada beberapa koneksi yang harus diperbaiki dan didefinisikan secara manual. Koneksi yang perlu diperbaiki adalah beberapa koneksi yang seharusnya tidak menyatu, tetapi terdefiniskan sebagai geometri yang menyatu. Koneksi harus didefinisikan secara manual saat geometri yang seharusnya menyatu, tetapi tidak terdefinisi.



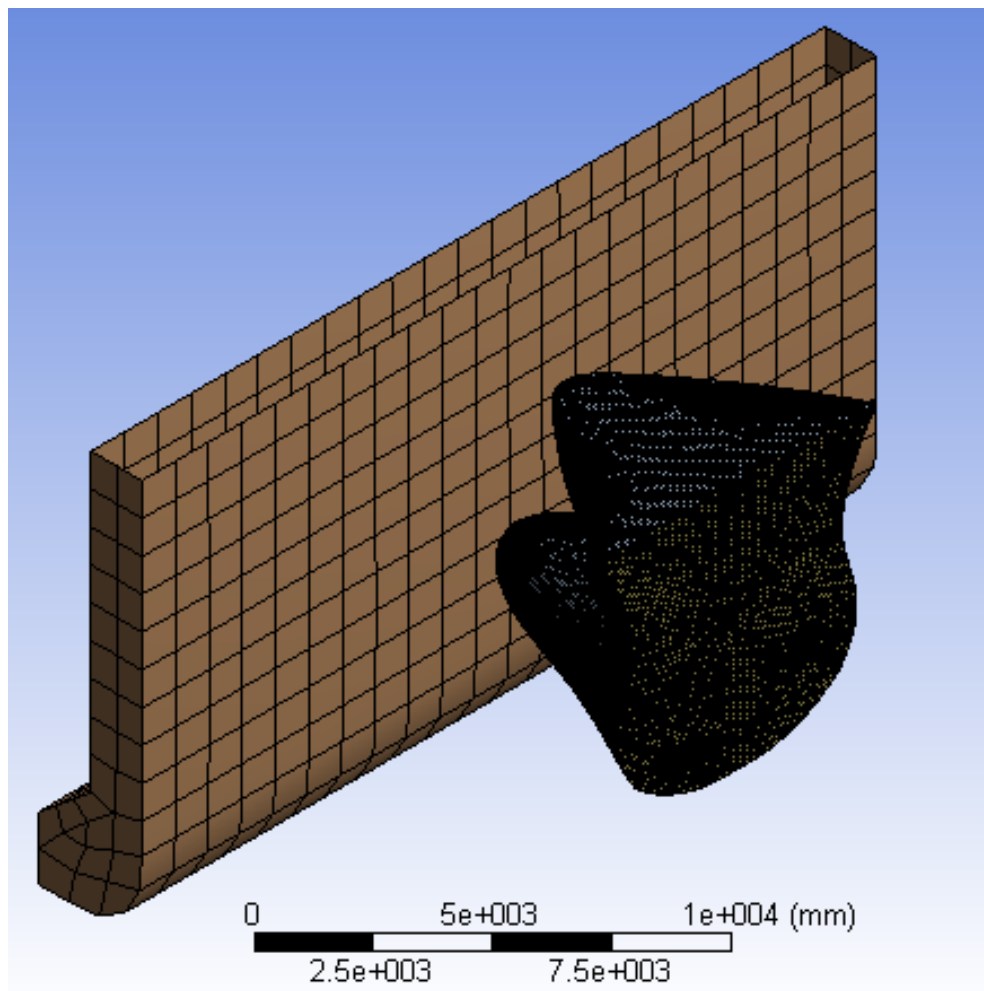
**Gambar III.15** Contoh Pendefinisian *Connections*



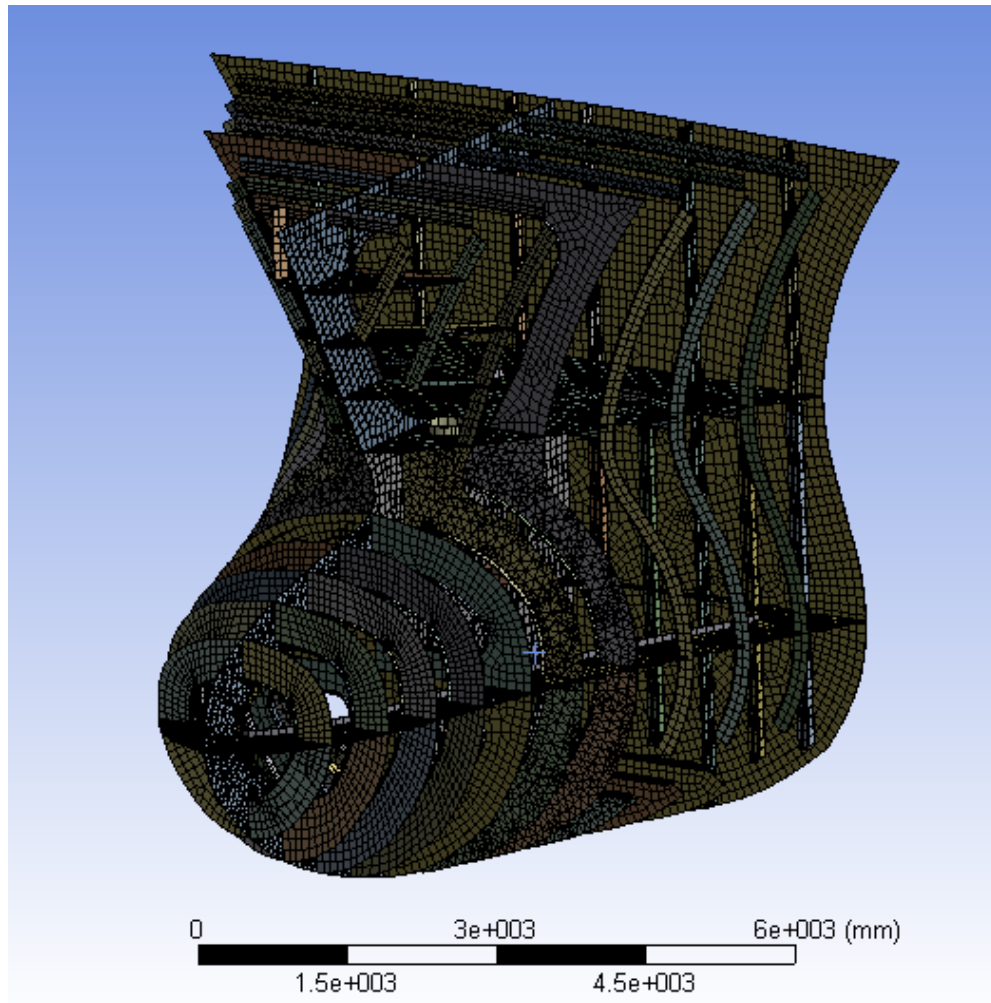
Gambar III.15 merupakan pendefinisian *connections* pada model geometri kedua kapal. Terdapat perbedaan penamaan dalam *connections*. *Connection* yang didefinisikan secara otomatis memiliki nama *contact region*, sedangkan yang didefinisikan secara manual memiliki nama *bonded*.

### 3. Meshing

Dalam penelitian ini, ukuran elemen yang digunakan untuk *meshing* sesuai dengan hasil yang didapatkan dalam konvergensi *meshing*, yaitu 0,2 meter. Metode yang digunakan untuk tahap *meshing* adalah otomatis sehingga terdapat dua macam tipe *meshing*, yaitu *tetrahedrons* dan *hex dominant*. Gambar III.16 menunjukkan model geometri hasil *meshing* dari *striking ship* dan *struck ship*. Karena *struck ship* dianggap sebagai *rigid body* maka ukuran mesh yang digunakan adalah 1 m untuk mempercepat waktu simulasi. Ukuran mesh untuk *struck ship* tidak berpengaruh terhadap hasil simulasi karena *struck ship* tidak akan terjadi deformasi dan tidak akan menghasilkan nilai tegangan.



**Gambar III.16 Meshing Model Geometri**



**Gambar III.17 Meshing Pada Konstruksi Haluan**

Gambar III.17 menunjukkan hasil *meshing* pada konstruksi haluan *striking ship*. Tipe *meshing* yang dihasilkan merupakan *tetrahedrons* dan *hex dominant* dengan ukuran 0,2 meter, sedangkan pada *struck ship* digunakan ukuran mesh sebesar 1 m.

#### 4. *Initial Velocity*

Ada tiga variasi kecepatan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s. Dalam penelitian ini, pendefinisian kecepatan diberikan kepada lambung kapal *struck ship*. Hal ini dikarenakan oleh keterbatasan *software* FEM yang tidak bisa menampilkan hasil apabila pendefinisian kecepatan dilakukan pada haluan kapal *striking ship*. Kecepatan tersebut didefinisikan ke arah sumbu x negatif.

#### 5. *Fixed Support*

Dalam penelitian ini didefinisikan geometri yang tidak dapat bergerak dan dianggap sebagai tumpuan jepit (*fixed support*). Geometri yang didefinisikan sebagai *fixed support* adalah *collision bulkhead* pada haluan kapal *striking ship*.

## 6. End Time

*End time* adalah waktu yang berlangsung selama proses tubrukan. Nilai *end time* dicari menggunakan persamaan hubungan antara momentum dan impuls

$$F = \frac{dp}{dt}$$

$$F \cdot dt = dp$$

$$F \cdot dt = [(M_A V_{A1} + M_B V_{B1}) - (M_A V_{A2} + M_B V_{B2})]$$

Dengan

F adalah *maximum bow collision load*

$M_A$  adalah massa kapal yang menabrak, yaitu 5314,974 ton

$V_{A1}$  adalah kecepatan kapal yang menabrak

$M_B$  adalah massa kapal yang ditabrak

$V_{B1}$  adalah kecepatan kapal yang ditabrak

Karena kecepatan kapal yang ditabrak sebelum dan setelah terjadinya tubrukan adalah 0 m/s maka momentum kapal yang ditabrak adalah 0. Sehingga persamaan di atas menjadi

$$F \cdot dt = M_A V_{A1}$$

$$dt = \frac{M_A V_{A1}}{F}$$

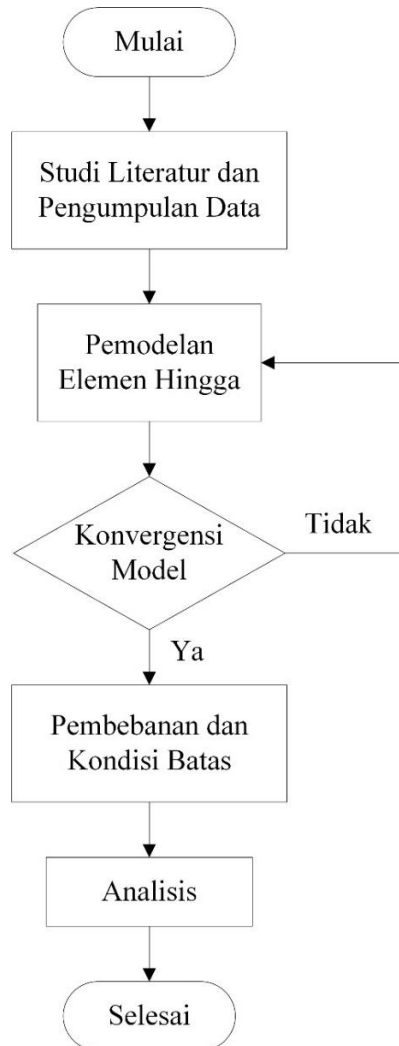
Dengan persamaan di atas, waktu yang terjadi selama proses tubrukan hingga kapal yang menabrak berhenti dapat dihitung. Untuk kecepatan kapal 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s waktu yang dibutuhkan hingga kecepatan kapal yang menabrak 0 adalah 0,4851 detik. Namun, karena keterbatasan kemampuan komputer maka *end time* yang digunakan adalah 0,05 detik.

## III.7. Analisis Tegangan

Analisis dilakukan terhadap respon struktur konstruksi haluan kapal yang terjadi akibat tubrukan dengan lambung kapal tanker. Variabel yang menjadi pengamatan adalah tegangan, gaya, dan deformasi yang terjadi serta energi yang diserap atau *internal energy* pada konstruksi haluan tersebut. Nilai tegangan yang dianalisis hanya pada saat kapal mulai menabrak hingga mencapai nilai *ultimate stress*. Besar gaya dan deformasi yang didapatkan dari hasil simulasi akan dibandingkan dengan hasil perhitungan analitis.

### III.8. Bagan Alir

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



**Gambar III.18 Diagram Alir Tugas Akhir**

Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### IV.1. Hasil Perhitungan Analisis

Perhitungan analisis digunakan untuk mendapatkan nilai kecepatan haluan kapal pada waktu 0,05 detik yang kemudian digunakan untuk mencari nilai kedalaman penetrasi yang dihasilkan akibat tubrukan. Formula yang digunakan adalah formula fisika dasar. Untuk mendapatkan nilai kecepatan tersebut, digunakan substitusi dari persamaan (II.3) dan (II.8) sehingga dituliskan sebagai berikut

$$F \cdot \Delta t = [(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})] - [(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})] \quad (IV.1)$$

Dengan

F adalah *maximum bow collision load*

$M_A$  adalah massa haluan striking ship

$V_{A1}$  dan  $V_{A2}$  adalah kecepatan haluan *striking ship* sebelum tubrukan dan saat 0,05 detik

$M_B$  adalah massa struck ship

$V_{B1}$  dan  $V_{B2}$  adalah kecepatan *struck ship* sebelum tubrukan dan saat 0,05 detik

Nilai F dicari dengan persamaan (III.1) dan dihasilkan untuk kecepatan 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s masing-masing adalah 11,504 MN; 23,009 MN; dan 34,513 MN. Nilai  $V_{B1}$  dan  $V_{B2}$  adalah 0 karena *struck ship* dianggap diam. Sehingga untuk mencari kecepatan *striking ship* pada waktu 0,05 detik, persamaan (IV.1) dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_{A2} = [F \cdot \Delta t + (M_A V_{A1})] / M_A \quad (IV.2)$$

Dengan demikian didapatkan nilai kecepatan *striking ship* pada waktu 0,05 detik dengan kecepatan awal 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s masing-masing adalah 0,897 m/s; 1,794 m/s; dan 2,690 m/s.

Setelah mendapatkan kecepatan pada waktu 0,05 detik maka untuk mencari nilai kedalaman penetrasi digunakan persamaan prinsip kerja dan energi, yaitu

$$W = \Delta E_k \quad (IV.3)$$

dengan

$$W = F \cdot \Delta s$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} M_A V_{A2}^2 - \frac{1}{2} M_A V_{A1}^2$$

Dengan menggunakan persamaan di atas nilai penetrasi yang didapatkan untuk kecepatan awal 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s masing-masing adalah 47,423 mm; 94,846 mm; dan 142,270 mm. Tabel IV-1 menunjukkan rekapitulasi hasil dari perhitungan analitis.

**Tabel IV-1 Hasil Perhitungan Analisis**

Kecepatan Awal (m/s)	Kecepatan Saat 0,05 detik (m/s)	Gaya (MN)	Penetrasi (mm)
1	0,897	11,504	47,423
2	1,794	23,009	94,846
3	2,691	34,513	142,270

## IV.2. Hasil dan Analisis FEM

Dalam penelitian ini, variabel yang didapatkan dari simulasi FEM adalah tegangan, energi, gaya dan penetrasi, dan deformasi dengan tiga variasi kecepatan, yaitu 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s.

### IV.2.1. Tegangan

Tegangan yang dihasilkan akibat tubrukan pada simulasi FEM ditunjukkan Tabel IV-2. Tegangan tersebut merupakan nilai tegangan *von misses* maksimal pada haluan kapal. Nilai tegangan yang ditampilkan dalam tabel mulai dari kapal menabrak hingga mencapai nilai *ultimate strength* material, yaitu 550 MPa.

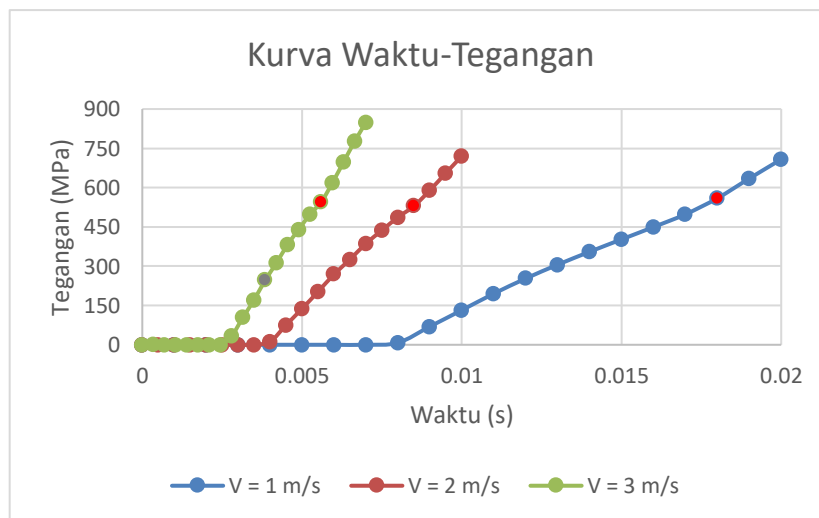
**Tabel IV-2 Hasil Tegangan**

V = 1 m/s		V = 2 m/s		V = 3 m/s	
Waktu (s)	Tegangan (Mpa)	Waktu (s)	Tegangan (Mpa)	Waktu (s)	Tegangan (Mpa)
0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000
0,0010	0,015	0,0005	0,020	0,0004	0,654
0,0020	0,014	0,0010	0,015	0,0007	0,128
0,0030	0,014	0,0015	0,015	0,0011	0,059
0,0040	0,014	0,0020	0,014	0,0014	0,052
0,0050	0,014	0,0025	0,015	0,0018	0,064
0,0060	0,014	0,0030	0,014	0,0021	0,048
0,0070	0,014	0,0035	0,014	0,0025	0,047
0,0080	7,542	0,0040	12,193	0,0028	34,595
0,0090	69,591	0,0045	75,202	0,0032	104,470
0,0100	132,110	0,0050	137,720	0,0035	171,570
0,0110	195,120	0,0055	202,530	0,0039	247,310
0,0120	252,880	0,0060	268,720	0,0042	312,200
0,0130	305,600	0,0065	325,760	0,0046	383,100
0,0140	354,930	0,0070	386,360	0,0049	440,030

V = 1 m/s		V = 2 m/s		V = 3 m/s	
Waktu (s)	Tegangan (Mpa)	Waktu (s)	Tegangan (Mpa)	Waktu (s)	Tegangan (Mpa)
0,0150	402,300	0,0075	436,660	0,0053	498,470
0,0160	449,380	0,0080	486,790	0,0056	544,410
0,0170	498,150	0,0085	529,110	0,0060	618,170
0,0180	559,300	0,0090	589,480	0,0063	697,600
0,0190	634,700	0,0095	655,380	0,0067	776,810
0,0200	707,930	0,0100	720,200	0,0070	849,070

Pada Tabel IV-2, dapat diketahui tegangan haluan kapal mencapai *compressive yield strength* pada waktu yang berbeda untuk setiap kecepatan awal. Nilai tegangan mencapai *yield strength* untuk kecepatan awal 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s masing-masing pada sekitar waktu 0,011 detik; 0,0055 detik; dan 0,0035 detik. Setelah tegangan melebihi *yield strength*, haluan kapal mengalami deformasi plastis.

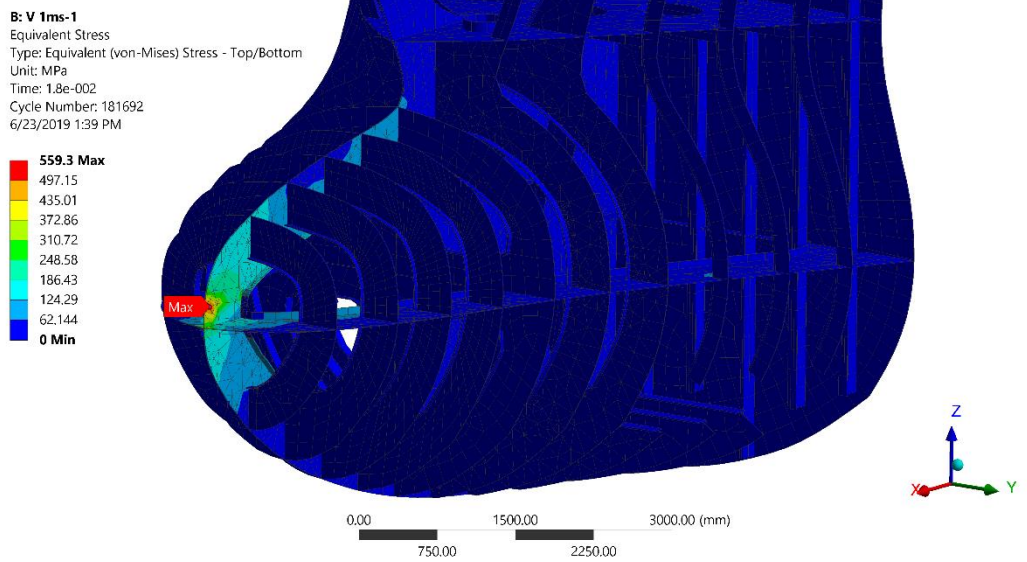
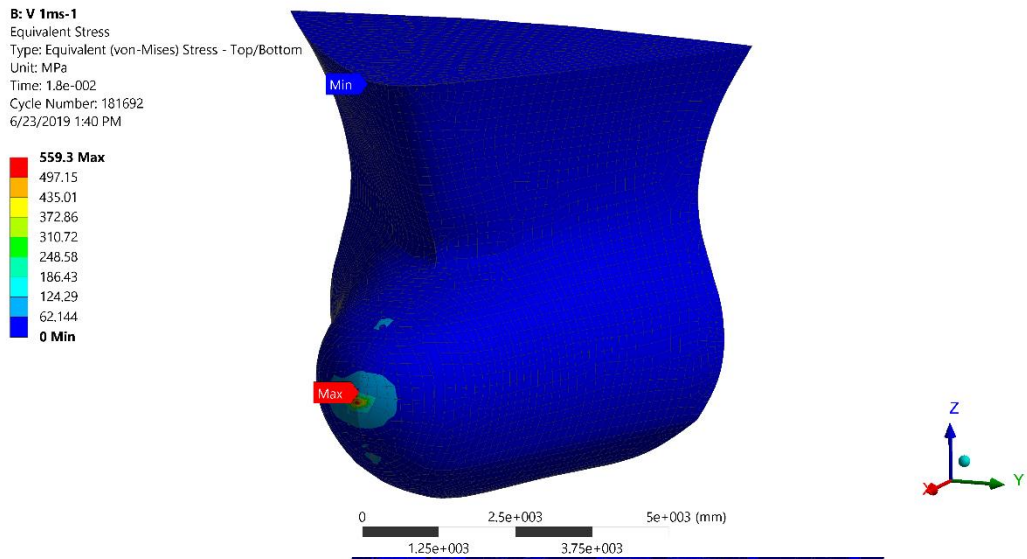
Nilai tegangan mencapai *ultimate strength* untuk kecepatan awal 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s masing-masing pada sekitar waktu 0,012 detik; 0,009 detik; dan 0,0056. Pada tahap ini haluan kapal sudah mengalami deformasi plastis dan tidak dapat kembali ke bentuk semula. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kecepatan  $V$  maka semakin cepat untuk mencapai nilai tegangan *ultimate*.



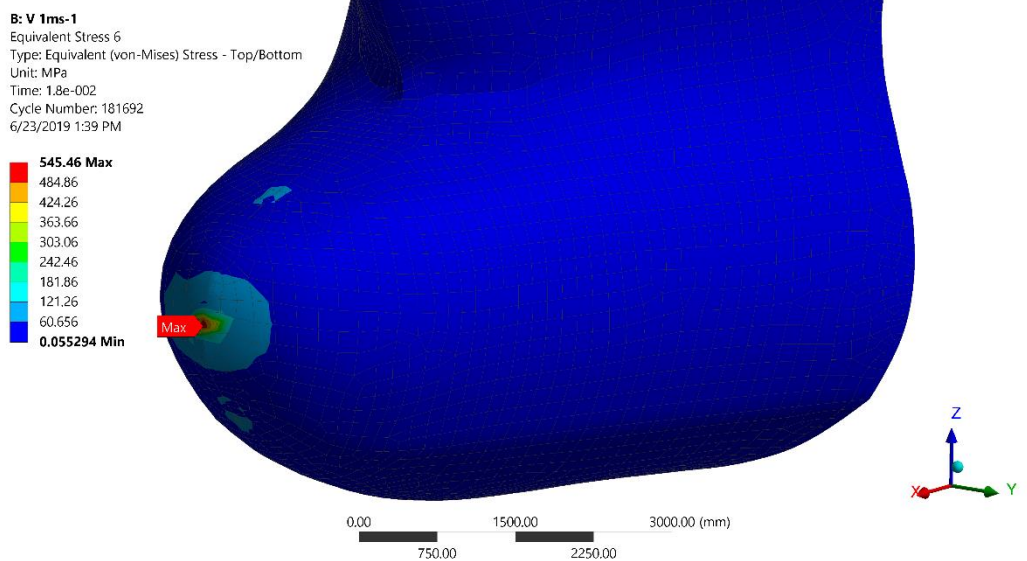
**Gambar IV.1 Kurva *Time-Stress***

Pada Gambar IV.1, dapat dilihat dari kurva di atas, nilai tegangan cenderung naik. Hal ini dikarenakan haluan kapal mendapatkan beban yang berkelanjutan. Untuk waktu yang sama, nilai tegangan paling tinggi terjadi pada saat kapal bergerak dengan kecepatan awal 3 m/s. Dengan demikian, semakin tinggi kecepatan maka semakin besar tegangan yang dihasilkan pada haluan.



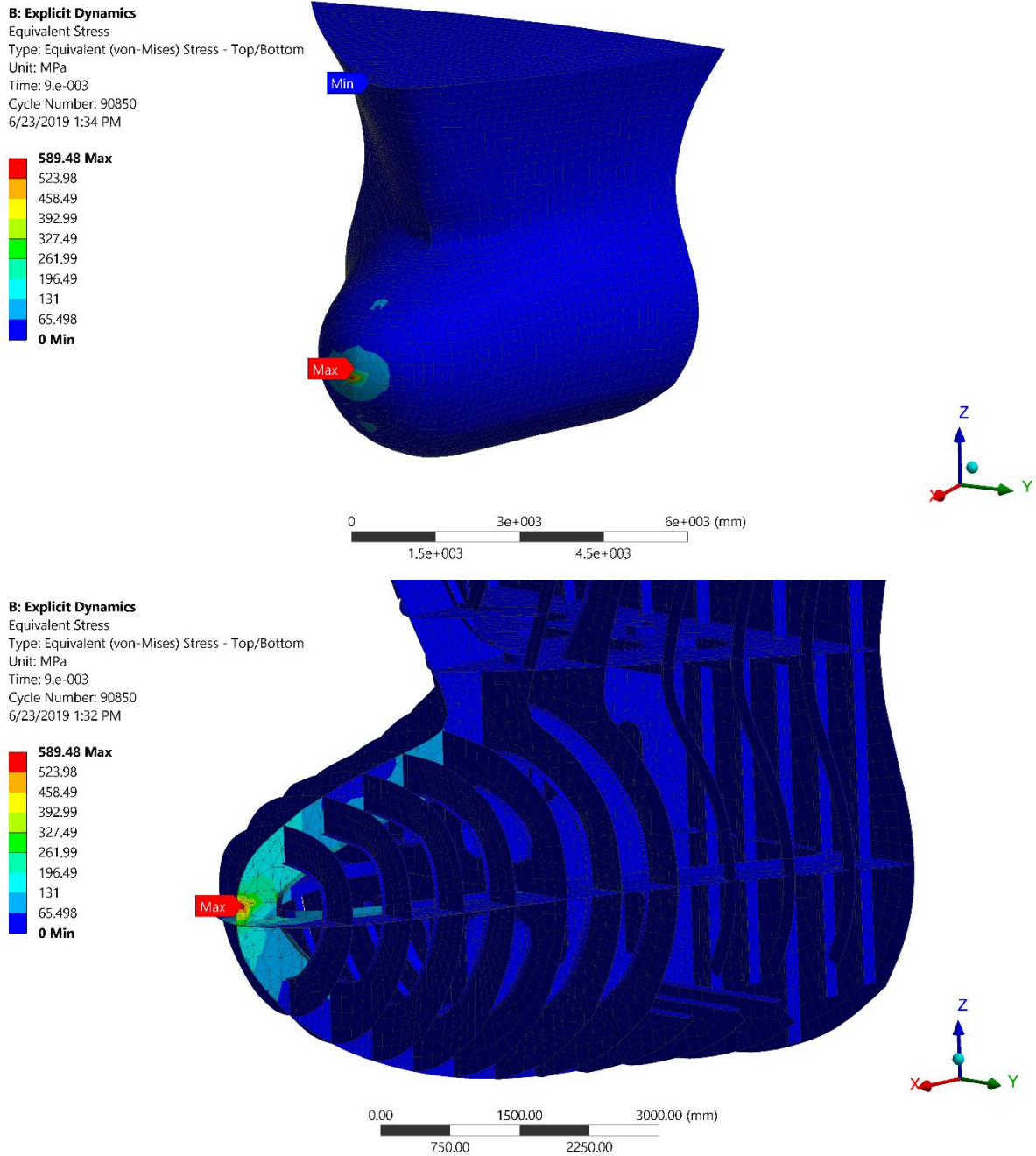


**Gambar IV.2 Hasil Tegangan Von Mises Untuk  $V = 1 \text{ m/s}$**



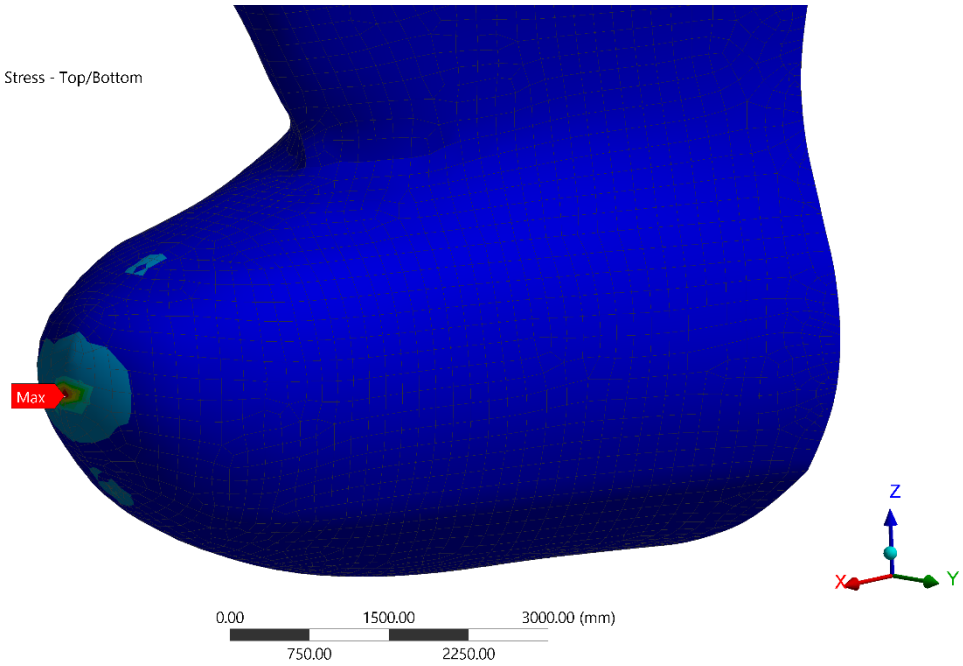
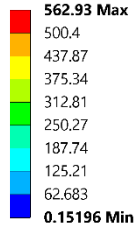
**Gambar IV.3 Hasil Tegangan Pada Pelat Untuk  $V = 1 \text{ m/s}$**

Gambar IV.2 memperlihatkan hasil tegangan von mises untuk kecepatan awal 1 m/s. Tegangan maksimal terjadi pada *center girder* haluan *striking ship*. Nilai tegangan maksimal sebesar 559,3 MPa merupakan nilai *ultimate* yang terjadi pada waktu 0,018 detik. Kemudian untuk besar tegangan pada pelat di waktu yang sama ditunjukkan pada Gambar IV.3 dengan nilai tegangan sebesar 545,46 MPa. Nilai tegangan pada pelat lebih kecil dibandingkan nilai tegangan pada *center girder*.



**Gambar IV.4 Hasil Tegangan Untuk  $V = 2$  m/s**

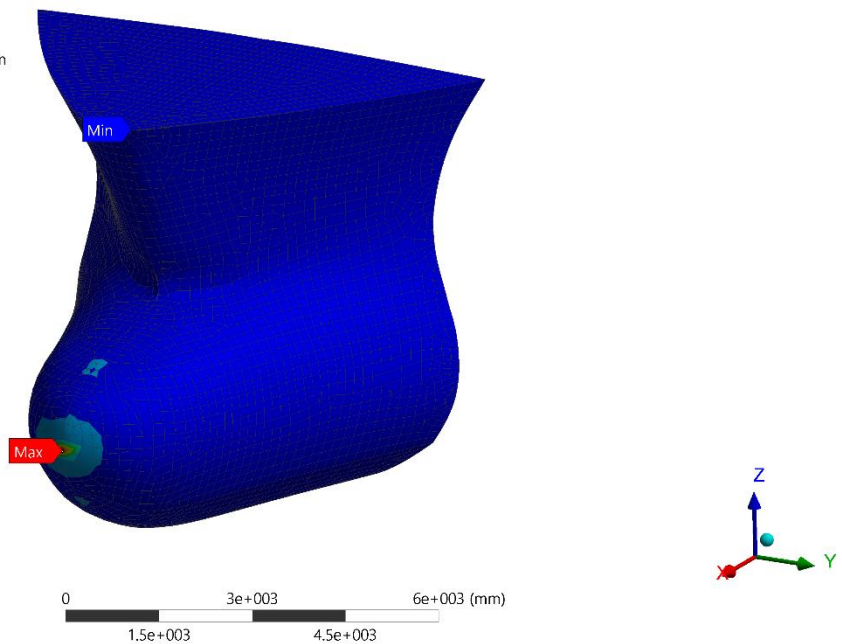
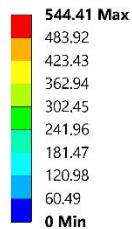
**B: Explicit Dynamics**  
 Equivalent Stress 6  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
 Unit: MPa  
 Time: 9.e-003  
 Cycle Number: 90850  
 6/23/2019 1:33 PM



**Gambar IV.5 Hasil Tegangan Pada Pelat Untuk  $V = 2$  m/s**

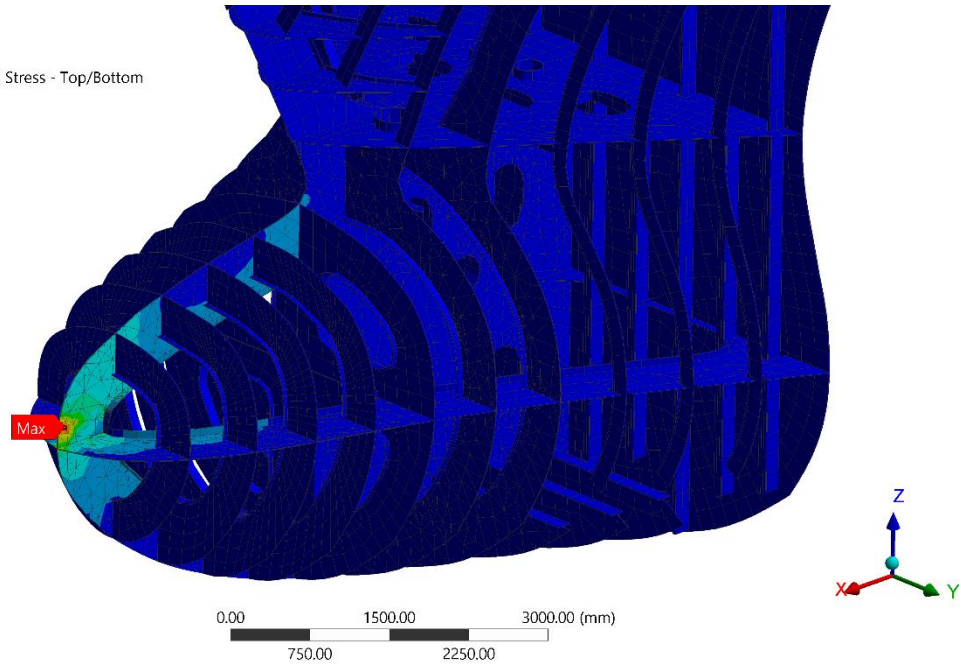
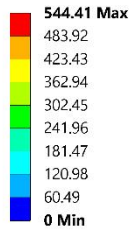
Gambar IV.4 memperlihatkan hasil tegangan von misses untuk kecepatan awal 2 m/s. Tegangan maksimal juga terjadi pada *center girder* haluan *striking ship*. Nilai tegangan maksimal sebesar 589,48 MPa merupakan nilai yang terjadi pada waktu 0,009 detik sehingga nilai tegangan mencapai *ultimate* sebelum waktu 0,009 detik. Kemudian untuk besar tegangan pada pelat di waktu yang sama ditunjukkan pada Gambar IV.5 dengan nilai tegangan sebesar 569,93 MPa. Untuk kecepatan awal 2 m/s, nilai tegangan pada pelat juga lebih kecil dibandingkan nilai tegangan pada *center girder*.

**B: Explicit Dynamics**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
 Unit: MPa  
 Time: 5.6e-003  
 Cycle Number: 101747  
 6/23/2019 1:23 PM



**B: Explicit Dynamics**

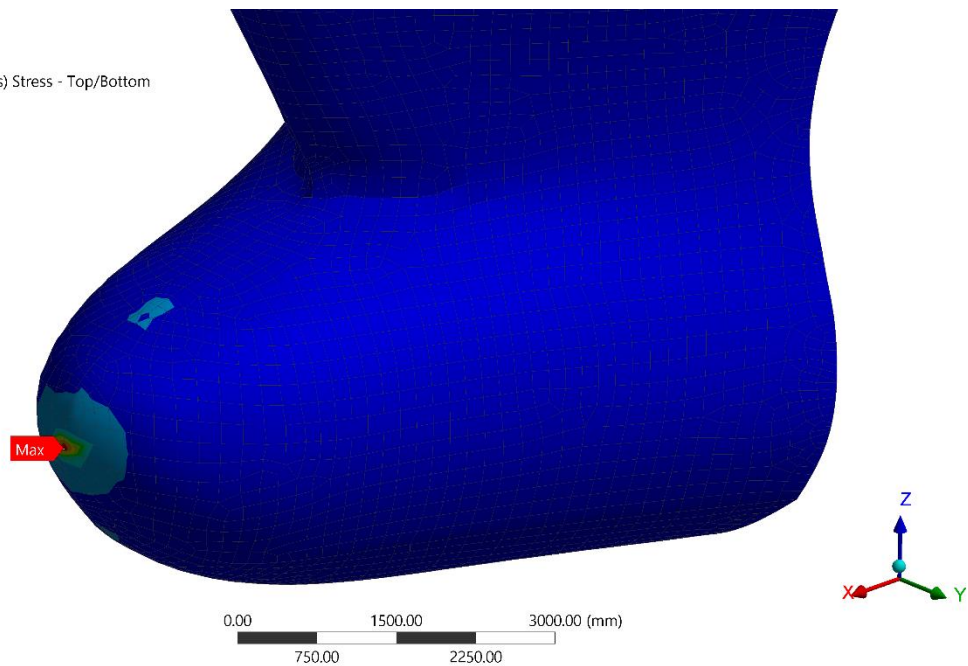
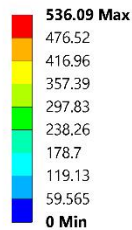
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 5.6e-003  
Cycle Number: 101747  
6/23/2019 1:21 PM



**Gambar IV.6 Hasil Tegangan Von Misses Untuk  $V = 3$  m/s**

**B: Explicit Dynamics**

Equivalent Stress 6  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 5.6e-003  
Cycle Number: 101747  
6/23/2019 1:21 PM



**Gambar IV.7 Hasil Tegangan Pada Pelat Untuk  $V = 3$  m/s**

Gambar IV.6 memperlihatkan hasil tegangan von misses untuk kecepatan awal 3 m/s. Tegangan maksimal di waktu 0,0056 detik juga terjadi pada *center girder* haluan *striking ship*. Pada waktu 0,0056 detik, nilai tegangan maksimal sebesar 544,41 MPa sehingga nilai tegangan mencapai *ultimate* setelah waktu 0,0056 detik. Kemudian untuk besar tegangan pada pelat di waktu yang sama ditunjukkan pada Gambar IV.7 dengan nilai tegangan sebesar 536,09 MPa.

Untuk kecepatan awal 3 m/s pada waktu tersebut, nilai tegangan pada pelat lebih kecil dibandingkan nilai tegangan pada *center girder*.

Nilai tegangan pada konstruksi lebih besar dibandingkan tegangan pada pelat karena konstruksi merupakan penguat sehingga menerima beban lebih besar. Oleh karena itu untuk kecepatan 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s nilai tegangan pada pelat lebih kecil daripada tegangan pada *center girder*.

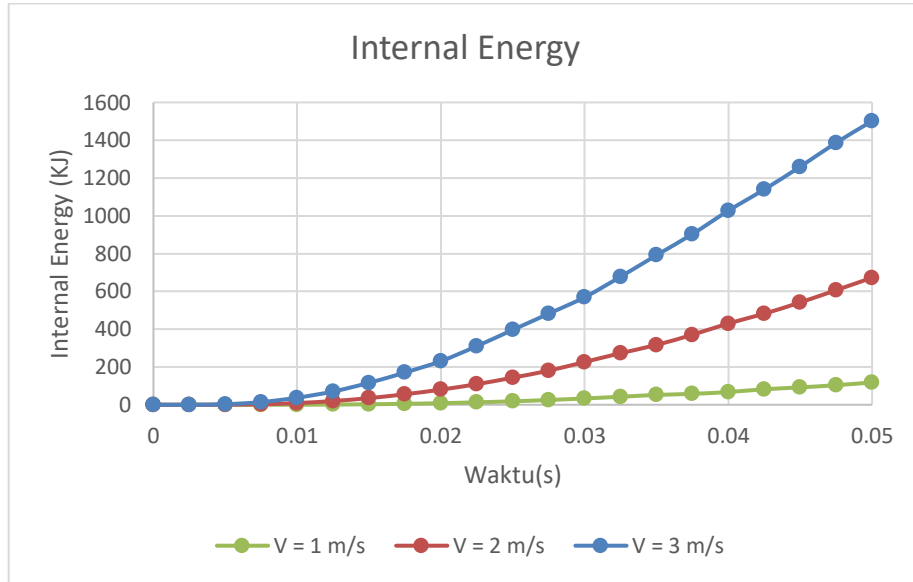
#### IV.2.2. Internal Energy

*Internal energy* merupakan energi yang diserap oleh konstruksi haluan. Nilai *internal energy* sama dengan nilai energi kinetik yang hilang saat tubrukan terjadi. Besar *internal energy* yang dihasilkan dari simulasi tubrukan ditampilkan pada Tabel IV-3. Hasil yang ditampilkan merupakan hasil dari simulasi selama *end time* 0,05 detik.

**Tabel IV-3 Hasil *Internal Energy***

No	Waktu (s)	Internal Energy (KJ)		
		V = 1 m/s	V = 2 m/s	V = 3 m/s
1	0,0000	0,000	0,000	0,000
2	0,0025	0,000	0,000	0,000
3	0,0050	0,000	0,216	2,709
4	0,0075	0,000	2,614	14,075
5	0,0100	0,193	9,003	37,374
6	0,0125	0,953	19,589	70,092
7	0,0150	2,516	35,118	115,990
8	0,0175	4,869	55,605	170,560
9	0,0200	8,183	80,056	230,790
10	0,0225	12,772	108,940	310,240
11	0,0250	18,224	143,430	396,450
12	0,0275	25,057	180,420	481,780
13	0,0300	33,305	226,310	569,030
14	0,0325	42,338	272,850	677,630
15	0,0350	51,881	316,740	791,660
16	0,0375	57,704	370,440	903,460
17	0,0400	67,303	430,100	1026,900
18	0,0425	81,969	481,970	1139,600
19	0,0450	91,948	541,610	1259,800
20	0,0475	103,460	606,500	1386,800
21	0,0500	118,010	672,390	1501,300

Pada Tabel IV-3, nilai *internal energy* maksimal yang dihasilkan oleh kecepatan 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s masing-masing adalah 118,01 KJ; 672,39 KJ; dan 1501,3 KJ. Selanjutnya dari tabel tersebut dibuat grafik yang ditunjukkan pada Gambar IV.5.



**Gambar IV.8 Kurva *Internal Energy***

Pada Gambar IV.8, sumbu x menunjukkan waktu dalam satuan detik dan sumbu y menunjukkan *internal energy* dalam satuan KJ. Dari kurva tersebut dapat dilihat bahwa *internal energy* cenderung naik. Selain itu, *internal energy* paling besar diserap oleh haluan saat kecepatan awal 3 m/s sehingga semakin tinggi kecepatan awal saat tubrukan terjadi, semakin tinggi energi yang diserap oleh haluan.

#### IV.2.3. Gaya dan Penetrasi

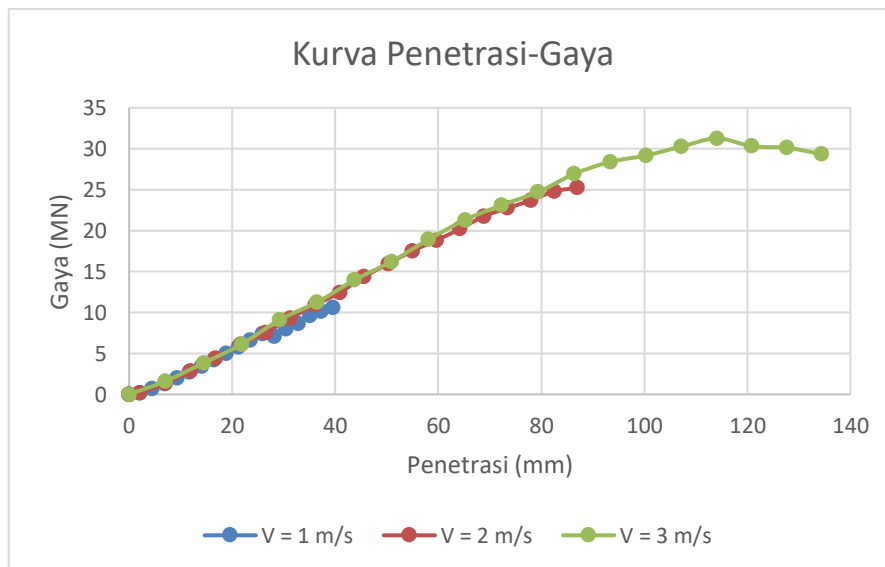
Selain tegangan dan *internal energy*, variabel yang dihasilkan dari simulasi FEM adalah gaya dan penetrasi. Besar gaya dan penetrasi yang dihasilkan merupakan hasil simulasi tubrukan dalam waktu 0,05 detik. Untuk masing-masing kecepatan awal, besar gaya dan penetrasi dapat dilihat pada Tabel IV-4

**Tabel IV-4 Hasil *Penetration-Force***

No	V = 1 m/s		V = 2 m/s		V = 3 m/s	
	Penetrasi (mm)	Gaya (MN)	Penetrasi (mm)	Gaya (MN)	Penetrasi (mm)	Gaya (MN)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	2,100	0,147	7,074	1,619
4	0,000	0,000	7,035	1,344	14,477	3,836

No	V = 1 m/s		V = 2 m/s		V = 3 m/s	
	Penetrasi (mm)	Gaya (MN)	Penetrasi (mm)	Gaya (MN)	Penetrasi (mm)	Gaya (MN)
5	2,048	0,145	11,945	2,822	21,842	6,127
6	4,490	0,679	16,829	4,408	29,168	9,098
7	6,919	1,290	21,687	6,086	36,455	11,240
8	9,335	1,961	26,520	7,529	43,704	13,952
9	11,739	2,706	31,327	9,318	50,914	16,214
10	14,129	3,406	36,107	10,910	58,086	18,905
11	16,507	4,191	40,863	12,434	65,218	21,309
12	18,872	4,959	45,592	14,363	72,313	23,121
13	21,223	5,745	50,296	15,950	79,368	24,701
14	23,562	6,625	54,974	17,519	86,385	26,926
15	25,888	7,395	59,626	18,809	93,363	28,393
16	28,202	7,100	64,252	20,226	100,300	29,173
17	30,502	7,994	68,853	21,752	107,200	30,266
18	32,789	8,659	73,428	22,746	114,070	31,260
19	35,064	9,637	77,977	23,697	120,890	30,304
20	37,325	10,107	82,500	24,792	127,670	30,113
21	39,574	10,597	86,998	25,221	134,420	29,350

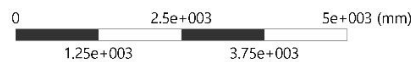
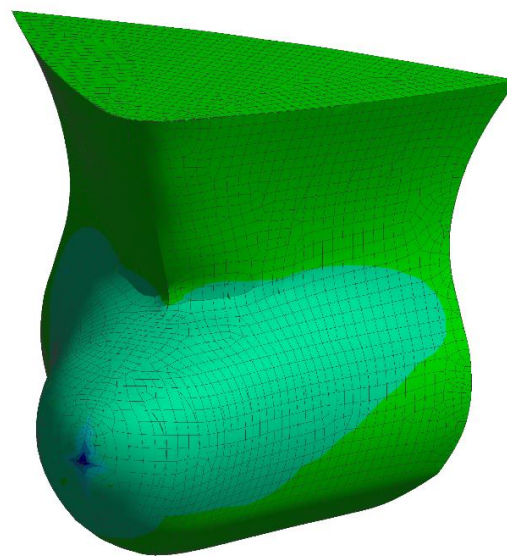
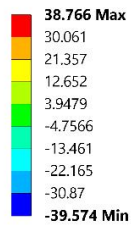
Dari Tabel IV-4 dapat dilihat untuk kecepatan awal 1 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 10,597 MN dengan penetrasi yang terjadi adalah 39,574 mm. Untuk kecepatan awal 2 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 25,221 MN dengan penetrasi 86,998 mm. Kemudian untuk kecepatan awal 3 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 29,35 MN dengan penetrasi 134,42 mm. Dari data yang sudah dihasilkan tersebut dibuat grafik untuk memudahkan analisis yang dapat dilihat pada Gambar IV.9



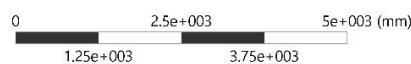
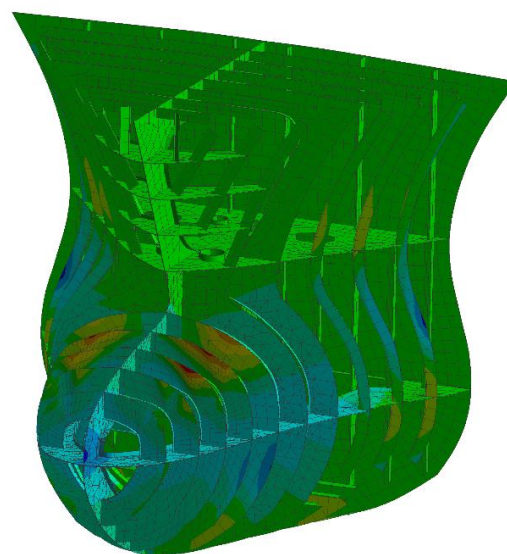
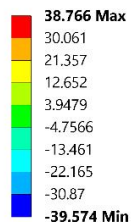
**Gambar IV.9 Kurva Penetrasi-Gaya**

Dalam kasus tubrukan pada haluan ini, terjadi deformasi ke arah sumbu x positif dan negatif. Deformasi ke arah sumbu x negatif merupakan penetrasi yang terjadi pada haluan. Pada Gambar IV.9, sumbu x menunjukkan penetrasi dalam satuan mm dan sumbu y menunjukkan gaya yang terjadi dalam satuan MN. Dari kurva tersebut dapat dilihat bahwa gaya yang terjadi cenderung naik dan nilai paling besar terjadi pada saat kecepatan awal 3 m/s. Namun, ada suatu kondisi saat gaya yang terjadi cenderung konstan, sedangkan penetrasi tetap naik. Ini merupakan suatu kondisi saat konstruksi kapal mempertahankan deformasi, tetapi penetrasi tetap terjadi.

**B: Explicit Dynamics**  
 Directional Deformation 6  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5.e-002  
 Cycle Number: 506957  
 6/22/2019 3:00 PM



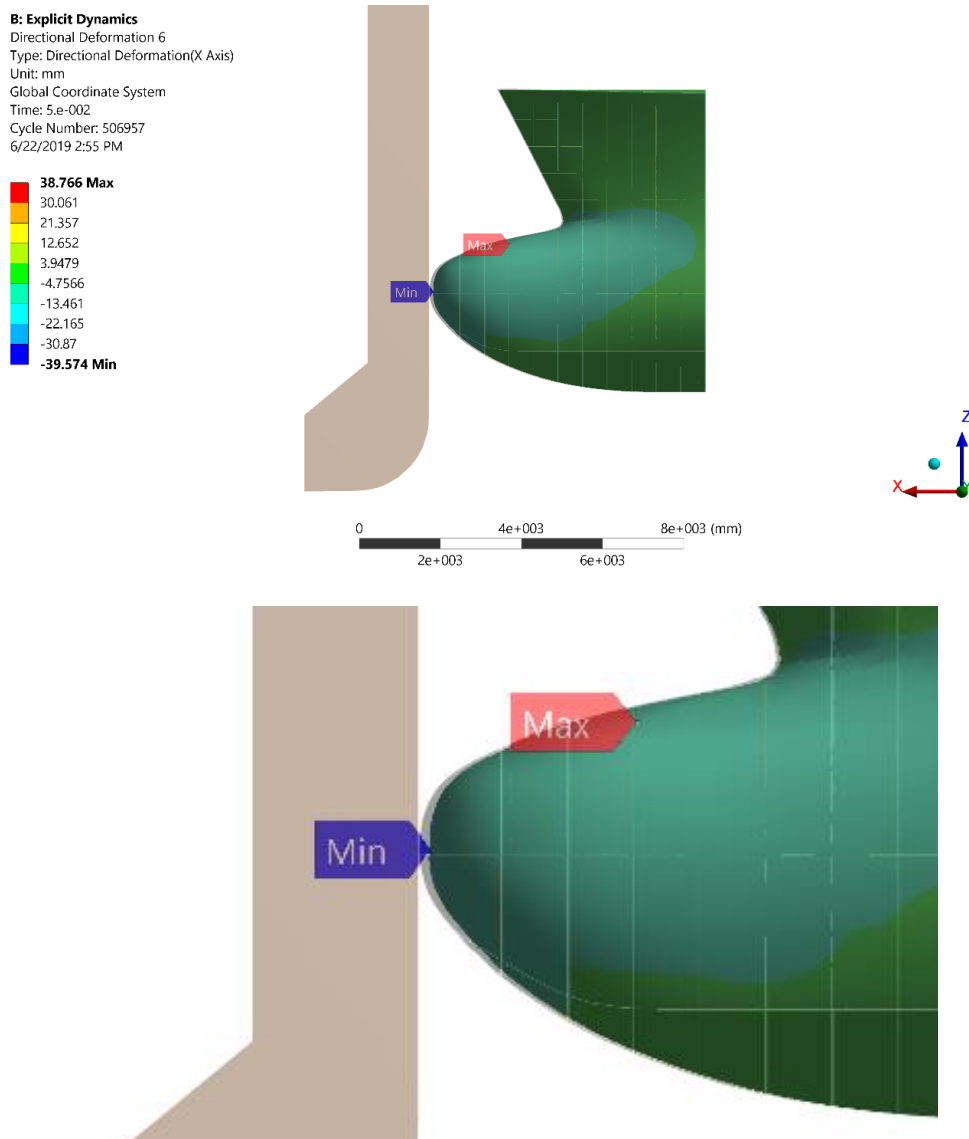
**B: Explicit Dynamics**  
 Directional Deformation 6  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5.e-002  
 Cycle Number: 506957  
 6/22/2019 3:01 PM



**Gambar IV.10 Hasil Deformasi Untuk  $V = 1$  m/s**



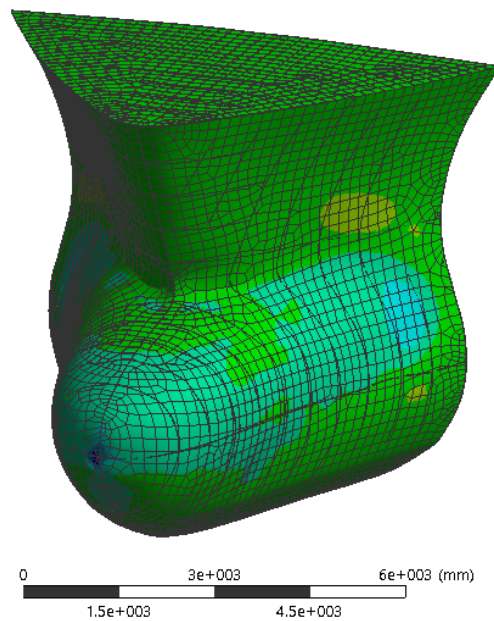
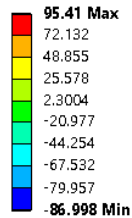
Gambar IV.10 menunjukkan hasil deformasi untuk kecepatan awal 1 m/. Nilai deformasi terkecil ke arah sumbu x negatif adalah 39,574 mm yang merupakan penetrasi di ujung haluan *striking ship*. Untuk kecepatan awal 1 m/s deformasi tidak hanya terjadi pada *bulbousbow*, tetapi juga terjadi pada gading kecil dan gading besar yang ditunjukkan dengan kontur warna biru pada Gambar IV.10. Dari gambar tersebut dapat dilihat deformasi pada gading besar di *frame 74* hingga *frame 80* dan juga pada gading kecil di *frame 71* hingga *frame 73*. Namun, deformasi yang terjadi sangat kecil sehingga tidak terlihat perubahan bentuk dari kondisi semula.



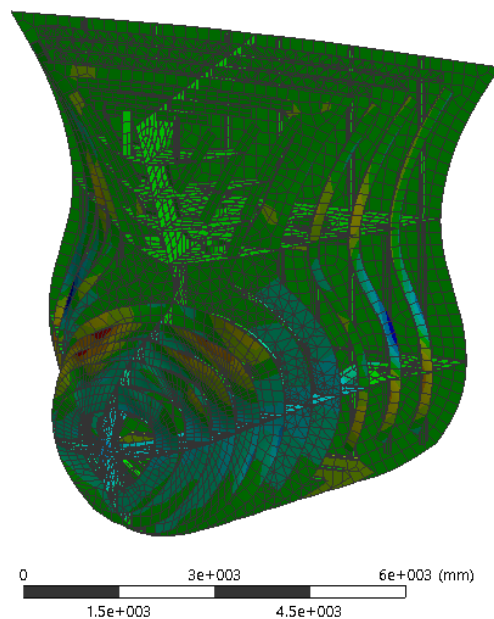
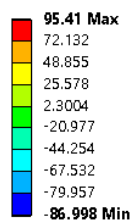
**Gambar IV.11 Perubahan Bentuk Haluan Untuk  $V = 1$  m/s**

Gambar IV.11 menunjukkan perubahan bentuk haluan *striking ship* sebelum dan sesudah tubrukan. Dari gambar tersebut, perubahan bentuk haluan kapal tidak begitu terlihat karena haluan kapal mengalami perubahan ke arah sumbu x negatif hanya sebesar 39,574 mm.

**B: Explicit Dynamics**  
 Directional Deformation 3  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5.e-002  
 Cycle Number: 511611  
 6/22/2019 3:37 PM

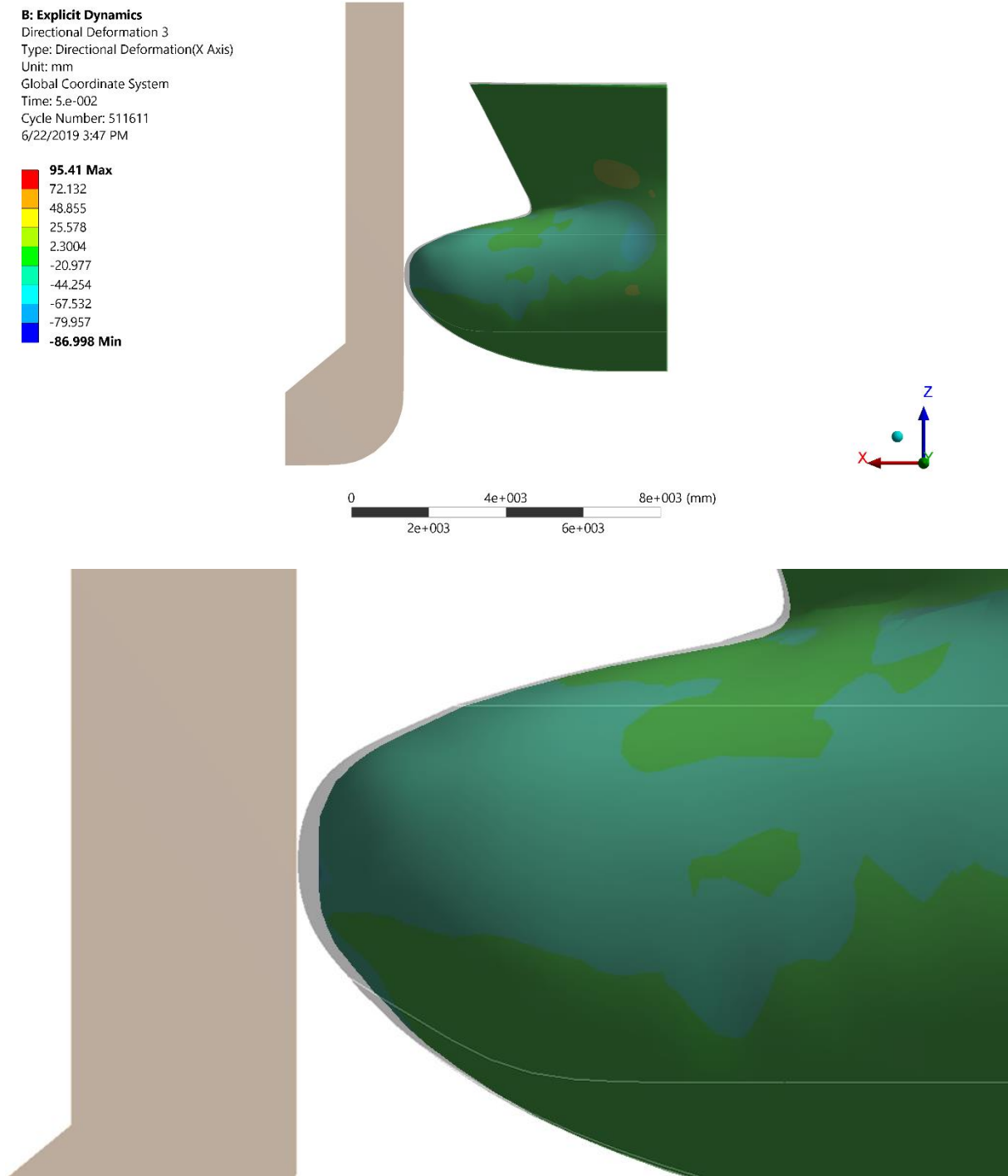


**B: Explicit Dynamics**  
 Directional Deformation 4  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5.e-002  
 Cycle Number: 511611  
 6/22/2019 3:36 PM



**Gambar IV.12 Hasil Deformasi Untuk  $V = 2$  m/s**

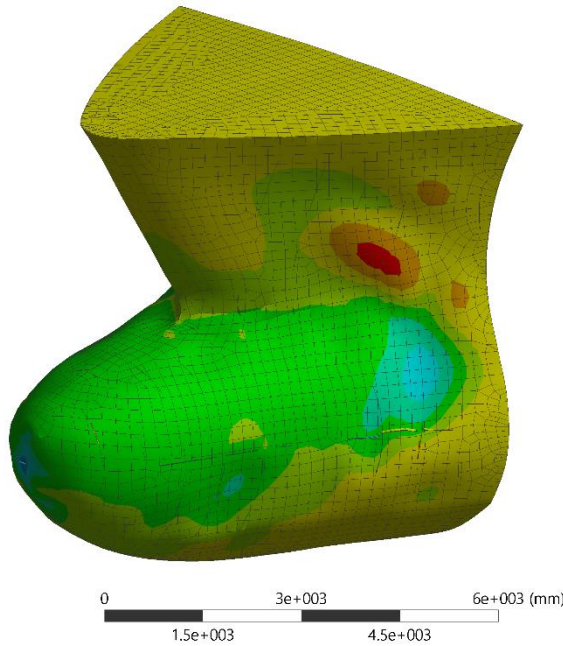
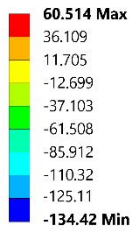
Gambar IV.12 memperlihatkan hasil deformasi untuk kecepatan awal 2 m/s. Nilai deformasi terkecil ke arah sumbu x negatif adalah 86,998 mm yang merupakan penetrasi pada ujung haluan *striking ship*. Dari gambar tersebut juga dapat dilihat deformasi yang terjadi pada konstruksi bagian *horizontal web girder* yang berada pada 2400 mm di atas *baseline* yang berupa lipatan. Lipatan tersebut terjadi akibat beban aksial yang diterima ujung haluan kapal searah dengan arah konstruksi *horizontal web girder*. Dari gambar juga dapat dilihat terdapat deformasi ke arah sumbu x positif yang ditunjukkan dengan kontur warna merah. Namun, hanya sedikit bagian konstruksi yang mengalami deformasi ke arah sumbu x.



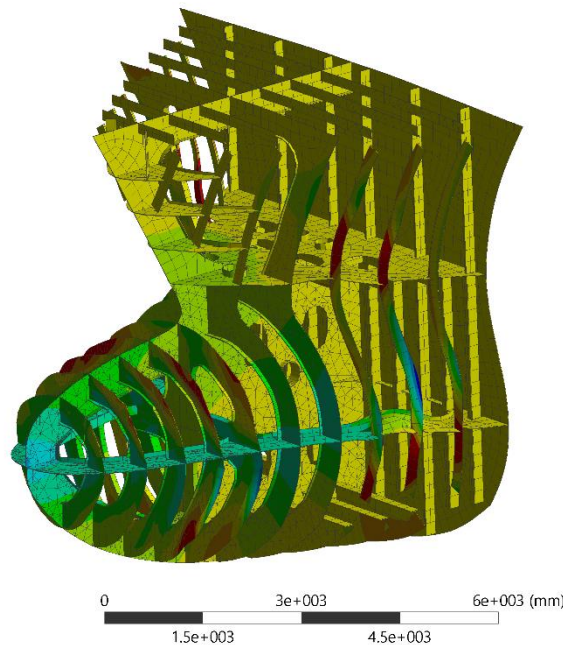
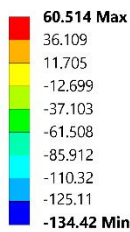
**Gambar IV.13 Perubahan Bentuk Haluan Untuk  $V = 2 \text{ m/s}$**

Gambar IV.11 menunjukkan perubahan bentuk haluan *striking ship* sebelum dan sesudah tubrukan. Dari gambar tersebut, perubahan bentuk haluan kapal cukup terlihat. Haluan kapal terlihat tertekan mundur ke arah sumbu x negatif sebesar 86,998 mm.

**B: Explicit Dynamics**  
 Directional Deformation 3  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5.e-002  
 Cycle Number: 930394  
 6/22/2019 12:18 PM



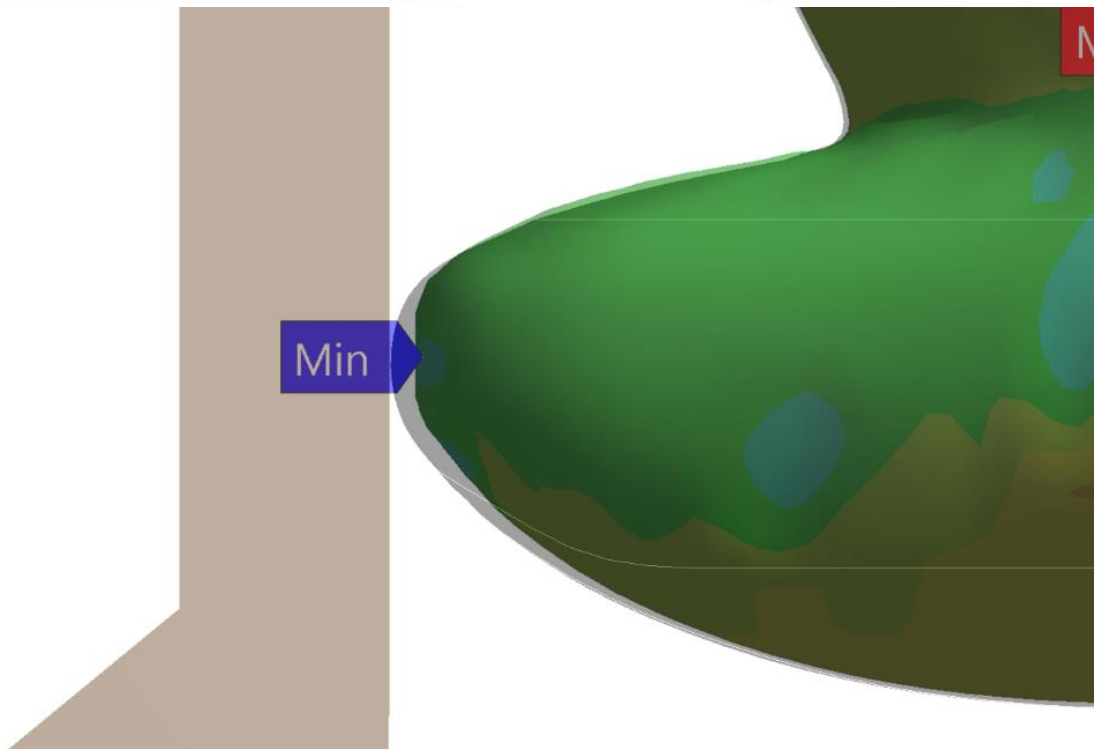
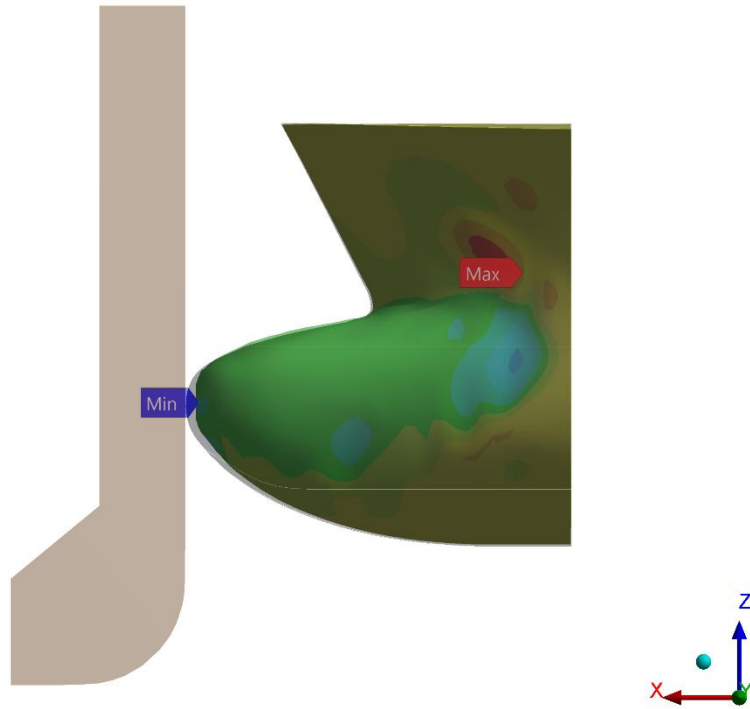
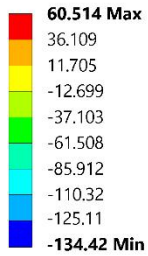
**B: Explicit Dynamics**  
 Directional Deformation 3  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 5.e-002  
 Cycle Number: 930394  
 6/22/2019 12:18 PM



**Gambar IV.14 Hasil Deformasi Untuk  $V = 3$  m/s**

Gambar IV.14 menunjukkan hasil deformasi untuk kecepatan awal 3 m/s. Nilai deformasi terkecil ke arah sumbu x negatif adalah 134,42 mm yang merupakan penetrasi di ujung haluan kapal *striking ship*. Dari gambar di atas juga dapat dilihat deformasi konstruksi di bagian *horizontal web girder* yang berada pada 2400 mm di atas *baseline* yang berupa lipatan. Lipatan tersebut terjadi akibat beban aksial yang diterima ujung haluan kapal searah dengan arah konstruksi *horizontal web girder*. Dari gambar juga dapat dilihat terdapat deformasi ke arah sumbu x positif yang ditunjukkan dengan kontur warna merah.

**B: Explicit Dynamics**  
Directional Deformation 3  
Type: Directional Deformation(X Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 5.e-002  
Cycle Number: 930394  
6/22/2019 12:18 PM



**Gambar IV.15 Perubahan Bentuk Haluan Untuk  $V = 3 \text{ m/s}$**

Gambar IV.15 menunjukkan perubahan bentuk haluan *striking ship* sebelum dan sesudah tubrukan. Dari gambar tersebut, haluan kapal terlihat tertekan ke arah sumbu x negatif lebih besar dari hasil deformasi untuk kecepatan awal 2 m/s. Haluan kapal mengalami deformasi ke arah sumbu x negatif sejauh 134,42 mm.

### IV.3. Komparasi Hasil

Salah satu variabel yang dihasilkan dari simulasi tubrukan menggunakan FEM adalah penetrasi. Nilai penetrasi ini kemudian dibandingkan dengan nilai yang dihasilkan dari perhitungan analitis. Nilai yang dibandingkan merupakan nilai penetrasi terbesar, yaitu pada waktu 0,05 detik untuk masing-masing kecepatan awal. Perbandingan nilai tersebut ditampilkan pada Tabel IV-5.

**Tabel IV-5 Perbandingan Nilai Penetrasi**

Kecepatan (m/s)	Penetrasi (mm)		Margin (%)
	Metode Analitis	FEM	
1	47,423	39,574	19,83%
2	94,846	86.998	9,02%
3	142,270	134,420	5,84%

Pada tabel di atas dapat dilihat perbedaan besar penetrasi untuk kecepatan 1 m/s adalah sebesar 19,83%; untuk kecepatan 2 m/s sebesar 9,02%; dan untuk kecepatan 3 m/s sebesar 5,84%. Nilai penetrasi yang dihasilkan menggunakan simulasi FEM cenderung lebih kecil dibandingkan dengan perhitungan analisis. Hal ini dikarenakan formula yang digunakan untuk perhitungan analisis merupakan formula perhitungan perpindahan jarak tanpa hambatan, sedangkan simulasi tubrukan menggunakan FEM merupakan kondisi benda bergerak yang mengalami hambatan oleh benda lain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **V.1. Kesimpulan**

Setelah dilakukan analisis dan pembahasan mengenai tegangan haluan kapal akibat tubrukan menggunakan simulasi FEM maka dihasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Haluan kapal *striking ship* menerima beban yang besar dalam waktu tubrukan yang singkat. Semakin tinggi kecepatan maka semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai tegangan *ultimate*. Untuk kecepatan awal 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s tegangan mencapai *ultimate strength* masing-masing pada sekitar waktu 0,018 detik; 0,009 detik; dan 0,0056 detik. Pada waktu tersebut, haluan kapal sudah mengalami deformasi plastis dan tidak dapat kembali ke bentuk semula.
2. Struktur konstruksi haluan kapal menyerap *Internal Energy* pada waktu 0,05 detik untuk kecepatan 1 m/s; 2 m/s; dan 3 m/s sebesar 118,01 KJ; 672,39 KJ; dan 1501,3 KJ. Semakin besar kecepatan awal maka semakin besar *internal energy* yang diserap. Karena *internal energy* merupakan nilai energi kinetik yang hilang saat tubrukan.
3. Haluan kapal juga menerima gaya dan menghasilkan deformasi penetrasi. Gaya maksimal yang dihasilkan pada waktu 0,05 detik untuk kecepatan awal 1 m/s adalah 10,597 MN dengan penetrasi yang terjadi adalah 39,574 mm. Untuk kecepatan awal 2 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 25,221 MN dengan penetrasi 86,998 mm. Kemudian untuk kecepatan awal 3 m/s, nilai gaya maksimal yang dihasilkan adalah 29,35 MN dengan penetrasi 134,42 mm. Kondisi saat gaya yang terjadi cenderung konstan, sedangkan nilai penetrasi tetap naik merupakan suatu kondisi saat konstruksi kapal mempertahankan kedudukan deformasinya.



## V.2. Saran

Pada penelitian ini ada beberapa hal yang belum diperhitungkan sehingga dapat dijadikan saran untuk tujuan perbaikan dan pengembangan pada penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Menggunakan variasi sudut tubrukan
2. *Side hull* agar didefinisikan sebagai *deformable*, melainkan *rigid body* agar bisa menggunakan variasi perbedaan lokasi tubrukan.
3. Menggunakan *software* FEM lain yang lebih memadai
4. Menggunakan input tambahan yang dapat merepresentasikan berat kapal sesungguhnya

## DAFTAR PUSTAKA

- Allianz Global Corporate & Specialty. (2017). *Safety and Shipping Review*. Allianz Global Corporate Specialty.
- ASTM A370. (2004). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. New York: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2014). *Rules for The Classification and Construction Of Seagoing Steel Ships Vol. 2*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia.
- Goldsmith, W. (1960). *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids Dover Publications*. London: Edward Arnold LTD.
- Haris, S., & Amdahl, J. (2013). Analysis of Ship-Ship Collision Damage Accounting for Bow and Side Deformation Interaction. *Marine Structures*, 31.
- Hasanudin, H., Aryawan, W. D., Zubaydi, A., & Putranto, T. (2017). Dynamics Finite Element for Ship Damage Collision Analysis. *IPTEK Journal of Proceedings Series*.
- Hibeller, R. (1997). *Mechanics of Material, Third Edition*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Hoque, K. N. (2013). *Thesis. Analysis of Structural Discontinuities in Ship Hull Using Finite Element Method*. Bangladesh: Bangladesh University of Engineering and Technology.
- IACS. (2014). *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tanker*. IACS.
- International Maritime Organization (IMO). (Consolidated Edition 2009). *International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, as amended (Solas 1974)*. London: IMO Publishing.
- IOPCF. (2006). International Regime for Compensation for Oil Pollution Damage. *International Oil Pollution Compensatoin Funds*.
- Jones, N., & Wierzbicki, T. (1983). *Structural Crashworthiness*. Butterworth & Co. (Publisher) Ltd.
- K. Wisniewski, P. K. (2002). The Effect of Selected Parameters on Ship Collision Results by Dynamic FE Simulations. *Finite Elem. Anal*, 985-1006.
- Kim, J. Y. (2000). *Analysis of Bow Crushing in Ship Collision*. Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology.

- Kitamura, O. (1996). Comparative Study on Collision Resistance of Side Structure. *International Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships*. San Fransisco.
- McGill, D. J., & King, W. W. (1995). *Engineering Mechanics : An Introduction to Dynamics*. PWS Pub. Co.
- Minorsky, V. (1959). An Analysis of Ship Collision with Reference to Protection of Nuclear Power Ships. *Journal Of Ship Research*.
- Nave, C. (2010). Elastic and inelastic collisions. *Hyperphysics*.
- Pedersen, P., Valsgaard, S., Olsen, D., & Spangenberg, S. (1993). Ship Impacts: Bow Collisions. *International J. of Impact Engineering, Vol. 13, No. 2*, 163-187.
- Popov, E. (1978). *Mechanics of Material*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Singer, F., & Pytel, A. (1995). *Ilmu Kekuatan Bahan (Teori Kokoh-Strength of Material) (alih bahasa Darwin Sebayang) Edisi II*. Jakarta: Erlangga.
- Timoshenko, S. (1980). *Strength of Material. Edisi Kedua*. New York: D. Van Nostrad Company Inc.
- Weaver, J. W., & Johnston, P. R. (1993). *Finite Element Analysis (Elemen Hingga untuk Analisa Struktur). Terjemahan oleh Markus Rubijanto Kusuma*. Bandung: PT Eresco.
- Woisin, G. (1979). *Design Against Collision*. Germany.
- Zhang, S. (1999). *The Mechanics of Ship Collisions*. Lyngby: Department of Naval Architecture and Offshore Engineering Technical University of Denmark.
- Zhang, S., Ocakli, H., & Pedersen, P. (2004). Crushing of Ship Bows In Head-On Collision. *International Journal of Maritime Engineering*.

## **LAMPIRAN**

LAMPIRAN A PERHITUNGAN *MAXIMUM BOW COLLISION LOAD*

LAMPIRAN B PERHITUNGAN *END TIME*

LAMPIRAN C PERHITUNGAN KEDALAMAN PENETRASI

LAMPIRAN D HASIL TEGANGAN UNTUK KECEPATAN 1 M/S

LAMPIRAN E HASIL TEGANGAN UNTUK KECEPATAN 2 M/S

LAMPIRAN F HASIL TEGANGAN UNTUK KECEPATAN 3 M/S

**LAMPIRAN A**  
**PERHITUNGAN *MAXIMUM BOW COLLISION LOAD***

Main Dimention			Perhitungan <i>Maximum Bow Collision Load</i>	
LoA	90	m	V	= 1 m/s
LbP	84	m		
Lwl	87.36	m	Po	= 210 MN
B	15.2	m		
D	7.2	m	mx	= Ship mass + Added Mass
T	5	m		= 5580722.347 Kg
Cb	0.781			
Δ	5314.974	Ton	Eimp	= 1/2 x mx x V0^2
				= 2790361.174 J
				= 2.790361174 MJ
			Ēimp	= Eimp/1425
				0.001958148 MNm
			L̄	= Lpp/275
				0.305454545 m
			L̄^2.6	= 0.045799543 m
			$P_{bow} = \begin{cases} P_0 \cdot L [\bar{E}_{imp} + (5 - L) \bar{L}^{1.6}]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} \geq \bar{L}^{2.6} \\ 2.24 \cdot P_0 [\bar{E}_{imp} \bar{L}]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6} \end{cases}$	
			Pbow	= 11.50438447 MN
				11504384.47 N

Perhitungan *Maximum Bow Collision Load*

V = 2 m/s

Po = 210 MN

mx = Ship mass + Added Mass  
= 5580722 Kg

Eimp = 1/2 x mx x V0^2  
= 11161445 J  
= 11.16144 MJ

Ēimp = Eimp/1425  
= 0.007833 MNm

L̄ = Lpp/275  
= 0.305455 m

L̄^2.6 = 0.0458 m

$$f_{bow} = \begin{cases} P_0 \cdot L [\bar{E}_{imp} + (5 - L) L^{1.6}]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} \geq L^{2.6} \\ 2.24 \cdot P_0 [\bar{E}_{imp} L]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} < L^{2.6} \end{cases}$$

Pbow = 23.00877 MN  
= 23008769 N

Perhitungan Maximum Bow Collision Load

$$V = 3 \text{ m/s}$$

$$P_0 = 210 \text{ MN}$$

$$m_x = \text{Ship mass + Added Mass}$$

$$= 5580722 \text{ Kg}$$

$$E_{imp} = 1/2 \times m_x \times V_0^2$$

$$= 25113251 \text{ J}$$

$$= 25.11325 \text{ MJ}$$

$$\bar{E}_{imp} = E_{imp}/1425$$

$$= 0.017623 \text{ MNm}$$

$$\bar{L} = L_{pp}/275$$

$$= 0.305455 \text{ m}$$

$$\bar{L}^{2.6} = 0.0458 \text{ m}$$

$$P_{bow} = \begin{cases} P_0 \cdot \bar{L} [\bar{E}_{imp} + (5 - \bar{L}) \bar{L}^{1.6}]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} \geq \bar{L}^{2.6} \\ 2.24 \cdot P_0 [\bar{E}_{imp} \bar{L}]^{0.5}, & \bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6} \end{cases}$$

$$P_{bow} = 34.51315 \text{ MN}$$

$$= 34513153 \text{ N}$$



**LAMPIRAN B**  
**PERHITUNGAN END TIME**

**WAKTU YANG DIBUTUHKAN HINGGA KECEPATAN KAPAL 0 M/S**

End Time Calculation					
$M_A$	=	5580722	Kg	$V_{B1}$	= 0 m/s
$V_{A1}$	=	1	m/s	$V_{B2}$	= 0 m/s
$V_{A2}$	=	0			
F	=	11504384	N		
$\Delta p$	=	[[ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ] - [ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ]]			
F. $\Delta t$	=	[[ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ] - [ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ]]			
$\Delta t$	=	[[ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ] - [ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ]]/F			
	=	0.485095 s			
End Time Calculation					
$M_A$	=	5580722	Kg	$V_{B1}$	= 0 m/s
$V_{A1}$	=	2	m/s	$V_{B2}$	= 0 m/s
$V_{A2}$	=	0			
F	=	23008769	N		
$\Delta p$	=	[[ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ] - [ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ]]			
F. $\Delta t$	=	[[ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ] - [ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ]]			
$\Delta t$	=	[[ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ] - [ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ]]/F			
	=	0.485095 s			
End Time Calculation					
$M_A$	=	5580722	Kg	$V_{B1}$	= 0 m/s
$V_{A1}$	=	3	m/s	$V_{B2}$	= 0 m/s
$V_{A2}$	=	0			
F	=	34513153	N		
$\Delta p$	=	[[ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ] - [ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ]]			
F. $\Delta t$	=	[[ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ] - [ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ]]			
$\Delta t$	=	[[ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ] - [ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ]]/F			
	=	0.485095 s			

**KECEPATAN SAAT 0,05 DETIK**

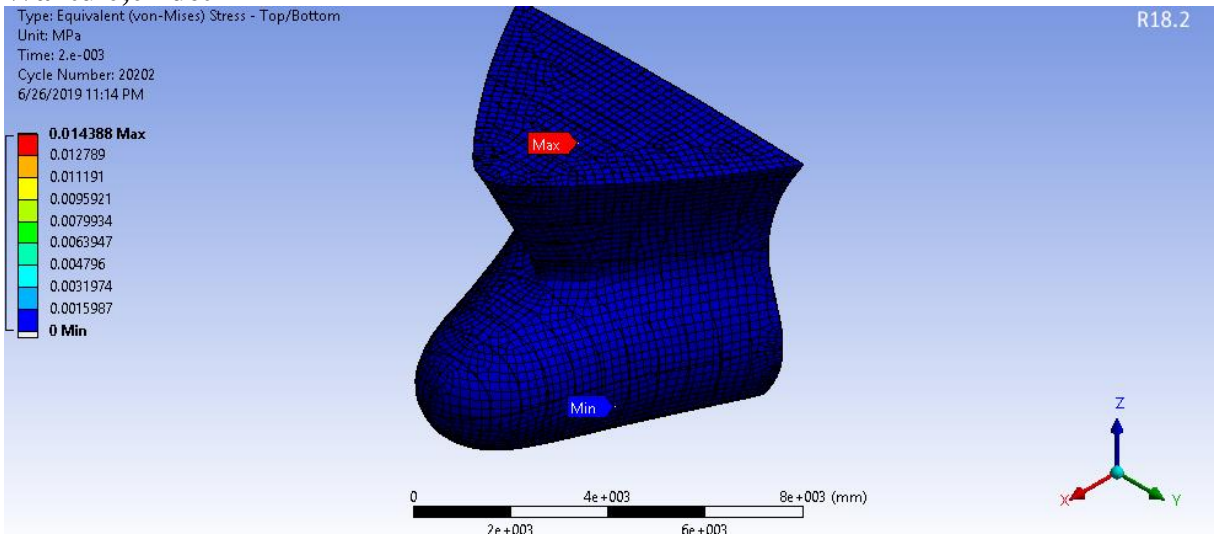
Velocity at 0,05 s					
$M_A$	=	5580722	Kg	$V_{B1}$	= 0 m/s
$V_{A1}$	=	1	m/s	$V_{B2}$	= 0 m/s
$\Delta t$	=	0.05	s		
F	=	11504384	N		
F. $\Delta t$	=	[[ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ] - [ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ]]			
	=	$(M_A V_{A2}) - (M_A V_{A1})$			
$V_{A2}$	=	[F. $\Delta t + (M_A V_{A1})$ ] / $M_A$			
	=	0.896927			
Velocity at 0,05 s					
$M_A$	=	5580722	Kg	$V_{B1}$	= 0 m/s
$V_{A1}$	=	2	m/s	$V_{B2}$	= 0 m/s
$\Delta t$	=	0.05	s		
F	=	23008769	N		
F. $\Delta t$	=	[[ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ] - [ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ]]			
	=	$(M_A V_{A2}) - (M_A V_{A1})$			
$V_{A2}$	=	[F. $\Delta t + (M_A V_{A1})$ ] / $M_A$			
	=	1.793855			
Velocity at 0,05 s					
$M_A$	=	5580722	Kg	$V_{B1}$	= 0 m/s
$V_{A1}$	=	3	m/s	$V_{B2}$	= 0 m/s
$\Delta t$	=	0.05	s		
F	=	34513153	N		
F. $\Delta t$	=	[[ $(M_A V_{A2}) + (M_B V_{B2})$ ] - [ $(M_A V_{A1}) + (M_B V_{B1})$ ]]			
	=	$(M_A V_{A2}) - (M_A V_{A1})$			
$V_{A2}$	=	[F. $\Delta t + (M_A V_{A1})$ ] / $M_A$			
	=	2.690782			

**LAMPIRAN C**  
**PERHITUNGAN KEDALAMAN PENETRASI**

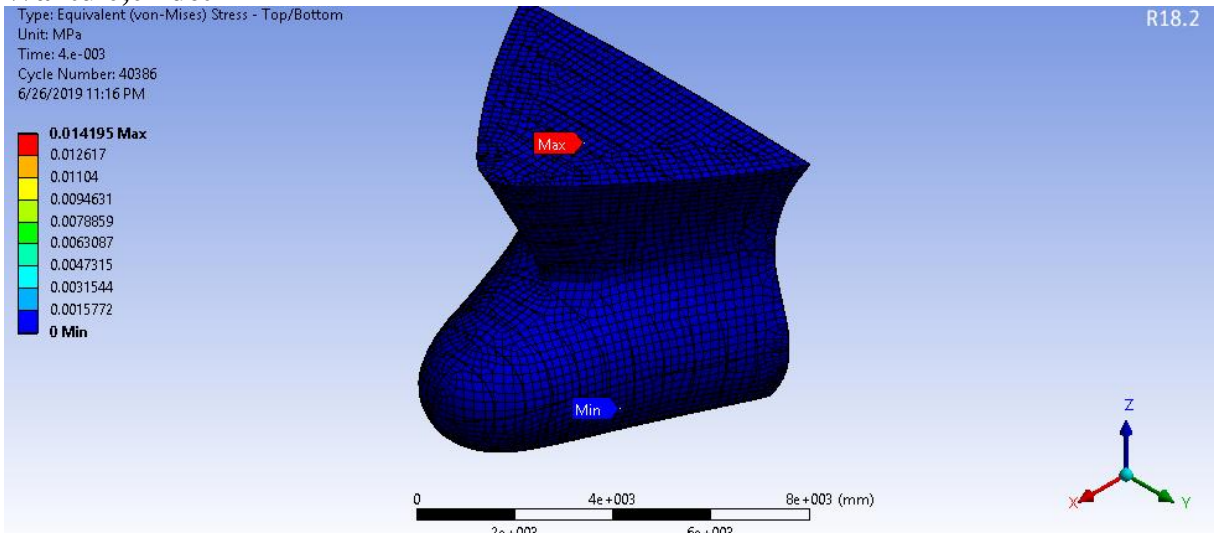
Displacement Calculation		
$M_A$	=	5580722 Kg
$V_{A1}$	=	1 m/s
$V_{A2}$	=	0.896927
$F$	=	11504384 N
$\Delta Ek$	=	W
$F \cdot \Delta s$	=	$0.5M_A V_{A2}^2 - 0.5M_A V_{A1}^2$
$\Delta s$	=	$[0.5M_A V_{A2}^2 - 0.5M_A V_{A1}^2]/F$
$\Delta s$	=	-0.04742
Displacement Calculation		
$M_A$	=	5580722 Kg
$V_{A1}$	=	2 m/s
$V_{A2}$	=	1.793855
$F$	=	23008769 N
$\Delta Ek$	=	W
$F \cdot \Delta s$	=	$0.5M_A V_{A2}^2 - 0.5M_A V_{A1}^2$
$\Delta s$	=	$[0.5M_A V_{A2}^2 - 0.5M_A V_{A1}^2]/F$
$\Delta s$	=	-0.09485
Displacement Calculation		
$M_A$	=	5580722 Kg
$V_{A1}$	=	3 m/s
$V_{A2}$	=	2.690782
$F$	=	34513153 N
$\Delta Ek$	=	W
$F \cdot \Delta s$	=	$0.5M_A V_{A2}^2 - 0.5M_A V_{A1}^2$
$\Delta s$	=	$[0.5M_A V_{A2}^2 - 0.5M_A V_{A1}^2]/F$
$\Delta s$	=	-0.14227

**LAMPIRAN D**  
**HASIL TEGANGAN UNTUK KECEPATAN 1 M/S**

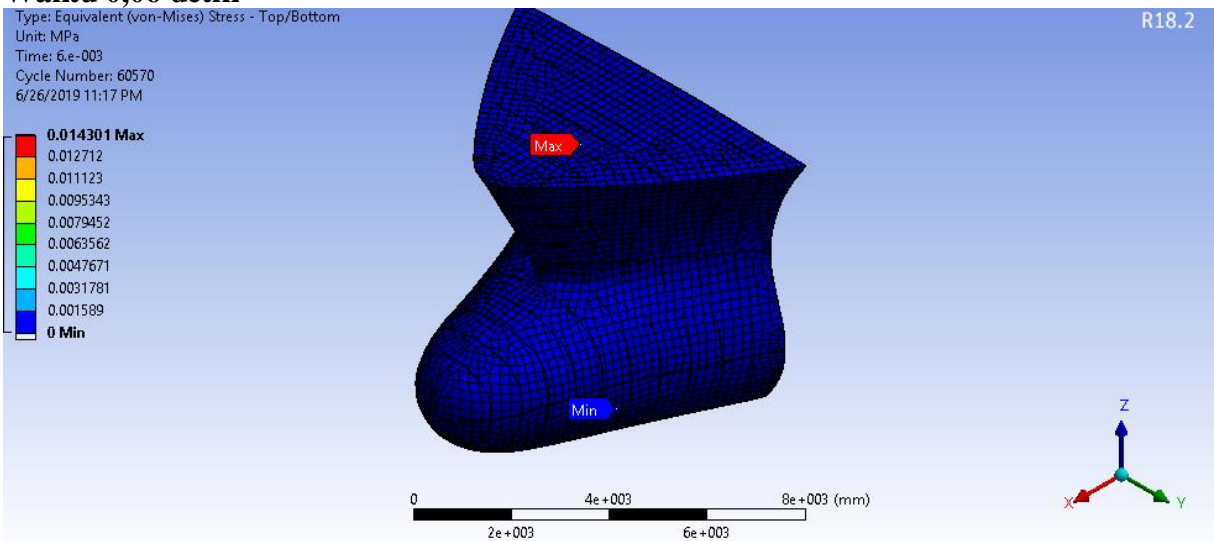
### Waktu 0,02 detik



### Waktu 0,04 detik



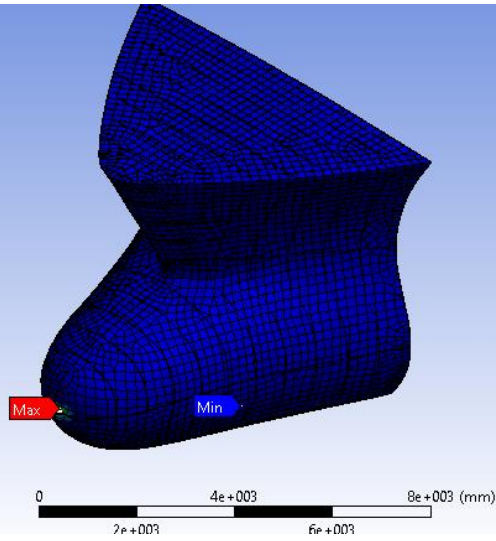
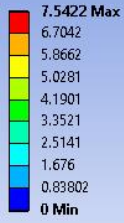
### Waktu 0,06 detik



### Waktu 0,08 detik

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 8.e-003  
Cycle Number: 80754  
6/26/2019 11:19 PM

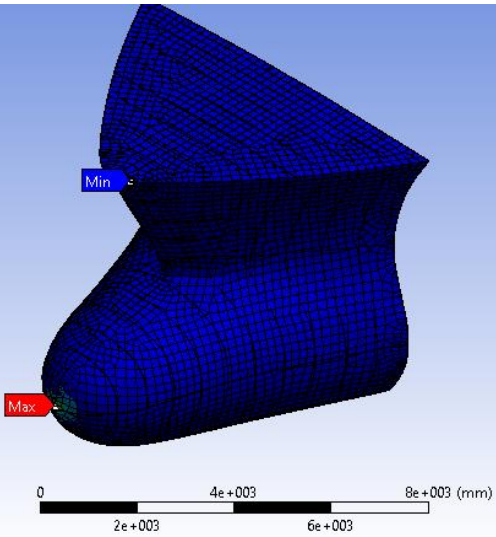
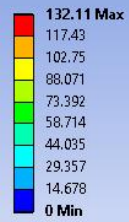
R18.2



### Waktu 0,01 detik

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1.e-002  
Cycle Number: 100938  
6/26/2019 11:20 PM

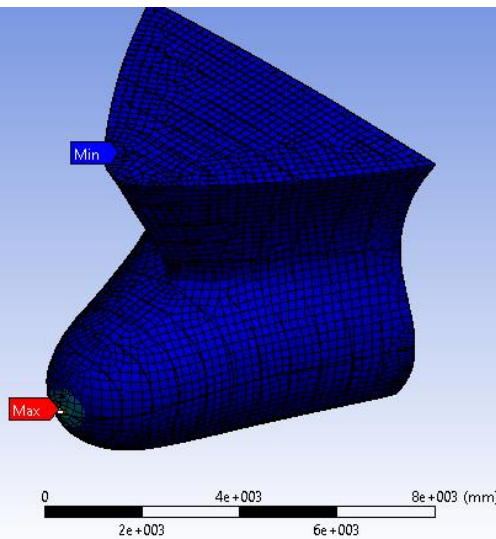
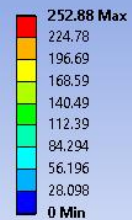
R18.2



### Waktu 0,012 detik

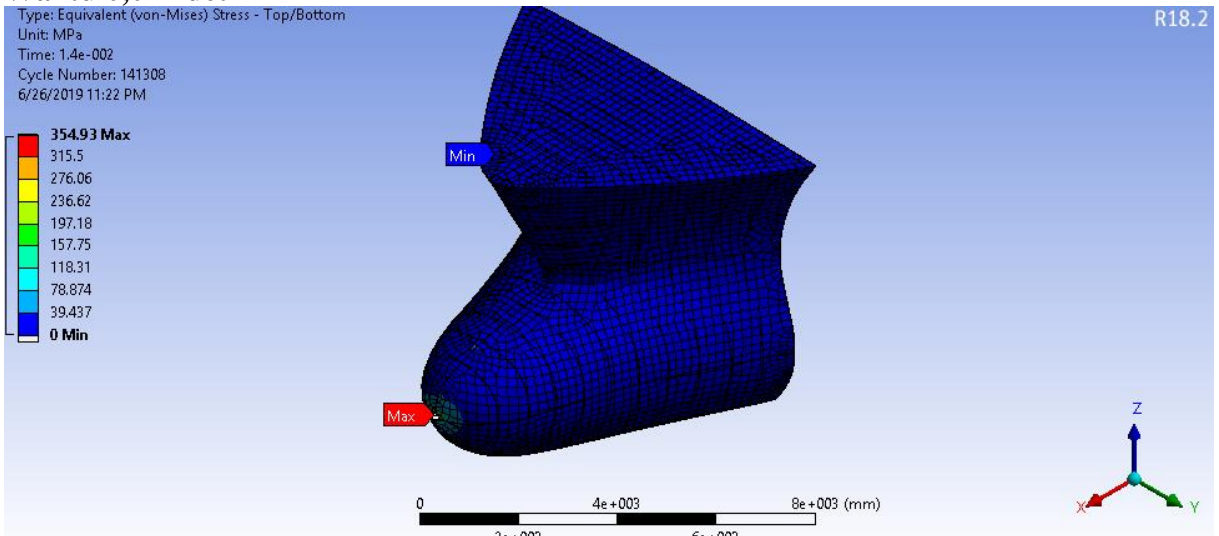
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1.2e-002  
Cycle Number: 121122  
6/26/2019 11:20 PM

R18.2

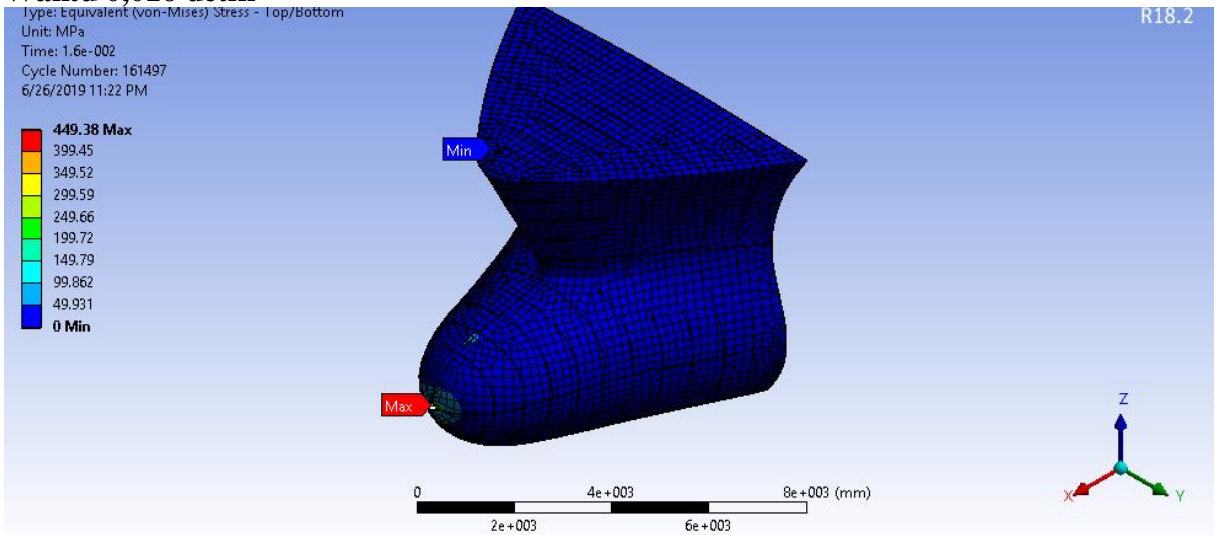




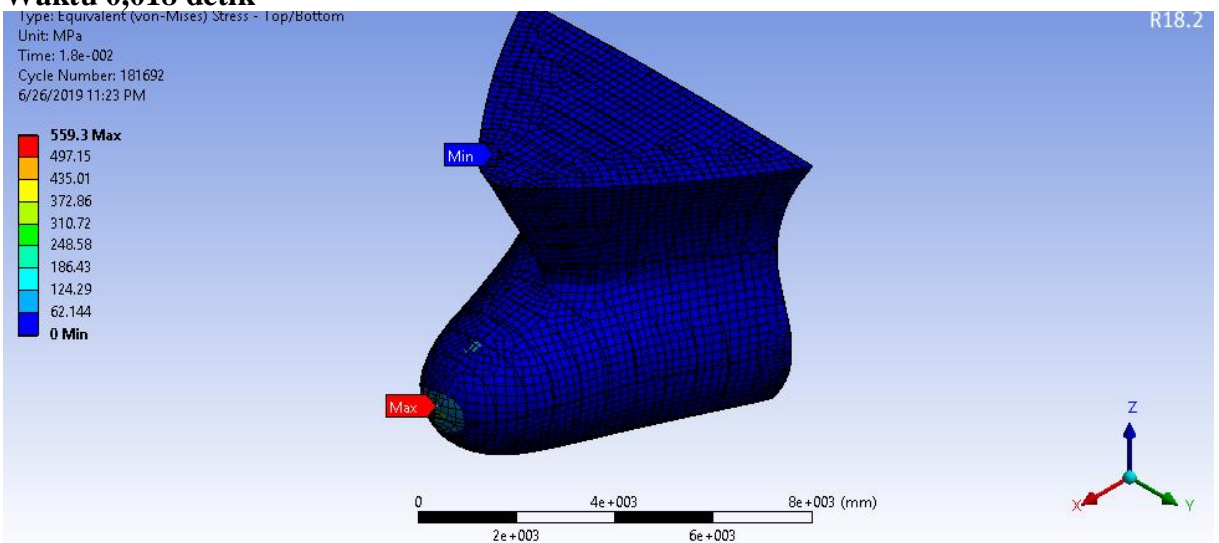
### Waktu 0,014 detik



### Waktu 0,016 detik



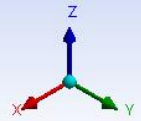
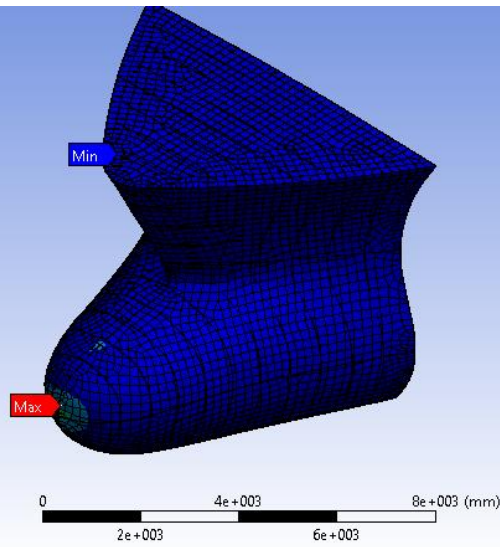
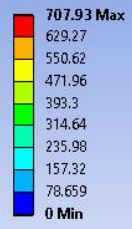
### Waktu 0,018 detik



# Waktu 0,02 detik

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 2.e-002  
Cycle Number: 201893  
6/26/2019 11:27 PM

R18.2

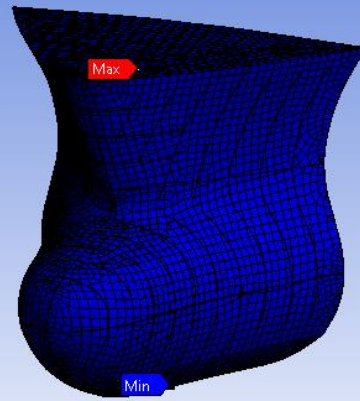
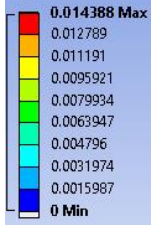


**LAMPIRAN E**  
**HASIL TEGANGAN UNTUK KECEPATAN 2 M/S**

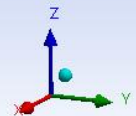
## Waktu 0,02 detik

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 2.e-003  
Cycle Number: 20202  
6/26/2019 11:39 PM

R18.2



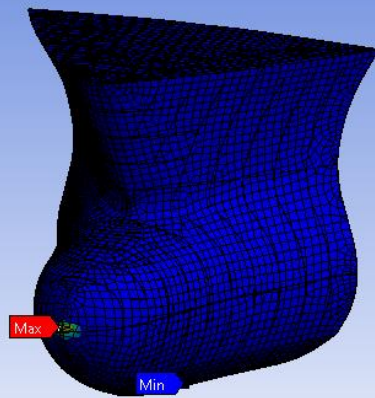
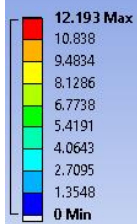
0 4e+003 8e+003 (mm)



## Waktu 0,04 detik

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 4.e-003  
Cycle Number: 40386  
6/26/2019 11:40 PM

R18.2



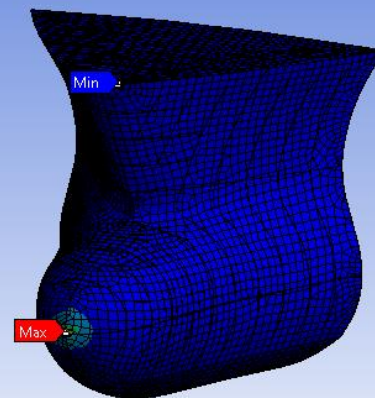
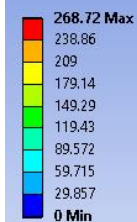
0 4e+003 8e+003 (mm)



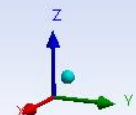
## Waktu 0,06 detik

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 6.e-003  
Cycle Number: 60570  
6/26/2019 11:40 PM

R18.2



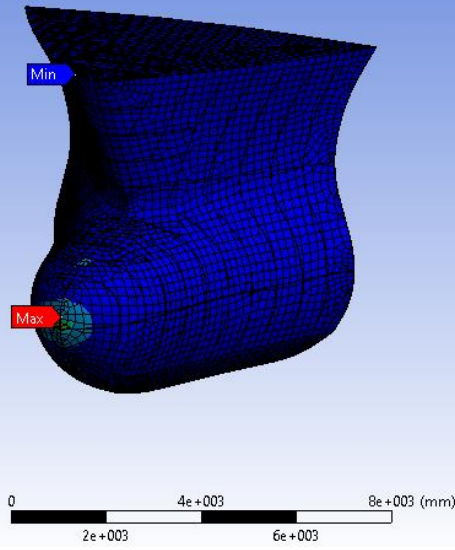
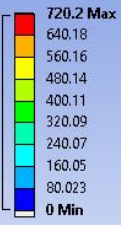
0 4e+003 8e+003 (mm)



## Waktu 0,08 detik

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1.e-002  
Cycle Number: 100947  
6/26/2019 11:42 PM

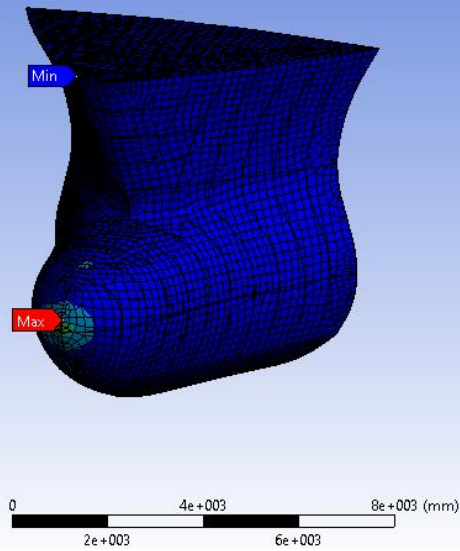
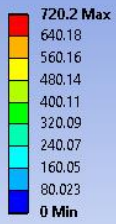
R18.2



## Waktu 0,01 detik

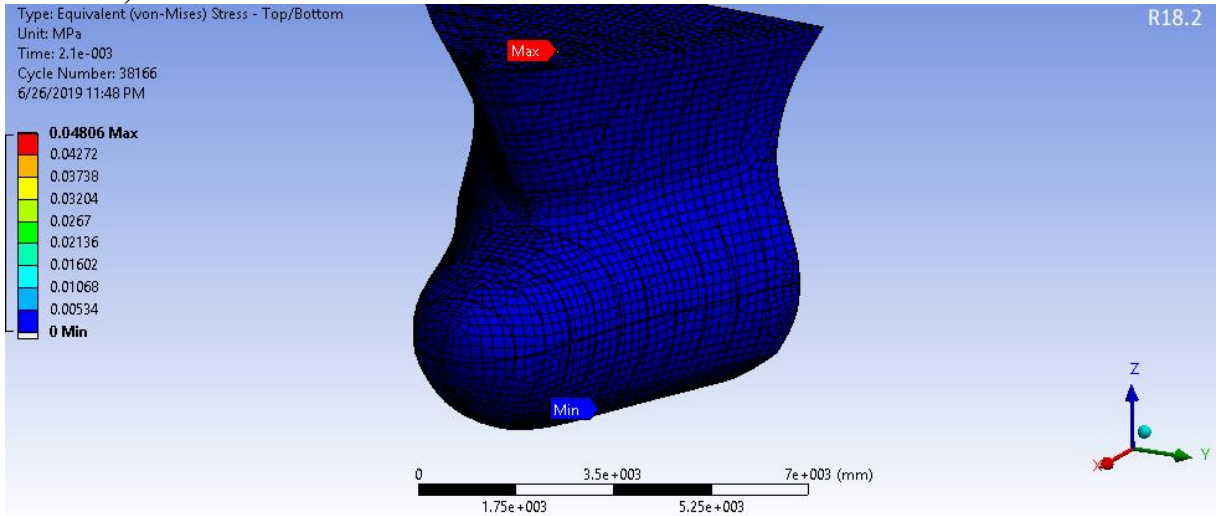
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1.e-002  
Cycle Number: 100947  
6/26/2019 11:42 PM

R18.2

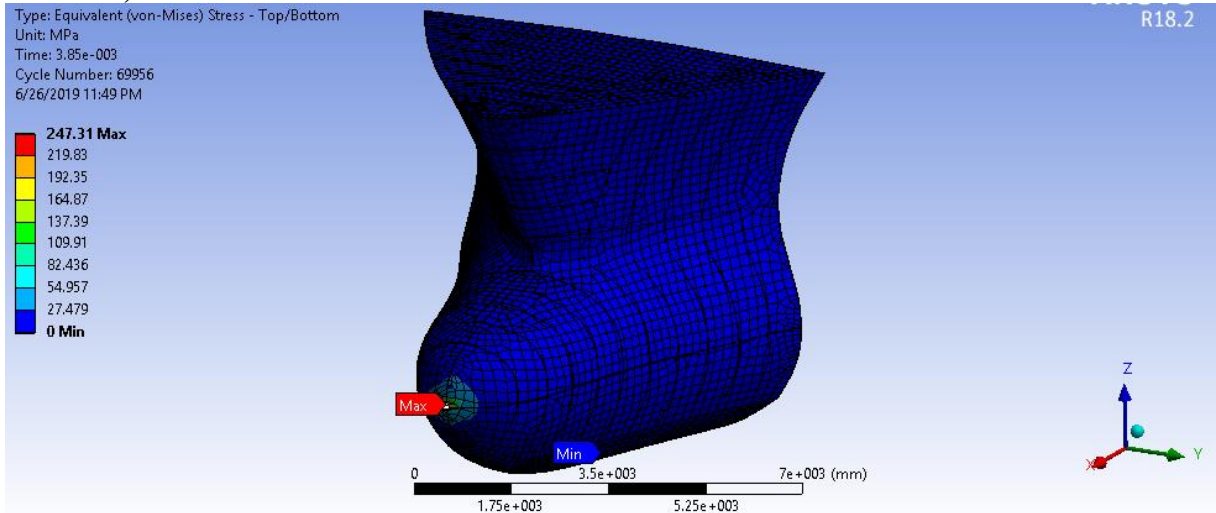


**LAMPIRAN F**  
**HASIL TEGANGAN UNTUK KECEPATAN 3 M/S**

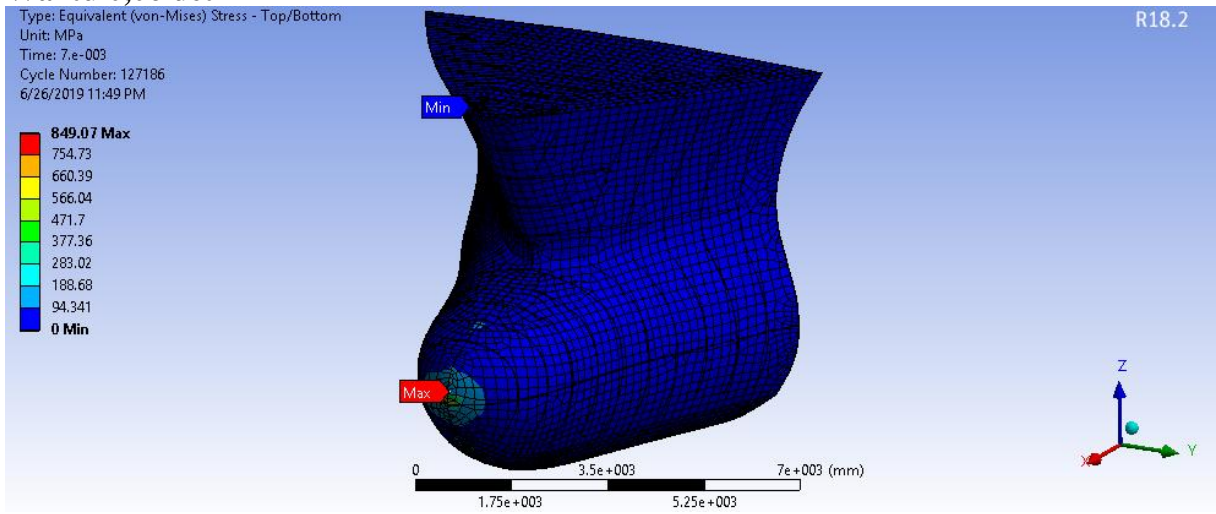
### Waktu 0,02 detik



### Waktu 0,04 detik



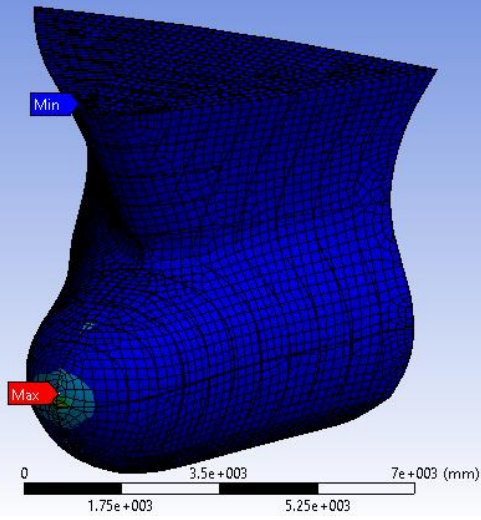
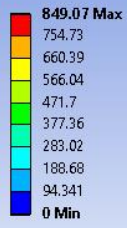
### Waktu 0,06 detik



# Waktu 0,07 detik

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 7.e-003  
Cycle Number: 127186  
6/26/2019 11:51 PM

R18.2





## BIODATA PENULIS



Nur Ahmad Dzikron, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Bekasi pada 18 April 1997 silam, Penulis merupakan anak ketiga dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Bahrul Ulum, kemudian melanjutkan ke SD Bani Saleh 5, SMPN 3 Kota Bekasi dan SMAN 1 Kota Bekasi. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2015 melalui jalur SBMPTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Kekuatan dan Konstruksi Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi Koordinator Publikasi SAMPAN 10 serta Wakil Ketua Himatekpal 2017/2018.

Penulis tercatat pernah menjadi *grader* untuk mata kuliah Desain Konstruksi Kapal dan Perencanaan Produksi Kapal.

Email: [ahmad.dzikron15@mhs.na.its.ac.id](mailto:ahmad.dzikron15@mhs.na.its.ac.id) / [nurahmaddzikron@gmail.com](mailto:nurahmaddzikron@gmail.com)