



TUGAS AKHIR - ME234802

SIMULASI TUBRUKAN PADA KONSTRUKSI KAPAL PATROLI DENGAN ADANYA KOROSI

ARIQ INDRA PRATAMA

NRP 5019201131

Dosen Pembimbing

Dr. Achmad Baidowi, S.T., M.T.

NIP 2022198011056

Ir. Amiadji, M.Sc.

NIP 196103241988031001

Program Studi S-1 Teknik Sistem Perkapalan

Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

Halaman ini sengaja dikosongkan



TUGAS AKHIR - ME234802

SIMULASI TUBRUKAN PADA KONSTRUKSI KAPAL PATROLI DENGAN ADANYA KOROSI

ARIQ INDRA PRATAMA

NRP 5019201131

Dosen Pembimbing

Dr. Achmad Baidowi, S.T., M.T.

NIP. 2022198011056

Ir. Amiadji, M.Sc.

NIP. 196103241988031001

Program Studi S1 Teknik Sistem Perkapalan

Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - ME234802

**SIMULATION OF COLLISION ON PATROL BOAT CONSTRUCTION WITH
THE PRESENCE OF CORROSION**

ARIQ INDRA PRATAMA

NRP 5019201131

ADVISOR

Dr. Achmad Baidowi, S.T., M.T.

NIP. 2022198011056

Ir. Amiadji, M.Sc.

NIP. 196103241988031001

Departement of Marine Engineering

Faculty of Marine Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI TUBRUKAN PADA KONSTRUKSI KAPAL PATROLI DENGAN ADANYA KOROSI

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Sistem Perkapalan
Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **ARIQ INDRA PRATAMA**

NRP. 5019201131

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan:

Tanda Tangan : 
Kepala Departemen :  Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph. D
NIP : 197903192008011008
Tanggal :

SURABAYA

JULI, 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI TUBRUKAN PADA KONSTRUKSI KAPAL PATROLI DENGAN ADANYA KOROSI

TUGAS AKHIR

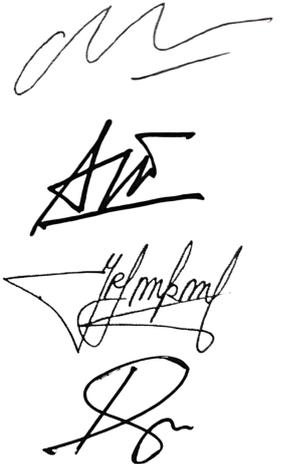
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Sistem Perkapalan
Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **ARIQ INDRA PRATAMA**

NRP. 5019201131

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | |
|------------------------------------|---------------|
| 1. Dr. Achmad Baidowi, S.T., M.T. | Pembimbing |
| 2. Ir. Amiadji, M.Sc. | Ko-pembimbing |
| 3. Irfan Syarief Arief, S.T., M.T. | Penguji |
| 4. Sunarsih, S.T., M.Eng., Ph.D. | Penguji |



SURABAYA

Juli, 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Ariq Indra Pratama / 5019201131
Program studi : Teknik Sistem Perkapalan
Dosen Pembimbing / NIP : 1. Dr. Achmad Baidowi, S.T., M.T. / 2022198011056
2. Ir. Amiadji, M.Sc. / 196103241988031001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Simulasi Tubrukan Pada Konstruksi Kapal Patroli Dengan Adanya Korosi” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 25 Juli 2024

Mahasiswa



Ariq Indra Pratama
NRP. 5019201131

Mengetahui
Dosen Pembimbing 1



Dr. Achmad Baidowi, S.T., M.T.
2022198011056

Mengetahui
Dosen Pembimbing 2



Ir. Amiadji, M.Sc.
196103241988031001

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRAK

SIMULASI TUBRUKAN PADA KONSTRUKSI KAPAL PATROLI DENGAN ADANYA KOROSI

Nama Mahasiswa / NRP : Ariq Indra Pratama / 5019201131
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan FTK - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Achmad Baidowi, S.T., M.T.
: Ir. Amiadji, M.Sc.

Abstrak

Kapal patroli memiliki peranan yang cukup strategis dalam melindungi kekayaan laut di Indonesia. Salah satunya adalah upaya penangkapan kapal ikan yang *melakukan illegal fishing* dan *destructive fishing*. Dalam praktiknya, kapal ini kerap kali berbenturan hingga mengalami tubrukan dengan kapal yang sedang dikejanya. Dalam kondisi tersebut kapal dapat mengalami kerusakan seperti terjadinya deformasi pada bagian konstruksi kapal. Efek dari tubrukan tersebut makin diperparah oleh usia kapal seiring dengan penipisan pelat lambung kapal akibat dari terjadinya korosi. Pada penelitian ini, akan dibahas mengenai simulasi dampak tubrukan terhadap konstruksi kapal pada kondisi konstruksi normal dan kondisi konstruksi setelah terjadinya korosi. Penelitian dilakukan dengan menghitung gaya saat terjadinya tubrukan kapal dan hasilnya digunakan untuk simulasi dengan basis *finite element method*. Dari proses simulasi, diketahui model kapal tanpa korosi akan mengalami deformasi tertinggi sebesar 124.74 mm pada sudut tubrukan 30° dan 61.97 mm pada sudut tubrukan 60°. Model kapal dengan korosi akan mengalami deformasi tertinggi sebesar 178.13 mm pada sudut tubrukan 30° dan 88.59 mm pada sudut tubrukan 60°.

Kata Kunci: Deformasi, *Finite Element Method*, Korosi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

SIMULATION OF COLLISION ON PATROL BOAT CONSTRUCTION WITH THE PRESENCE OF CORROSION

Student Name / NRP : Ariq Indra Pratama / 5019201131
Department : Marine Engineering FTK - ITS
Advisor : Dr. Achmad Baidowi, S.T., M.T.
: Ir. Amiadji, M.Sc.

Abstract

Patrol boats have a strategic role in protecting Indonesia's marine resources. One of those activities is the seize of fishing vessels that commit illegal fishing and destructive fishing. In practice, these vessels often collide with the vessels they are pursuing. Under these conditions, the ship can face damage such as deformation of the ship's construction. The effect of the collision is further exacerbated by the age of the ship along with the thinning of the hull plate due to corrosion. In this study, it is intended to discuss the simulation of the impact of collision on ship construction under normal construction conditions and construction conditions after corrosion. The research is conducted by calculating the force during a ship collision and the results are used for simulation based on the finite element method. From the simulation process, it is known that the ship model without corrosion will have the highest deformation of 124.74 mm at 30° impact angle and 61.97 mm at 60° impact angle. The ship model with corrosion will have the highest deformation of 178.13 mm at 30° impact angle and 88.59 mm at 60° impact angle.

Keywords: *Corrosion, Deformation, Finite Element Method.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

24 Agustus 2023, hari dimana saya melakukan ujian pertama untuk tugas akhir. Banyak lelucon yang mengatakan bahwa “skripsi yang baik adalah skripsi yang selesai”. Hal tersebut membuat saya terpacu untuk mengambil satu topik yang berada diluar kemampuan saya. Topik yang hanya mengikuti kata hati saya. Topik yang belum pernah diambil oleh pendahulu saya. Topik yang pada akhirnya membuat saya menyadari bahwa saya lebih bodoh dari yang saya pikirkan.

31 Juli 2024, Pukul 2:50, saya mulai menulis kata pengantar ini yang juga menandakan bahwa saya telah menyelesaikan laporan tugas akhir saya. Hal yang saya sesali, saya tidak dapat menyelesaikan tugas akhir saya sesuai dengan *plan* yang saya inginkan di awal saya mengambil topik ini. Lagi dan lagi saya harus mengambil zona nyaman agar saya bisa menyelesaikan tugas akhir ini.

Masih banyak hal yang ingin saya sampaikan, akan tetapi, ucapan terima kasih sepertinya lebih penting daripada hal lain yang ada di pikiran saya. Saya mengakui bahwa saya tidak terlalu religius, tetapi saya selalu percaya bahwa tanpa bantuan dari **Allah S.W.T** saya tidak akan dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Sebagai seorang yang masih dalam kategori pemuda, banyak kesalahan yang saya lakukan akibat dari kurangnya pengalaman dan ketidakdewasaan dalam pemikiran. Saya berterima kasih kepada kedua orang tua saya **Bapak Hartoko** dan **Ibu Suratmi** yang telah senantiasa mendukung saya dalam seluruh pilihan yang telah saya ambil. Tidak lupa saya juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh **Dosen Departemen Teknik Sistem Perkapalan**, khususnya kepada **Bapak Baidowi**, **Bapak Amiadji**, **Bapak Irfan**, dan **Ibu Sunarsih** atas segala bimbingannya selama masa kuliah dan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

Teman. Salah satu kata terkompleks menurut saya. Kedekatan dengan seseorang yang terlalu abstrak membuat saya berpikir apakah saya cukup dekat dengan seseorang sehingga saya bisa dianggap sebagai salah satu temannya. Terlepas dari hal tersebut, saya mengucapkan terima kasih kepada teman-teman saya yang telah membantu saya menyelesaikan tugas akhir ini utamanya kepada **Fahri**, **Albert**, **Rayyan**, **Hafidz**, **Rendi**, **Fathany**, **Abi**, dan **Attita**. Saya juga mengucapkan terima kasih kepada **Bachtiar**, **Aldi**, **Yudha**, dan **Prabu** yang telah menemani saya lembur di masa masa krusial penyelesaian tugas akhir saya.

Paragraf terakhir dalam ucapan terima kasih saya, saya dedikasikan untuk orang-orang yang paling saya sayangi. Seorang wanita yang telah menemani saya selama saya berada di jenjang perkuliahan **Azri Keisha** dan juga orang-orang yang saya anggap sebagai sahabat terdekat saya, **Dyah Ika**, **Rovega Krisna**, dan **Ovicha Nada**.

life moves so fast

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	3
2.2 Kapal Patroli	4
2.3 Korosi pada Lambung Kapal	5
2.4 Tubrukan Kapal	6
2.5 Momentum	7
2.6 Hukum Kekekalan Momentum	8
2.7 Koefisien Restitusi	9
2.8 <i>Yield Tensile Strength</i> dan <i>Ultimate Tensile Strength</i>	12
2.9 <i>Stress, Von-Mises Stress</i> , dan Deformasi	12
BAB 3 METODOLOGI	15
3.1 Diagram Alir Penelitian	15
3.2 Finite Element Method	17
3.3 Identifikasi dan Perumusan Masalah	17
3.4 Studi Literatur	17
3.5 Pengumpulan Data	17
3.5.1 Kapal Patroli	18
3.5.2 Fishing Vessel	20
	xiii

3.6	3D Modelling	20
3.6.1	Pemilihan Modeling	20
3.6.2	3D Model Kapal Patroli	21
3.6.3	3D Model Fishing Vessel	22
3.7	Perhitungan Berat Kapal	23
3.7.1	Berat Kapal Patroli	23
3.7.2	Berat Fishing Vessel	23
3.8	Perhitungan Gaya yang Mengenai Kapal Patroli	24
3.8.1	Rumus Dasar	24
3.8.2	Subtitusi dan Penurunan Rumus	25
3.8.3	Persamaan va' dan vb'	26
3.9	Meshing	26
3.10	Simulasi Tubrukan	27
3.11	Analisa Hasil Simulasi	28
3.12	Penarikan Kesimpulan	28
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1	Pendahuluan	29
4.2	Hasil Perhitungan Gaya yang Mengenai Kapal Patroli	29
4.3	Pra-Simulasi Model	30
4.3.1	Material Data	30
4.3.2	Meshing dan Konvergensi	30
4.4	Hasil Simulasi Model	32
4.4.1	Hasil Simulasi Tanpa Korosi, Sudut 30°	32
4.4.2	Hasil Simulasi Tanpa Korosi, Sudut 60°	35
4.4.3	Hasil Simulasi dengan Korosi, Sudut 30°	39
4.4.4	Hasil Simulasi dengan Korosi, Sudut 60°	42
4.4.5	Tabel Rangkuman Hasil Simulasi	46
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	47
5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran	47
	DAFTAR PUSTAKA	49
	LAMPIRAN	51
	BIODATA PENULIS	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Pengejaran kapal pelaku illegal fishing (KKP, 2020).....	1
Gambar 2. 1 Kapal Patroli (KKP, 2015).....	5
Gambar 2. 2 Jenis kerusakan korosi: (a) <i>general corrosion</i> , (b) <i>localized corrosion</i> , (c) <i>fatigue cracks arising from localized corrosion</i> . (Paik, 2002)	5
Gambar 2. 3 Aturan BKI mengenai batas pengurangan ketebalan material (BKI, 2022)	6
Gambar 2. 4 Ilustrasi <i>colliding ship</i> dan <i>struck ship</i> (Kitamura, 2001).....	7
Gambar 2. 5 Grafik hubungan tegangan dan regangan.....	12
Gambar 2. 6 <i>Tensile stress</i> (a), <i>Compressive stress</i> (b), dan <i>Shear stress</i> (c).....	13
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian bagian 1	15
Gambar 3. 2 Diagram alir penelitian bagian 2	16
Gambar 3. 3 Rencana garis kapal patroli	18
Gambar 3. 4 Rencana konstruksi kapal patroli tampak samping dan tampak atas	19
Gambar 3. 5 Rencana konstruksi kapal patroli tampak melintang	19
Gambar 3. 6 Rencana garis fishing vessel	20
Gambar 3. 7 Bagian konstruksi kapal patroli yang akan dimodelkan	21
Gambar 3. 8 model 3d konstruksi kapal patroli (a), model kapal patroli tanpa korosi (b), dan model kapal patroli dengan korosi (c).....	22
Gambar 3. 9 Model 3d lambung fishing vessel	22
Gambar 3. 10 Perhitungan berat <i>fishing vessel</i>	24
Gambar 3. 11 Hasil meshing model.....	27
Gambar 3. 12 Tipe tubrukan yang akan disimulasikan.....	27
Gambar 3. 13 ilustrasi sudut tubrukan 30° dan 60°.....	28
Gambar 4. 1 Material properties AH36.....	30
Gambar 4. 2 Grafik konvergensi hasil simulasi.....	31
Gambar 4. 3 <i>Von-mises stress</i> pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 30°.....	32
Gambar 4. 4 <i>Von-mises stress</i> tertinggi pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 30°	33
Gambar 4. 5 <i>Displacement magnitude</i> pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 30°	33
Gambar 4. 6 <i>Von-mises stress</i> pada struktur kapal model tanpa korosi sudut 30°.....	34
Gambar 4. 7 <i>Displacement magnitude</i> pada struktur kapal model tanpa korosi sudut 30°	35
Gambar 4. 8 <i>Von-mises stress</i> pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 60°.....	36
Gambar 4. 9 <i>Von-mises stress</i> tertinggi pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 60°	36
Gambar 4. 10 <i>Displacement magnitude</i> pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 60°	37
Gambar 4. 11 <i>Von-mises stress</i> pada struktur kapal model tanpa korosi sudut 60°.....	38
Gambar 4. 12 <i>Displacement magnitude</i> pada struktur kapal model tanpa korosi sudut 60°	38
Gambar 4. 13 <i>Von-mises stress</i> pada kulit kapal model dengan korosi sudut 30°.....	39
Gambar 4. 14 <i>Von-mises stress</i> tertinggi pada kulit kapal model dengan korosi sudut 30°	40

Gambar 4. 15 <i>Displacement magnitude</i> pada kulit kapal model dengan korosi sudut 30°	40
Gambar 4. 16 <i>Von-mises stress</i> pada struktur kapal model dengan korosi sudut 30° ..	41
Gambar 4. 17 <i>Displacement magnitude</i> struktur kapal model dengan korosi sudut 30°	42
Gambar 4. 18 <i>Von-mises stress</i> pada kulit kapal model dengan korosi sudut 60°.....	43
Gambar 4. 19 <i>Von-mises stress</i> tertinggi pada kulit kapal model dengan korosi sudut 60°	43
Gambar 4. 20 <i>Displacement magnitude</i> pada kulit kapal model dengan korosi sudut 60°	44
Gambar 4. 21 <i>Von-mises stress</i> pada struktur kapal model dengan korosi sudut 60° ..	45
Gambar 4. 22 <i>Displacement magnitude</i> struktur kapal model dengan korosi sudut 60°	45

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu	3
Tabel 2. 2 Nilai koefisien restitusi dengan kecepatan kedua kapal 4.5 m/s.....	10
Tabel 2. 3 Nilai koefisien restitusi dengan kecepatan striking ship 6 m/s dan struck ship 4.5 m/s.....	11
Tabel 3. 1 Data berat kapal patroli.....	23
Tabel 3. 2 Rekomendasi kualitas meshing simscale.....	26
Tabel 4. 1 Gaya yang mengenai kapal patroli.....	29
Tabel 4. 2 Kualitas meshing pada tiap ukuran	30
Tabel 4. 3 konvergensi hasil simulasi	31
Tabel 4. 4 Resume hasil simulasi model.....	46

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

F	=	Gaya
P	=	Momentum
t	=	Waktu
m	=	Massa
v	=	Kecepatan
e	=	Koefisien Restitusi
σ_v	=	Von-Mises Stress
σ_y	=	Yield Material
A	=	Luas Permukaan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal patroli merupakan kapal yang difungsikan untuk menjaga keamanan serta aset negara yang berada di wilayah pesisir dan laut Indonesia (Koostanto dkk, 2021). Salah satu aset yang harus dilindungi adalah kekayaan laut yang utamanya berupa perikanan. Data dari Kementerian Kelautan dan Perikanan menyebutkan bahwa pada tahun 2021 terdapat penangkapan sejumlah 167 kapal pelaku *illegal fishing* dan 96 kapal pelaku *destructive fishing* (KKP, 2021).



Gambar 1. 1 Pengejaran kapal pelaku illegal fishing (KKP, 2020)

Pada Gambar 1.1 diatas menunjukkan kapal patroli yang sedang mengejar kapal pelaku *illegal fishing*. Proses penangkapan inilah yang menyebabkan banyak terjadinya benturan di lambung kapal patroli saat melakukan pengejaran. Benturan atau tubrukan dapat menyebabkan kerugian yang cukup besar baik dari segi keselamatan kapal maupun dari segi ekonomi untuk perbaikan kapal (Dzikron, 2019).

Efek dari kejadian tubrukan kapal ini akan semakin parah setelah pelat lambung kapal mulai tergerus korosi. Korosi sendiri merupakan kerusakan material yang terjadi karena reaksi dengan lingkungannya. Korosi yang terjadi pada pelat lambung kapal ini dapat menyebabkan penurunan kualitas baja yang mengakibatkan baja pelat lambung kapal tersebut menjadi cepat lemah dan rusak (Afandi dkk, 2015). Oleh karena itu, analisis kekuatan konstruksi kapal perlu dilakukan melihat pentingnya keamanan dan keselamatan pada saat pengoperasionalan kapal (Koostanto dkk, 2021).

Pada dasarnya kejadian tubrukan terbagi menjadi dua bagian yang saling berkaitan, yaitu *external dynamics* dan *internal mechanics*. Metode elemen hingga (*finite element method* – FEM) merupakan salah satu instrumen yang dikembangkan untuk menganalisa fenomena ini. Metode elemen hingga digunakan untuk meningkatkan kapabilitas serta ketelitian dalam memprediksi kriteria struktur pada saat maupun setelah terjadinya fenomena tubrukan (Prabowo dkk, 2018). Kitamura dalam risetnya menggunakan FEM, menuliskan bahwa konfigurasi analisa tubrukan cukup akurat apabila pemodelannya menggunakan asumsi aktual kecelakaan, metode analitik, dan metode elemen hingga (Kitamura, 2002).

Mempertimbangkan hal-hal yang telah disebutkan di atas, pada penelitian ini, penulis akan menganalisa dampak terjadinya tubrukan pada konstruksi kapal patroli dalam kondisi konstruksi normal dan setelah terjadinya korosi menggunakan finite element method.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang didapatkan sebagai berikut:

1. Bagaimana dampak yang terjadi akibat tubrukan pada kondisi konstruksi normal?
2. Bagaimana dampak yang terjadi akibat tubrukan pada kondisi konstruksi setelah terjadinya korosi?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka perlu adanya batasan masalah untuk membatasi ruang lingkup dan mempermudah analisa. Adapun ruang lingkup penelitian, sebagai berikut:

1. Kapal yang akan disimulasikan adalah kapal patroli.
2. Analisa dampak tubrukan akan dilakukan menggunakan metode elemen hingga.
3. Model korosi yang digambarkan adalah pengurangan ketebalan pelat sebesar 15% dari ketebalan pelat awal sesuai dengan nilai yang diizinkan oleh aturan dari kelas BKI.
4. Besarnya gaya tubrukan akan ditentukan menggunakan persamaan hukum 2 newton. Kemudian hasil gaya pada perhitungan akan dikenakan pada lambung kapal patroli dengan simulasi *static structural* pada software simscale.
5. Fokus analisa dampak tubrukan pada bagian lambung kapal yang menabrak fishing vessel.

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui dampak akibat tubrukan pada kondisi konstruksi normal.
2. Mengetahui dampak akibat tubrukan pada kondisi konstruksi setelah terjadinya korosi.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah:

1. Mengetahui dampak terjadinya tubrukan terhadap konstruksi kapal sebelum maupun setelah terkena korosi.
2. Memberikan referensi mengenai simulasi dampak tubrukan terhadap konstruksi kapal.
3. Mengembangkan ilmu pengetahuan di bidang maritim.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Dalam proses pengerjaan penelitian, dibutuhkan referensi dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan relevansi yang sama agar penelitian yang akan dilakukan dapat disusun secara terstruktur dan sistematis. Beberapa penelitian yang relevan dengan penelitian ini ditunjukkan oleh tabel 2.1 berikut:

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu

No	Penulis	Judul Penelitian	Tahun	Hasil Penelitian
1.	Hasanudin, Wasis D. Aryawan, Achmad Zubaydi, Teguh Putranto	<i>Dynamics Finite Element for Ship Damage Collision Analysis</i>	2016	Kekuatan dan energi akan meningkat ketika penetrasi lebih dalam. Pola kekuatan meningkat dan menurun sepanjang penetrasi yang berarti struktur <i>double skin</i> rusak disebabkan oleh tabrakan <i>striking ship</i> .
2.	Nur Ahmad Dzikron dan Totok Yulianto	Analisis Tegangan Haluan Kapal Akibat Tubrukan	2019	Haluan kapal <i>striking ship</i> mendapat beban yang tinggi dalam kurun waktu yang singkat. Semakin tinggi kecepatan kapal maka semakin singkat waktu yang diperlukan untuk mencapai nilai tegangan <i>ultimate</i> .
3.	Aditya Rio Prabowo, Teguh Muttaqie, Jung Min Sohn, Dong Myung Bae	Investigasi Dampak Insiden Tubrukan Terhadap Respon Struktur Kapal Penumpang Antar Pulau	2018	Pengaruh target lokasi (midship, fore-end) secara keseluruhan menunjukkan perbedaan kapabilitas yang cukup signifikan dalam menghadapi beban impak.
4.	Ozgun Ozguc	<i>Structural damage of ship-FPSO collisions</i>	2019	Efek tabrakan samping oleh <i>supply vessel</i> dengan energi dampak 40 MJ hampir tidak mengubah kapasitas lentur buritan kapal secara keseluruhan.

5.	Ding Hongya, Zhu Qi, Zhang Puyang	<i>Dynamic Simulation on Collision Between Ship and Offshore Wind Turbine</i>	2014	Hanya terjadi kerusakan minor pada bagian haluan kapal dan tidak ada zona plastik yang muncul pada bagian haluan kapal.
6.	Zhaolong Yu, Jørgen Amdahl, Martin Storheim	<i>A New Approach for Coupling External Dynamics and Internal Mechanics in Ship Collisions</i>	2016	Untuk <i>striking collisions</i> , pendekatan terpisah memprediksi kontribusi energi dari energi internal dan energi gesek dengan presisi yang kurang karena asumsi rasio gaya yang konstan.
7.	Shengming Zhang, Preben Terndrup Pedersen	<i>A method for ship collision damage and energy absorption analysis and its validation</i>	2017	Metode sederhana yang cepat, praktis, namun tampaknya cukup akurat untuk menentukan energi yang diserap akibat tumbukan. Dalam analisis tumbukan kapal, metode telah dievaluasi dan divalidasi lebih lanjut berdasarkan sejumlah besar hasil uji model.

2.2 Kapal Patroli

Kapal patroli (*patrol vessel/patrol boat/patrol ship*) merupakan kapal angkatan laut yang cenderung berukuran kecil. Kapal patroli dapat dioperasikan oleh beberapa pihak seperti angkatan laut, *coastguard*, kepolisian, dan bea cukai. Pada umumnya, kapal ini bertugas untuk menjaga wilayah pesisir. Kapal patroli sering kali terlibat dalam berbagai peran perlindungan perbatasan, termasuk anti penyelundupan, anti pembajakan, patroli perikanan, dan penegakan hukum imigrasi. Kapal patroli ini juga kerap kali berpartisipasi dalam operasi penyelamatan.

Kapal patroli biasanya berukuran lebih kecil daripada kapal jenis corvette, meskipun ada beberapa yang berukuran sebesar frigate. Kapal patroli dapat diklasifikasikan sebagai *Inshore Patrol Vessels (IPV)* dan *Offshore Patrol Vessels (OPV)*. Perbedaan utama antara *IPV* dan *OPV* adalah kapasitasnya dalam membawa awak kapal dan amunisi. *IPV* umumnya digunakan untuk melakukan pengawasan di dekat garis pantai, sedangkan *OPV* dirancang untuk dioperasikan jauh dari garis pantai sehingga memiliki volume yang lebih besar. (Kaushik dkk, 2019)

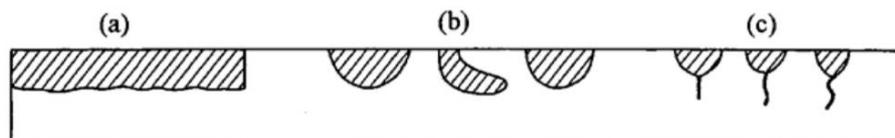


Gambar 2. 1 Kapal Patroli (KKP, 2015)

2.3 Korosi pada Lambung Kapal

Korosi merupakan proses oksidasi yang terjadi pada material dan memiliki sifat destruktif. Korosi ditandai dengan munculnya karat. Proses korosi umumnya dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti: faktor lingkungan, komposisi campuran baja, temperatur, dan permukaan material. Sifat destruktif korosi menyebabkan melemahnya kekuatan struktur material sehingga berpotensi terjadi keretakan (*crack*) pada konstruksi kapal. (Kolios, 2014)

Paik (2002) membagi korosi menjadi 3 jenis, yaitu *general corrosion*, *localized corrosion*, dan *fatigue cracks arising from localized corrosion*. *general corrosion* terjadi secara merata di seluruh permukaan logam. Korosi ini disebabkan oleh reaksi kimia antara logam dan lingkungannya, seperti oksidasi atau reaksi dengan asam, yang mengakibatkan penipisan material secara keseluruhan. *localized corrosion* terjadi hanya di area tertentu dari logam, seperti pada *pitting* atau *crevice corrosion*, di mana kerusakan terbatas pada titik-titik kecil atau celah, yang seringkali lebih sulit dideteksi dan lebih berbahaya karena dapat menyebabkan kerusakan struktural yang signifikan dalam waktu singkat. *Fatigue cracks* yang timbul dari korosi terlokalisasi terjadi ketika korosi terlokalisasi melemahkan struktur logam pada titik-titik tertentu, menyebabkan terbentuknya retakan yang kemudian dapat berkembang lebih besar akibat siklus beban mekanis yang berulang, sehingga meningkatkan risiko kegagalan material secara tiba-tiba.



Gambar 2. 2 Jenis kerusakan korosi: (a) *general corrosion*, (b) *localized corrosion*, (c) *fatigue cracks arising from localized corrosion*. (Paik, 2002)

Dalam ketentuan dari regulasi BKI, batas pengurangan ketebalan plat akibat korosi dalam konstruksi kapal dibatasi maksimal sebesar 20% dari ketebalan pelat awal. Apabila penipisan pelat melebihi batas tersebut, maka pelat harus diganti.

A.3 Batasan Pengurangan

1. Jika pengukuran ketebalan sesuai hasil nilai korosi dan keausan melebihi dari yang dinyatakan berikut ini, masing-masing elemen konstruksi lambung harus diperbarui. Jika pengurangan ketebalan material diterima untuk bangunan baru (sistem pencegahan korosi yang efektif), batasan korosi yang diizinkan didasarkan pada aturan ketebalan yang tidak dikurangi.

2. Kekuatan memanjang

Pengurangan maksimum yang diizinkan dari modulus bagian tengah kapal: 10% yang diambil dari persyaratan yang diberikan dalam *Rules for Hull (Pt.1, Vol.II) Sec.5.C.1 and Sec.5.C.2*, mana yang terbesar.

3. Kekuatan lokal

Maksimum pengurangan permukaan besar yang diizinkan dari ketebalan pelat dan ketebalan bilah profil: t_k

$$\text{untuk } t \leq 11,5 \text{ mm: } t_k = 1,5 \text{ mm}$$

$$\text{untuk } t > 11,5 \text{ mm: } t_k = 0,09 \cdot t + 0,45 \text{ mm, maksimum } 3,0 \text{ mm}$$

t = pelat dan/atau ketebalan bilah dalam [mm], sebagaimana diatur dalam Peraturan Konstruksi.

Maksimum pembatasan lokal yang diizinkan dari pengurangan ketebalan: $0,2t$.

Dalam tangki balas pada jarak 1,5 m di bawah geladak cuaca, jika geladak cuaca adalah geladak tangki:

$$t_k = 2,5 \text{ mm}$$

Dalam tangki muatan minyak dengan jarak 1,5 m di bawah geladak cuaca, jika geladak cuaca adalah geladak tangki, dan untuk elemen struktural horizontal dalam tangki muatan minyak dan bahan bakar: $t_k = 2,0 \text{ mm}$.

Dalam sel kering, seperti jalan lintas dari haluan ke buritan pada kapal kontainer dan ruang yang sebanding, dan untuk penutup palka ruang muat kering:

$$\text{untuk } t \leq 11,5 \text{ mm: } t_k = 1,0 \text{ mm}$$

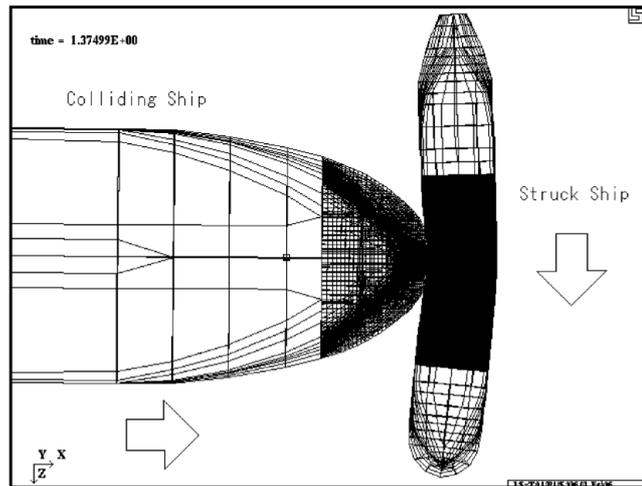
$$\text{untuk } t > 11,5 \text{ mm: } t_k = 0,09 \cdot t, \text{ maksimum } 2,5 \text{ mm}$$

Maksimum pengurangan permukaan yang diizinkan dari kulit sisi yang ditambahkan sabuk es: 2,0 mm.

Gambar 2. 3 Aturan BKI mengenai batas pengurangan ketebalan material (BKI, 2022)

2.4 Tubrukan Kapal

Tubrukan kapal (*Collision*) merupakan kecelakaan yang melibatkan kerusakan antar kapal. *Collision* dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *side collision* dan *head-on collision*. Kasus *side collision* merupakan kasus yang terjadi ketika terdapat dua sisi kapal yang bertubrukan. Sedangkan kasus *head-on collision* terjadi ketika haluan kapal menabrak struktur/bangunan maupun menabrak kapal lain (Kim, 2000). Dalam kasus tubrukan, kapal yang menabrak disebut *striking/colliding ship* dan kapal yang tertabrak disebut *struck ship* (Wisniewski, 2002). Gambar 2.3 memberikan gambaran mengenai kejadian tabrakan yang melibatkan *striking ship* dan *struck ship*.



Gambar 2. 4 Ilustrasi *colliding ship* dan *struck ship* (Kitamura, 2001)

Kejadian tubrukan kapal dapat dibagi menjadi dua bagian yang saling berkaitan yaitu *internal mechanics* dan *external dynamics*. *Internal mechanics* mengacu pada respon struktur internal kapal terhadap gaya dan energi yang dihasilkan selama tabrakan. Pada saat kapal bertabrakan, gaya dan energi dari tabrakan akan diserap oleh struktur kapal. Hal ini dapat menyebabkan kegagalan struktural pada kapal. *External dynamics* berkaitan dengan pergerakan dan gaya yang terjadi pada kapal selama tabrakan. Tabrakan antara kapal dengan kapal maupun dengan objek lain dapat menghasilkan kekuatan yang signifikan dan mengubah kecepatan, arah, maupun rotasi kapal. (Prabowo dkk, 2018)

2.5 Momentum

Momentum terbagi menjadi dua jenis, yaitu momentum linear dan momentum angular. Momentum linear merujuk pada momentum benda yang bergerak dalam gerakan translasi, yakni gerakan lurus. Sebaliknya, momentum angular adalah momentum yang dimiliki oleh benda yang bergerak dalam gerakan rotasi, yaitu gerakan melingkar atau berputar.

Momentum linear (momentum) didefinisikan sebagai hasil kali massa suatu partikel dengan kecepatannya. Momentum adalah besaran vektor, yang berarti memiliki arah dan besar. Secara matematis, momentum linear (p) suatu partikel dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$p = mv$$

di mana (m) adalah massa partikel dan (v) adalah kecepatannya. Karena massa (m) selalu merupakan kuantitas skalar positif, arah vektor momentum sama dengan arah vektor kecepatan.

Selain itu, hukum kedua Newton dapat dinyatakan dalam bentuk momentum linear. Perubahan momentum linear suatu partikel sebanding dengan gaya bersih yang bekerja padanya. Persamaan ini dapat ditulis sebagai:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

di mana (F) adalah gaya bersih yang bekerja pada partikel, (p) adalah momentum linear, dan (t) adalah waktu. (D. Halliday dkk, 2013)

2.6 Hukum Kekekalan Momentum

Tumbukan merupakan interaksi antar benda yang saling bertukar gaya dalam jangka waktu tertentu dan memenuhi hukum kekekalan momentum. Dalam Hukum kekekalan momentum disebutkan bahwa: “Jika tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem, maka momentum sebuah sistem akan selalu konstan”. Jenis-jenis tumbukan ini dibedakan berdasarkan perubahan energi yang terjadi.

Tumbukan lenting sempurna, tumbukan lenting sebagian, dan tumbukan tidak lenting sama sekali (tidak elastis) adalah jenis jenis dari tumbukan. Tumbukan lenting sempurna terjadi apabila energi kinetik sebelum dan setelah tumbukan memiliki nilai yang sama. Dalam tumbukan lenting sempurna, semua energi kinetik di kondisi awal menjadi energi kinetik di kondisi akhir. Pada tumbukan ini berlaku hukum kekekalan energi mekanik.

Tumbukan lenting sebagian dapat terjadi apabila energi kinetik sebelum tumbukan berubah menjadi energi yang mengubah bentuk benda setelah tumbukan. Pada tumbukan ini hukum kekekalan energi mekanik tidak berlaku. Dalam tumbukan lenting sempurna dan tumbukan lenting sebagian, berlaku persamaan:

$$m_a v_a + m_b v_b = m_a v_a' + m_b v_b'$$

dimana

- m_a = Massa benda A
- m_b = Massa benda B
- v_a = Kecepatan benda A sebelum tumbukan
- v_a' = Kecepatan benda A setelah tumbukan
- v_b = Kecepatan benda B sebelum tumbukan
- v_b' = Kecepatan benda B setelah tumbukan

Tumbukan tidak lenting sama sekali terjadi apabila energi kinetik berubah saat tumbukan. Perubahan tersebut membuat benda menyatu dan bergerak bersama setelah tumbukan. Tumbukan ini dapat terjadi ketika salah satu benda memiliki massa dan kecepatan yang jauh lebih besar dibandingkan massa dan kecepatan benda lainnya, Hal tersebut menyebabkan benda yang bermassa dan berkecepatan lebih rendah akan ikut terbawa. Pada tumbukan ini hukum kekekalan energi mekanik tidak berlaku. Dalam tumbukan tidak lenting sama sekali, berlaku persamaan:

$$m_a v_a + m_b v_b = (m_a + m_b) v'$$

dimana

- m_a = Massa benda A
- m_b = Massa benda B
- v_a = Kecepatan benda A sebelum tumbukan
- v_b = Kecepatan benda B sebelum tumbukan
- v' = Kecepatan benda setelah tumbukan

(D. Halliday dkk, 2013)

2.7 Koefisien Restitusi

Koefisien restitusi, atau koefisien pantulan, adalah ukuran seberapa elastis sebuah tumbukan. Koefisien restitusi didefinisikan sebagai perbandingan antara kecepatan relatif setelah tumbukan dengan kecepatan relatif sebelum tumbukan. Nilai koefisien restitusi berkisar antara 0 dan 1, di mana 1 menunjukkan tumbukan elastis sempurna, dan 0 menunjukkan tumbukan tidak elastis sempurna. Dalam konteks tumbukan, koefisien restitusi membantu dalam menentukan bagaimana energi kinetik dipertahankan atau hilang selama interaksi dua benda. Persamaan koefisien restitusi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$e = \frac{|v'_b - v'_a|}{|v_b - v_a|}$$

dimana

v_a = Kecepatan benda A sebelum tumbukan

v'_a = Kecepatan benda A setelah tumbukan

v_b = Kecepatan benda B sebelum tumbukan

v'_b = Kecepatan benda B setelah tumbukan

(Bueche dkk, 2006)

Restitusi dalam konteks tabrakan kapal adalah parameter yang mengukur pemulihan energi kinetik pasca tabrakan, dengan koefisien restitusi bervariasi antara 0 dan 1, dimana 0 menunjukkan tabrakan sepenuhnya plastis dan 1 menunjukkan tabrakan sepenuhnya elastis. Pemilihan koefisien restitusi yang tepat sangat penting karena berpengaruh langsung pada prediksi dissipasi energi. Dalam analisis dinamis eksternal tiga dimensi, restitusi berperan dalam menentukan laju perubahan kecepatan relatif antara dua kapal sebelum dan sesudah tabrakan.

Liu J F, HU Z Q (2017) menemukan bahwa sudut dan lokasi tabrakan mempengaruhi nilai konservatif koefisien restitusi, yang berbeda-beda untuk setiap skenario tabrakan. Nilai restitusi tubrukan kapal hasil penelitian ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 2. 2 Nilai koefisien restitusi dengan kecepatan kedua kapal 4.5 m/s

Collision location	Collision angle $\theta/(^{\circ})$				
	30	60	90	120	150
0.50	0.95	0.85	0.65	0	0
0.48	0	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0	0.1
0.43	0	0	0	0	0.25
0.39	0	0	0	0	0.7
0.34	0	0	0	0.1	1
0.29	0	0	0	0.3	1
0.24	0	0	0	0.6	1
0.19	0	0	0	0.55	1
0.15	0.1	0	0	0.5	1
0.10	0.1	0	0	0.45	1
0.05	0.1	0	0	0.4	1
0.00	0.1	0.15	0	0.4	1
-0.05	0.15	0.2	0	0.4	1
-0.10	0.15	0.2	0	0.4	1
-0.15	0.15	0.2	0	0.4	1
-0.19	0.15	0.2	0	0.45	1
-0.24	0.15	0.2	0	0.45	1
-0.29	0.15	0	0	0.5	1
-0.34	0.15	0	0	0.55	1
-0.39	0.2	0	0	0.6	1
-0.43	0.2	0	0.05	0.6	1
-0.48	0.2	0	0.1	0.65	1

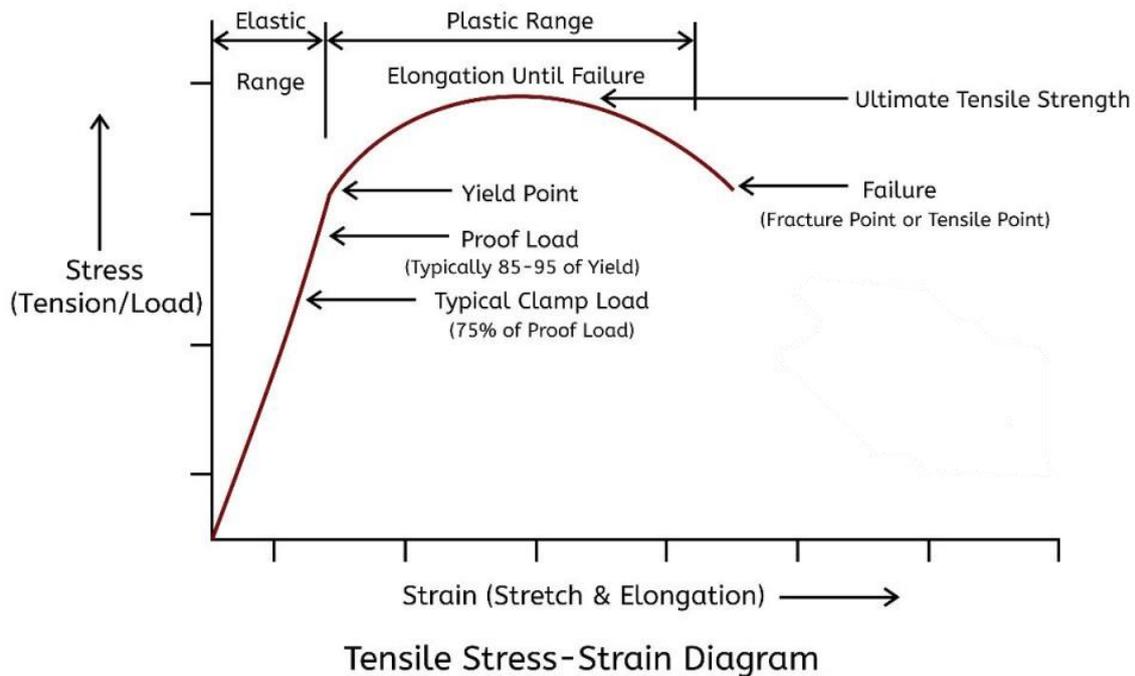
Tabel 2. 3 Nilai koefisien restitusi dengan kecepatan striking ship 6 m/s dan struck ship 4.5 m/s

Collision location	Collision angle $\theta/(^\circ)$				
	30	60	90	120	150
0.50	0.3	1	0.95	0.25	0
0.48	1	0.45	0	0	0
0.46	0.95	0.25	0	0	0.1
0.43	0.95	0.05	0	0	0.2
0.39	0.75	0	0	0	0.6
0.34	0.75	0	0	0	0.9
0.29	0.75	0	0	0.2	1
0.24	0.75	0.05	0	0.45	1
0.19	0.85	0.05	0	0.4	1
0.15	0.85	0.05	0	0.3	1
0.10	0.95	0.05	0	0.3	1
0.05	0.95	0.05	0	0.25	1
0.00	0.95	0.05	0	0.25	1
-0.05	0.95	0.05	0	0.2	1
-0.10	0.95	0.05	0	0.25	1
-0.15	0.95	0.05	0	0.25	1
-0.19	0.95	0.05	0	0.3	1
-0.24	0.2	0.05	0	0.3	1
-0.29	0.2	0.1	0	0.35	1
-0.34	0.3	0.1	0	0.35	1
-0.39	0.3	0.1	0	0.4	1
-0.43	0.3	0.1	0	0.45	1
-0.48	0.3	0.1	0	0.45	1
-0.50	0.3	0.1	0	0.45	1

(Liu J F & HU Z Q, 2017)

2.8 Yield Tensile Strength dan Ultimate Tensile Strength

Yield Tensile Strength adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh material sebelum mengalami deformasi plastis permanen. Ketika tegangan pada material mencapai nilai ini, material akan mulai berubah bentuk secara permanen dan tidak kembali ke bentuk aslinya setelah beban dilepaskan. *Ultimate Tensile Strength*, di sisi lain, adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh material sebelum mengalami patah atau keruntuhan. Nilai ini menunjukkan kemampuan material untuk menahan beban maksimum sebelum terjadinya kerusakan struktural. (Rajput, 2018)



Gambar 2. 5 Grafik hubungan tegangan dan regangan

2.9 Stress, Von-Mises Stress, dan Deformasi

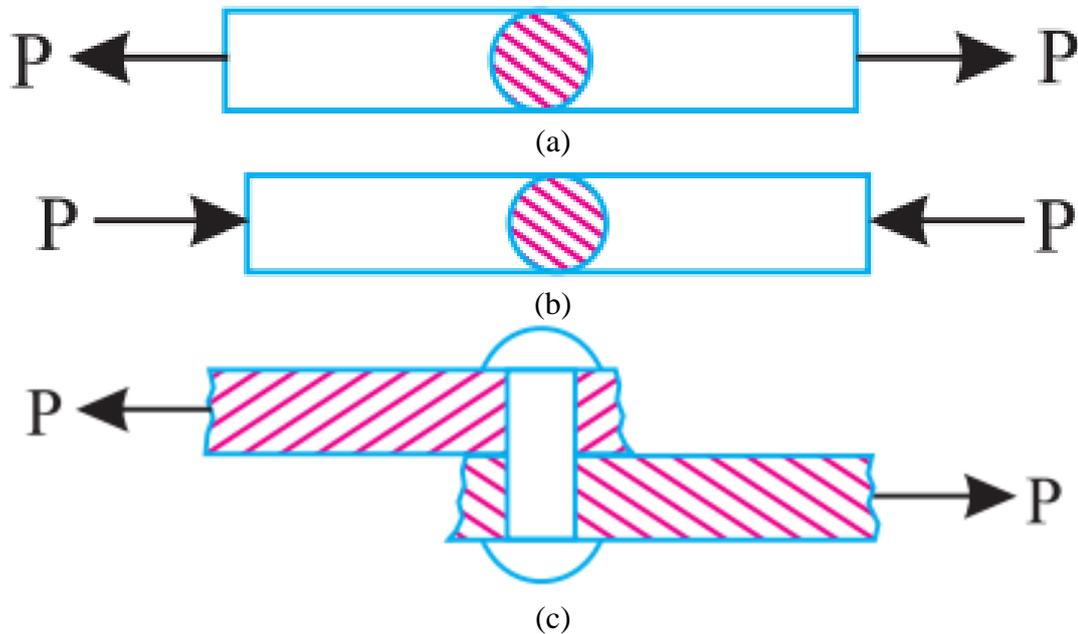
Stress adalah respon internal material terhadap beban eksternal yang diaplikasikan, dan diukur sebagai gaya per satuan luas. Dalam mekanika material, *stress* digunakan dalam menentukan kemampuan material untuk menahan beban tanpa mengalami deformasi atau kegagalan. Persamaan dasar untuk menghitung *stress* (σ) adalah:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Di mana:

- σ = *Stress* yang diukur dalam satuan pascal (Pa) atau N/mm²
- P = Gaya atau beban yang bekerja pada material dalam satuan Newton (N).
- A = Luas penampang tempat gaya tersebut bekerja dalam satuan milimeter persegi (mm²)

Tensile stress, *compressive stress*, dan *shear stress* adalah tiga jenis utama stress yang dialami material dalam berbagai kondisi beban. *Tensile stress* terjadi ketika gaya tarik bekerja pada material, menyebabkan perpanjangan atau regangan. *Compressive stress* adalah kebalikan dari *tensile stress*, terjadi ketika gaya tekan bekerja pada material yang menyebabkan pemendekan. *Shear stress* terjadi ketika gaya bekerja sejajar dengan permukaan material, menyebabkan deformasi geser.



Gambar 2. 6 *Tensile stress*(a), *Compressive stress*(b), dan *Shear stress*(c)

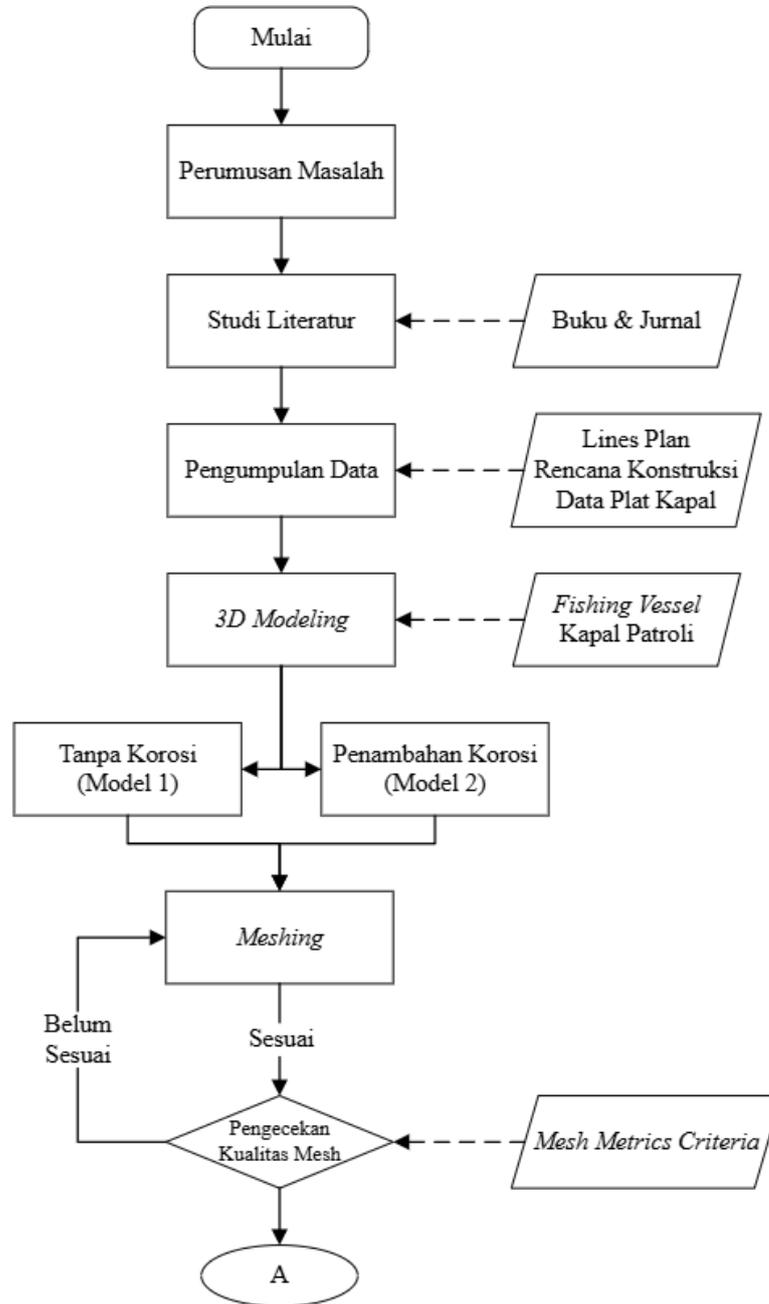
Von-Mises stress (σ_v) didefinisikan sebagai tegangan ekuivalen yang dapat dibandingkan langsung dengan kekuatan yield dari material dalam uji tarik. *Von-Mises stress* (*maximum distortion energy criterion*), digunakan untuk menentukan apakah suatu material akan mengalami yield di bawah kondisi kompleks tegangan.

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau ukuran material sebagai respons terhadap gaya yang bekerja padanya. Deformasi dapat berupa elastis atau plastis. Deformasi elastis adalah deformasi yang sepenuhnya reversible setelah gaya dihilangkan, sedangkan deformasi plastis adalah deformasi permanen. Deformasi terjadi ketika tegangan yang bekerja pada material melebihi batas elastisnya. Dalam kasus *Von-Mises stress*, deformasi plastis terjadi ketika nilai (σ_v) melebihi kekuatan *yield material* (σ_y). (Rajput, 2018)

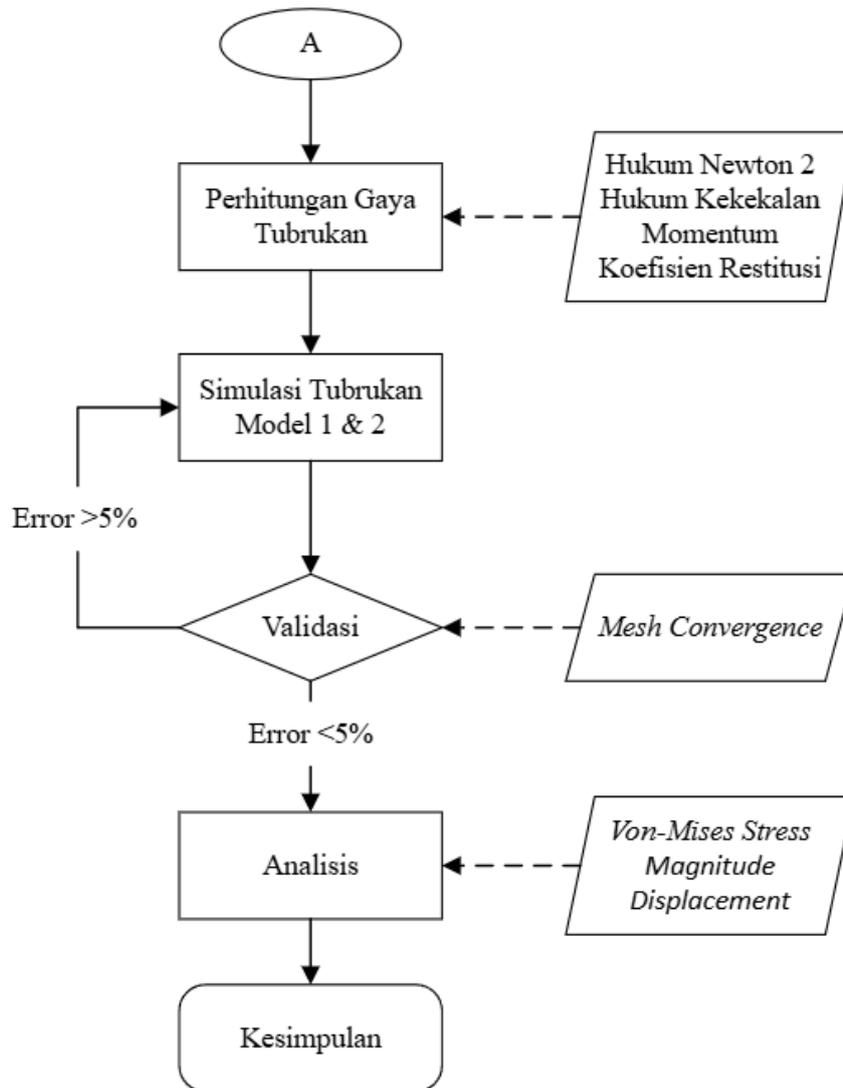
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian bagian 1



Gambar 3. 2 Diagram alir penelitian bagian 2

3.2 Finite Element Method

Finite Element Method (FEM) merupakan metode numerik yang membagi suatu geometri 2 dan 3 dimensi menjadi elemen (*cell*) yang ukurannya lebih kecil dengan jumlah hingga (*finite*) yang dibatasi oleh domain untuk kemudian dikalkulasikan melalui persamaan aljabar. FEM digunakan dalam berbagai macam analisis struktur, mekanika fluida, dan termodinamika. (Logan, 2012).

Dalam bidang simulasi kekuatan struktur, FEM memungkinkan analisis dan prediksi perilaku struktur di bawah berbagai kondisi beban dan tekanan. Prosesnya dimulai dengan membuat model geometris dari struktur yang akan dianalisis, yang mencakup bentuk, ukuran, dan konfigurasi material dari struktur tersebut. Setelah itu, model geometris ini dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana dalam proses yang disebut *meshing*. Semakin kecil dan banyak elemen yang digunakan, semakin tinggi akurasi hasil analisis, meskipun ini juga meningkatkan kebutuhan komputasi. Kemudian, fungsi basis dipilih untuk mendekati variabel seperti perpindahan di dalam setiap elemen, dan persamaan diferensial yang mengatur perilaku mekanik struktur diterapkan pada elemen-elemen ini untuk menghasilkan serangkaian persamaan aljabar. Persamaan-persamaan ini digabungkan menjadi satu sistem persamaan besar yang mencakup seluruh domain struktur. Setelah kondisi batas dan kondisi beban diterapkan, sistem persamaan ini diselesaikan menggunakan teknik numerik untuk mendapatkan distribusi gaya dan deformasi dalam struktur. Hasil analisis ini membantu memahami bagaimana struktur akan merespon terhadap berbagai kondisi operasional dan beban, serta untuk merancang dan mengoptimalkan kekuatan dan kestabilan struktur tersebut.

3.3 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah ditemukan, langkah awal dalam penelitian ini adalah merumuskan masalah. Perumusan masalah dalam penelitian ini menghasilkan 2 pernyataan masalah yang menjadi fokus utama penelitian. Selanjutnya dari pernyataan masalah tersebut diharapkan dapat terjawab melalui proses penelitian yang terstruktur dan sistematis.

3.4 Studi Literatur

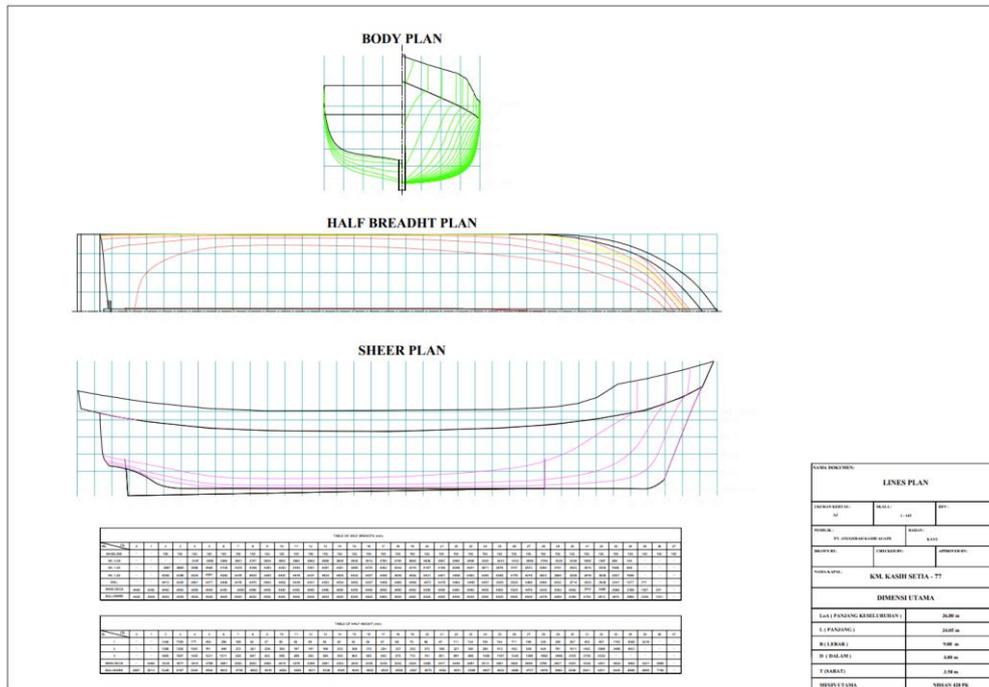
Setelah masalah ditemukan, studi literatur dilakukan untuk mengkaji teori-teori yang dapat mendukung penelitian ini. Hal tersebut bertujuan agar proses pengerjaan penelitian menjadi sistematis dan terstruktur serta hasil yang didapatkan dapat tervalidasi. Sumber utama proses studi literatur dalam penelitian ini terdiri dari buku, artikel, jurnal, dan internet dengan referensi yang dapat dipertanggungjawabkan.

3.5 Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, akan digunakan 2 data kapal yaitu kapal patroli dan *fishing vessel*. Dari kedua kapal tersebut akan dibutuhkan data rencana garis, rencana konstruksi, dan data pelat kapal yang digunakan. Data tersebut diolah untuk pemodelan 3d desain kapal yang selanjutnya dipergunakan untuk simulasi.

3.5.2 Fishing Vessel

Data *fishing vessel* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data rencana garis KM. Kasih Setia - 77 yang beroperasi di wilayah laut natuna sesuai dengan wilayah operasi kapal patroli.



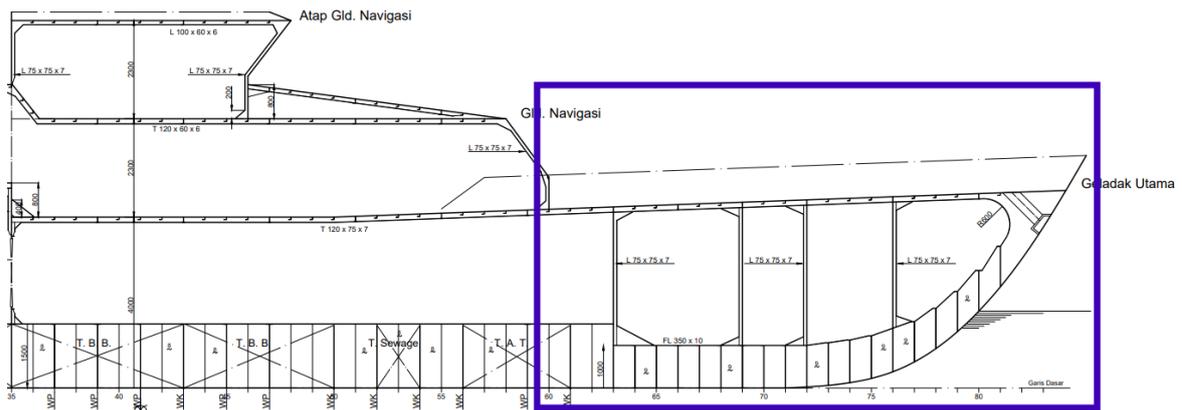
Gambar 3. 6 Rencana garis fishing vessel

3.6 3D Modelling

Pemodelan lambung kapal dilakukan menggunakan data linesplan dan rencana konstruksi yang didapatkan pada tahap sebelumnya. Software yang digunakan untuk memodelkan kapal adalah Maxsurf Modeler untuk lambung kapal dan Rhinoceros untuk gambar konstruksi. Setelah 3d model berbentuk solid, akan dilakukan simulasi menggunakan software Simcale.

3.6.1 Pemilihan Modeling

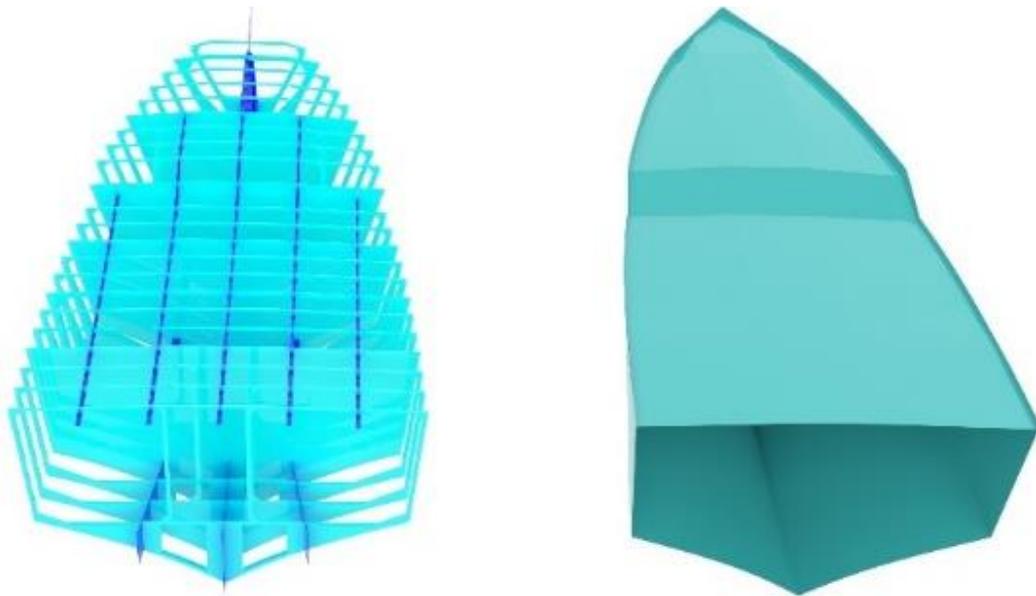
Pemilihan model dilakukan pada sebagian kapal pengawas tipe 42 patroli polisi di area haluan kapal. Area yang dimodelkan terletak di antara frame 66 hingga frame 81, sesuai dengan tampilan pada gambar 3.7. Pemodelan hanya dilakukan pada beberapa frame untuk mengurangi beban komputasi pada saat proses simulasi. Pemodelan juga akan dilakukan pada *fishing vessel* sesuai dengan rencana garis yang akan digunakan untuk mencari beban kapal. Beban tersebut kemudian akan dipergunakan dalam perhitungan *force* yang mengenai lambung kapal patroli.



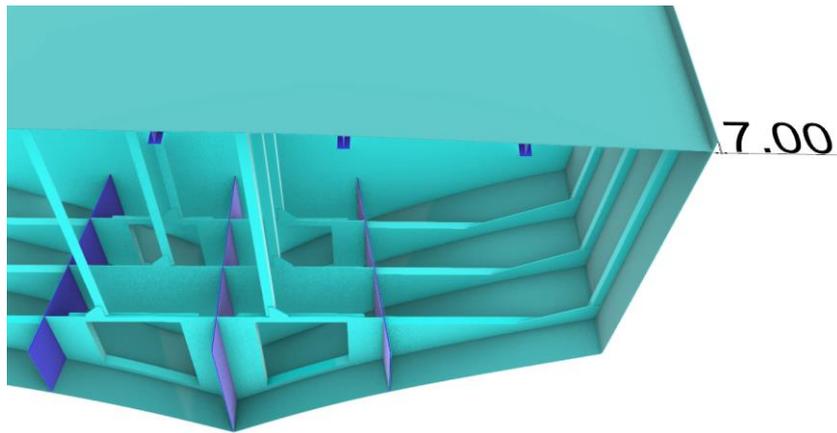
Gambar 3. 7 Bagian konstruksi kapal patroli yang akan dimodelkan

3.6.2 3D Model Kapal Patroli

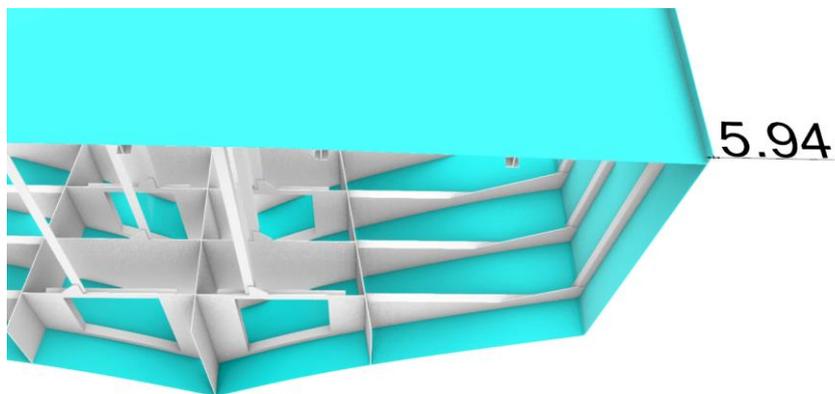
Sesuai dengan bagian konstruksi kapal yang telah terpilih pada sub-bab 3.6.1, area tersebut akan dimodelkan secara 3D untuk proses simulasi pada tahap selanjutnya. Model dibuat dengan 2 variasi, variasi pertama merupakan variasi model tanpa korosi dengan ketebalan plat 7 mm dan variasi kedua merupakan variasi model kondisi korosi dengan ketebalan plat 5.94 mm.



(a)



(b)

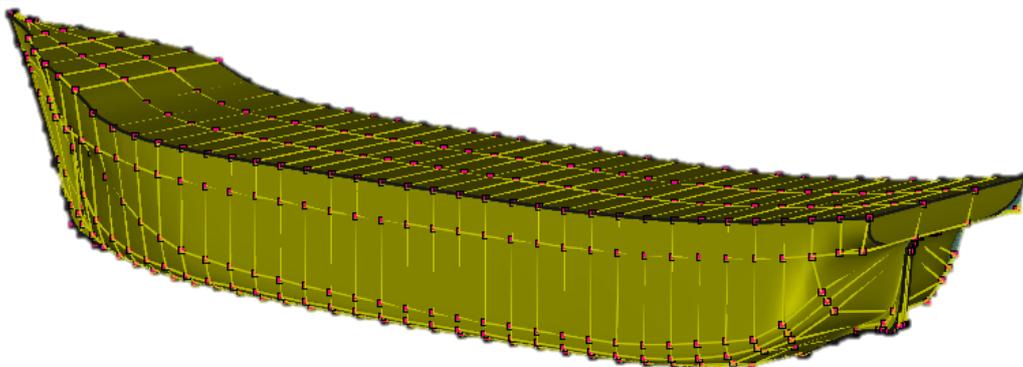


(c)

Gambar 3. 8 model 3d konstruksi kapal patroli (a), model kapal patroli tanpa korosi (b), dan model kapal patroli dengan korosi (c)

3.6.3 3D Model Fishing Vessel

Pada sub-bab ini akan diperlihatkan 3D model dari *fishing vessel* yang telah dibuat berdasarkan gambar rencana garis yang telah tersedia dalam sub-bab pengumpulan data. Pemodelan dilakukan menggunakan aplikasi maxsurf yang mana dalam aplikasi tersebut akan dilakukan juga perhitungan hidrostatis untuk menentukan berat *displacement* dari *fishing vessel*.



Gambar 3. 9 Model 3d lambung fishing vessel

3.7 Perhitungan Berat Kapal

Pada sub bab ini akan ditampilkan berat kapal patroli yang telah didapat pada saat pengumpulan data dan perhitungan berat *fishing vessel* yang akan dilakukan menggunakan aplikasi maxsurf.

3.7.1 Berat Kapal Patroli

Tabel 3.1 menunjukkan perhitungan stabilitas dari kapal patroli dengan kondisi kapal dengan muatan penuh di laut, bahan bakar dan air tawar 50 %. Dari tabel tersebut terdapat data berat pada masing masing komponen kapal yang ketika dijumlahkan akan mendapat hasil sebesar 206.194 ton.

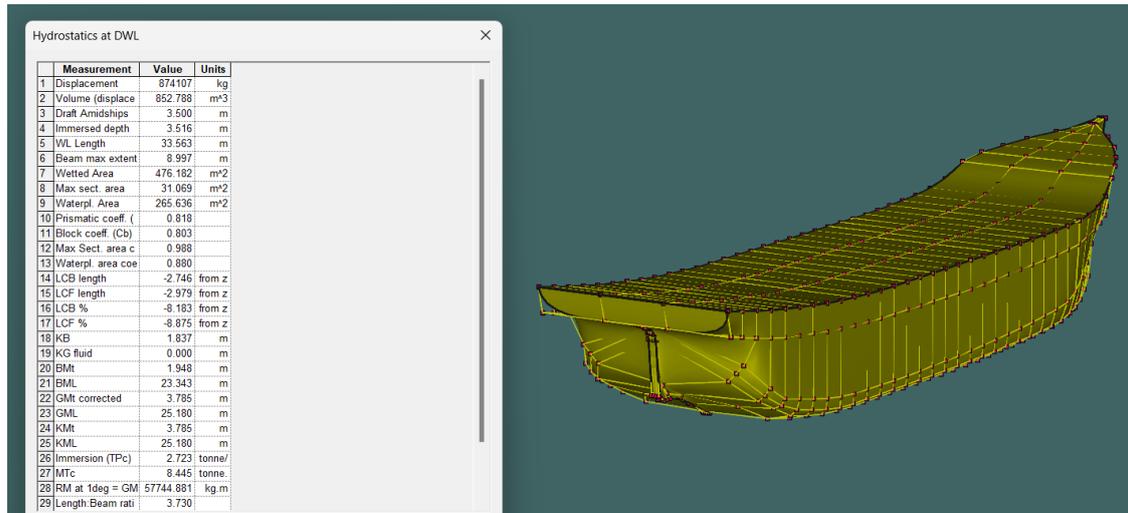
Tabel 3. 1 Data berat kapal patroli

No	Items	Quantity	Berat	LCG	KG	WxLCG	WxKG	FS moment
1	Lightship	1	175	16.879	2.877	0	0	1
2	ABK (26 Orang)	1	2.08	19.36	4.93	0	0	1
3	Provisions (50%)	1	0.25	18	2.1	0	0	1
4	Amunisi	1	1	31.5	2	0	0	1
5	T.Ceruk Haluan	0%	0	38.224	3.442	0	0	0%
6	T.A.T 1 (S)	50%	1.571	28.457	0.65	0.55	0.563	50%
7	T.A.T 1 (P)	50%	1.571	28.457	0.65	-0.55	0.563	50%
8	T.A.T 2 (S)	50%	1.39	2.507	2.004	2.558	0.12	50%
9	T.A.T 2 (P)	50%	1.39	2.507	2.004	-2.558	0.12	50%
10	T. Sewage (S)	0%	0	25.498	0.864	0.514	0	0%
11	T. Sewage (P)	0%	0	25.498	0.864	-0.514	0	0%
12	T.B.B 1 (S)	50%	3.214	21.98	0.617	-0.852	2.316	50%
13	T.B.B 1 (P)	50%	3.214	21.98	0.617	0.852	2.316	50%
14	T.B.B 2 (S)	50%	4.379	18.496	0.605	-0.873	3.088	50%
15	T.B.B 2 (P)	50%	4.379	18.496	0.605	0.873	3.088	50%
16	T.A.B (S)	0%	0	0.55	2.748	2.551	0	0%
17	T.A.B (P)	0%	0	0.55	2.748	-2.551	0	0%
18	T.B.B M.I (S)	100%	1.86	15.5	3.6	2.725	0	100%
19	T.B.B M.I (P)	100%	1.86	15.5	3.6	-2.725	0	100%
20	T.B.B M.B (S)	100%	0.881	5.525	2.8	2.15	0	100%
21	T.B.B M.B (P)	100%	0.881	5.525	2.8	-2.15	0	100%
22	T. Limbah	0%	0	15.526	0.836	0.525	0	0%
23	T.M.L	50%	1.274	15.527	0.502	-0.501	0.195	50%
24	T.M.K	0%	0	12.004	0.855	0.524	0	0%
25	T. Bilga	0%	0	12.004	0.855	-0.524	0	0%

3.7.2 Berat Fishing Vessel

Perhitungan berat dari fishing vessel dilakukan menggunakan aplikasi maxsurf setelah proses modeling selesai. Perhitungan dilakukan dengan memasukkan data sarat air kapal yang didapat saat pengumpulan data ke dalam model kapal yang dibuat berdasarkan lines plan. Setelah data sarat air diaplikasikan, kemudian dilakukan perhitungan hidrostatis dalam

aplikasi maxsurf. Hasil perhitungan hidrostatis kapal menunjukkan nilai *displacement* sebesar 874.107 ton.



Gambar 3. 10 Perhitungan berat *fishing vessel*

3.8 Perhitungan Gaya yang Mengenai Kapal Patroli

Gaya tubrukan akan dikalkulasikan sesuai dengan persamaan hukum newton 2, hukum kekekalan momentum, dan koefisien restitusi yang terdapat pada bab dasar teori.

3.8.1 Rumus Dasar

Perhitungan gaya yang mengenai kapal saat tubrukan akan dikalkulasikan menggunakan rumus

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

$$\Delta P = m(v - v')$$

dimana

- F = Gaya saat tubrukan
- ΔP = Momentum
- Δt = Waktu tubrukan
- m = Massa kapal
- v = Kecepatan kapal sebelum tubrukan
- v' = Kecepatan kapal setelah tubrukan

dikarenakan tidak adanya data kecepatan kapal setelah tubrukan maka akan digunakan hukum kekekalan momentum dan hukum restitusi untuk mengkalkulasikan persamaan kecepatan kapal setelah terjadinya tubrukan.

Berikut merupakan rumus dari hukum kekekalan momentum

$$m_a v_a + m_b v_b = m_a v_a' + m_b v_b'$$

dimana

- m_a = Massa kapal A (*Patrol boat*)
- m_b = Massa kapal B (*Fishing vessel*)
- v_a = Kecepatan kapal A sebelum tubrukan
- v_a' = Kecepatan kapal A setelah tubrukan
- v_b = Kecepatan kapal B sebelum tubrukan
- v_b' = Kecepatan kapal B setelah tubrukan

Rumus tersebut akan di substitusi dengan persamaan dari koefisien restitusi

$$e = \frac{v_b' - v_a'}{v_b - v_a}$$

dimana

- e = Koefisien restitusi
- v_a = Kecepatan kapal A sebelum tubrukan
- v_a' = Kecepatan kapal A setelah tubrukan
- v_b = Kecepatan kapal B sebelum tubrukan
- v_b' = Kecepatan kapal B setelah tubrukan

3.8.2 Substitusi dan Penurunan Rumus

a) Hukum Kekekalan Momentum

$$m_a v_a + m_b v_b = m_a v_a' + m_b v_b'$$

b) Persamaan Restitusi

$$e = \frac{v_b' - v_a'}{v_b - v_a}$$

$$(v_b - v_a)e = (v_b' - v_a')$$

$$v_b' = (v_b - v_a)e + v_a'$$

$$v_a' = v_b' - (v_b - v_a)e$$

c) v_a'

$$m_a v_a + m_b v_b = m_a v_a' + m_b v_b'$$

$$m_a v_a + m_b v_b = m_a v_a' + m_b ((v_b - v_a)e + v_a')$$

$$m_a v_a + m_b v_b = v_a' (m_a + m_b) + m_b e (v_b - v_a)$$

$$v_a' (m_a + m_b) = m_a v_a + m_b v_b - m_b e (v_b - v_a)$$

$$v_a' = \frac{m_a v_a + m_b v_b - m_b e (v_b - v_a)}{m_a + m_b}$$

d) v_b'

$$\begin{aligned}
 m_a v_a + m_b v_b &= m_a v_a' + m_b v_b' \\
 m_a v_a + m_b v_b &= m_a (v_b' - (v_b - v_a)e) + m_b v_b' \\
 m_a v_a + m_b v_b &= m_a v_b' + m_b v_b' - m_a (v_b - v_a)e \\
 m_a v_a + m_b v_b &= v_b' (m_a + m_b) - m_a (v_b - v_a)e \\
 m_a v_a + m_b v_b + m_a (v_b - v_a)e &= v_b' (m_a + m_b) \\
 v_b' &= \frac{m_a v_a + m_b v_b + m_a e (v_b - v_a)}{(m_a + m_b)}
 \end{aligned}$$

3.8.3 Persamaan v_a' dan v_b'

Setelah dilakukan proses substitusi, didapatkan rumus untuk menentukan v_a' dan v_b' sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 v_a' &= \frac{m_a v_a + m_b v_b - m_b e (v_a - v_b)}{m_a + m_b} \\
 v_b' &= \frac{m_a v_a + m_b v_b + m_a e (v_a - v_b)}{m_a + m_b}
 \end{aligned}$$

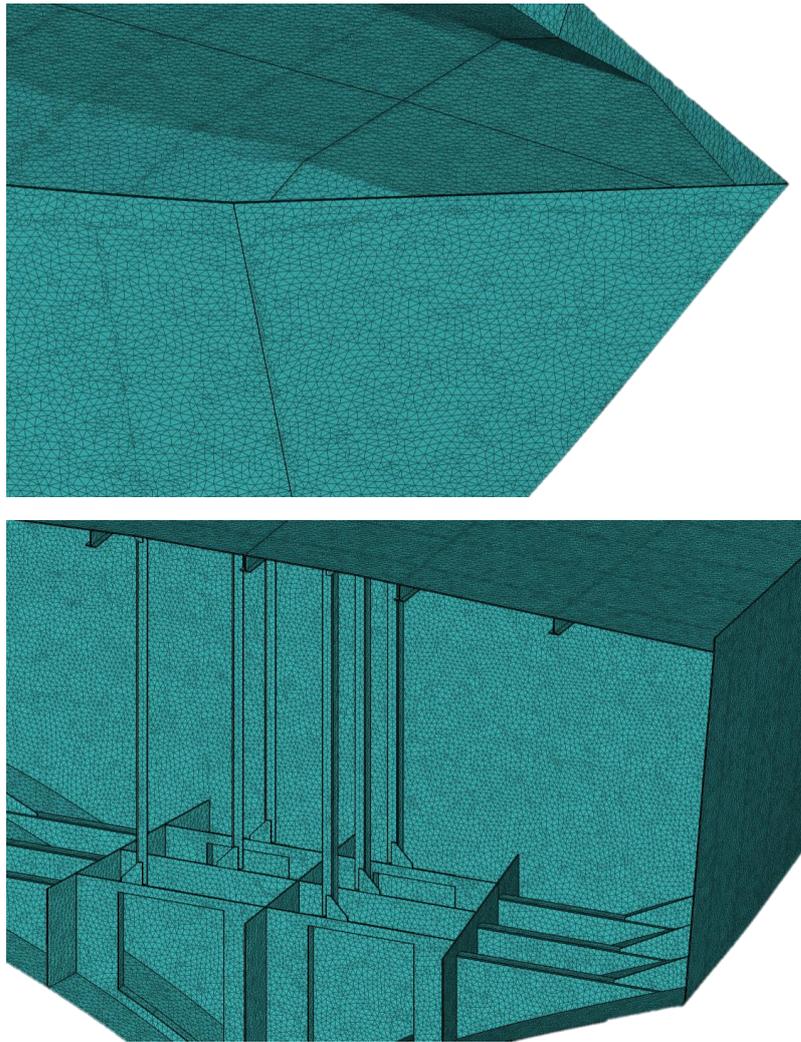
3.9 Meshing

Sebelum melakukan proses simulasi, dilakukan proses meshing pada model 3d. Proses meshing merupakan rangkaian simulasi FEM yang dilakukan untuk membagi objek 3d menjadi pecahan yang kecil dalam bentuk mesh dan node. Proses validasi ukuran dan kualitas mesh disesuaikan dengan kriteria mesh metrics dengan batasan minimum pada nilai *skewness* dan *nonorthogonality*.

Tabel 3. 2 Rekomendasi kualitas meshing simscale

Mesh Quality Metric	Maximum, CFD	Recommended, CFD	Maximum, FEA	Recommended, FEA
<i>aspectRatio</i>	20	10	80	4
<i>nonOrthogonality</i>	85	60	90	60
<i>tetEdgeRatio</i>	100	10	100	10
<i>volumeRatio</i>	80	10	100	30
<i>skewness</i>	0.85	0.25	0.85	0.25

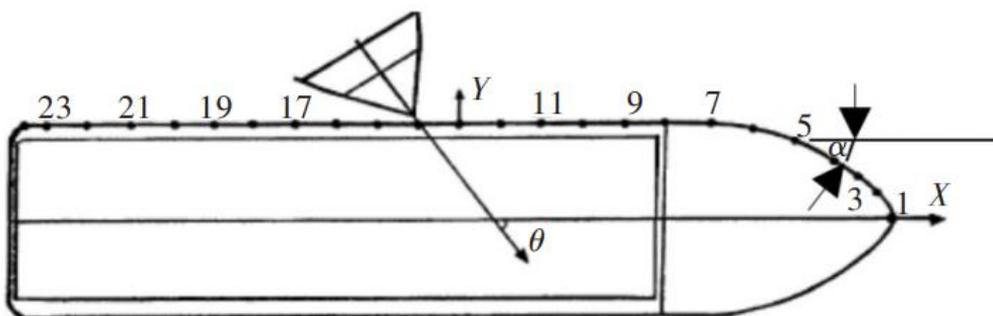
Gambar 3.11 merupakan salah satu contoh hasil meshing model kapal patroli tanpa korosi dengan besar maksimal mesh 100 mm.



Gambar 3. 11 Hasil meshing model

3.10 Simulasi Tubrukan

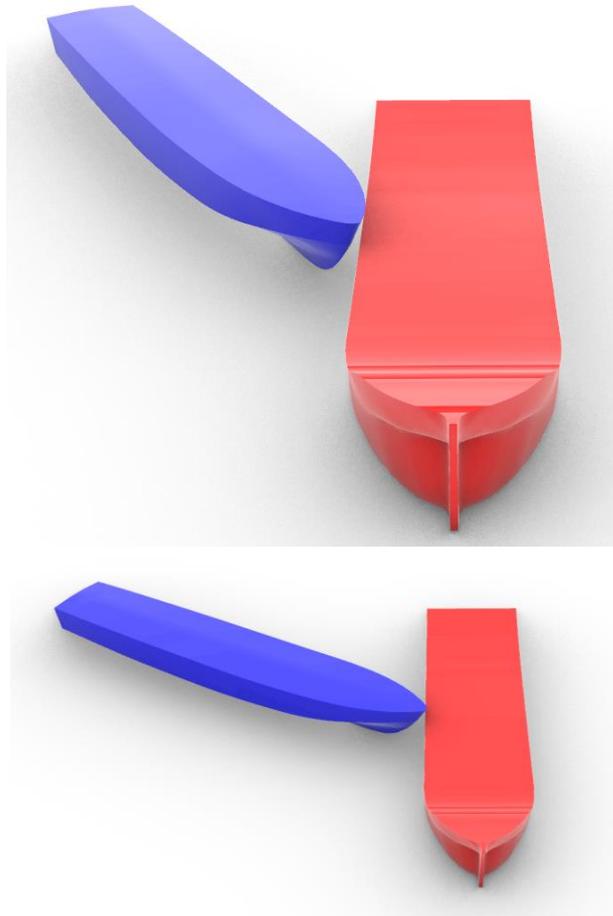
Model 3d yang sudah memenuhi kriteria *mesh metrics* selanjutnya disimulasikan untuk diberi gaya tubrukan pada bagian lambung yang terkena tubrukan pada saat kejadian tubrukan. Simulasi tersebut dilakukan dengan variasi sebelum dan setelah dikenakan korosi. Simulasi bertujuan untuk mendapatkan nilai *stress* dan deformasi pada konstruksi kapal.



Gambar 3. 12 Tipe tubrukan yang akan disimulasikan

(Liu J F & HU Z Q, 1999)

Ada 2 variasi sudut tubrukan yang akan disimulasikan. Simulasi pertama adalah tubrukan dengan variasi sudut 30° dan variasi kedua adalah variasi tubrukan dengan sudut 60° . ilustrasi sudut tubrukan ditampilkan dalam gambar 3.13.



Gambar 3. 13 ilustrasi sudut tubrukan 30° dan 60°

3.11 Analisa Hasil Simulasi

Proses analisa dilakukan dengan mengacu pada data yang telah didapatkan dari hasil simulasi tubrukan. Analisa dilakukan untuk mengetahui nilai *von-mises stress* dan total deformasi pada konstruksi kapal patroli. Nilai tersebut akan dikomparasikan antara model tanpa korosi dan setelah terkena korosi.

3.12 Penarikan Kesimpulan

Penarikan kesimpulan merupakan langkah terakhir dalam penelitian ini. Secara umum, kesimpulan akan memberikan jawaban terhadap masalah yang telah dirumuskan di awal. Kesimpulan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi mengenai simulasi tubrukan kapal.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang hasil penelitian dan pembahasannya. Pada bab ini, akan menunjukkan data hasil simulasi tubrukan pada konstruksi kapal patroli beserta penambahan korosi.

4.2 Hasil Perhitungan Gaya yang Mengenai Kapal Patroli

Dalam sub bab 4.2 akan dikalkulasikan gaya yang mengenai lambung kapal patroli. Besar dari gaya tersebut nantinya akan diaplikasikan pada saat simulasi sebagai salah satu parameter simulasi.

Hasil perhitungan gaya tubrukan sesuai dengan persamaan pada bab 3 ditampilkan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Gaya yang mengenai kapal patroli

Data Kapal						
Ver		m_a	m_b	v_a	v_b	e
		kg		(m/s)		
$v_a > v_b$	30°	206194	874107	6	4.5	0.95
	60°	206194	874107	6	4.5	0.05

Hasil Perhitungan					
Ver		v_a'	v_b'	F_a	F_b
		(m/s)		N	
$v_a > v_b$	30°	3.633	5.058	976004.3	976004.3
	60°	4.725	4.801	525540.8	525540.8

4.3 Pra-Simulasi Model

4.3.1 Material Data

Pada tahap pertama simulasi, hal pertama yang dilakukan setelah input model adalah pengaplikasian material pada model. Pelat yang digunakan pada konstruksi kapal patroli adalah baja AH36. Spesifikasi material AH36 adalah sebagai berikut.

Physical Properties		Original Value
Density		7.80 g/cc
Mechanical Properties		Original Value
Tensile Strength, Ultimate		490 - 620 MPa
Tensile Strength, Yield		350 MPa
Elongation at Break		19 %
		22 %
Modulus of Elasticity		200 GPa
Bulk Modulus		160 GPa
Poissons Ratio		0.29
Shear Modulus		80.0 GPa
Electrical Properties		Original Value
Electrical Resistivity		0.0000170 ohm-cm
Thermal Properties		Original Value
CTE, linear		12.0 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$
Specific Heat Capacity		0.470 J/g $\cdot^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity		52.0 W/m-K
Component Elements Properties		Original Value
Carbon, C		$\leq 0.18\%$
Chromium, Cr		0.25 %
Copper, Cu		0.35 %
Iron, Fe		97.09 %
Manganese, Mn		0.90 - 1.6 %
Molybdenum, Mo		0.080 %
Nickel, Ni		0.40 %
Niobium, Nb (Columbium, Cb)		0.050 %
Phosphorus, P		$\leq 0.040\%$
Silicon, Si		0.10 - 0.50 %
Sulfur, S		$\leq 0.040\%$
Vanadium, V		0.10 %

Gambar 4. 1 Material properties AH36

4.3.2 Meshing dan Konvergensi

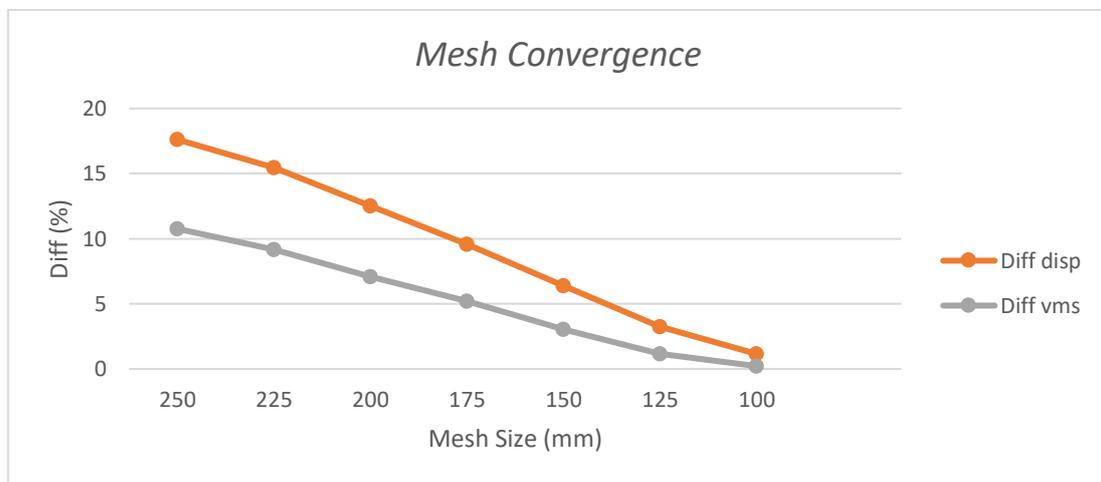
Tahap selanjutnya pada simulasi adalah meshing. Ukuran meshing yang diterapkan pada model konstruksi kapal patroli berkisar pada ukuran maksimal 75mm sampai 250mm. Jumlah elemen hasil meshing dan nilai kualitas mesh akan ditampilkan dalam tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Kualitas meshing pada tiap ukuran

Mesh				
Ukuran (mm)	Elemen	Quality		Diff from Recc (%)
		Skewness	Non-Orthogonality	
75	3356021	0.2	58.4	2.74
100	1981518	0.3	65.1	7.83
125	1399891	0.3	68.7	12.66
150	1081288	0.3	70.8	15.25
175	898124	0.3	72	16.67
200	790274	0.3	72.6	17.36
225	715789	0.3	73	17.81
250	660413	0.3	73.2	18.03

Tabel 4. 3 konvergensi hasil simulasi

<i>Impact</i>					
Ukuran <i>max</i> (mm)	Elemen	<i>Mg Displacement</i> (mm)	<i>Von-mises</i> <i>Stress</i> (MPa)	<i>Diff disp</i>	<i>Diff vms</i>
75	3356021	1.833	16.554		
100	1981518	1.812	16.518	1.16 %	0.22 %
125	1399891	1.775	16.362	3.24 %	1.17 %
150	1081288	1.722	16.064	6.41 %	3.05 %
175	898124	1.673	15.734	9.56 %	5.21 %
200	790274	1.629	15.460	12.51 %	7.07 %
225	715789	1.587	15.165	15.46 %	9.16 %
250	660413	1.558	14.946	17.61 %	10.76 %



Gambar 4. 2 Grafik konvergensi hasil simulasi

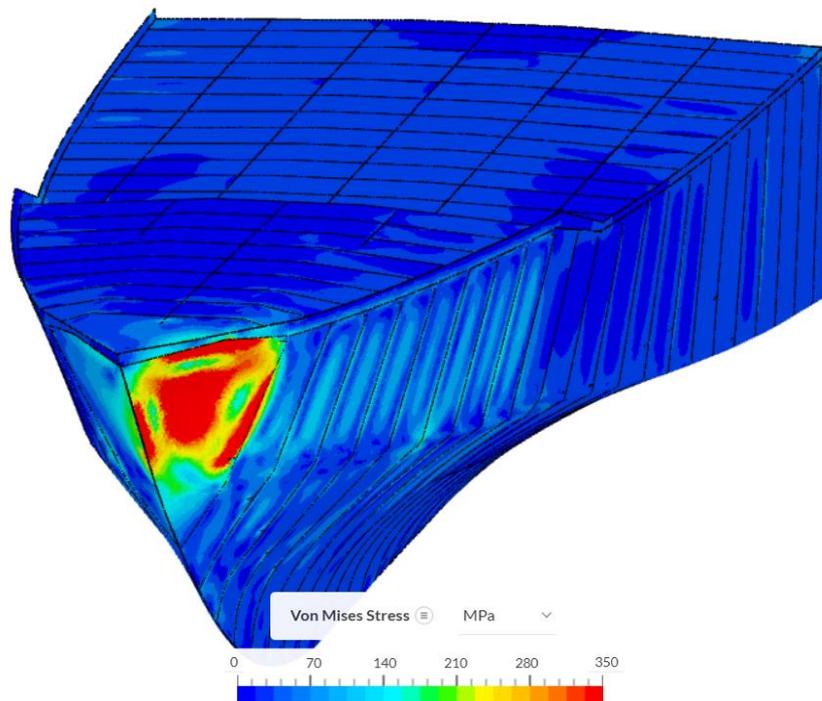
Dari hasil meshing diatas, simulasi model akan menggunakan ukuran mesh sebesar 100 mm. Hal tersebut dipilih mempertimbangkan perbedaan hasil simulasi yang sudah dibawah 5%. Selain itu, dipertimbangkan juga waktu yang diperlukan untuk simulasi dan jumlah *core hours* yang digunakan setiap proses meshing dan simulasi.

4.4 Hasil Simulasi Model

4.4.1 Hasil Simulasi Tanpa Korosi, Sudut 30°

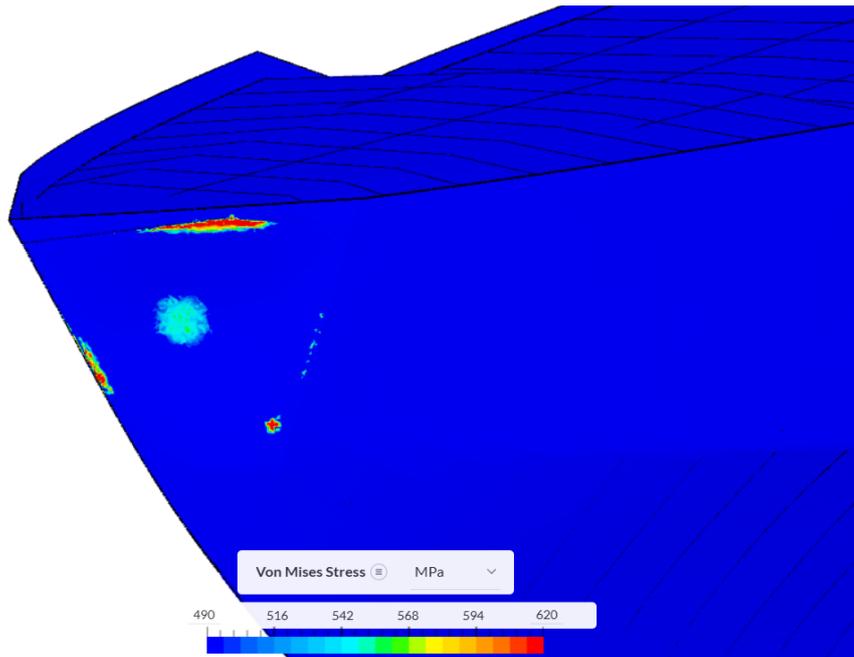
a) Von-mises Stress pada Kulit Kapal

Gambar 4.3 menunjukkan analisis tegangan *Von-Mises* pada struktur kapal patroli variasi tanpa korosi dengan sudut 30°. Dalam ilustrasi hasil simulasi ini, besarnya *von-mises stress* yang mengenai kulit kapal dipaparkan dengan beberapa warna yang berbeda. Area berwarna **merah** di bagian depan kapal mengindikasikan tegangan yang cukup tinggi **melebihi 350 MPa**. Besarnya tegangan tersebut telah melebihi nilai *yield tensile strength* material. Dengan demikian, menurut dasar teori yang telah dipaparkan dalam bab 2, area tersebut akan mengalami deformasi plastis hingga kegagalan struktur. Sementara area lain yang berwarna **biru** dan **hijau** menunjukkan tegangan yang lebih rendah dan masih **dibawah nilai *yield tensile strength* material**, sehingga pada bagian **selain warna merah** hanya akan mengalami **deformasi elastis**.



Gambar 4. 3 *Von-mises stress* pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 30°

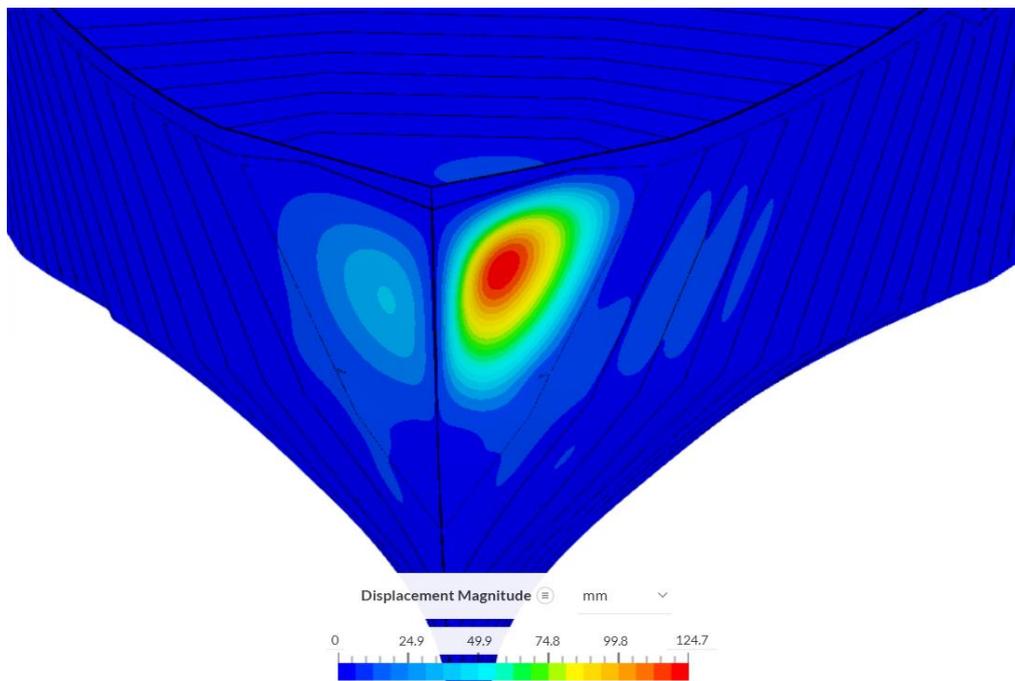
Pada gambar 4.4 ditunjukkan gambaran lebih detail mengenai besarnya tegangan pada area depan kapal pasca terjadinya tubrukan dengan skala tegangan yang lebih tinggi. Ilustrasi hasil simulasi tersebut mengindikasikan **terjadinya robekan** pada kulit kapal yang ditandai dengan warna **merah** karena besarnya tegangan yang **melebihi** kapasitas *ultimate tensile strength* material sebesar **620 MPa**. Warna **biru** hingga **kuning** menandakan bahwa dalam area tersebut, material akan mengalami kondisi **deformasi plastis** hingga munculnya **crack dan necking** karena tingginya tegangan telah berada dalam **rentang nilai *ultimate tensile strength* material** sebesar **490-620 MPa**.



Gambar 4. 4 *Von-mises stress* tertinggi pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 30°

b) *Displacement Magnitude* pada Kulit Kapal

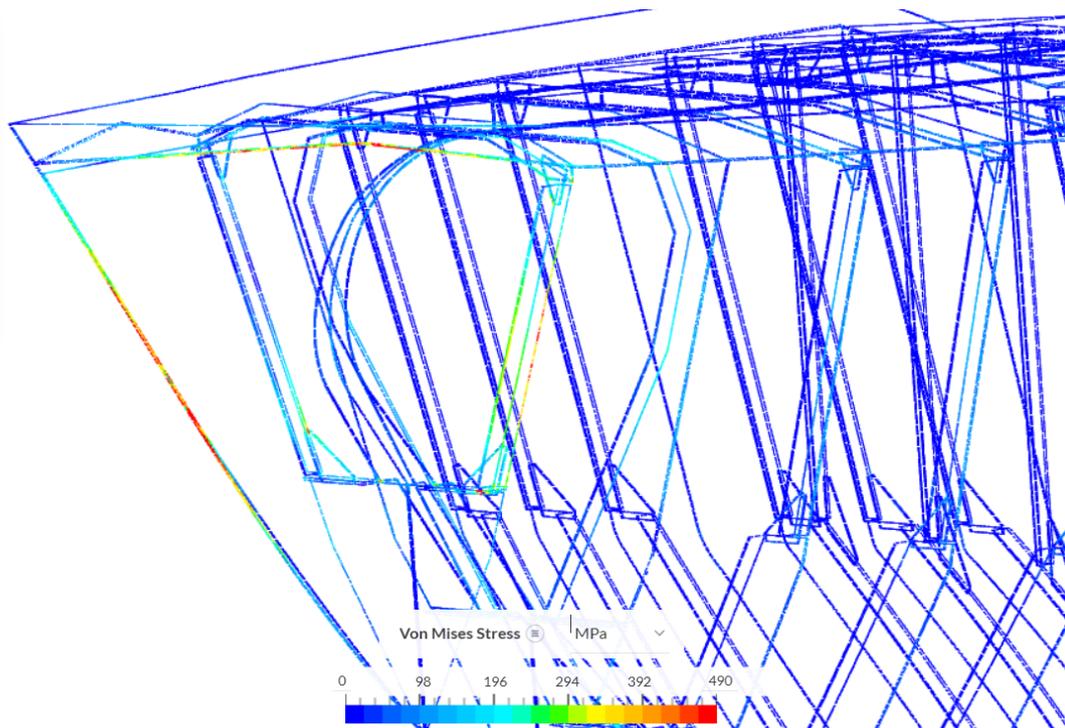
Gambar 4.5 menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada kulit kapal patroli. Dalam ilustrasi tersebut, area dan kedalaman deformasi ditampilkan dalam beberapa warna. Warna **biru pekat** menandakan area dengan nilai **deformasi paling rendah** hingga bernilai 0. Warna **merah** pada gambar menunjukkan titik **deformasi tertinggi** pada kulit kapal patroli di angka **124.7 mm**.



Gambar 4. 5 *Displacement magnitude* pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 30°

c) *Von-mises Stress* pada Struktur Kapal

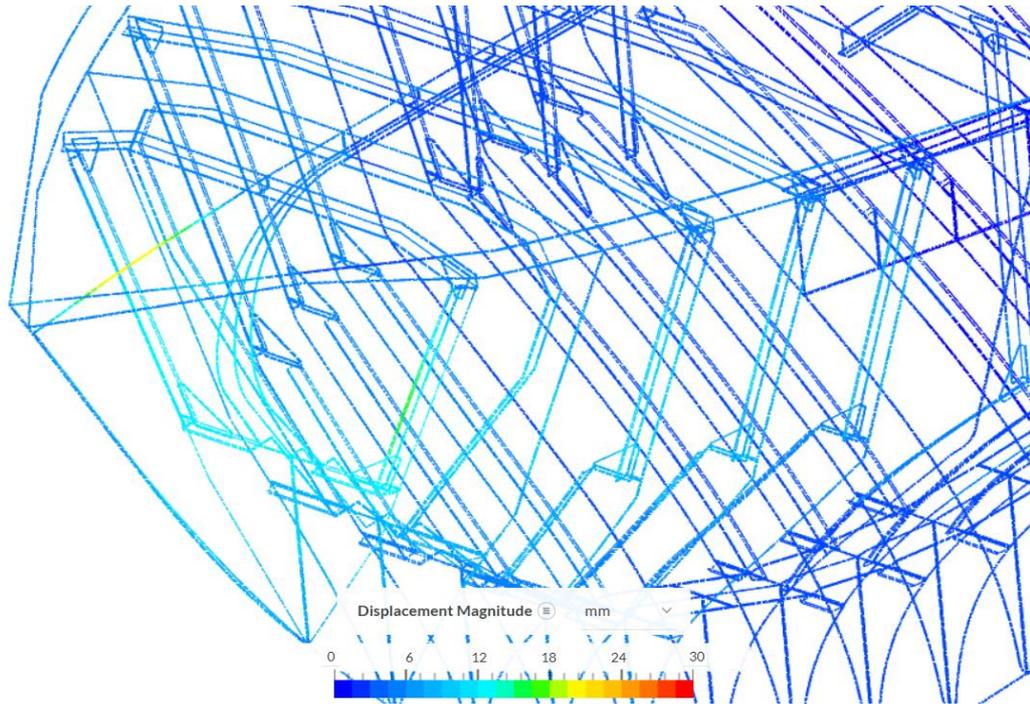
Dalam ilustrasi hasil simulasi pada gambar 4.6, besarnya *von-mises stress* yang mengenai struktur kapal dipaparkan dengan beberapa warna yang berbeda. Area berwarna **merah** di bagian **struktur haluan kapal dan frame 81** mengindikasikan tegangan yang cukup tinggi **melebihi 490 MPa**. Besarnya tegangan tersebut telah berada dalam area nilai *ultimate tensile strength* material. Dengan demikian, menurut dasar teori yang telah dipaparkan dalam bab 2, area tersebut akan mengalami **deformasi plastis** hingga **kegagalan struktur**. Sementara area lain yang berwarna **biru** dan **hijau** menunjukkan tegangan yang lebih rendah dan masih **dibawah nilai *yield tensile strength*** material sebesar **350 MPa**, sehingga pada bagian berwarna biru dan hijau hanya akan mengalami **deformasi elastis**.



Gambar 4. 6 *Von-mises stress* pada struktur kapal model tanpa korosi sudut 30°

d) *Displacement Magnitude* pada Struktur Kapal

Gambar 4.7 menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada struktur kapal patroli. Dalam ilustrasi tersebut, area dan kedalaman deformasi ditampilkan dalam beberapa warna. Warna **biru pekat** menandakan area dengan nilai **deformasi paling rendah** hingga bernilai 0. Warna **kuning** pada gambar menunjukkan titik **deformasi tertinggi** pada struktur kapal patroli di angka **20 mm**.

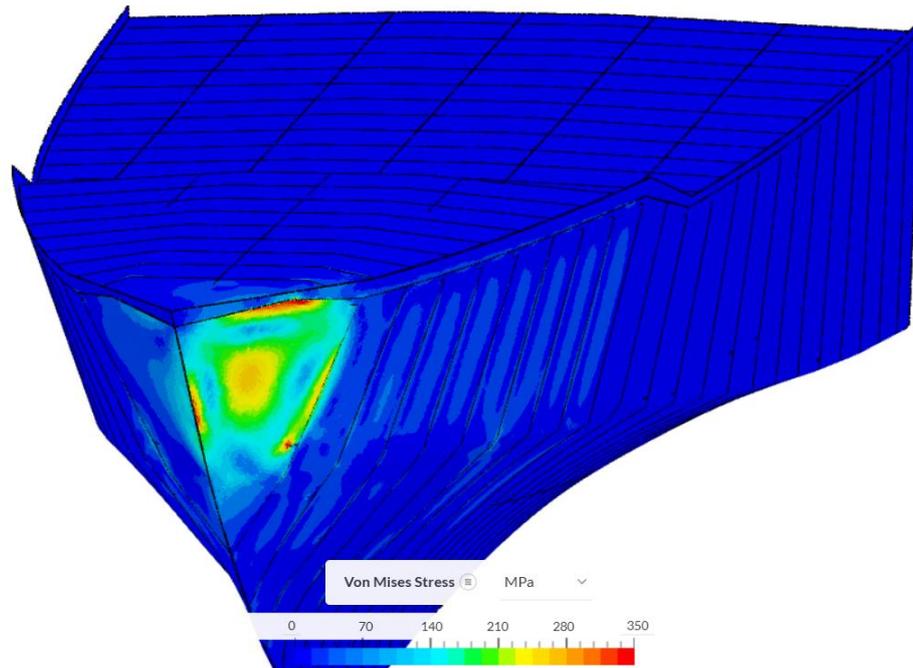


Gambar 4. 7 *Displacement magnitude* pada struktur kapal model tanpa korosi sudut 30°

4.4.2 Hasil Simulasi Tanpa Korosi, Sudut 60°

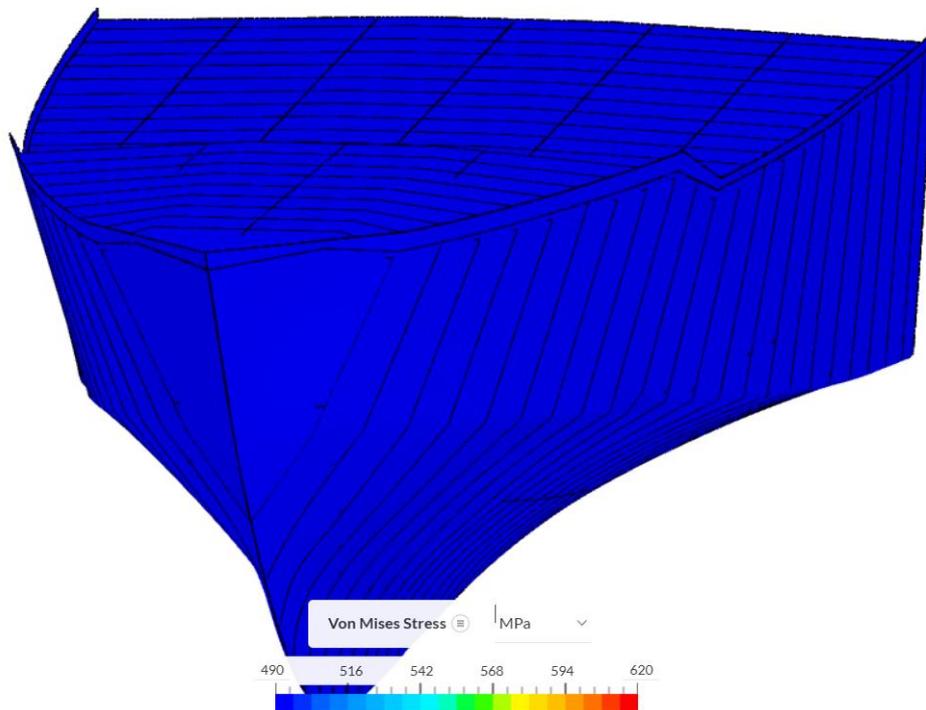
a) *Von-Mises Stress*

Gambar 4.8 menunjukkan analisis tegangan *Von-Mises* pada struktur kapal patroli variasi tanpa korosi dengan sudut 60°. Dalam ilustrasi hasil simulasi ini, besarnya *von-mises stress* yang mengenai kulit kapal dipaparkan dengan beberapa warna yang berbeda. Area berwarna **merah** di bagian depan kapal mengindikasikan tegangan yang cukup tinggi **melebihi 350 MPa**. Besarnya tegangan tersebut telah melebihi nilai *yield tensile strength* material. Dengan demikian, menurut dasar teori yang telah dipaparkan dalam bab 2, area tersebut akan mengalami **deformasi plastis** hingga **kegagalan struktur**. Sementara area lain yang berwarna **biru** dan **hijau** menunjukkan tegangan yang lebih rendah dan masih **dibawah nilai *yield tensile strength* material**, sehingga pada bagian **selain warna merah** hanya akan mengalami **deformasi elastis**.



Gambar 4. 8 *Von-mises stress* pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 60°

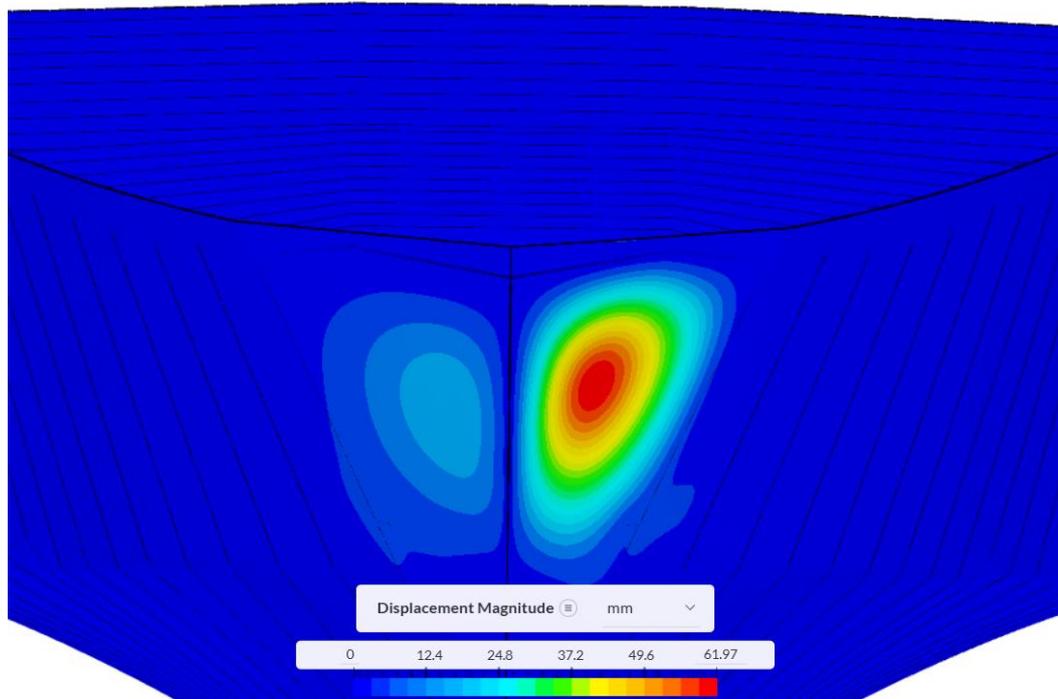
Pada gambar 4.9 ditunjukkan gambaran lebih detail mengenai besarnya tegangan pada area depan kapal pasca terjadinya tubrukan dengan skala tegangan yang lebih tinggi. Gambar tersebut mengindikasikan bahwa tidak adanya bagian dari kapal patroli yang terkena tegangan hingga mencapai nilai *ultimate tensile strength* material sebesar 490 MPa. Kerusakan terparah adalah terjadinya deformasi plastis pada area haluan kapal yang ditunjukkan dengan warna merah pada gambar 4.8.



Gambar 4. 9 *Von-mises stress* tertinggi pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 60°

b) *Displacement Magnitude*

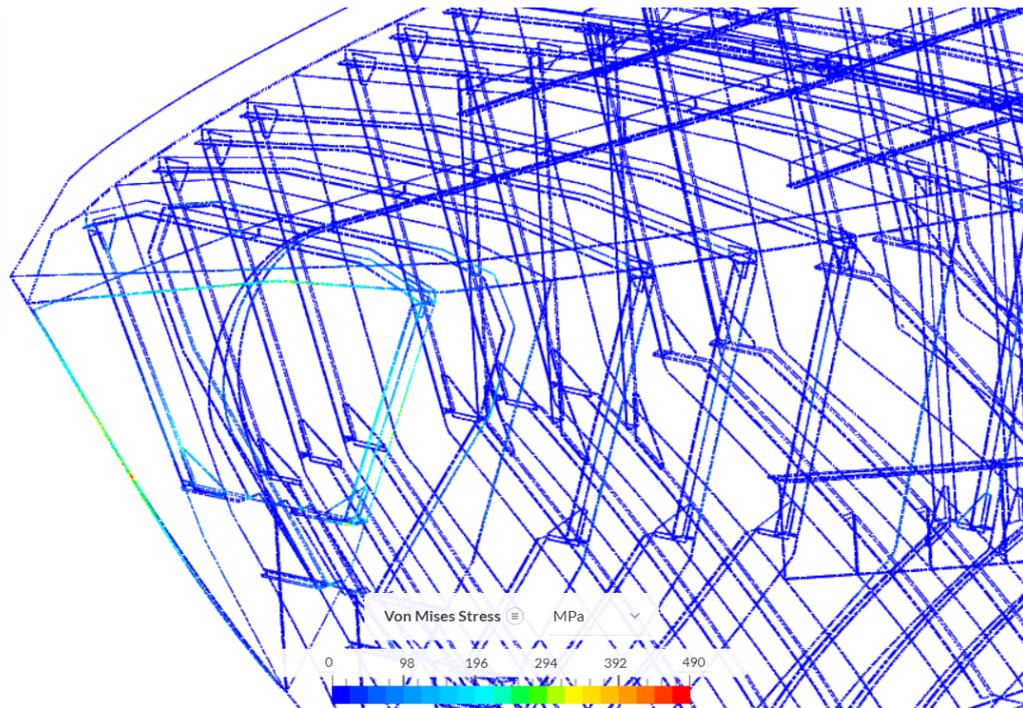
Gambar 4.10 menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada kulit kapal patroli. Dalam ilustrasi tersebut, area dan kedalaman deformasi ditampilkan dalam beberapa warna. Warna **biru pekat** menandakan area dengan nilai **deformasi paling rendah** hingga bernilai 0. Warna **merah** pada gambar menunjukkan titik **deformasi tertinggi** pada kulit kapal patroli di angka **61.97 mm**.



Gambar 4. 10 *Displacement magnitude* pada kulit kapal model tanpa korosi sudut 60°

c) *Von-mises Stress* pada Struktur Kapal

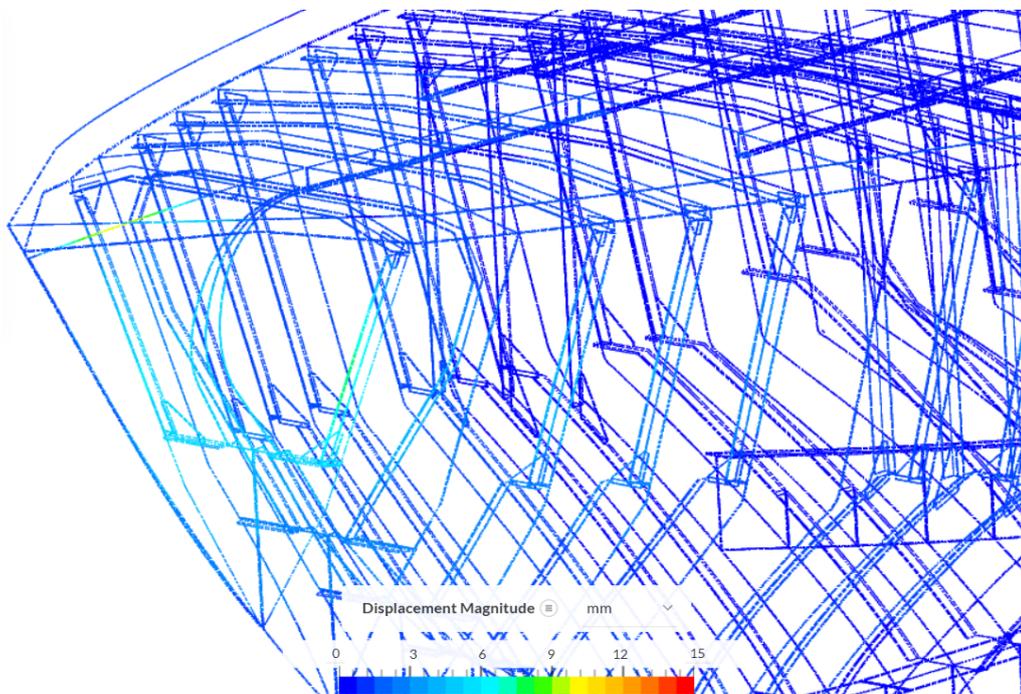
Dalam ilustrasi hasil simulasi pada gambar 4.11, besarnya *von-mises stress* yang mengenai struktur kapal dipaparkan dengan beberapa warna yang berbeda. Area berwarna **oranye** di bagian depan kapal mengindikasikan tegangan yang cukup tinggi dengan nilai **kurang lebih 400 MPa**. Besarnya tegangan tersebut telah **melebihi nilai yield tensile strength** material sebesar 350 MPa. Dengan demikian, menurut dasar teori yang telah dipaparkan dalam bab 2, area tersebut akan mengalami **deformasi plastis**. Sementara area lain yang berwarna **biru** dan **hijau** menunjukkan tegangan yang lebih rendah dan masih **dibawah nilai yield tensile strength material**, sehingga pada bagian berwarna **biru** dan **hijau** hanya akan mengalami **deformasi elastis**.



Gambar 4. 11 *Von-mises stress* pada struktur kapal model tanpa korosi sudut 60°

d) *Displacement Magnitude* pada Struktur Kapal

Gambar 4.12 menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada struktur kapal patroli. Dalam ilustrasi tersebut, area dan kedalaman deformasi ditampilkan dalam beberapa warna. Warna **biru pekat** menandakan area dengan nilai **deformasi paling rendah** hingga bernilai 0. Warna **kuning** pada gambar menunjukkan **titik deformasi tertinggi** pada struktur kapal patroli di angka **10 mm**.

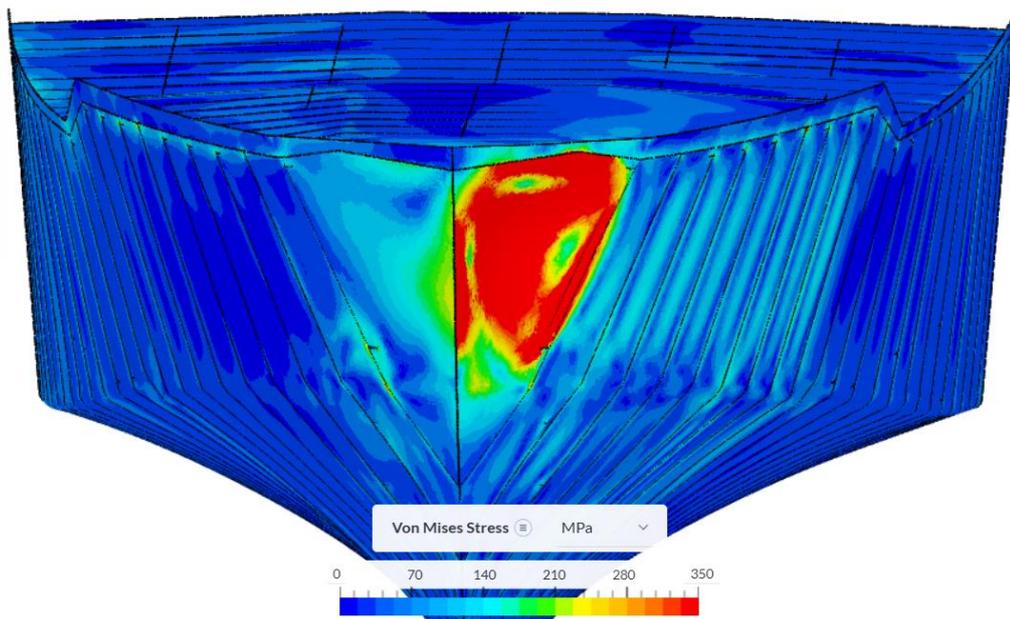


Gambar 4. 12 *Displacement magnitude* pada struktur kapal model tanpa korosi sudut 60°

4.4.3 Hasil Simulasi dengan Korosi, Sudut 30°

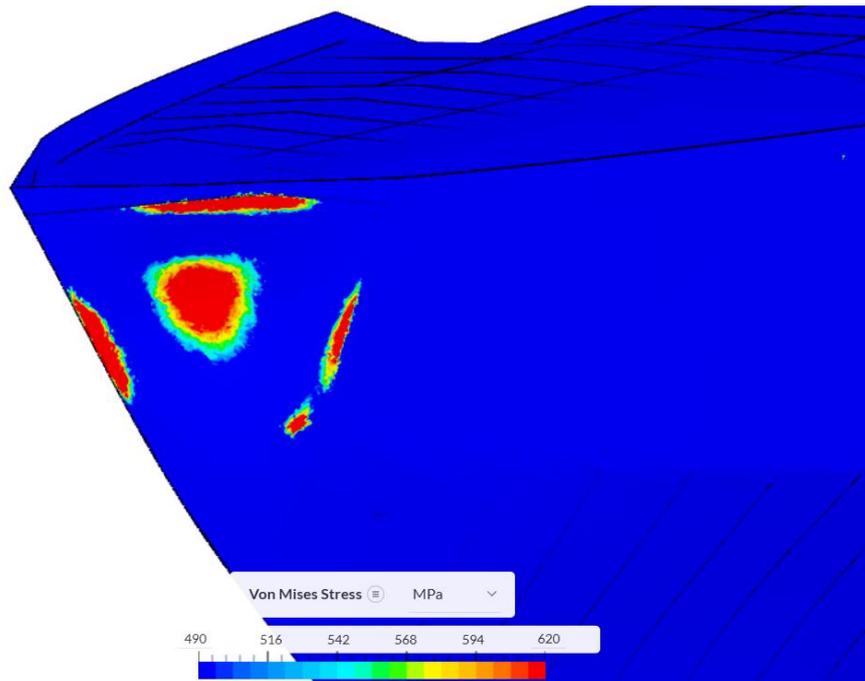
a) Von-Mises Stress

Gambar 4.13 menunjukkan analisis tegangan *Von-Mises* pada struktur kapal patroli variasi dengan korosi pada sudut 30°. Dalam ilustrasi hasil simulasi ini, besarnya *von-mises stress* yang mengenai kulit kapal dipaparkan dengan beberapa warna yang berbeda. Area berwarna **merah** di bagian depan kapal mengindikasikan tegangan yang cukup tinggi **melebihi 350 MPa**. Besarnya tegangan tersebut telah melebihi nilai *yield tensile strength* material. Dengan demikian, menurut dasar teori yang telah dipaparkan dalam bab 2, area tersebut akan mengalami **deformasi plastis** hingga **kegagalan struktur**. Sementara area lain yang berwarna **biru** dan **hijau** menunjukkan tegangan yang lebih rendah dan masih **dibawah nilai *yield tensile strength* material**, sehingga pada bagian **selain warna merah** hanya akan mengalami **deformasi elastis**.



Gambar 4. 13 *Von-mises stress* pada kulit kapal model dengan korosi sudut 30°

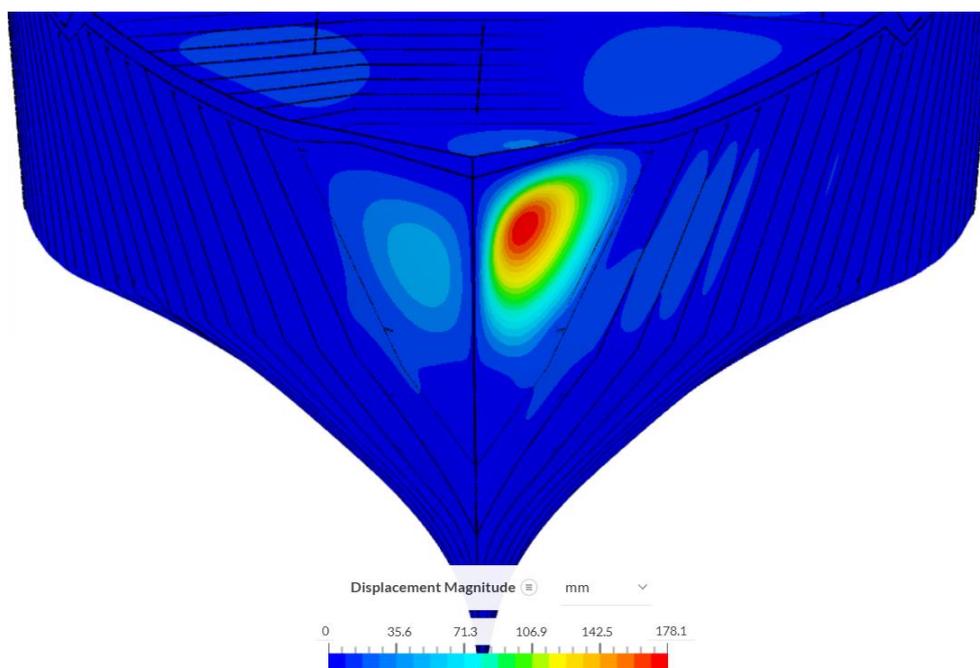
Pada gambar 4.14 ditunjukkan gambaran lebih detail mengenai besarnya tegangan pada area depan kapal pasca terjadinya tubrukan dengan skala tegangan yang lebih tinggi. Ilustrasi hasil simulasi tersebut mengindikasikan terjadinya **robekan pada kulit kapal** yang ditandai dengan warna **merah** karena besarnya tegangan yang **melebihi kapasitas *ultimate tensile strength*** material sebesar 350 MPa. Warna **biru** hingga **kuning** menandakan bahwa dalam area tersebut, material akan mengalami kondisi **deformasi plastis** hingga munculnya **crack** dan **necking** karena tingginya tegangan telah berada dalam rentang nilai *ultimate tensile strength* material.



Gambar 4. 14 *Von-mises stress* tertinggi pada kulit kapal model dengan korosi sudut 30°

b) *Displacement Magnitude*

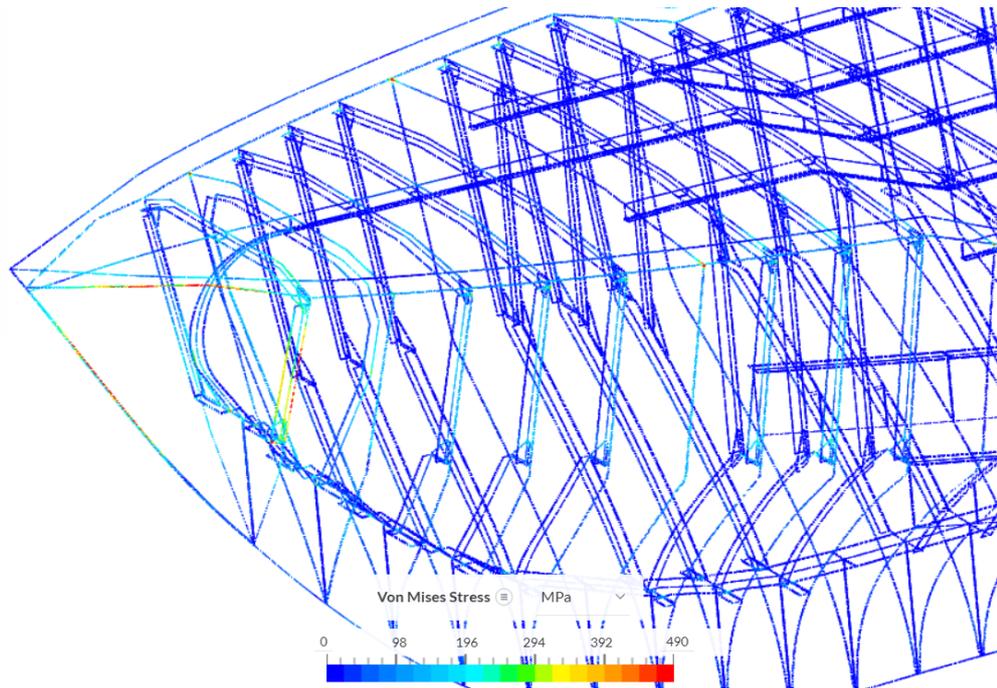
Gambar 4.15 menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada kulit kapal patroli. Dalam ilustrasi tersebut, area dan kedalaman deformasi ditampilkan dalam beberapa warna. Warna **biru pekat** menandakan area dengan nilai **deformasi paling rendah** hingga bernilai 0. Warna **merah** pada gambar menunjukkan titik **deformasi tertinggi** pada kulit kapal patroli di angka **178.1 mm**.



Gambar 4. 15 *Displacement magnitude* pada kulit kapal model dengan korosi sudut 30°

c) *Von-mises Stress* pada Struktur Kapal

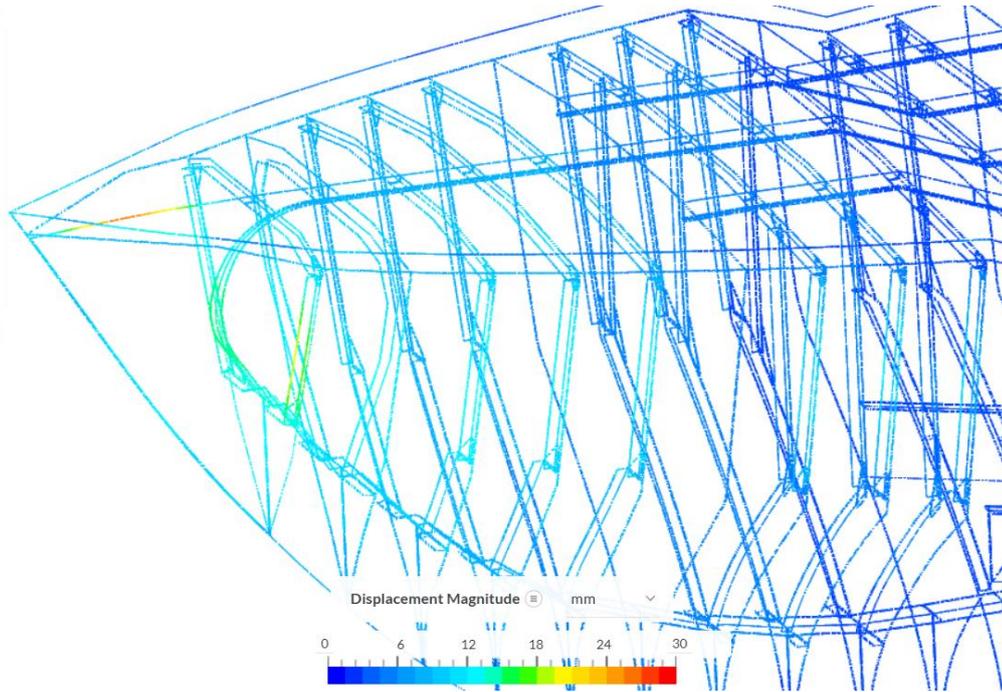
Dalam ilustrasi hasil simulasi pada gambar 4.16, besarnya *von-mises stress* yang mengenai struktur kapal dipaparkan dengan beberapa warna yang berbeda. Area berwarna **merah** di bagian **haluan kapal** dan **frame 81** mengindikasikan tegangan yang cukup tinggi **melebihi 490 MPa**. Besarnya tegangan tersebut telah berada dalam area nilai *ultimate tensile strength* material. Dengan demikian, menurut dasar teori yang telah dipaparkan dalam bab 2, area tersebut akan mengalami **deformasi plastis** hingga **kegagalan struktur**. Sementara area lain yang berwarna **biru** dan **hijau** menunjukkan **tegangan yang lebih rendah** dan masih dibawah nilai *yield tensile strength* material sebesar 350 MPa, sehingga pada bagian berwarna biru dan hijau hanya akan mengalami **deformasi elastis**.



Gambar 4. 16 *Von-mises stress* pada struktur kapal model dengan korosi sudut 30°

d) *Displacement Magnitude* pada Struktur Kapal

Gambar 4.17 menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada struktur kapal patroli. Dalam ilustrasi tersebut, area dan kedalaman deformasi ditampilkan dalam beberapa warna. Warna **biru pekat** menandakan area dengan nilai **deformasi paling rendah** hingga bernilai 0. Warna **oranye** pada gambar menunjukkan titik **deformasi tertinggi** pada struktur kapal patroli di angka **27 mm**.

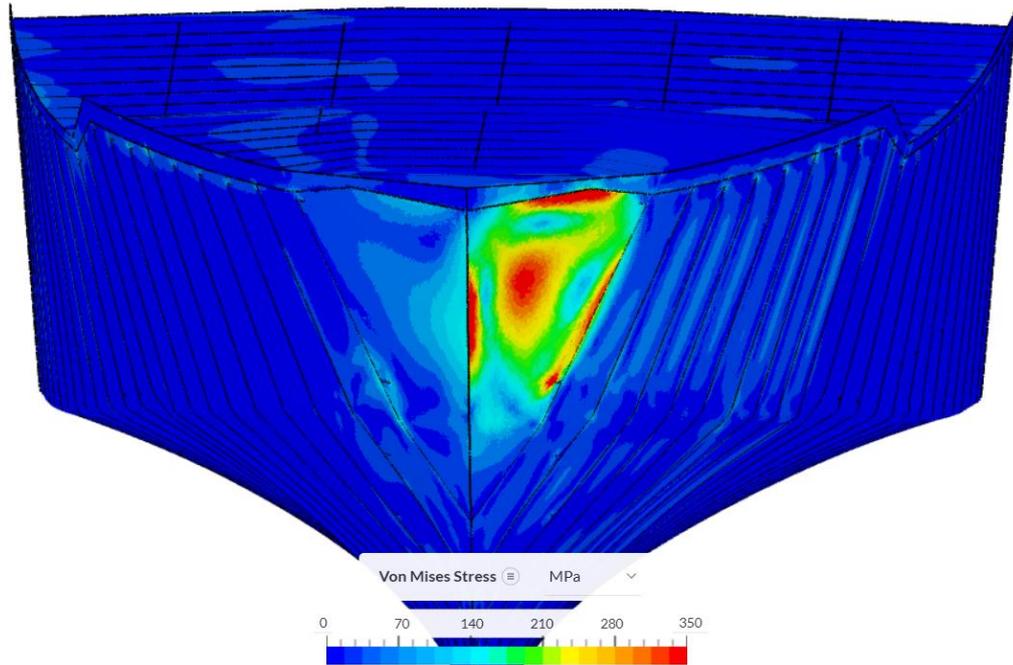


Gambar 4. 17 *Displacement magnitude* struktur kapal model dengan korosi sudut 30°

4.4.4 Hasil Simulasi dengan Korosi, Sudut 60°

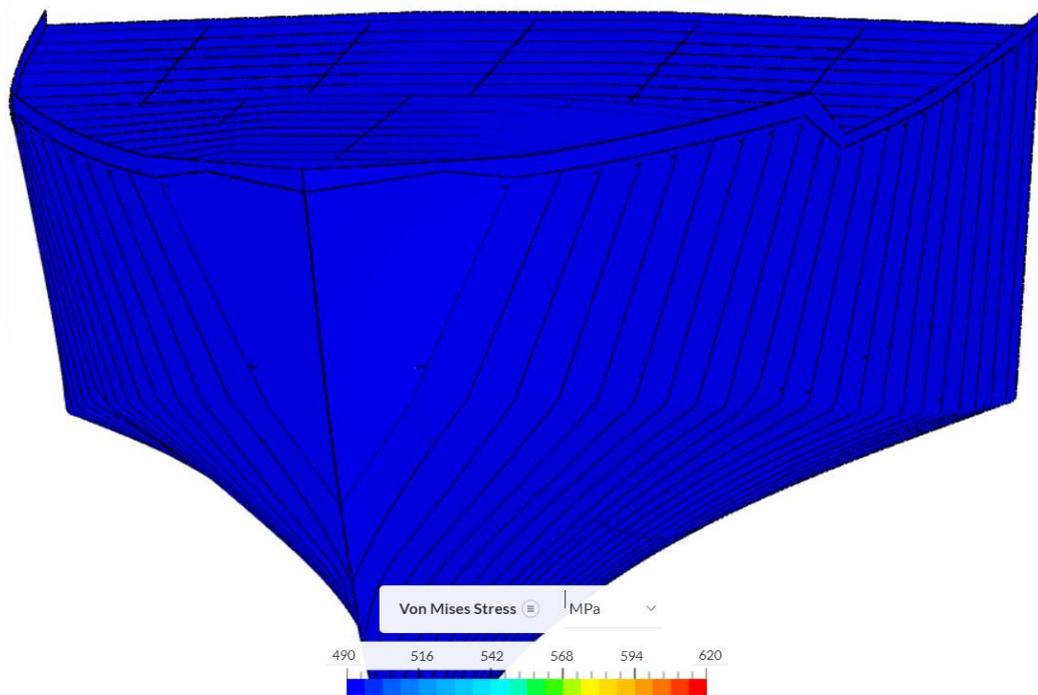
a) *Von-Mises Stress*

Gambar 4.18 menunjukkan analisis tegangan *Von-Mises* pada struktur kapal patroli variasi dengan korosi pada sudut 60°. Dalam ilustrasi hasil simulasi ini, besarnya *von-mises stress* yang mengenai kulit kapal dipaparkan dengan beberapa warna yang berbeda. Area berwarna **merah** di bagian haluan kapal mengindikasikan tegangan yang cukup tinggi **melebihi 350 MPa**. Besarnya tegangan tersebut telah melebihi nilai *yield tensile strength* material. Dengan demikian, menurut dasar teori yang telah dipaparkan dalam bab 2, area tersebut akan mengalami **deformasi plastis** hingga **kegagalan struktur**. Sementara area lain yang berwarna **biru** dan **hijau** menunjukkan tegangan yang lebih rendah dan masih dibawah nilai *yield tensile strength* material, sehingga pada bagian **selain warna merah** hanya akan mengalami **deformasi elastis**.



Gambar 4. 18 *Von-mises stress* pada kulit kapal model dengan korosi sudut 60°

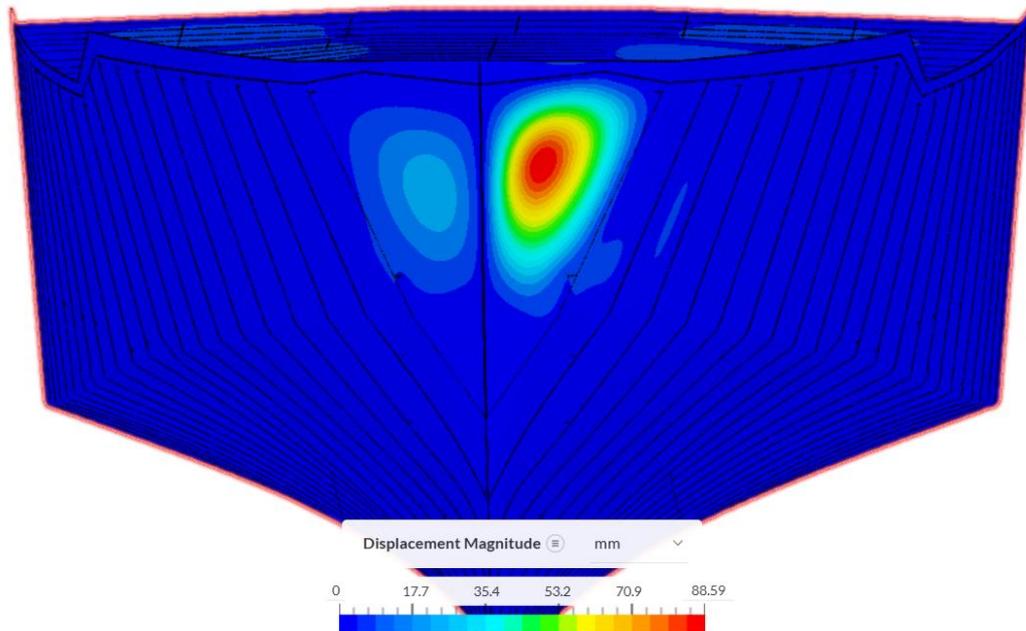
Pada gambar 4.19 ditunjukkan gambaran lebih detail mengenai besarnya tegangan pada area haluan kapal pasca terjadinya tubrukan dengan skala tegangan yang lebih tinggi. Gambar tersebut mengindikasikan bahwa tidak adanya bagian dari kapal patroli yang terkena tegangan hingga mencapai nilai *ultimate tensile strength* material. Kerusakan terparah adalah terjadinya deformasi plastis pada area depan kapal yang ditunjukkan dengan warna merah pada gambar 4.18.



Gambar 4. 19 *Von-mises stress* tertinggi pada kulit kapal model dengan korosi sudut 60°

b) *Displacement Magnitude*

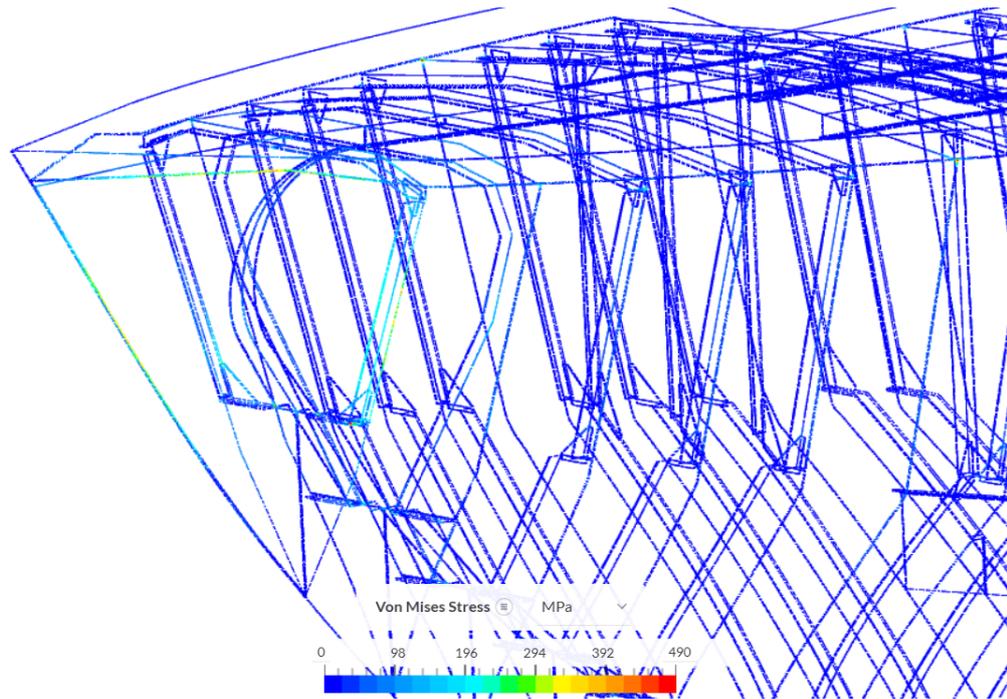
Gambar 4.20 menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada kulit kapal patroli. Dalam ilustrasi tersebut, area dan kedalaman deformasi ditampilkan dalam beberapa warna. Warna **biru pekat** menandakan area dengan nilai **deformasi paling rendah** hingga bernilai 0. Warna **merah** pada gambar menunjukkan titik **deformasi tertinggi** pada kulit kapal patroli di angka **88.59 mm**.



Gambar 4. 20 *Displacement magnitude* pada kulit kapal model dengan korosi sudut 60°

c) *Von-mises Stress* pada Struktur Kapal

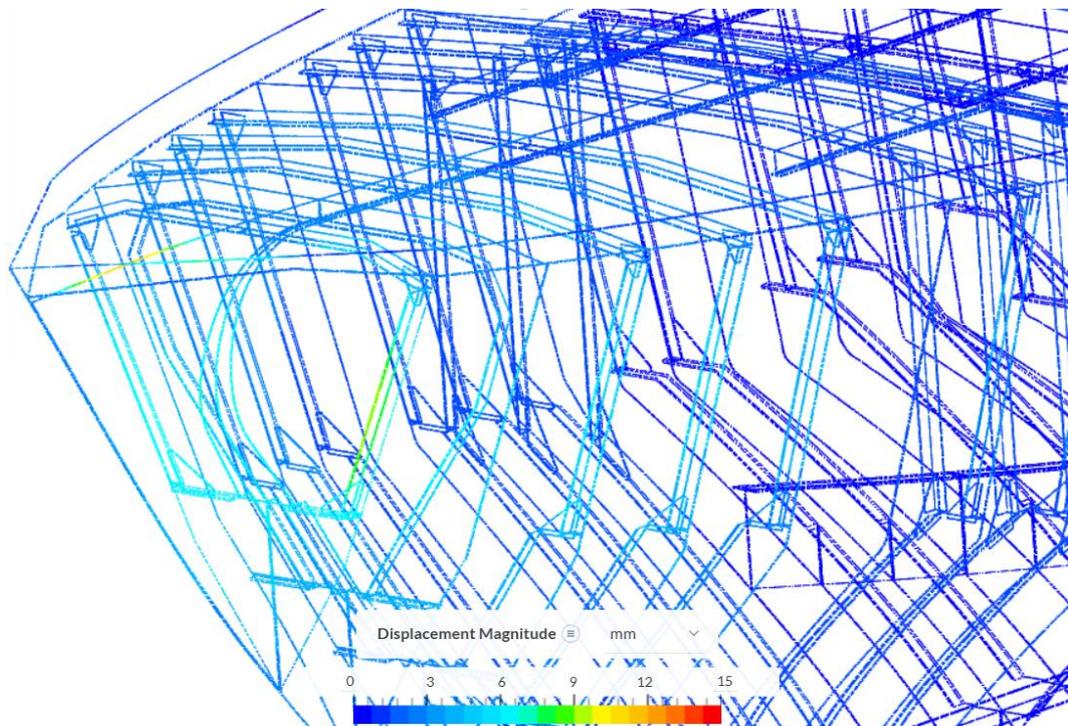
Dalam ilustrasi hasil simulasi pada gambar 4.21, besarnya *von-mises stress* yang mengenai struktur kapal dipaparkan dengan beberapa warna yang berbeda. Area berwarna **oranye** di bagian **haluan kapal** dan **frame 81** mengindikasikan tegangan yang cukup tinggi dengan nilai **kurang lebih 400 MPa**. Besarnya tegangan tersebut telah melebihi nilai *yield tensile strength* material sebesar 350 MPa. Dengan demikian, menurut dasar teori yang telah dipaparkan dalam bab 2, area tersebut akan mengalami **deformasi plastis**. Sementara area lain yang berwarna **biru** dan **hijau** menunjukkan tegangan yang lebih rendah dan **masih dibawah nilai *yield tensile strength* material**, sehingga pada bagian berwarna biru dan hijau hanya akan mengalami **deformasi elastis**.



Gambar 4. 21 *Von-mises stress* pada struktur kapal model dengan korosi sudut 60°

d) Displacement Magnitude pada Struktur Kapal

Gambar 4.22 menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada struktur kapal patroli. Dalam ilustrasi tersebut, area dan kedalaman deformasi ditampilkan dalam beberapa warna. Warna **biru pekat** menandakan area dengan **nilai deformasi paling rendah** hingga bernilai 0. Warna **oranye** pada gambar menunjukkan titik **deformasi tertinggi** pada struktur kapal patroli di angka **12 mm**.



Gambar 4. 22 *Displacement magnitude* struktur kapal model dengan korosi sudut 60°

4.4.5 Tabel Rangkuman Hasil Simulasi

Resume nilai hasil simulasi akan dipaparkan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4. 4 Resume hasil simulasi model

<i>Impact</i>	30°		60°	
	Tanpa Korosi	Dengan Korosi	Tanpa Korosi	Dengan Korosi
<i>Von-mises Stress (avg)</i>	16.53	20.23	6.48	8.21
<i>Mg Displacement (avg)</i>	1.81	3.09	0.66	1.38
<i>Mg Displacement (max)</i>	124.74	178.13	61.97	88.59

Berdasarkan data dalam tabel yang menunjukkan hasil simulasi tubrukan pada sudut 30° dan 60°, baik dengan kondisi model terkena korosi maupun tanpa korosi, dapat disimpulkan bahwa korosi memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan *stress* dan deformasi (*displacement*) dalam material.

Pada sudut 30°, *Von-Mises Stress* rata-rata meningkat dari 16.53 pada model tanpa korosi menjadi 20.23 pada model dengan korosi. Perpindahan rata-rata (*Mg Displacement*) juga meningkat dari 1.81 menjadi 3.09, dan perpindahan maksimum (*Mg Displacement max*) naik dari 124.74 menjadi 178.13. Hal ini menunjukkan bahwa adanya korosi dapat memperlemah material, sehingga *stress* yang dihasilkan lebih tinggi dan deformasi yang terjadi lebih besar.

Pada sudut 60°, tren yang sama juga terlihat. *Von-Mises Stress* rata-rata meningkat dari 6.48 tanpa korosi menjadi 8.21 dengan korosi. Perpindahan rata-rata meningkat dari 0.66 menjadi 1.38, dan perpindahan maksimum naik dari 61.97 menjadi 88.59.

Dari resume hasil simulasi diatas, dapat disimpulkan bahwa peningkatan perpindahan menunjukkan material yang terdampak korosi memiliki kekakuan yang lebih rendah, mengarah pada deformasi yang lebih besar pada kondisi beban yang sama.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dampak tubrukan kapal pengawas tipe 42 patroli polisi dengan fishing vessel, ditemukan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada kondisi kapal patroli yang tidak terdampak korosi, stress pada konstruksi kapal patroli akibat terkena tubrukan memiliki nilai rata rata sebesar 16.53 MPa pada tubrukan dengan sudut 30° dan 6.48 MPa pada tubrukan dengan sudut 60°. Pada sudut 30°, kulit bagian depan kapal patroli mengalami kerusakan yang cukup parah hingga terjadi kegagalan pada beberapa area. Kondisi tersebut berbeda dengan tubrukan pada sudut 60° yang hanya menghasilkan deformasi elastis pada sebagian besar area tubrukan.
2. Pada kondisi kapal patroli yang terdampak korosi, stress pada konstruksi kapal patroli akibat terkena tubrukan memiliki nilai rata rata sebesar 20.23 MPa pada tubrukan dengan sudut 30° dan 8.21 MPa pada tubrukan dengan sudut 60°. Pada sudut 30°, kulit bagian depan kapal patroli mengalami kerusakan yang cukup parah hingga terjadi kegagalan pada beberapa area. Kondisi tersebut berbeda dengan tubrukan pada sudut 60° yang hanya menghasilkan deformasi plastis pada sebagian kecil area dan deformasi elastis pada sebagian besar area tubrukan.
3. Tubrukan dengan sudut 30° mengakibatkan kerusakan yang lebih masif apabila dibandingkan dengan tubrukan dengan sudut 60°. Hal tersebut ditunjukkan dengan ilustrasi hasil simulasi variasi 60° dimana tidak adanya nilai *von-mises stress* yang melebihi nilai ultimate tensile strength pada kulit kapal model tanpa korosi maupun dengan korosi.

5.2 Saran

Saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Penyederhanaan model konstruksi untuk meringankan beban komputasi.
2. Penggunaan software yang dapat mengakomodasi simulasi dengan solver explicit dynamics.
3. Penggunaan PC dengan spesifikasi yang lebih mumpuni untuk keperluan simulasi dengan beban komputasi yang cukup tinggi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

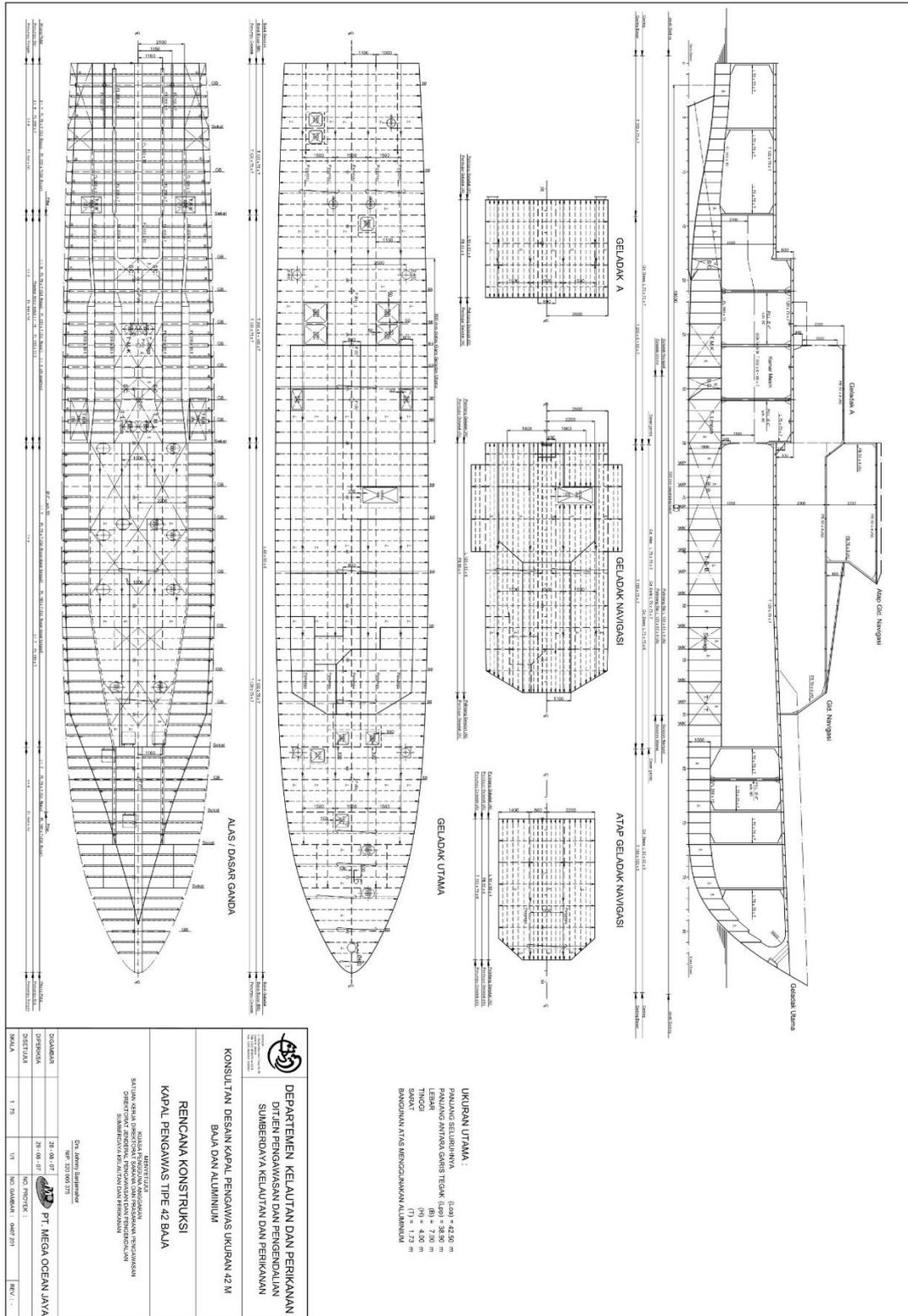
- Afandi, Y. K., Arief, I. S., & Amiadji. (2015). Analisa Laju Korosi pada Pelat Baja Karbon dengan Variasi Ketebalan Coating. *Jurnal Teknik ITS*.
- Bueche, F. &. (2006). *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh*. Jakarta: Erlangga.
- Dzikron, N. A., & Yulianto, T. (2019). Analisis Tegangan Haluan Kapal Akibat Tubrukan. *Jurnal Teknik ITS*.
- Indonesia, B. K. (2022). *PERATURAN KLASIFIKASI DAN SURVEI*. Jakarta.
- Jearl Walker, D. H. (2007). *FUNDAMENTALS OF PHYSICS*. WILEY.
- Kaushik, B., Kumar, B. M., Harathi, B., & Sai, A. T. (2019). *Design and Fabrication of Unmanned Patrol Vessel*. Visakhapatnam: Anil Neerukonda Institute of Techonology and Sciences.
- Kim, J. Y. (2000). *Analysis of Bow Crushing in Ship Collision*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Kitamura. (2002). FEM Approach to the Simulation of Collision and Grounding Damage. *Marine Structures*.
- KKP. (2020). *KKP Tangkap Kapal Ikan Berbendera Malaysia di Selat Malaka*. Jakarta.
- KKP. (2021). *KKP Buktikan Zero Tolerance Terhadap Illegal Fishing dan Jaga Ketat Pemanfaatan Laut Indonesia*. Jakarta.
- Kolios, A., Srikanth, S., & Salonitis, K. (2014). Numerical Simulation of Material Strength Deterioration due to Pitting Corrosion. *Elsevier B.V*.
- Koostanto, H. K., Zakki, A. F., & Samuel. (2021). Studi Perencanaan Konstruksi dan Analisa Kekuatan Kapal Patroli 165 DWT pada Perairan Indonesia. *Jurnal Teknik Perkapalan*.
- LIU Junfeng, H. Z. (2017). 3D analytical method for the external dynamics of ship collisions and investigation of the coefficient of restitution. *CHINESE JOURNAL OF SHIP RESEARCH*.
- Logan, D. L. (2012). A First Course in The Finite Element Method. *Cengage Learning*.
- Paik, J. K., & Thayamballi, A. K. (2002). Ultimate strength of ageing ships. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*.
- Prabowo, A. R., Bae, D. M., Sohn, J. M., & Cao, B. (2016). Energy behavior on side structure in event of ship collision subjected to external parameters. *Elsevier Ltd*.
- Prabowo, A. R., Muttaqie, T., Sohn, J. M., & Bae, D. M. (2018). Investigasi Dampak Insiden Tubrukan Terhadap Respon Struktur Kapal Penumpang Antar Pulau. *KAPAL*.
- Rajput, E. R. (2018). *A Textbook of Strength of Materials*. New Delhi: S Chand And Company Limited.

- Zhang, S. (1999). *The Mechanics of Ship Collisions*. Lyngby: Technical University of Denmark.
- Zhang, S., & Pedersen, P. T. (2017). A method for ship collision damage and energy absorption analysis and its validation. *Ship and Offshore Structures*.

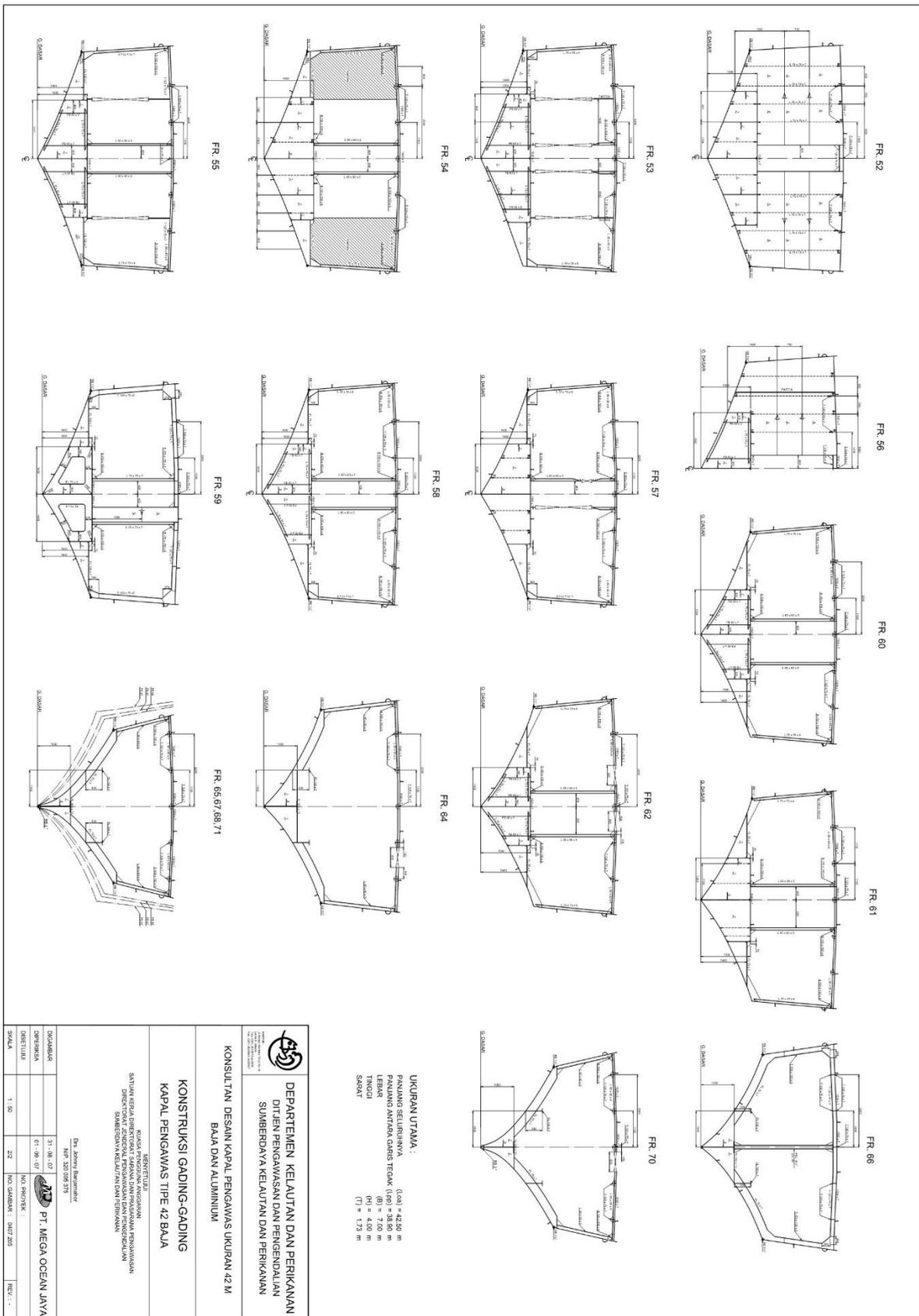
LAMPIRAN

Lampiran 1: Data Rencana Konstruksi Kapal Patroli

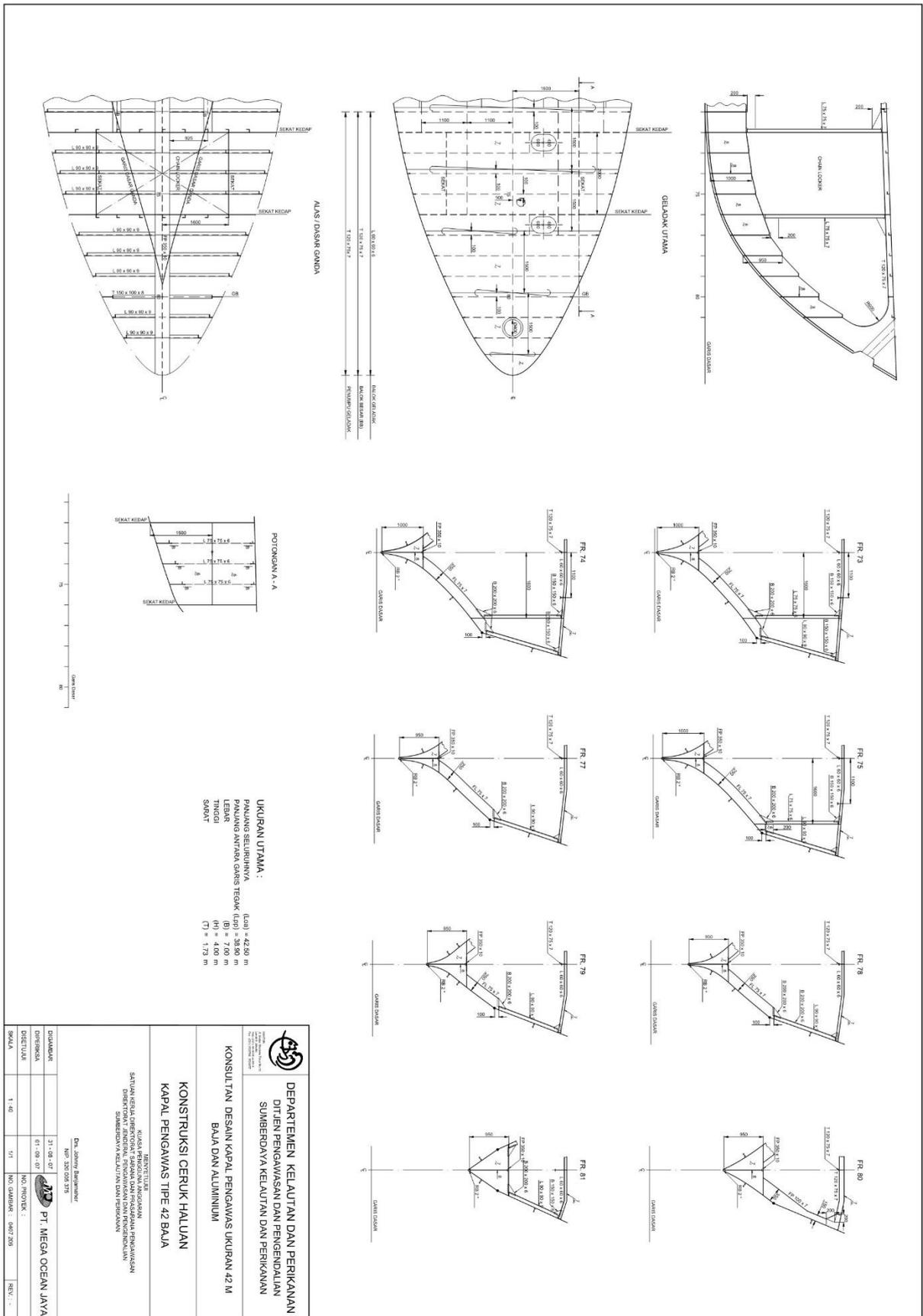
- Rencana konstruksi tampak atas



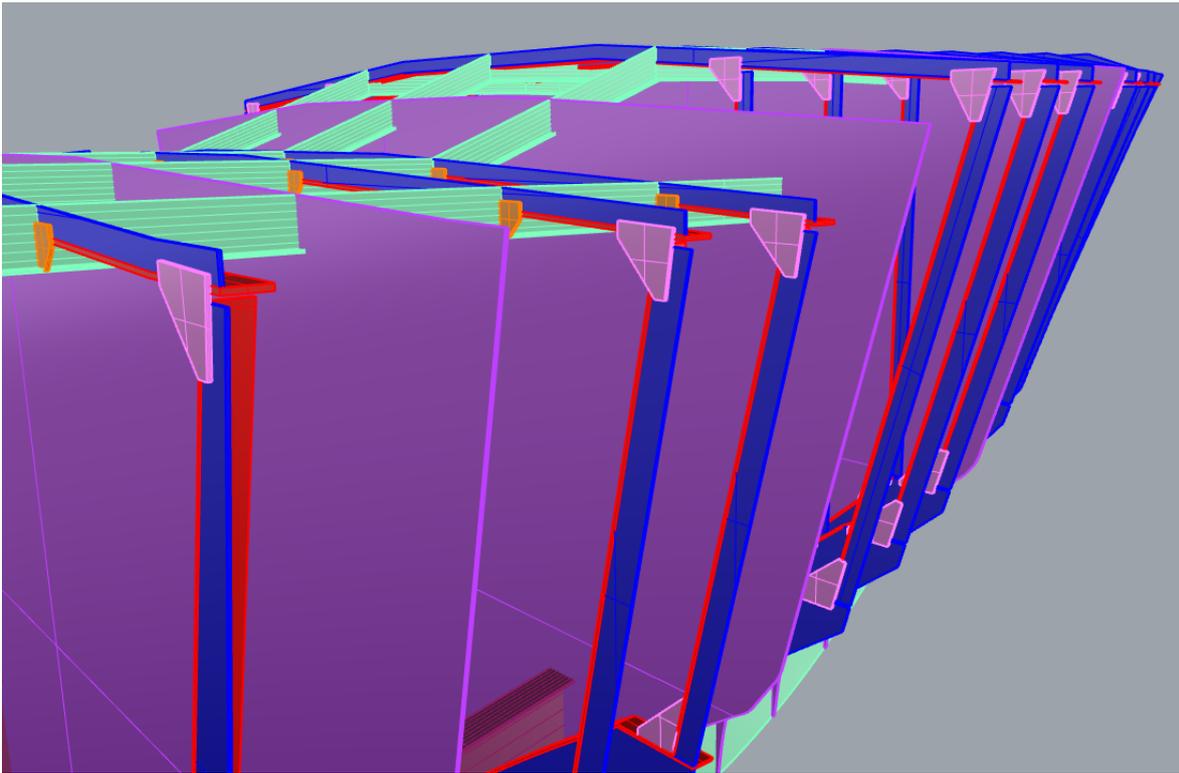
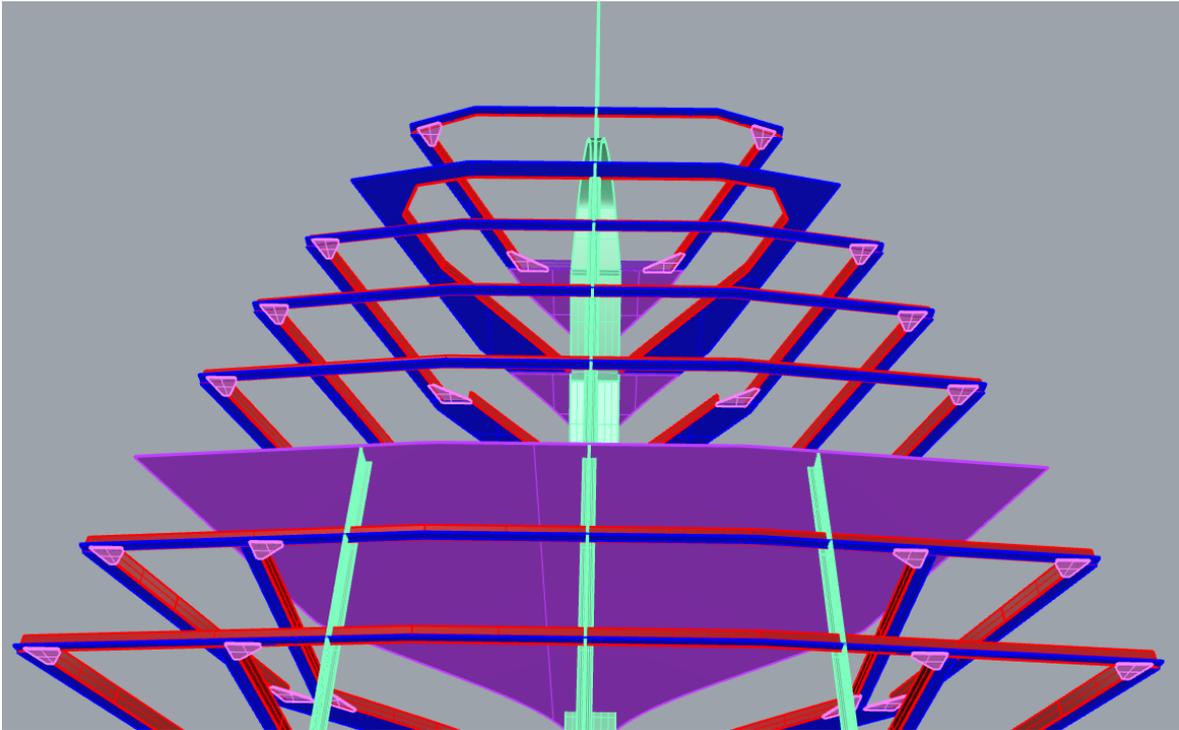
- Rencana Konstruksi tampak melintang gading-gading



- Rencana Konstruksi tampak melintang ceruk haluan

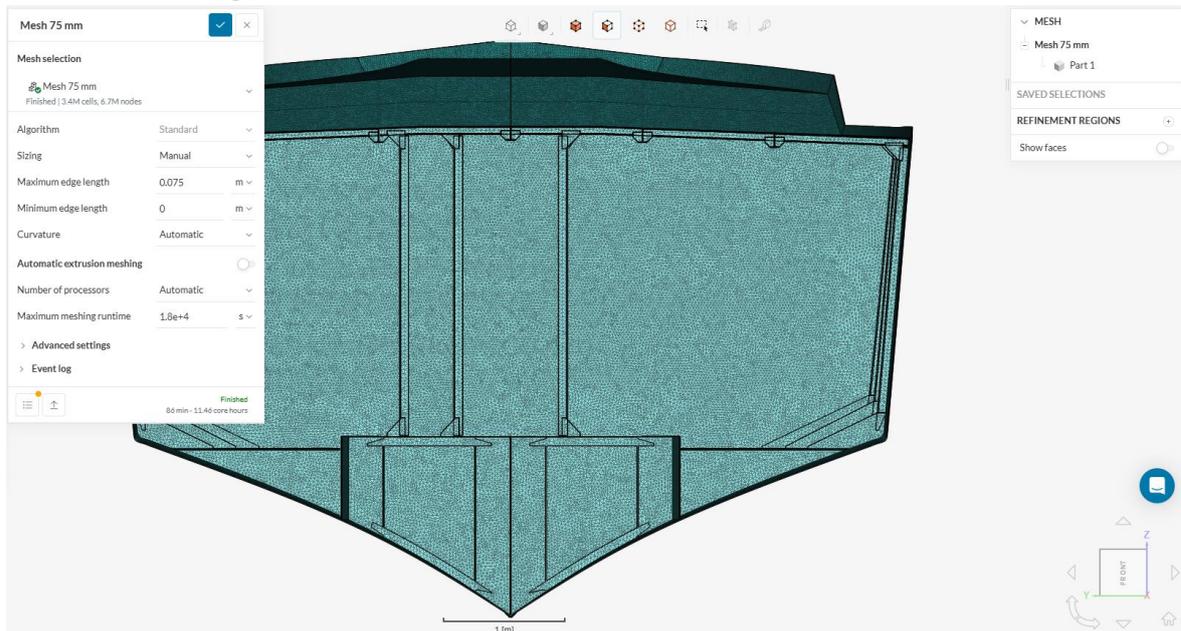


Lampiran 2: Model Struktur Kapal Patroli



Lampiran 3: Konvergensi Meshing

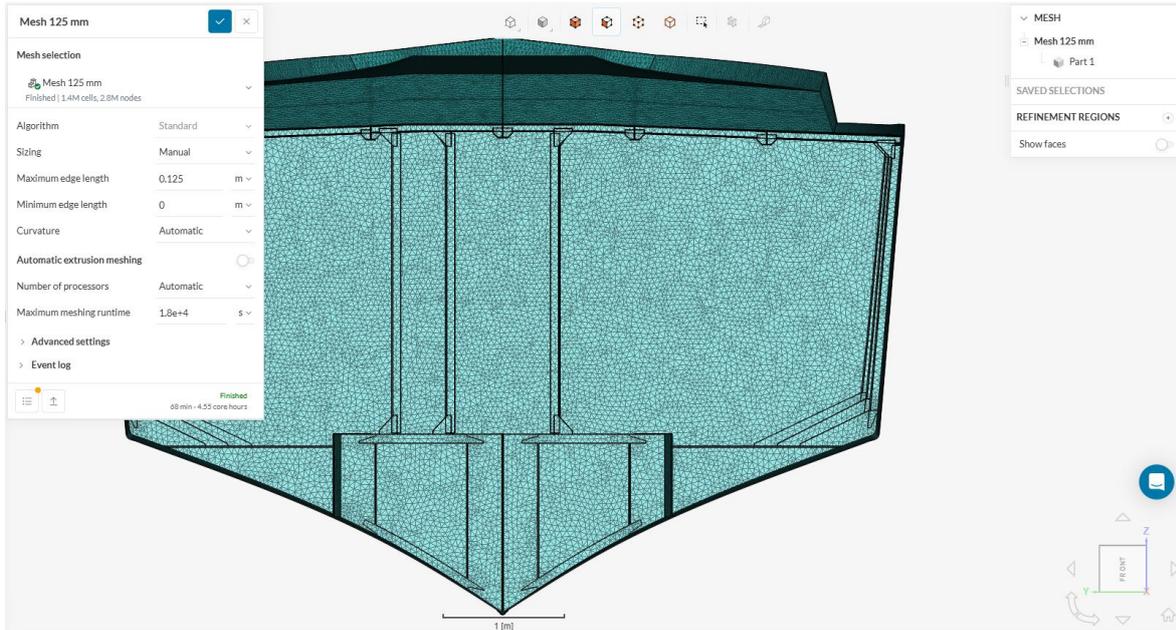
- Mesh dengan ukuran 75 mm



- Mesh dengan ukuran 100 mm



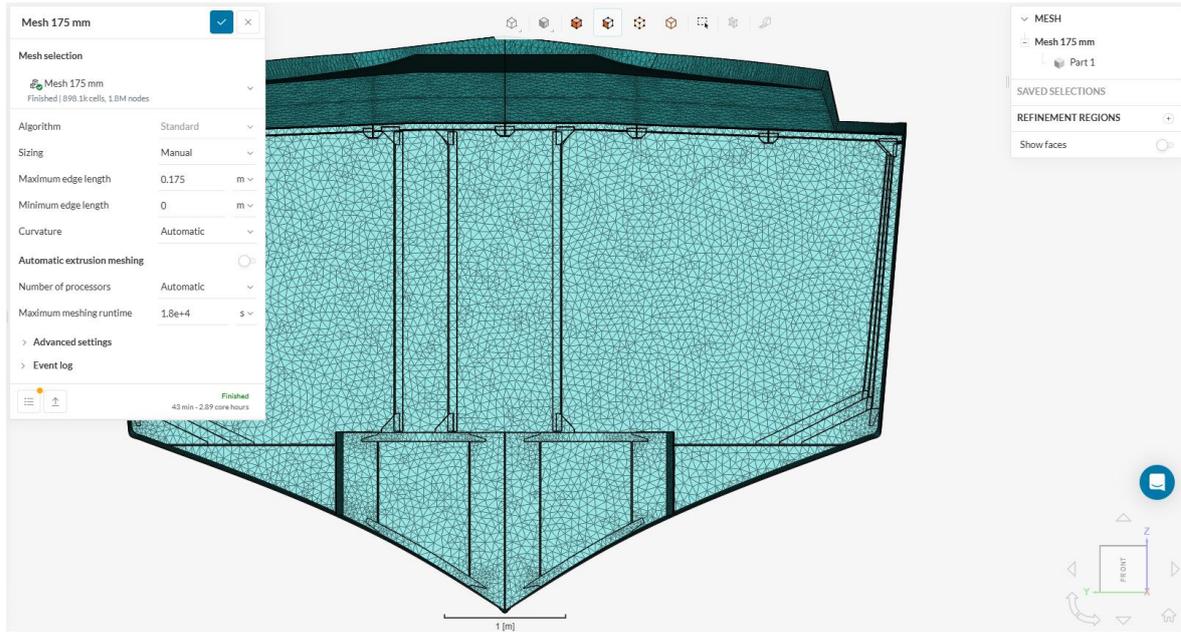
- Mesh dengan ukuran 125 mm



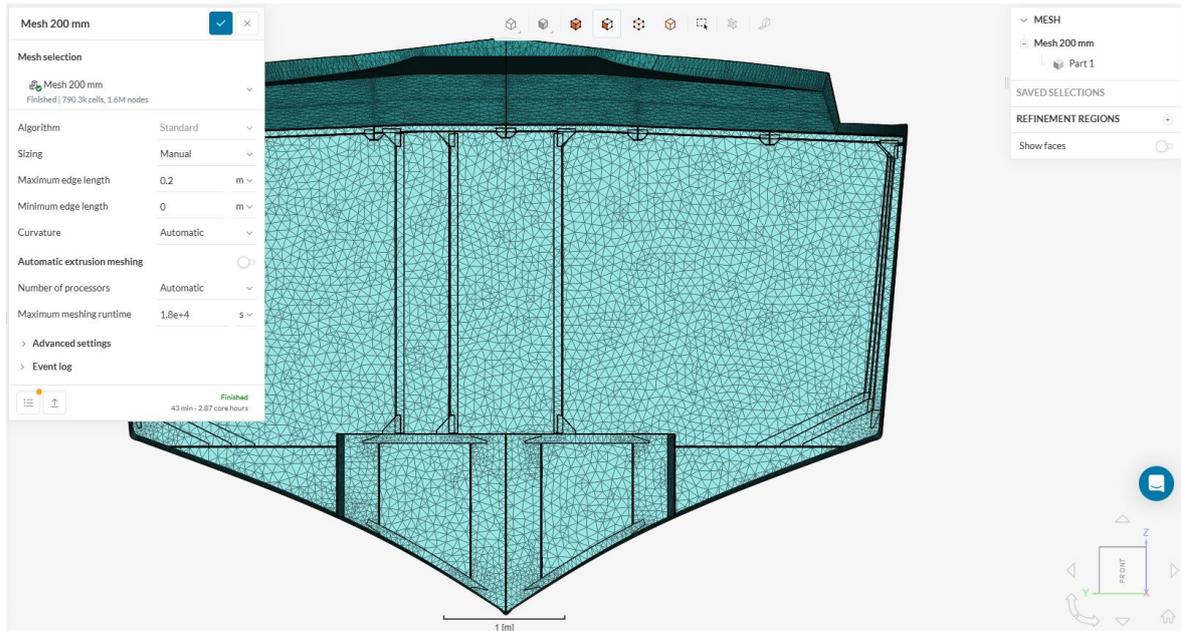
- Mesh dengan ukuran 150 mm



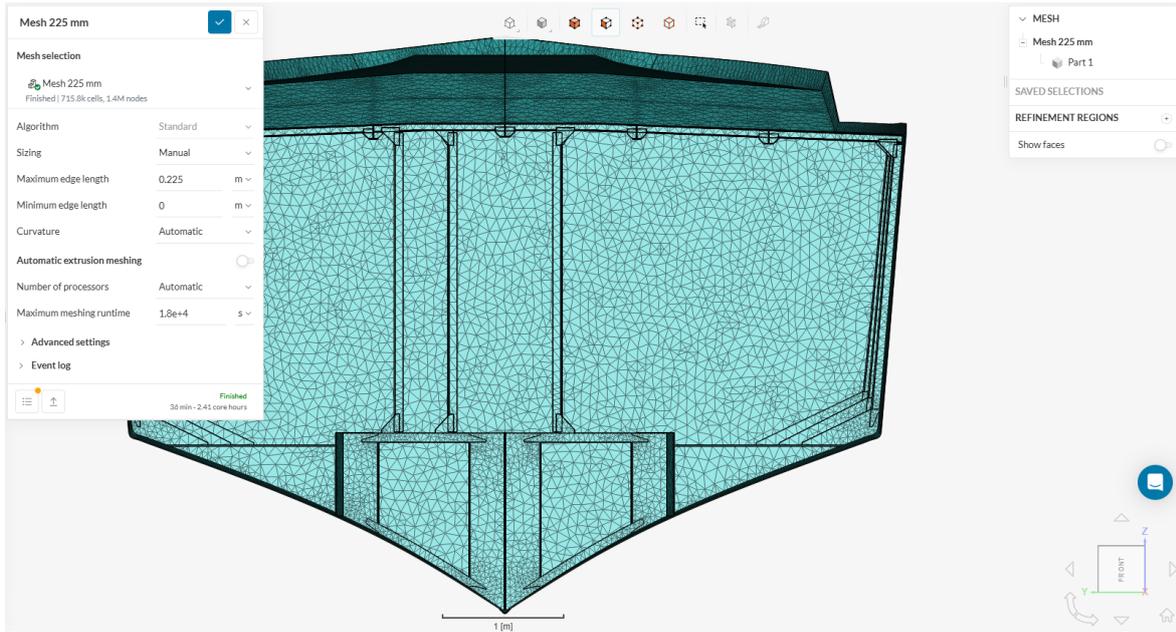
- Mesh dengan ukuran 175 mm



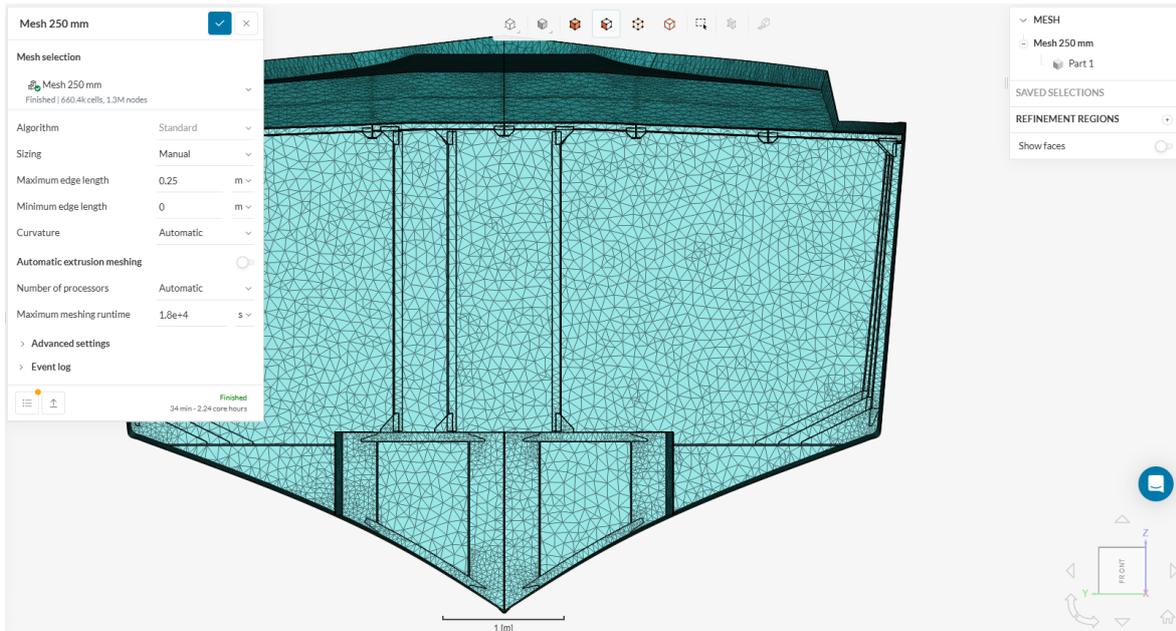
- Mesh dengan ukuran 200 mm



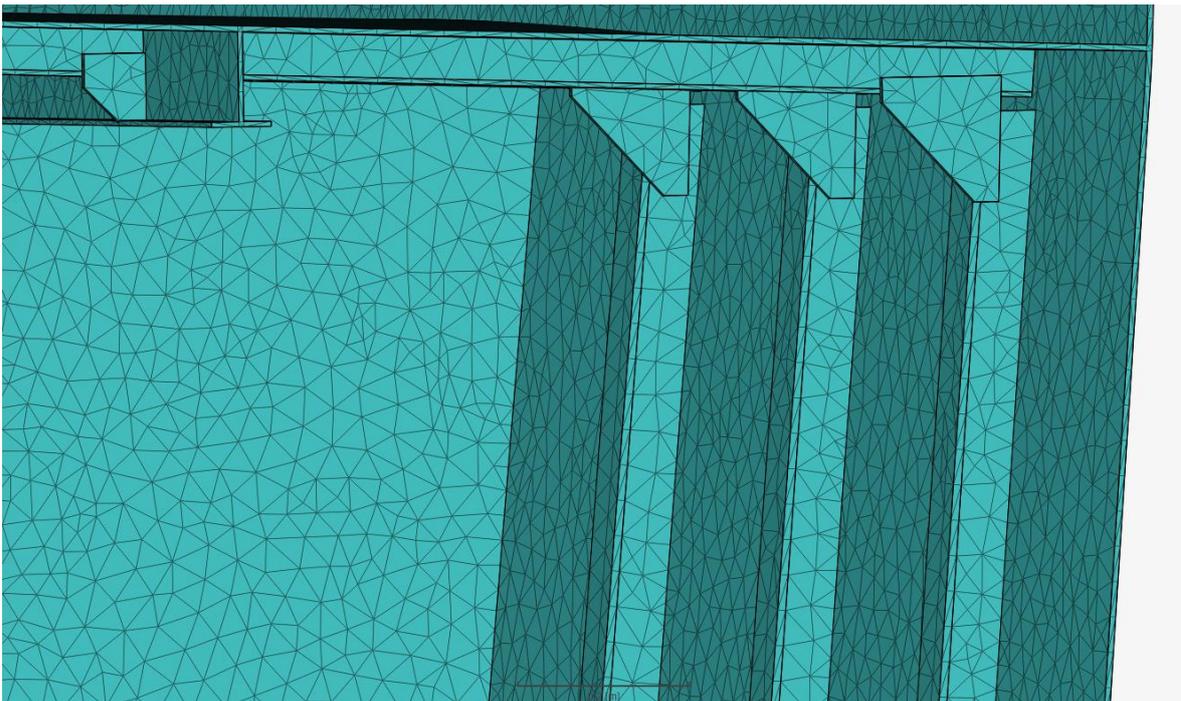
- Mesh dengan ukuran 225 mm



- Mesh dengan ukuran 250 mm



Lampiran 4: Mesh Terpilih untuk Simulasi (100 mm)



Lampiran 5: *Material Properties* Baja AH36

Physical Properties	Original Value	Comments
Density	7.80 g/cc	Typical of ASTM Steel

Mechanical Properties	Original Value	Comments
Tensile Strength, Ultimate	490 - 620 MPa	
Tensile Strength, Yield	350 MPa	
Elongation at Break	19 %	in 200 mm
	22 %	in 50 mm
Modulus of Elasticity	200 GPa	Typical Carbon Steel
Bulk Modulus	160 GPa	Typical for Steel
Poissons Ratio	0.29	Typical Carbon Steel
Shear Modulus	80.0 GPa	Typical for Steel

Electrical Properties	Original Value	Comments
Electrical Resistivity	0.0000170 ohm-cm	Typical Carbon Steel

Thermal Properties	Original Value	Comments
CTE, linear	12.0 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$	Typical Carbon Steel
Specific Heat Capacity	0.470 J/g- $^\circ\text{C}$	Typical Carbon Steel
Thermal Conductivity	52.0 W/m-K	Typical Carbon Steel

Component Elements Properties	Original Value	Comments
Carbon, C	≤ 0.18 %	
Chromium, Cr	0.25 %	
Copper, Cu	0.35 %	
Iron, Fe	97.09 %	as balance
Manganese, Mn	0.90 - 1.6 %	
Molybdenum, Mo	0.080 %	
Nickel, Ni	0.40 %	
Niobium, Nb (Columbium, Cb)	0.050 %	
Phosphorus, P	≤ 0.040 %	
Silicon, Si	0.10 - 0.50 %	
Sulfur, S	≤ 0.040 %	
Vanadium, V	0.10 %	

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Karanganyar, 12 Februari 2002, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDIT Insan Kamil Karanganyar, SMPN 1 Karanganyar dan SMAN 1 Surakarta. Setelah lulus dari SMA tahun 2020, Penulis diterima di Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK - ITS pada tahun 2020 dan terdaftar dengan NRP 5019201131.

Di Departemen Teknik Sistem Perkapalan Penulis sempat aktif di beberapa Organisasi seperti *Marine Technology and Innovation Club*, *Marine Solar Boat Team*, dan *Laboratorium Marine Manufacturing and Design*.