



TUGAS AKHIR (DM43300)

**ANALISIS DAN EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR *STERN*
RAMP DOOR KRI MAKASSAR-590 MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

NABILLA FAIZZATIN MARDIYAH

NRP. 0622040022

DOSEN PEMBIMBING :

Ir. PRIYAMBODO NUR ARDI NUGROHO, S.T., M.T., Ph.D.

RIZAL INDRAWAN, S.ST., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK DESAIN DAN MANUFAKTUR

JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

SURABAYA

2026



TUGAS AKHIR (DM43300)

HALIMA IDUL

**ANALISIS DAN EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR STERN
RAMP DOOR KRI MAKASSAR-590 MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

NABILLA FAIZZATIN MARDIYAH

NRP. 0622040022

DOSEN PEMBIMBING :

Ir. PRIYAMBODO NUR ARDI NUGROHO, S.T., M.T., Ph.D.

RIZAL INDRAWAN, S.ST., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK DESAIN DAN MANUFAKTUR

JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

SURABAYA

2026

"Halaman Ini Sengaja Dikosongkan"

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

ANALISIS DAN EVALUASI STRUKTUR KEKUATAN STERN RAMP DOOR KRI MAKASSAR-590 MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Disusun Oleh:
Nabilla Faizzatin Mardiyah
NRP 0622040022

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 - Teknik Desain dan Manufaktur
Jurusan Teknik Permesinan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 21 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Rizal Indrawan, S.ST., M.T.
2. Tri Andi Setiawan, S.ST., M.T.
3. Dhika Aditya Purnomo, S.ST., M.T.
4. Pranowo Sidi, S.T., M.T.

NIDN/NUPTK

(0023078902)
(0028018902)
(0007108902)
()

Tanda Tangan

(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Dosen Pembimbing

1. Ir. Priyambodo Nur Ardi Nugroho, S.T.,
M.T., Ph.D.
2. Rizal Indrawan, S.ST., M.T.

NIDN/NUPTK

(0024038107)
(0023078902)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,



Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T.
NIP. 197708192005011001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,

Dhika Aditya Purnomo, S.ST., M.T.
NIP. 198910072019031008



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I. 021

Date : 3 Nopember 2015

Rev. : 01

Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Nabilla Faizzatin Mardiyah

NRP. : 0622040022

Jurusan/Prodi : D4 - Teknik Desain dan Manufaktur

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

"ANALISIS DAN EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR *STERN RAMP DOOR* KRI MAKASSAR – 590 MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA"

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 7 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



(Nabilla Faizzatin Mardiyah)

NRP. 0622040022

"Halaman sengaja diksoongkan"

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, taufik, hidayah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **"Analisis dan Evaluasi Kekuatan Struktur *Stern Ramp Door* KRI Makassar-590 Menggunakan Metode Elemen Hingga"** dengan baik. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga, sahabat, dan seluruh pengikut beliau hingga akhir zaman.

Penyusunan Tugas Akhir ini dilakukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi D4 Teknik Desain dan Manufaktur, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis memperoleh banyak bimbingan, dukungan, bantuan, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Teristimewa kepada Aba H. Farhan Abdullah dan Mama Hj. Siti Farida selaku orang tua penulis, serta Mas Dhani, Mas Fachri, Mbak Ica, dan Mbak Novita selaku kakak dan kakak ipar penulis, yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan, perhatian, motivasi, serta pengorbanan yang tiada henti. Terima kasih atas segala bentuk dukungan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan dan Tugas Akhir ini dengan baik.
2. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
3. Bapak Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Dhika Aditya Purnomo, S.ST., M.T. selaku Koordinator Program Studi Teknik Desain dan Manufaktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Fipka Bisono, S.T., M.T. selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Desain dan Manufaktur.

6. Bapak Ir. Priyambodo Nur Ardi Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Rizal Indrawan, S.ST., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, saran, motivasi, serta masukan yang sangat berharga kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini hingga dapat diselesaikan dengan baik.
7. Komandan KRI Makassar-590 beserta Perwira KRI Makassar-590 dan staf Fasilitas Pemeliharaan dan Perbaikan (Fasharkan) Surabaya, yang telah memberikan izin, bantuan, dukungan, serta fasilitas kepada penulis selama proses pengambilan data dan pelaksanaan penelitian sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
8. Tim Dosen Penguji Tugas Akhir, seluruh dosen, dan staf kependidikan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu pengetahuan, arahan, masukan, serta pelayanan akademik yang sangat membantu penulis selama menempuh pendidikan hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
9. Kepada diri penulis sendiri, terima kasih atas segala usaha, kesabaran, ketekunan, dan semangat yang telah diberikan selama menjalani proses perkuliahan hingga penyusunan Tugas Akhir ini. Terima kasih karena telah mampu bertahan, terus belajar, bangkit dari setiap tantangan, dan tidak menyerah hingga akhirnya dapat menyelesaikan salah satu tahap penting dalam perjalanan pendidikan ini.
10. Teman-teman Program Studi D4 Teknik Desain dan Manufaktur angkatan 2022 yang telah memberikan kebersamaan, dukungan, semangat, serta menjadi rekan berbagi pengalaman selama masa perkuliahan hingga penyusunan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat, menambah wawasan, serta menjadi referensi bagi mahasiswa, akademisi, maupun pihak lain yang berkepentingan, khususnya dalam bidang analisis dan evaluasi kekuatan struktur kapal menggunakan Metode Elemen Hingga.

Surabaya, 7 Juli 2026

Penulis

”Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

ANALISIS DAN EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR *STERN RAMP DOOR* KRI MAKASSAR-590 MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nabilla Faizzatin Mardiyah

ABSTRAK

Stern Ramp Door merupakan salah satu komponen penting pada kapal *Landing Platform Dock* (LPD) yang berfungsi sebagai akses keluar masuk kendaraan. Struktur ini harus mampu menahan beban kendaraan tanpa mengalami kegagalan akibat tegangan maupun deformasi yang berlebihan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur *Stern Ramp Door Existing* serta mengoptimalkan desain menggunakan metode SCAMPER yang divalidasi melalui *Finite Element Method* (FEM). Pengembangan desain dilakukan melalui tahapan *Modify* dengan menambah ketebalan pelat atas dan bawah dari 10 mm menjadi 14 mm serta tahapan *Combine* dengan menambahkan 8 buah *longitudinal*. Hasil analisis menunjukkan bahwa desain *Existing* memiliki nilai *Equivalent Stress* sebesar 170,78 MPa, melebihi batas tegangan izin BKI sebesar 159,58 MPa, dengan *Total Deformation* sebesar 3,9191 mm dan *Safety Factor* sebesar 1,4639. Setelah dilakukan *Redesign*, nilai *Equivalent Stress* menurun menjadi 117,49 MPa, *Total Deformation* menjadi 2,6963 mm, dan *Safety Factor* meningkat menjadi 2,1278. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan metode SCAMPER mampu meningkatkan kekuatan, kekakuan, dan tingkat keamanan struktur sehingga desain hasil *Redesign* memenuhi persyaratan BKI dan lebih optimal dibandingkan desain *Existing*.

Kata kunci: *Stern Ramp Door*, *Finite Element Method*, SCAMPER, *Equivalent Stress*, *Safety Factor*.

”Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

ANALYSIS AND EVALUATION OF THE STRUCTURAL STRENGTH OF THE STERN RAMP DOOR ON KRI MAKASSAR-590 USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Nabilla Faizzatin Mardiyah

ABSTRACT

The Stern Ramp Door is a critical component of a Landing Platform Dock (LPD) vessel, serving as the access route for loading and unloading Vehicles. This structure must be capable of withstanding Vehicle loads without excessive stress or Deformation. This study aims to analyze the structural strength of the Existing Stern Ramp Door and optimize its design using the SCAMPER method validated through the Finite Element Method (FEM). The Redesign process was carried out through the Adapt stage by increasing the thickness of the upper and lower plates from 10 mm to 14 mm, and the Modify stage by adding eight longitudinal stiffeners. The analysis results showed that the Existing design produced a maximum Equivalent Stress of 170,78 MPa, exceeding the allowable stress specified by BKI of 159.58 MPa, with a Total Deformation of 3,9191 mm and a Safety Factor of 1.4639. After the Redesign, the Equivalent Stress decreased to 117,49 MPa, the Total Deformation decreased to 2,6963 mm, and the Safety Factor increased to 2,1278. These results indicate that the application of the SCAMPER method successfully improved the structural strength, stiffness, and safety of the Stern Ramp Door, making the Redesigned structure comply with BKI requirements and perform better than the Existing design.

Keywords: Stern Ramp Door, Finite Element Method, SCAMPER, Equivalent Stress, Safety Factor.

”Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Konsep Dasar <i>Landing Platform Dock</i> (LPD)	7
2.1.1 Definisi dan Fungsi Kapal LPD.....	8
2.1.2 Komponen Utama Kapal LPD.....	8
2.1.3 Struktur <i>Ramp Door</i>	8
2.2 Struktur <i>Ramp Door</i> Kapal.....	9
2.2.1 Definisi dan Fungsi <i>Ramp Door</i>	9
2.2.2 Jenis-Jenis <i>Ramp Door</i>	10
2.2.3 Perhitungan Konstruksi <i>Ramp Door</i>	12

2.3 Jenis Beban Kendaraan	12
2.4 Dasar Teori Kekuatan Struktur	13
2.4.1 Gaya yang bekerja pada Stern <i>Ramp Door</i>	14
2.4.2 Analisis Keseimbangan Statis	16
2.4.3 Momen Inersia Penampang	17
2.4.4 Tegangan Lentur	17
2.4.5 Tegangan Geser	18
2.4.6 Batas Tegangan yang Diizinkan	18
2.4.7 Faktor Keamanan (Safety Factor).....	19
2.4.8 Material ASTM A36	20
2.5 Deformasi pada Struktur	21
2.6 <i>Finite Element Method (FEM)</i>	22
2.7 Peraturan Klasifikasi Standar	24
2.8 Metode SCAMPER.....	24
2.9 Penelitian Terdahulu	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	29
3.1 Diagram Alir	29
3.2 Tahap Penelitian Awal.....	29
3.3 Pengumpulan Data	30
3.4 Penentuan Kondisi Pembebanan.....	31
3.5 Pemodelan 3D.....	32
3.6 Pemodelan Elemen Hingga.....	32
3.7 Penerapan Pembebanan	33
3.8 Evaluasi dan Kesimpulan.....	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Data Umum KRI Makassar-590	37

4.2 Existing Stern Ramp Door	38
4.3 Pemodelan 3D Existing Stern Ramp Door	38
4.4 Material Existing Stern Ramp Door	40
4.5 Analisis Pembebanan Existing Stern Ramp Door	40
4.5.1 Penentuan Beban Kendaraan	41
4.5.2 Distribusi Beban Kendaraan	42
4.5.3 Free Body Diagram (FBD).....	43
4.6 Perhitungan Batas Tegangan Izin Berdasarkan BKI	46
4.7 Perhitungan Tegangan Rampdoor Eksisting	48
4.8 Perhitungan Tegangan Rampdoor Redesign.....	51
4.9 Perhitungan Penggerak Wire Rope pada Ramp Door.....	53
4.10 Perhitungan Pin	56
4.11 Analisis FEM Rampdoor Eksisting.....	58
4.11.1. Boundary Condition	58
4.11.2. Peletakan Beban (Force)	59
4.11.3. Hasil Tegangan.....	60
4.11.4. Hasil Deformasi	61
4.11.5. Hasil Safety Factor.....	62
4.11.6. Hasil Analisis Ramp Door Existing	63
4.12 Penerapan Metode SCAMPER	64
4.12.1 Identifikasi Permasalahan Struktur Existing	64
4.12.2 Penentuan Komponen yang diperbaiki	65
4.12.3 Pengembangan Ide Menggunakan Metode SCAMPER	65
4.12.4 Evaluasi Alternatif Desain.....	67
4.12.5 Validasi Hasil Redesign.....	69
4.12.6 Perbandingan Existing dan Redesign	71

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	75
5.1. Kesimpulan	75
5.2. Saran	76
DAFTAR PUSTAKA.....	77
LAMPIRAN	79

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Material ASTM A36.....	21
Tabel 2. 2 Elemen Metode SCAMPER.....	25
Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu.....	26
Tabel 4. 1 Data Utama Kapal	37
Tabel 4. 2 Ukuran Stern Rampdoor KRI Makassar-590	38
Tabel 4. 3 Properties Material ASTM A36.....	40
Tabel 4. 4 Spesifikasi Kendaraan	41
Tabel 4. 5 Luas Penampang <i>Ramp Door</i> Eksisting.....	48
Tabel 4. 6 Titik Berat Penampang <i>Ramp Door</i> Eksisting	48
Tabel 4. 7 Momen Inersia <i>Ramp Door</i> Eksisting.....	49
Tabel 4. 8 Luas Penampang <i>Ramp Door Redesign</i>	51
Tabel 4. 9 Titik Berat Penampang <i>Ramp Door Redesign</i>	51
Tabel 4. 10 Momen Inersia <i>Ramp Door Redesign</i>	52
Tabel 4. 11 Hasil Perbandingan <i>Equivalent Stress Ramp Door Existing</i>	61
Tabel 4. 12 Elemen SCAMPER	66
Tabel 4. 13 Hasil Perbandingan <i>Equivalent Stress Ramp Door Redesign</i>	70
Tabel 4. 14 Perbandingan Hasil <i>Existing</i> dan <i>Redesign</i>	72

”Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 KRI Makassar – 590.....	7
Gambar 2. 2 <i>Quarter Ramp Door</i>	10
Gambar 2. 3 <i>Slewing Ramp Door</i>	10
Gambar 2. 4 <i>Side Ramp Door</i>	11
Gambar 2. 5 <i>Stern Ramp Door</i>	11
Gambar 2. 6 <i>Bow Ramp Door</i>	12
Gambar 2. 7 <i>Dump Truck Cargo</i>	13
Gambar 3. 1 Diagram Alir.....	29
Gambar 3. 2 Ilustrasi Truk	34
Gambar 4. 1 <i>Isometric Rampdoor Existing</i>	39
Gambar 4. 2 Tampak Atas <i>Rampdoor Existing</i>	39
Gambar 4. 3 Tampak Bawah <i>Rampdoor Existing</i>	39
Gambar 4. 4 <i>Free Body Diagram</i>	43
Gambar 4. 5 <i>Free Body Diagram Transform Sudut</i>	44
Gambar 4. 6 <i>Fixed Support 1</i>	59
Gambar 4. 7 <i>Fixed Support 2</i>	59
Gambar 4. 8 <i>Input Force</i>	60
Gambar 4. 9 Hasil Ekuivalen Eksisting	61
Gambar 4. 10 Hasil Deformasi.....	62
Gambar 4. 11 Hasil <i>Safety Factor</i>	63
Gambar 4. 12 Tampak Bawah Tegangan Maksimal.....	65
Gambar 4. 13 Sebelum Penambahan Ketebalan Plat	67
Gambar 4. 14 Sesudah Penambahan Ketebalan Plat.....	67
Gambar 4. 15 Sebelum Penambahan Longitudinal.....	67
Gambar 4. 16 Sesudah Penambahan Longitudinal	67
Gambar 4. 17 <i>Isometric View Rampdoor Existing</i>	68
Gambar 4. 18 <i>Isometric View Rampdoor Redesign</i>	68
Gambar 4. 19 <i>Bottom plate Rampdoor Existing</i>	69
Gambar 4. 20 <i>Bottom plate Rampdoor Redesign</i>	69
Gambar 4. 21 Hasil Tegangan <i>Redesign</i>	70

Gambar 4. 22 Hasil Deformasi <i>Redesign</i>	70
Gambar 4. 23 Hasil <i>Safety Faktor Redesign</i>	71

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

KRI Makassar-590 merupakan kapal jenis *Landing Platform Dock* (LPD) kelas Makassar yang berperan penting dalam mendukung operasi amfibi Angkatan Laut Indonesia. Kapal ini dirancang untuk melaksanakan berbagai misi, antara lain pengangkutan pasukan, kendaraan militer, serta dukungan logistik dan bantuan kemanusiaan. Dalam mendukung fungsi operasional tersebut, keandalan struktur kapal menjadi aspek yang sangat penting, khususnya pada komponen yang berhubungan langsung dengan proses bongkar muat kendaraan.

Salah satu komponen struktural utama pada kapal LPD adalah *stern Ramp Door*, yang berfungsi sebagai akses utama kendaraan selama proses embarkasi dan debarkasi. Pada saat pengoperasian, *Stern Ramp Door* menerima beban kendaraan yang relatif besar dengan distribusi beban yang tidak selalu merata akibat perbedaan posisi kendaraan di atas ramp. Kondisi pembebanan ini dapat menimbulkan gaya dan momen lentur yang signifikan pada struktur, sehingga berpotensi menyebabkan konsentrasi tegangan dan deformasi pada area tertentu, terutama pada pelat, penguat, dan sambungan struktur. Oleh karena itu, evaluasi kekuatan struktur *Stern Ramp Door* perlu dilakukan untuk memastikan struktur mampu menahan beban operasional sesuai dengan kriteria keselamatan yang berlaku (Watson, 1998). Kondisi pembebanan yang kompleks pada *Stern Ramp Door* tersebut mendorong perlunya kajian lebih lanjut melalui pendekatan analisis yang sistematis untuk memahami respon struktur serta mengidentifikasi area kritis yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan.

Beberapa kajian sebelumnya telah membahas analisis kekuatan struktur *Ramp Door* pada kapal Ro-Ro dan kapal sejenis dengan pendekatan numerik. (Alam et al., 2023) melakukan analisis struktur *Ramp Door* menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) untuk mengevaluasi

distribusi tegangan akibat beban kendaraan, yang menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada area engsel dan sambungan pelat. Penelitian lain oleh (Alamsyah et al., 2021) juga menggunakan pendekatan FEM untuk menganalisis pengaruh variasi sudut kemiringan ramp terhadap respon tegangan struktur. Namun demikian, kajian yang secara khusus membahas struktur *Stern Ramp Door* pada kapal LPD masih terbatas, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengevaluasi kondisi pembebanan yang paling kritis pada struktur tersebut.

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) merupakan metode numerik yang banyak digunakan dalam analisis struktur karena mampu memodelkan geometri yang kompleks serta memprediksi respons struktur terhadap berbagai kondisi pembebanan dengan tingkat akurasi yang tinggi. Melalui metode ini dapat diperoleh informasi mengenai distribusi tegangan dan faktor keamanan, sehingga area yang mengalami konsentrasi tegangan dapat diidentifikasi secara lebih efektif sebagai dasar evaluasi kekuatan struktur. Oleh karena itu, FEM telah banyak diterapkan pada analisis struktur kapal, termasuk untuk mengevaluasi komponen yang menerima beban operasional tinggi, seperti *Stern Ramp Door* (Logan, 2012; Reddy, 2019)

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)*, area yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi dapat diidentifikasi sehingga menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan perbaikan desain. Namun demikian, hasil analisis struktur saja belum cukup untuk meningkatkan performa struktur, sehingga diperlukan suatu pendekatan yang mampu menghasilkan alternatif pengembangan desain secara sistematis. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah SCAMPER (*Substitute, Combine, Adapt, Modify, Put to Another Use, Eliminate, dan Reverse*). Metode ini merupakan teknik pengembangan ide yang bertujuan menghasilkan alternatif desain melalui modifikasi terhadap produk atau struktur yang telah ada sehingga diperoleh rancangan yang lebih efektif (Eberle, 1996)

Pada penelitian ini, metode SCAMPER diterapkan sebagai pendekatan dalam proses *Redesign* struktur *Stern Ramp Door* berdasarkan hasil evaluasi FEM pada kondisi *Existing*. Penerapan metode tersebut menghasilkan beberapa alternatif modifikasi, kemudian dipilih *Redesign* berupa penambahan longitudinal serta peningkatan ketebalan *bottom plate* untuk meningkatkan kekakuan struktur. Selanjutnya, model *Redesign* dianalisis kembali menggunakan metode FEM sehingga efektivitas perubahan desain dapat dievaluasi berdasarkan distribusi tegangan ekuivalen (*von Mises*) dan faktor keamanan struktur (Logan, 2022). Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, penelitian ini bertujuan melakukan *Redesign* struktur *Stern Ramp Door* menggunakan metode SCAMPER dan mengevaluasi kinerja struktur hasil *Redesign* melalui analisis *Finite Element Method (FEM)*, sehingga diperoleh rancangan yang memiliki distribusi tegangan dan faktor keamanan yang lebih baik dibandingkan struktur *Existing*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam tugas akhir adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil analisis kekuatan struktur *Stern Ramp Door* KRI Makassar pada kondisi *Existing* berdasarkan parameter tegangan ekuivalen (*von Mises*), Deformasi dan faktor keamanan menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)*?
2. Bagaimana penerapan metode SCAMPER dalam proses *Redesign* struktur *Stern Ramp Door* KRI Makassar untuk meningkatkan performa struktur?
3. Bagaimana perubahan hasil analisis struktur *Stern Ramp Door* setelah dilakukan *Redesign* berdasarkan parameter tegangan ekuivalen (*von Mises*), Deformasi dan faktor keamanan menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis kekuatan struktur *Stern Ramp Door* KRI Makassar pada kondisi *Existing* berdasarkan parameter tegangan ekuivalen (*von Mises*), Deformasi dan faktor keamanan menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)*
2. Menerapkan metode SCAMPER sebagai pendekatan dalam proses *Redesign* struktur *Stern Ramp Door* KRI Makassar berdasarkan hasil analisis kondisi *Existing*.
3. Menganalisis perubahan nilai tegangan ekuivalen (*von Mises*) Deformasi dan faktor keamanan pada struktur *Stern Ramp Door* setelah dilakukan *Redesign* menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan gambaran teknis mengenai respon kekuatan struktur *Stern Ramp Door* KRI Makassar berdasarkan hasil analisis tegangan ekuivalen (*von Mises*) dan faktor keamanan menggunakan metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) pada kondisi *Existing* dan hasil *Redesign*
2. Memberikan informasi mengenai pengaruh penerapan metode SCAMPER terhadap peningkatan kinerja struktur *Stern Ramp Door* berdasarkan hasil analisis FEM.
3. Menyediakan alternatif *Redesign* struktur *Stern Ramp Door* melalui penerapan metode SCAMPER sebagai upaya meningkatkan kekuatan struktur pada area yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi.
4. Memberikan referensi teknis bagi TNI AL, galangan kapal, maupun peneliti di bidang teknik perkapalan mengenai penerapan metode FEM dan SCAMPER dalam proses evaluasi dan *Redesign* struktur *Stern Ramp Door*.

5. Menambah referensi ilmiah mengenai penerapan metode SCAMPER sebagai pendekatan *Redesign* struktur kapal yang dikombinasikan dengan analisis *Finite Element Method (FEM)*.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Objek penelitian adalah struktur *Stern Ramp Door* pada KRI Makassar.
2. Material struktur yang digunakan adalah baja ASTM A36 sesuai dengan model yang digunakan dalam simulasi
3. Analisis struktur dilakukan menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)* menggunakan perangkat lunak ANSYS.
4. Pembebanan yang dianalisis adalah beban kendaraan sebesar 28 ton sesuai kapasitas operasi *Stern Ramp Door*.
5. Parameter yang dianalisis meliputi *Equivalent Stress* (Von Mises) dan Safety Factor.
6. Konsep *Redesign* struktur *Stern Ramp Door* dikembangkan menggunakan metode SCAMPER berdasarkan hasil analisis kondisi *Existing*.
7. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil analisis struktur *Existing* dan *Redesign* berdasarkan nilai tegangan dan faktor keamanan.
8. Penelitian ini tidak membahas proses manufaktur, biaya produksi, analisis kelelahan (fatigue), umur layan struktur, maupun analisis dinamika kapal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Dasar *Landing Platform Dock (LPD)*

Landing Platform Dock (LPD) adalah kapal perang amfibi yang dirancang untuk menunjang operasi pendaratan pasukan, kendaraan tempur, dan distribusi logistik melalui laut. Kapal ini memiliki ciri khas utama, yakni *vechile deck*, *well deck*, dan sistem *Ramp Door* yang memungkinkan proses pemuatan dan pembongkaran berjalan efisien serta terjamin keamanannya. Dalam konteks TNI Angkatan Laut, kapal LPD memiliki fungsi vital di luar pertempuran, seperti misi kemanusiaan, pengangkutan personel, serta pengiriman bahan logistik ke wilayah kepulauan. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 KRI Makassar – 590

Sumber: [https://id.wikipedia.org/wiki/KRI_Makassar_\(590\)](https://id.wikipedia.org/wiki/KRI_Makassar_(590))

KRI Makassar-590 menjadi kapal perdana dari kelas Makassar yang dioperasikan TNI AL. Kapal ini dibuat dengan konsep serbaguna, sehingga selain kemampuan tempur, ia juga dapat bertindak sebagai kapal angkut dan fasilitas medis lapangan. Secara struktural, area buritan kapal LPD merupakan bagian yang paling terbebani operasionalnya karena berinteraksi langsung dengan aktivitas kendaraan berat yang bergerak masuk dan keluar lewat *Stern Ramp Door*. Kapal LPD memiliki sistem *Stern Ramp Door* sebagai akses utama

kendaraan militer menuju *tank deck*. Oleh karena itu, struktur *Ramp Door* harus mampu menahan beban kendaraan serta pengaruh pembebanan dinamis selama operasi sehingga diperlukan evaluasi kekuatan struktur secara berkala.

2.1.1 Definisi dan Fungsi Kapal LPD

Landing Platform Dock (LPD) merupakan kapal perang angkut yang dirancang untuk mendukung operasi amfibi, transportasi personel, kendaraan tempur, dan logistik. KRI Makassar-590 sebagai kapal LPD TNI AL berfungsi dalam proyeksi kekuatan laut, operasi amfibi, serta misi kemanusiaan, dengan sistem bongkar muat di area buritan untuk menjamin perpindahan kendaraan dan material secara aman dan efisien. (TNI AL, 2006; Watson, 1998)

2.1.2 Komponen Utama Kapal LPD

Bagian buritan kapal LPD merupakan bagian penting yang membantu aktivitas pembongkaran dan pembongkaran serta operasi amfibi. Komponen inti di sini terdiri dari *Ramp Door* buritan, dek kendaraan, kerangka pendukung buritan, serta sistem pengoperasian pintu ramp berbasis *wire rope*. Selain itu, terdapat mekanisme pengunci *Ramp Door*, elemen penguat, dan balok utama yang berperan menjaga ketahanan struktur terhadap tekanan kendaraan dan barang muatan. Keseluruhan komponen dirancang agar saling terhubung, sehingga menjamin kelancaran operasi dan keamanan (Watson, 1998).

2.1.3 Struktur *Ramp Door*

Ramp Door berfungsi sebagai elemen yang dapat digerakkan, terletak pada buritan kapal, dan berfungsi sebagai jalur untuk keluar-masuk kendaraan, personel, dan bahan logistik. Pada dasarnya, *Ramp Door* terdiri dari pelat baja inti, stiffener, girder, engsel, serta sistem hidrolik untuk penggerak dan pengunci. *Ramp Door* dirancang agar tahan terhadap beban statis dan dinamis yang ditimbulkan oleh kendaraan yang melintas, sehingga memerlukan kekuatan lentur dan geser yang memadai. Keandalan *Ramp Door* menjadi elemen penting dalam menjaga keselamatan operasi dan daya tahan kapal (Biro Klasifikasi Indonesia, 2014; Watson, 1998).

2.2 Struktur *Ramp Door* Kapal

Struktur bergerak yang disebut *Ramp Door* pada kapal berfungsi sebagai penghubung antara dek kendaraan dan dermaga, pantai, atau fasilitas terapung lainnya. Di kapal LPD, *Ramp Door* dirancang agar mampu menanggung beban kendaraan militer berat dengan frekuensi operasional yang tinggi. Selain itu, *Ramp Door* harus tetap beroperasi di kondisi laut yang beragam, sehingga kebutuhan akan kekuatan dan kekakuan cukup tinggi.

Secara struktural, *Stern Ramp Door* terbentuk dari komponen-komponen utama seperti pelat ramp yang menahan beban kendaraan secara langsung, stiffener sebagai penguat pelat untuk meningkatkan kekakuan, girder yang berperan sebagai elemen penyalur beban utama, serta engsel dan sistem pengunci yang menghubungkan *Ramp Door* dengan lambung kapal. Interaksi antar komponen ini menghasilkan distribusi tegangan yang kompleks, terutama di area sambungan dan titik tumpu.

2.2.1 Definisi dan Fungsi *Ramp Door*

Ramp Door merupakan elemen struktur kapal yang berfungsi sebagai jalur keluar masuk untuk kendaraan, personel, dan muatan antara kapal dengan dermaga, pantai, atau wahana pendarat. Secara konstruksi, *Ramp Door* dirancang sebagai komponen struktur yang bergerak dan terintegrasi dengan badan kapal, dilengkapi sistem engsel dan penggerak, umumnya hidrolik, sehingga dapat dibuka dan ditutup berdasarkan kebutuhan pengoperasian. (*Rules for Classification and Construction Part 1 Volume II: Rules for Hull*, 2017).

Fungsi utama *Ramp Door* adalah mendukung proses bongkar muat langsung tanpa peralatan tambahan, khususnya untuk menangani angkutan kendaraan, logistik, atau kegiatan amfibi. Selain itu, *Ramp Door* berperan dalam mengakselerasi operasi kapal, memberikan rasa malu untuk berlabuh di berbagai kondisi lingkungan, serta menjaga keselamatan muatan dan personel selama proses keluar-masuk. Dari sisi struktur, *Ramp Door* wajib mampu menahan beban statis maupun dinamis akibat berat muatan, kendaraan, dan

faktor operasional, sehingga perancangannya merupakan bagian penting dalam sistem struktur kapal secara keseluruhan.

2.2.2 Jenis-Jenis *Ramp Door*

a. *Quarter Rampdoor*

Quarter Rampdoor dipasang di sisi buritan kapal dan umumnya hanya bergerak secara vertikal, sehingga menerima beban lentur dan geser dengan konfigurasi struktur yang relatif sederhana.



Gambar 2. 2 *Quarter Rampdoor*
Sumber: macgregor.com

b. *Slewing Rampdoor*

Slewing Ramp Door memiliki mekanisme yang lebih fleksibel karena mampu bergerak secara vertikal dan berputar secara horizontal. Kondisi ini menyebabkan struktur menjadi lebih kompleks serta menerima kombinasi beban lentur, geser, dan torsi yang relatif lebih besar selama operasi bongkar muat.



Gambar 2. 3 *Slewing Rampdoor*
Sumber: macgregor.com

c. *Side Ramp Door*

Terletak di bagian samping kanan (*starboard side*) atau kiri (*port side*) kapal. *Ramp Door* tipe ini lebih efisien bagi kapal yang memiliki *deck* tingkat dua atau lebih.



Gambar 2. 4 *Side Rampdoor*
Sumber: macgregor.com

d. *Stern Ramp Door*

Stern Ramp Door adalah *Ramp Door* yang terletak di bagian buritan (*stern*) kapal dan berfungsi sebagai akses utama kendaraan saat proses bongkar muat. *Ramp Door* ini umumnya bekerja dengan mekanisme buka-tutup vertikal atau lipat, serta dirancang untuk menahan beban kendaraan dan gaya gelombang dari arah belakang kapal.



Gambar 2. 5 *Stern Rampdoor*
Sumber: macgregor.com

e. *Bow Ramp Door*

Bow Ramp Door merupakan *Ramp Door* yang terletak di bagian haluan (*bow*) kapal dan digunakan sebagai akses bongkar muat dari

depan kapal. *Ramp Door* ini biasanya dilengkapi dengan mekanisme pintu angkat atau pintu geser, sehingga membutuhkan kekuatan struktur yang baik untuk menahan beban kendaraan serta tekanan air laut selama operasi.



Gambar 2. 6 *Bow Rampdoor*
Sumber: macgregor.com

2.2.3 Perhitungan Konstruksi *Ramp Door*

Perhitungan untuk konstruksi *Ramp Door* telah diatur oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). Pada BKI 2017 *Volume II Rules for Hull Section 6 Side Shell Doors* terdapat perhitungan untuk pintu samping yang meliputi ukuran konstruksi utama, pelat dan penegar sekunder, tegangan izin, dan lain-lain.

2.3 Jenis Beban Kendaraan

Beban kendaraan militer pada *Stern Ramp Door* berasal dari berat kendaraan yang bekerja sebagai beban vertikal selama proses embarkasi dan debarkasi. Beban ini diteruskan ke struktur *Ramp Door* melalui area kontak roda kendaraan, sehingga menimbulkan gaya tekan dan momen lentur pada pelat dan penguat struktur. Besarnya respons struktur dipengaruhi oleh distribusi beban kendaraan yang bekerja pada permukaan *Ramp Door*.

Dalam analisis kekuatan struktur, karakteristik kendaraan seperti berat total dan konfigurasi roda menjadi parameter utama dalam pemodelan pembebanan. Namun, dalam penelitian ini pembebanan kendaraan dimodelkan menggunakan satu kondisi kendaraan yang merepresentasikan kondisi pembebanan paling

kritis, sesuai dengan data yang digunakan dalam simulasi Metode Elemen Hingga (FEM). Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh gambaran respons struktur pada kondisi terberat yang mungkin terjadi selama operasi, sehingga hasil analisis dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kekuatan struktur *stern Ramp Door*.

Pada penelitian ini menggunakan pembebanan kendaraan, yaitu kendaraan dengan berat 28 ton. Beban kendaraan kemudian dimodelkan sebagai tiga kelompok beban roda sesuai distribusi beban kendaraan dan diterapkan pada model analisis FEM. Gambar kendaraan ditampilkan sebagai jenis kendaraan yang digunakan sebagai acuan pembebanan, sedangkan pemodelan dan distribusi beban dilakukan secara numerik pada Bab III.



Gambar 2. 7 Dump Truck Cargo
Sumber: Penulis, 2025

2.4 Dasar Teori Kekuatan Struktur

Analisis kekuatan struktur merupakan proses untuk mengevaluasi kemampuan suatu komponen dalam menahan pembebanan tanpa mengalami kegagalan selama masa operasionalnya. Pada struktur *Stern Ramp Door*, analisis kekuatan dilakukan untuk mengetahui respons struktur terhadap beban kendaraan yang bekerja selama proses embarkasi dan debarkasi. Beban tersebut menghasilkan gaya, reaksi tumpuan, momen lentur, serta distribusi tegangan pada struktur sehingga diperlukan evaluasi untuk memastikan bahwa struktur masih berada dalam kondisi aman terhadap pembebanan yang diberikan (Gere & Goodno, 2013).

Dalam penelitian ini, analisis dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu perhitungan analitis dan simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Perhitungan analitis digunakan untuk menentukan besarnya gaya yang bekerja, reaksi tumpuan, momen lentur, momen inersia penampang, tegangan lentur, tegangan geser, tegangan ekuivalen Von Mises, serta faktor keamanan struktur. Selanjutnya, hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan hasil simulasi FEM sebagai proses validasi terhadap kondisi struktur *Existing* maupun hasil *Redesign*. Pendekatan tersebut bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan kekuatan struktur setelah dilakukan proses *Redesign* sehingga diperoleh rancangan yang memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan aturan klasifikasi kapal (Hibbeler, 2016; *Rules for Classification and Construction Part 1 Volume II: Rules for Hull*, 2017)

2.4.1 Gaya yang bekerja pada Stern Ramp Door

Stern Ramp Door menerima pembebanan utama berupa berat kendaraan yang bekerja pada permukaan ramp selama proses bongkar muat. Beban tersebut diteruskan menuju sistem penumpu sehingga menghasilkan gaya-gaya internal pada struktur. Karena *Ramp Door* beroperasi pada posisi miring terhadap bidang horizontal, gaya berat kendaraan akan terurai menjadi komponen gaya sejajar bidang ramp (*longitudinal Force*) dan komponen gaya tegak lurus bidang ramp (*normal Force*). Besarnya kedua komponen gaya tersebut dipengaruhi oleh sudut kemiringan *Ramp Door* dan menjadi dasar dalam perhitungan reaksi tumpuan serta analisis momen lentur (Beer et al., 2015).

Pada penelitian ini, pembebanan kendaraan dimodelkan sebagai beban statis yang bekerja pada area kontak roda kendaraan dengan permukaan stern *Ramp Door*. Seluruh gaya yang diperoleh dari hasil penguraian gaya selanjutnya digunakan sebagai data masukan dalam penyusunan *free body diagram* dan perhitungan analitis sebelum dilakukan simulasi menggunakan *Finite Element Method* (Hibbeler, 2016).

1. Gaya Berat

$$W = m \cdot g \quad (2.1)$$

Keterangan :

W = Gaya berat (N)

m = Massa kendaraan (kg)

g = Percepatan gravitasi (9.81 m/s^2)

2. Gaya Longitudinal

$$F_x = W \sin \theta \quad (2.2)$$

Keterangan :

F_x = Gaya longitudinal (N)

W = Gaya berat (N)

θ = Sudut kemiringan *Ramp Door* ($^\circ$)

3. Gaya Normal

$$F_y = W \cos \theta \quad (2.3)$$

Keterangan :

F_y = Gaya normal (N)

W = Gaya berat (N)

θ = Sudut kemiringan *Ramp Door* ($^\circ$)

4. Distribusi beban kendaraan

$$P = \frac{F}{n} \quad (2.4)$$

Keterangan :

P = Beban tiap roda (kN)

F = Gaya total kendaraan (kN)

n = Jumlah roda

$$P_{1y} = P_1 \cos 20^\circ \quad (2.5)$$

P_{1y} = komponen gaya vertikal (kN)

P_{1x} = komponen gaya longitudinal (kN)

P_1 = beban axle depan (kN)

θ = sudut kemiringan *Ramp Door* ($^\circ$)

2.4.2 Analisis Keseimbangan Statis

Analisis keseimbangan statis digunakan untuk menentukan besarnya reaksi tumpuan akibat pembebanan yang bekerja pada suatu struktur. Suatu struktur dikatakan berada dalam keadaan setimbang apabila jumlah seluruh gaya dan momen yang bekerja sama dengan nol (Hibbeler, 2016).

Pada penelitian ini, analisis keseimbangan statis digunakan untuk menghitung reaksi tumpuan pada *Stern Ramp Door* akibat beban kendaraan. Nilai reaksi tumpuan tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan diagram gaya geser dan diagram momen lentur.

Persamaan keseimbangan statis yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Keseimbangan Momen terhadap Titik A

$$\sum M_A = 0 \quad (2.6)$$

Keterangan :

$$\sum M_A = \text{Jumlah momen terhadap titik tumpuan A (kN} \cdot \text{m)}$$

2. Keseimbangan Momen Terhadap Titik B

$$\sum M_B = 0 \quad (2.7)$$

Keterangan :

$$\sum M_B = \text{Jumlah momen terhadap titik tumpuan B (kN} \cdot \text{m)}$$

3. Keseimbangan Gaya Vertikal

$$\sum F_y = 0 \quad (2.8)$$

Keterangan :

$$\sum F_y = \text{Jumlah gaya vertikal yang bekerja pada struktur (kN)}$$

2.4.3 Momen Inersia Penampang

Momen inersia penampang merupakan sifat geometris suatu penampang yang menunjukkan kemampuan struktur dalam menahan pembebanan lentur. Semakin besar nilai momen inersia, semakin tinggi kekakuan penampang sehingga tegangan lentur yang terjadi akan semakin kecil (Gere & Timoshenko, 1997)

Pada penelitian ini, perhitungan momen inersia dilakukan pada penampang *Stern Ramp Door Existing* dan *Redesign*. Untuk penampang sederhana digunakan persamaan momen inersia persegi panjang.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2.9)$$

Keterangan :

I = Momen inersia penampang (mm⁴)

b = Lebar penampang (mm)

h = Tinggi penampang (mm)

2.4.4 Tegangan Lentur

Tegangan lentur merupakan tegangan normal yang timbul akibat adanya momen lentur pada suatu elemen struktur. Besarnya tegangan lentur dipengaruhi oleh nilai momen lentur, momen inersia penampang, serta jarak serat terluar terhadap sumbu netral. Analisis tegangan lentur dilakukan untuk mengetahui kemampuan struktur dalam menahan pembebanan sehingga tidak melebihi batas kekuatan material.

Pada penelitian ini, tegangan lentur dihitung berdasarkan momen lentur maksimum yang diperoleh dari diagram momen lentur serta momen inersia penampang pada kondisi *Existing* maupun *Redesign*. Hasil perhitungan tegangan lentur kemudian digunakan sebagai salah satu parameter dalam menentukan tegangan ekuivalen dan faktor keamanan struktur.

Persamaan tegangan lentur dinyatakan sebagai berikut.

$$\sigma_{max} = \frac{M \times y}{I} \quad (2.10)$$

Keterangan :

σ_{max} = Tegangan lentur maximum (MPa)

M = Momen lentur maksimum (N·mm)

c = Jarak sumbu netral ke serat terluar (mm)

I = Momen inersia penampang (mm⁴)

2.4.5 Tegangan Geser

Tegangan geser merupakan tegangan yang timbul akibat gaya geser yang bekerja sejajar terhadap penampang suatu struktur. Besarnya tegangan geser dipengaruhi oleh gaya geser yang diterima dan luas penampang yang menahan gaya tersebut. Tegangan geser dihitung untuk mengetahui kemampuan struktur dalam menahan beban geser yang bekerja.

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} \quad (2.11)$$

Keterangan :

τ = Tegangan geser

V = Gaya geser yang bekerja pada penampang (N)

Q = Momen statis luas penampang terhadap sumbu netral (mm)

I = Momen inersia penampang terhadap sumbu netral (mm)

b = Lebar penampang pada lokasi yang ditinjau (mm)

2.4.6 Batas Tegangan yang Diizinkan

Evaluasi struktur *Rampdoor* dalam analisis metode elemen hingga harus mengacu pada batas tegangan maksimum yang diizinkan oleh BKI. Nilai ini dijadikan parameter acuan untuk menilai apakah desain dapat digunakan secara aman atau perlu dilakukan penebalan struktur.

Batas tegangan lentur menurut BKI ditetapkan sebagai berikut:

$$\sigma_{max} = \frac{120}{k} \text{ N/mm}^2 \quad (2.12)$$

Dengan:

σ_{max} = tegangan lentur maksimum

k = material *factor*

Batas tegangan geser menurut BKI ditetapkan sebagai berikut:

$$\tau_{max} = \frac{80}{k} \text{ N/mm}^2 \quad (2.13)$$

τ_{max} = tegangan geser maksimum

k = material *factor*

Sedangkan batas tegangan *Equivalent* menurut BKI ditetapkan sebagai berikut:

$$\sigma_{v_{max}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \frac{150}{k} \text{ N/mm}^2 \quad (2.14)$$

Dengan:

$\sigma_{v_{max}}$ = tegangan *Equivalent* maksimum

k = material *factor*

Nilai faktor k diperoleh dari jenis baja yang digunakan.

Berdasarkan pada aturan BKI Vol. II Sec. 2 Po. A. 14 mengenai faktor bahan sebagai salah satu penunjang dalam perhitungan tegangan *Rampdoor* adalah sebagai berikut:

$$k = \frac{235}{Reh} \quad (2.15)$$

Dimana:

Reh = *yield stress* minimum material (MPa)

2.4.7 Faktor Keamanan (Safety Factor)

Faktor keamanan (*Safety Factor*) merupakan perbandingan antara kekuatan luluh material dengan tegangan kerja yang terjadi pada struktur. Nilai faktor

keamanan digunakan untuk mengevaluasi apakah suatu struktur masih berada pada kondisi aman selama menerima pembebanan. Semakin besar nilai faktor keamanan, semakin tinggi tingkat keamanan struktur terhadap kegagalan material (Budynas & Nisbett, 2020)

Pada penelitian ini, faktor keamanan dihitung menggunakan tegangan ekuivalen Von Mises yang diperoleh dari hasil perhitungan analitis. Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan tegangan luluh material ASTM A36 untuk mengetahui tingkat keamanan struktur *Stern Ramp Door* pada kondisi *Existing* maupun *Redesign*.

Persamaan faktor keamanan dinyatakan sebagai berikut.

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{eq}} \quad (2.16)$$

Keterangan :

SF = Faktor keamanan

σ_y = Tegangan luluh material (MPa)

σ_{eq} = Tegangan ekuivalen Von Mises (MPa)

2.4.8 Material ASTM A36

Material ASTM A36 merupakan baja karbon rendah (*low carbon steel*) yang banyak digunakan pada konstruksi bangunan, jembatan, serta struktur kapal karena memiliki kekuatan yang baik, mudah dilas, dan mudah dibentuk. Material ini juga memiliki sifat mekanik yang stabil sehingga banyak digunakan sebagai material struktural yang menerima pembebanan statis maupun dinamis (Callister & Rethwisch, 2018)

Pada penelitian ini, material ASTM A36 digunakan sebagai material *Stern Ramp Door* pada kondisi *Existing* maupun *Redesign*. Pemilihan material ini didasarkan pada kemampuannya dalam menahan pembebanan, kemudahan proses fabrikasi, serta kesesuaiannya dengan aplikasi struktur baja pada kapal. Sifat mekanik material ASTM A36 yang digunakan dalam penelitian disajikan pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 *Material ASTM A36*

Parameter	Nilai
Density	7850 kg/m ³
Young's Modulus	200 GPa
Poisson's Ratio	0,26
Yield Strength	250 MPa
Ultimate Tensile Strength	400-55- MPa

Sumber: ASTM International (2022).

Kelebihan Material ASTM A36 :

Material ASTM A36 dipilih dalam penelitian ini karena memiliki beberapa keunggulan sebagai berikut.

1. Memiliki kekuatan luluh yang cukup tinggi sehingga mampu menahan beban kerja pada struktur *Stern Ramp Door*.
2. Memiliki kemampuan las (*weldability*) yang sangat baik sehingga memudahkan proses fabrikasi dan perakitan komponen struktur.
3. Mudah dibentuk (*formability*) dan dikerjakan menggunakan proses pemotongan, pengeboran, maupun pembentukan tanpa memerlukan perlakuan khusus.
4. Memiliki ketangguhan yang baik terhadap pembebanan statis sehingga sesuai digunakan pada struktur kapal yang menerima beban kendaraan.
5. Harga material relatif ekonomis serta mudah diperoleh di pasaran dibandingkan baja struktural berkekuatan tinggi.
6. Memiliki sifat mekanik yang stabil dan telah digunakan secara luas sebagai material standar pada berbagai konstruksi baja, sehingga data materialnya tersedia dengan baik untuk analisis numerik menggunakan *Finite Element Method (FEM)*

2.5 Deformasi pada Struktur

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau perpindahan yang terjadi pada suatu struktur akibat menerima pembebanan. Pada *Stern Ramp Door*, deformasi terjadi ketika struktur menerima beban kendaraan sehingga mengalami perpindahan pada arah tertentu. Besarnya deformasi menjadi salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kekakuan struktur, karena deformasi

yang berlebihan dapat mengganggu fungsi operasional serta menurunkan tingkat keamanan struktur.

Pada penelitian ini, deformasi dievaluasi menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)* melalui perangkat lunak ANSYS *Workbench*. Hasil simulasi berupa *Total Deformation* digunakan untuk membandingkan tingkat kekakuan struktur pada kondisi *Existing* dan *Redesign*. Semakin kecil nilai deformasi yang terjadi, maka semakin baik kemampuan struktur dalam menahan pembebanan.

Untuk balok sederhana yang menerima beban merata, lendutan maksimum dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Gere & Timoshenko, 1997).

$$\delta_{\max} = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (2.17)$$

Keterangan :

$\delta_{\max}$ = Lendutan maksimum (mm)

w = Beban merata (N/mm)

L = Panjang bentang (mm)

E = Modulus elastisitas (MPa)

I = Momen inersia penampang (mm⁴)

2.6 Finite Element Method (FEM)

Finite Element Method (FEM) atau Metode Elemen Hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik yang sulit diselesaikan secara analitis, khususnya pada struktur yang memiliki bentuk geometri kompleks, kondisi pembebanan yang bervariasi, serta material dengan karakteristik tertentu. Prinsip dasar metode ini adalah membagi suatu struktur menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) yang saling terhubung melalui titik simpul (*node*), sehingga respons setiap elemen dapat dihitung secara

numerik. Hasil perhitungan pada seluruh elemen kemudian digabungkan untuk memperoleh respons struktur secara keseluruhan (Logan, 2012).

Metode FEM telah banyak digunakan dalam bidang teknik mesin, teknik sipil, maupun teknik perkapalan karena mampu memberikan hasil analisis yang lebih rinci dibandingkan metode analitis. Melalui metode ini dapat diketahui distribusi tegangan, deformasi, regangan, perpindahan, maupun faktor keamanan pada suatu struktur tanpa harus melakukan pengujian eksperimental secara langsung. Selain itu, FEM juga mampu menganalisis struktur dengan bentuk yang kompleks sehingga dapat mengurangi waktu serta biaya dalam proses perancangan dan evaluasi suatu komponen (Cook et al., 2002).

Pada analisis FEM, struktur terlebih dahulu dimodelkan dalam bentuk geometri tiga dimensi sesuai dengan kondisi sebenarnya. Selanjutnya dilakukan proses *meshing*, yaitu pembagian model menjadi elemen-elemen kecil agar perhitungan numerik dapat dilakukan pada setiap bagian struktur. Semakin halus ukuran *mesh* yang digunakan, maka hasil simulasi akan semakin mendekati kondisi nyata, meskipun membutuhkan waktu komputasi yang lebih besar (Logan, 2012).

Setelah proses *meshing* selesai, dilakukan pemberian kondisi batas (*boundary conditions*) berupa tumpuan, pembebanan, serta sifat mekanik material yang digunakan. Selanjutnya perangkat lunak akan menyelesaikan persamaan numerik menggunakan metode elemen hingga sehingga diperoleh hasil berupa distribusi tegangan, deformasi, dan parameter lainnya. Tahapan terakhir adalah *post-processing*, yaitu proses visualisasi hasil analisis dalam bentuk kontur warna sehingga memudahkan identifikasi daerah yang mengalami tegangan maupun deformasi maksimum (Cook et al., 2002).

Pada penelitian ini, analisis FEM dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Workbench* dengan jenis analisis *Static Structural*. Pemodelan dilakukan berdasarkan geometri *Stern Ramp Door* pada kondisi *Existing* dan *Redesign*, kemudian diberikan pembebanan sesuai kondisi operasional serta sifat mekanik material ASTM A36. Hasil simulasi yang dianalisis meliputi

Equivalent Stress (Von Mises), *Total Deformation*, dan *Safety Factor*. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi kekuatan struktur serta membandingkan kinerja antara desain *Existing* dan hasil *Redesign*.

Penggunaan metode FEM dalam penelitian ini dipilih karena mampu memberikan gambaran distribusi tegangan dan deformasi secara menyeluruh pada struktur *Stern Ramp Door*. Selain itu, hasil simulasi FEM dapat digunakan sebagai pembanding terhadap hasil perhitungan analitis sehingga validitas analisis struktur dapat dievaluasi dengan lebih baik. Dengan demikian, metode ini menjadi pendekatan yang efektif dalam mendukung proses evaluasi dan pengembangan desain struktur kapal (Logan, 2012).

2.7 Peraturan Klasifikasi Standar

Perancangan dan analisis kekuatan struktur kapal harus mengacu pada peraturan dan standar klasifikasi yang berlaku untuk menjamin keselamatan, keandalan, serta kelayakan operasional struktur. Standar klasifikasi berfungsi sebagai pedoman teknis yang menetapkan persyaratan minimum terkait material, dimensi, serta kriteria kekuatan struktur terhadap beban operasional. Dalam penelitian ini, evaluasi kekuatan struktur *Stern Ramp Door* mengacu pada ketentuan yang ditetapkan oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), khususnya yang berkaitan dengan kekuatan struktur lambung dan elemen struktural kapal baja. Penerapan standar ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil analisis numerik memenuhi batasan keselamatan yang diizinkan dan sesuai dengan praktik rekayasa perkapalan yang berlaku.

2.8 Metode SCAMPER

Metode SCAMPER merupakan salah satu metode pengembangan ide yang digunakan untuk menghasilkan inovasi atau penyempurnaan terhadap suatu produk maupun sistem yang telah ada. Metode ini dikembangkan oleh Bob Eberle (1996) berdasarkan konsep *checklist* kreativitas yang diperkenalkan oleh Alex Osborn. SCAMPER membantu proses pengembangan produk melalui serangkaian pertanyaan yang mendorong munculnya alternatif desain secara sistematis (Eberle, 1996).

SCAMPER merupakan akronim dari *Substitute, Combine, Adapt, Modify, Put to Another Use, Eliminate*, dan *Reverse*. Setiap tahapan digunakan sebagai pedoman untuk mengidentifikasi kemungkinan perubahan yang dapat meningkatkan fungsi, kekuatan, efisiensi, maupun kemudahan proses manufaktur suatu produk. Dengan pendekatan tersebut, proses *Redesign* dapat dilakukan secara terstruktur sehingga menghasilkan desain yang lebih optimal.

Pada penelitian ini, metode SCAMPER digunakan sebagai dasar dalam melakukan *Redesign Stern Ramp Door*. Penerapan metode difokuskan pada perubahan dimensi dan konfigurasi struktur untuk meningkatkan kekuatan konstruksi tanpa mengubah fungsi utama *Stern Ramp Door*. Hasil *Redesign* kemudian dievaluasi menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)* untuk mengetahui pengaruh perubahan desain terhadap nilai tegangan, deformasi, dan faktor keamanan.

Tabel 2. 2 Elemen Metode SCAMPER

Tahapan	Keterangan
<i>Substitute</i>	Mengganti material, komponen, atau bagian tertentu dengan alternatif yang lebih baik.
<i>Combine</i>	Menggabungkan dua atau lebih komponen untuk meningkatkan fungsi atau efisiensi.
<i>Adapt</i>	Menyesuaikan desain berdasarkan konsep atau produk lain yang memiliki fungsi serupa.
<i>Modify</i>	Mengubah ukuran, bentuk, dimensi, atau karakteristik produk untuk meningkatkan kinerja.
<i>Put to Another Use</i>	Memanfaatkan komponen atau desain untuk fungsi lain yang lebih efektif.
<i>Eliminate</i>	Menghilangkan bagian yang tidak diperlukan sehingga struktur menjadi lebih sederhana dan efisien.
<i>Reverse</i>	Mengubah susunan atau orientasi komponen untuk memperoleh desain yang lebih baik.

Sumber: Eberle (1996).

2.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini ditunjang oleh beberapa penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, berkaitan dengan analisis *Ramp Door*. Penelitian tersebut disajikan dalam Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul	Metode Penelitian	Objek Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Muhammad Rizki (Rizki et al., 2025).	Analisis Kekuatan Struktur <i>Ramp Door</i> Kapal Ro-Ro 600 GT Menggunakan Metode Elemen Hingga	Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM)	<i>Ramp Door kapal Ro-Ro 600 GT</i>	Berdasarkan analisis Metode Elemen Hingga (FEM), diperoleh distribusi tegangan dan deformasi pada struktur <i>Ramp Door</i> kapal ro-ro 600 GT. Hasil menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada daerah tumpuan dan sambungan struktural, namun masih memenuhi kriteria kekuatan dan faktor keamanan sesuai dengan ketentuan klasifikasi
2.	R. Moch Rizal Hafiyah (Hafiyah et al., 2022)	Redesain Meja Workshop Kayu untuk Praktik Mahasiswa Desain Produk Industri dengan Pendekatan SCAMPER	SCAMPER	Meja Workshop	Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode SCAMPER mampu menghasilkan alternatif desain yang lebih ergonomis dan memiliki fungsi yang lebih baik melalui proses modifikasi komponen tanpa mengubah fungsi utama produk.
3.	Hartono Yudo (Yudo et al., 2023).	<i>Strength Analysis of LCT Lady Primus 39.5 m Ramp Door Structure Due to Changes in Tilt Angle Variations and Load Variations</i>	Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM)	<i>Ramp Door kapal LCT Lady Primus 39.5 m</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan sudut kemiringan <i>Ramp Door</i> dan variasi beban kendaraan menyebabkan peningkatan tegangan dan deformasi pada struktur <i>Ramp Door</i> . Kondisi sudut kemiringan yang lebih besar menghasilkan respons struktur yang lebih kritis, khususnya pada area engsel dan sambungan utama <i>Ramp Door</i> .

4.	Alamsyah (Alamsyah et al., 2022).	Analisis Kekuatan Struktur <i>Ramp Door</i> Haluan pada Kapal Ferry Ro-Ro 1500 GT	Metode Elemen Hingga (<i>Finite Element Method</i>)	<i>Ramp Door haluan kapal ferry Ro- Ro 1500 GT</i>	Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi beban kendaraan memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan tegangan dan deformasi pada struktur <i>Ramp Door</i> haluan. Tegangan tertinggi teridentifikasi pada area sambungan pelat dan pengaku, namun secara umum struktur masih berada dalam kondisi aman.
5.	Slamet Haryo Samudro (Samudro et al., 2019)	Analisis Kekuatan Struktur <i>Stern Ramp Door</i> pada Kapal Ferry Ro-Ro 1000 GT	Metode Elemen Hingga (<i>Finite Element Method/FEM</i>)	<i>Stern Ramp Door kapal ferry Ro- Ro 1000 GT</i>	Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur <i>Stern Ramp Door</i> kapal ferry ro-ro 1000 GT masih berada dalam batas tegangan izin berdasarkan standar klasifikasi yang digunakan. Tegangan maksimum terjadi pada area sambungan dan engsel <i>Ramp Door</i> akibat beban kendaraan, namun nilai tegangan tersebut masih berada di bawah batas luluh material sehingga struktur dinyatakan aman.

Berdasarkan Tabel 2.3, penelitian terdahulu umumnya membahas analisis kekuatan struktur *Ramp Door* menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) dengan fokus pada distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan akibat variasi pembebanan maupun konfigurasi struktur. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa tegangan maksimum cenderung terjadi pada area engsel, sambungan struktural, dan pengaku (*stiffener*), sehingga area tersebut menjadi lokasi yang paling kritis terhadap potensi kegagalan struktur. Di sisi lain, penelitian yang menggunakan metode SCAMPER menunjukkan bahwa pendekatan tersebut mampu menghasilkan alternatif pengembangan desain secara sistematis

melalui proses modifikasi dan penyempurnaan struktur tanpa mengubah fungsi utama produk.

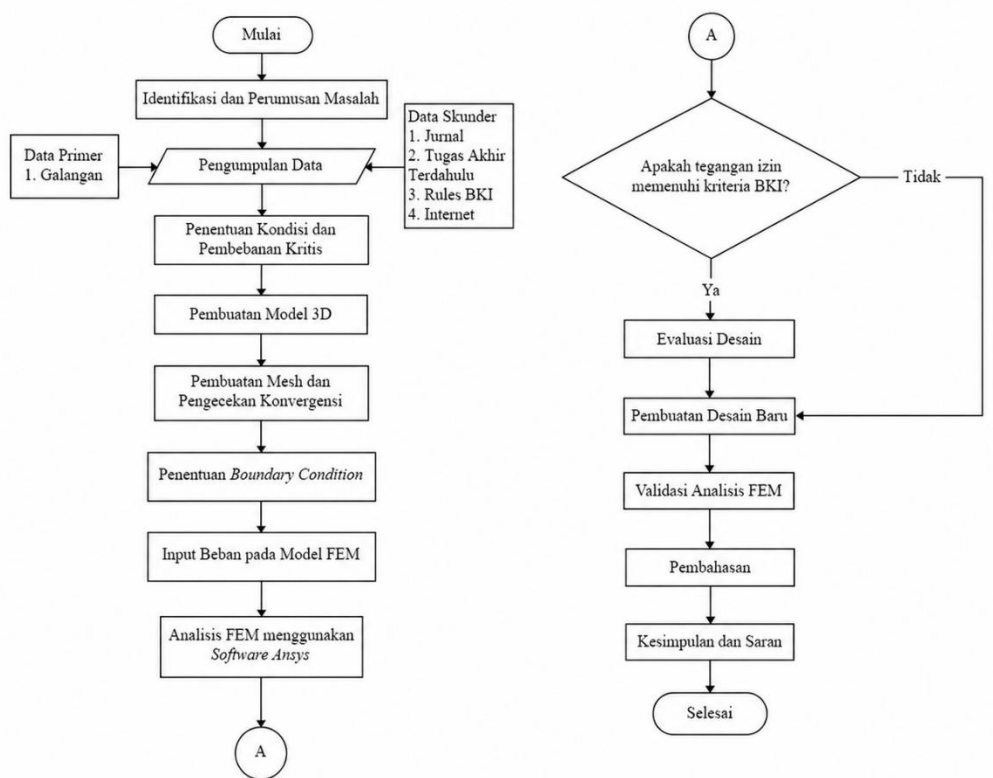
Meskipun demikian, penelitian yang mengombinasikan hasil analisis FEM sebagai dasar identifikasi area kritis dengan penerapan metode SCAMPER untuk proses *Redesign* struktur *Stern Ramp Door* kapal masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi celah penelitian tersebut dengan memanfaatkan hasil analisis FEM sebagai dasar evaluasi kondisi struktur eksisting, kemudian menerapkan metode SCAMPER dalam menyusun alternatif *Redesign*. Hasil *Redesign* selanjutnya dianalisis kembali menggunakan FEM untuk mengevaluasi perubahan distribusi tegangan dan faktor keamanan, sehingga dapat diperoleh rancangan struktur yang memiliki kinerja lebih baik dibandingkan kondisi eksisting.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Berikut Gambar 3.1 yang menjelaskan langkah-langkah dalam penyusunan tugas akhir dalam bentuk diagram alir penelitian :



Gambar 3. 1 Diagram Alir

3.2 Tahap Penelitian Awal

Tahap penelitian awal dilakukan untuk menentukan arah penelitian melalui identifikasi permasalahan, penentuan tujuan penelitian, serta studi literatur. Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan referensi mengenai struktur stern *Ramp Door*, metode elemen hingga (*Finite Element Method*), material ASTM A36, dan aturan BKI sebagai dasar analisis yang digunakan dalam penelitian.

3.3 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari dua sumber utama, yaitu data primer dan data sekunder. Pemisahan jenis data ini dilakukan untuk memperjelas asal-usul data serta perannya dalam proses analisis.

1. Data Primer

Data primer merupakan data utama yang digunakan secara langsung dalam pemodelan dan analisis struktur stern *Ramp Door*. Data primer dalam penelitian ini meliputi :

- Data ukuran struktur stern *Ramp Door*, yang mencakup panjang, lebar, ketebalan pelat, konfigurasi *stiffener*, *girder*, serta posisi engsel dan tumpuan *Ramp Door* terhadap struktur kapal. Data geometri *Stern Ramp Door* diperoleh dari gambar konstruksi *Existing* yang berasal dari Fasharkan Surabaya. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan pembuatan model tiga dimensi menggunakan Autodesk Fusion 360.
- Data material diperoleh berdasarkan keterangan material pada gambar konstruksi *Stern Ramp Door* yang menunjukkan penggunaan mild steel. Karena tidak tersedia data sertifikat material aktual, maka sifat mekanik material dimodelkan menggunakan baja struktural ASTM A36 sebagai pendekatan konservatif.
- Data beban kendaraan, yang mencakup berat total kendaraan, distribusi beban pada roda, serta area kontak roda dengan permukaan *Ramp Door*.

Data primer diperoleh dari gambar teknis kapal, dokumen konstruksi, serta spesifikasi teknis yang tersedia dari pihak terkait.

2. Data Sekunder

Data sekunder merupakan data pendukung yang digunakan untuk melengkapi dan memvalidasi analisis. Data sekunder dalam penelitian ini meliputi :

- Peraturan dan standar klasifikasi, seperti BKI Rules Volume II dan referensi klasifikasi internasional terkait kekuatan struktur.
- Hasil penelitian terdahulu, yang digunakan sebagai pembanding dan referensi dalam memahami karakteristik respons struktur *Ramp Door*
- Jurnal penelitian terdahulu, baik nasional maupun internasional, yang membahas analisis kekuatan struktur *Ramp Door*, struktur kapal Ro-Ro, LPD, maupun struktur baja sejenis dengan metode elemen hingga. Jurnal-jurnal ini digunakan sebagai referensi metode, pembanding hasil, serta untuk memperkuat posisi penelitian.
- Sumber internet, seperti situs lembaga klasifikasi, publikasi institusi akademik, dan dokumentasi teknis yang relevan, yang digunakan untuk melengkapi informasi teoritis dan data pendukung.

Data sekunder berfungsi sebagai dasar teoritis, referensi metodologi, serta acuan evaluasi hasil analisis FEM agar penelitian memiliki landasan ilmiah yang kuat dan dapat dipertanggungjawabkan secara akademik.

Data beban diperoleh dari spesifikasi kendaraan militer yang beroperasi di *Stern Ramp Door* seperti pada Lampiran B, menunjukkan berat keseluruhan kendaraan dan konfigurasi kontak roda atau rantai dengan permukaan *ramp*. Data ini digunakan untuk menentukan intensitas beban statistik yang bekerja pada *Ramp Door* selama proses bongkar muat.

Semua data yang telah dikumpulkan selanjutnya divalidasi secara konteks kapal agar cocok dengan kondisi operasional dan dapat dimasukkan sebagai masukan dalam pemodelan FEM.

3.4 Penentuan Kondisi Pembebanan

Tahap penentuan kondisi pembebanan dilakukan untuk menentukan besar gaya yang akan diberikan pada model elemen hingga. Beban yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari kendaraan militer yang melintasi *Stern Ramp Door*. Besarnya pembebanan ditentukan berdasarkan berat kendaraan,

konfigurasi jumlah roda, distribusi beban pada setiap kelompok roda, serta luas kontak ban terhadap permukaan *Ramp Door*.

Perhitungan pembebanan dilakukan secara manual sebelum dimasukkan ke dalam perangkat lunak ANSYS. Tahapan ini bertujuan agar besar gaya yang diberikan pada model sesuai dengan kondisi aktual kendaraan saat melintas di atas *Stern Ramp Door*. Selanjutnya beban tersebut dikonversi ke dalam satuan *Newton* sesuai dengan kebutuhan perangkat lunak ANSYS *Mechanical*.

Selain menentukan besar gaya, pada tahap ini juga ditentukan posisi kendaraan di atas *Stern Ramp Door* sehingga lokasi pembebanan dapat disesuaikan dengan kondisi sebenarnya. Posisi pembebanan sangat berpengaruh terhadap distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur.

3.5 Pemodelan 3D

Tahap pemodelan tiga dimensi dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Fusion berdasarkan gambar konstruksi *Stern Ramp Door*. Model dibuat dengan memperhatikan dimensi utama, bentuk struktur, ketebalan pelat, profil pengaku, serta komponen-komponen utama lainnya sehingga dapat merepresentasikan kondisi aktual struktur.

Pemodelan tiga dimensi bertujuan menghasilkan geometri yang siap digunakan dalam proses analisis menggunakan metode elemen hingga. Setelah proses pemodelan selesai, model diperiksa kembali untuk memastikan tidak terdapat kesalahan geometri yang dapat memengaruhi hasil simulasi.

Model yang telah selesai kemudian diekspor ke dalam format yang kompatibel dengan ANSYS *Mechanical* sehingga dapat digunakan pada tahap analisis berikutnya.

3.6 Pemodelan Elemen Hingga

Pemodelan elemen hingga dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Mechanical*. Tahap ini bertujuan mengubah model tiga dimensi menjadi model numerik yang dapat dianalisis menggunakan metode elemen

hingga. Pada proses ini dilakukan penentuan sifat material, pembentukan mesh, serta pemberian *boundary condition* sesuai kondisi aktual *Stern Ramp Door* pada kapal.

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja ASTM A36. Sifat mekanik material seperti modulus elastisitas, *rasio Poisson*, massa jenis, dan tegangan luluh dimasukkan ke dalam *Engineering Data* ANSYS sebagai parameter utama dalam proses analisis numerik.

3.7 Penerapan Pembebanan

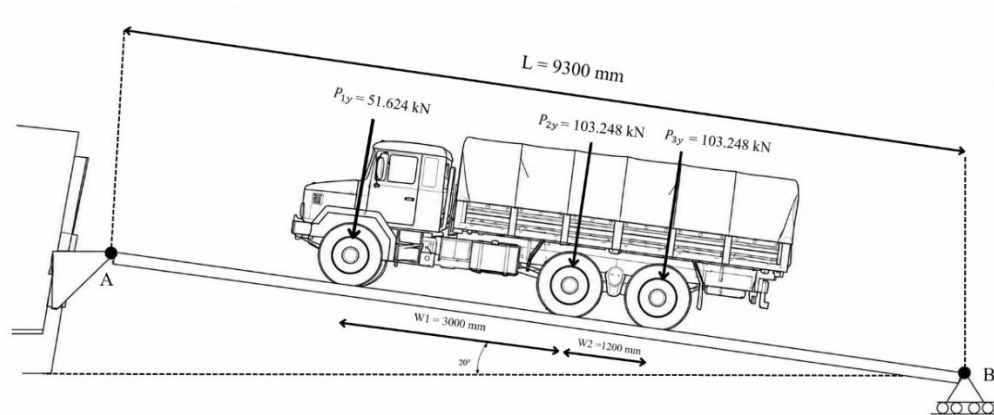
Setelah proses pemodelan selesai, beban kendaraan diterapkan pada model menggunakan fitur *Force* pada ANSYS *Mechanical*. Besar gaya yang diberikan merupakan hasil perhitungan manual yang telah disesuaikan dengan distribusi beban pada masing-masing kelompok roda kendaraan.

Proses pembebanan dilakukan pada area kontak roda terhadap permukaan *Stern Ramp Door* sesuai posisi kendaraan yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah seluruh kondisi pembebanan dan *boundary condition* selesai diterapkan, dilakukan proses *running analysis* untuk memperoleh distribusi tegangan (*Equivalent Stress*), deformasi total (*Total Deformation*), serta parameter lain yang diperlukan dalam penelitian.

Tabel 3. 1 Pembebanan

Parameter	Nilai
Jenis Kendaraan	<i>Dump Truck</i>
Berat Kendaraan (kosong)	8 ton
Muatan Maksimum	20 ton
Berat Total Kendaraan	28 ton
Massa Kendaraan	28.000 kg
Konfigurasi <i>Axle</i>	1–2–2
Jumlah Roda	10 roda
Percepatan Gravitasi	9,81 m/s ²
Gaya Berat Kendaraan	274,68 kN

Sumber: *Vehicle Loading* KRI Makassar-590 (Fasharkan Surabaya)



Gambar 3. 2 Ilustrasi Truk

4. Kesimpulan

Hasil simulasi Metode Elemen Hingga (FEM) berupa distribusi tegangan dan faktor keamanan dianalisis dan dievaluasi secara menyeluruh. Tegangan maksimum yang terjadi pada struktur *Stern Ramp Door* dibandingkan dengan tegangan izin material berdasarkan ketentuan klasifikasi untuk menentukan tingkat keamanan struktur.

Selain itu, faktor keamanan yang terjadi pada struktur juga dievaluasi untuk memastikan bahwa nilai faktor keamanan tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima secara struktural dan tidak mengganggu fungsi operasional *Ramp Door*.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, ditarik kesimpulan mengenai kemampuan struktur *Stern Ramp Door* KRI Makassar-590 dalam menahan kondisi pembebanan paling kritis. Kesimpulan ini mencerminkan tingkat keamanan struktur terhadap beban operasional yang dianalisis serta kesesuaiannya dengan kriteria klasifikasi yang berlaku.

Sebagai tindak lanjut dari hasil evaluasi, disusun rekomendasi desain konseptual pada area struktur yang mengalami respons paling kritis. Rekomendasi yang diberikan bertujuan untuk meningkatkan kinerja dan keselamatan struktur *Stern Ramp Door*, serta bersifat konseptual tanpa mencakup desain detail, perhitungan fabrikasi, maupun analisis biaya.

Berdasarkan hasil evaluasi kekuatan struktur, ditarik kesimpulan mengenai kemampuan struktur *Stern Ramp Door* KRI Makassar-590 dalam menahan kondisi pembebanan paling kritis. Selanjutnya disusun rekomendasi desain konseptual pada area struktur yang mengalami respons paling kritis sebagai upaya peningkatan kinerja dan keselamatan struktur.

”Halaman Sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Umum KRI Makassar-590

KRI Makassar-590 merupakan kapal perang jenis *Landing Platform Dock* (LPD) milik Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut (TNI AL) yang berfungsi sebagai sarana pengangkut personel, kendaraan tempur, dan logistik dalam mendukung operasi pendaratan amfibi maupun bantuan kemanusiaan. Salah satu komponen penting pada kapal ini adalah *Stern Ramp Door* yang berfungsi sebagai akses keluar masuk kendaraan menuju *Vehicle deck*. Data utama KRI Makassar-590 yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Utama Kapal

DATA UTAMA KAPAL	
<i>Ship Type</i>	Landing Platform Dock (LPD)
<i>Lenght Overall (LOA)</i>	122 m
<i>Breadth (B)</i>	22 m
<i>Height (H)</i>	38 m
<i>Draft (T)</i>	4.9 m
<i>Maximum Speed</i>	16 Knots

Sumber: https://en.wikipedia.org/wiki/KRI_Makassar

Berdasarkan data utama kapal pada Tabel 4.1, KRI Makassar-590 memiliki panjang keseluruhan (*Length Overall*) sebesar 122 m, lebar (*Breadth*) 22 m, *Height* 38 m, dan sarat (*Draft*) 4,9 m. Dimensi tersebut menunjukkan bahwa KRI Makassar-590 merupakan kapal pendarat berukuran besar yang dirancang untuk mengangkut kendaraan militer beserta perlengkapan pendukungnya. Oleh karena itu, *Stern Ramp Door* harus memiliki kekuatan struktur yang memadai untuk menahan beban kendaraan selama proses embarkasi dan debarkasi. Data utama kapal tersebut menjadi dasar dalam memahami karakteristik objek penelitian sebelum dilakukan pemodelan tiga dimensi dan analisis struktur menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*).

4.2 Existing Stern Ramp Door

Setelah mengetahui data utama kapal, tahap selanjutnya adalah mengidentifikasi dimensi *Existing Stern Ramp Door* sebagai objek penelitian. Dimensi geometri digunakan sebagai dasar dalam proses pemodelan tiga dimensi menggunakan Autodesk Fusion 360 dan analisis struktur menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Data dimensi diperoleh dari gambar konstruksi *Stern Ramp Door* KRI Makassar-590 yang diperoleh dari Fasharkan Surabaya sehingga model yang dibuat dapat merepresentasikan kondisi aktual struktur.

Tabel 4. 2 Ukuran *Stern Rampdoor* KRI Makassar-590

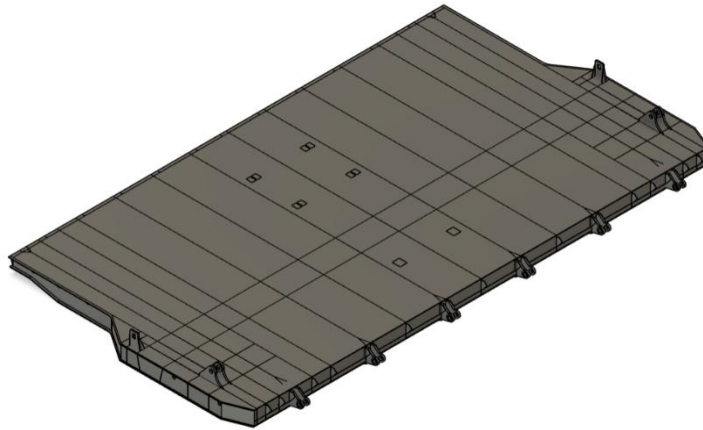
Panjang	9,300 mm
Lebar	16,850
Tebal Plat	10 mm

Sumber: Fasharkan Surabaya

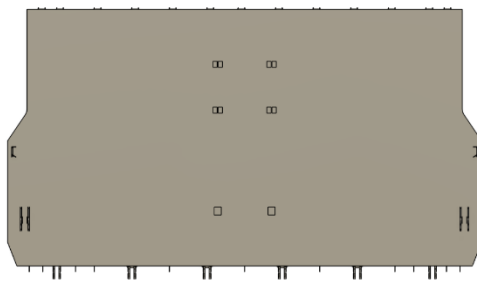
Berdasarkan Tabel 4.2, *Existing Stern Ramp Door* memiliki panjang 9,300 mm, lebar 16,850 mm, dan ketebalan pelat utama sebesar 10 mm. Dimensi tersebut digunakan sebagai acuan dalam proses pemodelan tiga dimensi sehingga geometri struktur yang dianalisis sesuai dengan kondisi aktual. Selanjutnya, model tiga dimensi digunakan sebagai dasar dalam analisis kekuatan struktur menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*).

4.3 Pemodelan 3D Existing Stern Ramp Door

Setelah memperoleh dimensi *Existing stern Ramp Door*, langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan 3D menggunakan *Autodesk Fusion 360*. Pemodelan dilakukan berdasarkan gambar konstruksi yang diperoleh dari Fasharkan Surabaya dengan mengacu pada dimensi aktual setiap komponen struktur. Tujuan pemodelan 3D adalah menghasilkan geometri yang sesuai dengan kondisi *Existing* sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam analisis menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)*.



Gambar 4. 1 *Isometric Rampdoor Existing*



Gambar 4. 2 Tampak Atas *Rampdoor Existing*



Gambar 4. 3 Tampak Bawah *Rampdoor Existing*

Gambar diatas menunjukkan hasil pemodelan 3D *Existing Stern Ramp Door* yang telah dibuat menggunakan Autodesk Fusion 360. Model tersebut terdiri atas komponen-komponen utama, seperti pelat utama (*main plate*), *longitudinal stiffener*, *transverse girder*, pelat samping, serta dudukan engsel (*hinge*). Seluruh komponen dimodelkan sesuai dengan dimensi aktual agar mampu merepresentasikan kondisi *Existing* struktur. Model 3D ini kemudian digunakan sebagai geometri utama pada proses analisis struktur menggunakan ANSYS *Workbench*.

4.4 Material *Existing Stern Ramp Door*

Material merupakan salah satu parameter penting dalam analisis struktur menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)*. Sifat mekanik material akan mempengaruhi respons struktur terhadap pembebanan, seperti distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan. Pada penelitian ini, material yang digunakan pada *Existing Stern Ramp Door* adalah baja ASTM A36 yang memiliki sifat mekanik sesuai dengan kebutuhan konstruksi struktur kapal.

Tabel 4. 3 Properties Material ASTM A36

Property	Value
<i>Material</i>	ASTM A36
<i>Young's Modulus</i>	200 GPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0.26
<i>Density</i>	7859 kg/m ³
<i>Yield Strength</i>	250 MPa
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	400-550 MPa

Sumber: ASTM International (2022).

Berdasarkan Tabel 4.3, material ASTM A36 memiliki modulus elastisitas sebesar 200 GPa, yang menunjukkan tingkat kekakuan material terhadap deformasi elastis. Material ini juga memiliki yield strength sebesar 250 MPa, sehingga nilai tersebut digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi apakah tegangan hasil analisis masih berada di bawah batas luluh material. Selain itu, nilai massa jenis (*density*) dan *Poisson's ratio* digunakan sebagai parameter masukan pada perangkat lunak ANSYS untuk memperoleh hasil simulasi yang sesuai dengan karakteristik material sebenarnya.

4.5 Analisis Pembebanan *Existing Stern Ramp Door*

Analisis pembebanan merupakan tahapan awal yang dilakukan untuk menentukan besarnya gaya yang bekerja pada struktur *Stern Ramp Door*. Pembebanan pada penelitian ini mengacu pada data *Vehicle load* KRI Makassar-590 berupa *Dump Truck* 8 ton dengan konfigurasi tiga axle (1-2-2). Untuk memperoleh kondisi pembebanan maksimum, kendaraan diasumsikan membawa muatan penuh sebesar 20 ton, sehingga total massa kendaraan yang bekerja pada struktur adalah 28 ton. Massa kendaraan tersebut kemudian

dikonversi menjadi gaya menggunakan percepatan gravitasi sebelum didistribusikan ke masing-masing roda. Hasil distribusi beban selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan *Free Body Diagram* (FBD) dan analisis struktur menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM).

4.5.1 Penentuan Beban Kendaraan

Penentuan beban kendaraan dilakukan berdasarkan data vehicle load KRI Makassar-590. Kendaraan yang digunakan berupa *Dump Truck* 8 ton dengan konfigurasi tiga axle (1-2-2). Pada kondisi pembebanan maksimum, kendaraan membawa muatan sebesar 8 ton, sehingga total massa kendaraan yang bekerja pada struktur *Stern Ramp Door* adalah 28 ton. Spesifikasi kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Spesifikasi Kendaraan

Parameter	Nilai
Jenis	<i>Dump Truck</i>
Berat Kendaraan	20 ton
Muatan Maksimum	8 ton
Berat Total	28 ton
Konfigurasi axle	1-2-2
Jumlah Roda	10 roda

Berdasarkan data pada Tabel 4.4, total massa kendaraan yang bekerja pada *Stern Ramp Door* sebesar 28 ton atau 28.000 kg. Untuk memperoleh gaya pembebanan yang digunakan pada analisis struktur, massa kendaraan dikonversi menjadi gaya menggunakan hukum Newton sebagai berikut. Gaya pembebanan dihitung menggunakan persamaan (2.1)

➤ Perhitungan Gaya Pembebanan

$$F = m \times g$$

Keterangan :

F = Gaya Pembebanan (N)

m = Massa kendaraan (kg)

g = Percepatan Gravitasi (9,81 m/s²)

- Konversi Massa

$$m = 28 \times 1000$$

$$m = 28000 \text{ kg}$$

- Substitusi

$$F = 28000 \times 9.81$$

$$F = 274680 \text{ N}$$

$$F = 274.68 \text{ kN}$$

4.5.2 Distribusi Beban Kendaraan

Distribusi beban dilakukan berdasarkan konfigurasi kendaraan yang terdiri atas 10 roda, sehingga gaya total kendaraan dianggap terdistribusi secara merata pada setiap roda. Besarnya gaya yang diterima oleh setiap roda dihitung menggunakan persamaan berikut. Beban pada setiap roda dihitung menggunakan persamaan (2.4)

$$P = \frac{F}{n}$$

Keterangan :

P = Beban tiap roda (kN)

F = Gaya total kendaraan (kN)

n = Jumlah roda

- Substitusi

$$P = \frac{274.68}{10}$$

$$P = 27.468 \text{ kN}$$

Karena *Rampdoor* memiliki sudut kemiringan 20° , maka beban setiap roda dihitung menggunakan persamaan (2.5)

Beban roda depan :

$$P_1 = 2 \times 27.468 = 54.936 \text{ kN}$$

$$P_{1y} = P_1 \cos 20^\circ$$

$$P_{1y} = 54.936 \cos 20^\circ = 51.624 \text{ kN}$$

Beban roda tengah :

$$P_2 = 4 \times 27.468 = 109.872 \text{ kN}$$

$$P_{2y} = P_2 \cos 20^\circ$$

$$P_{2y} = 109.872 \cos 20^\circ = 103.248 \text{ kN}$$

Beban roda belakang :

$$P_3 = 4 \times 27.468 = 109.872 \text{ kN}$$

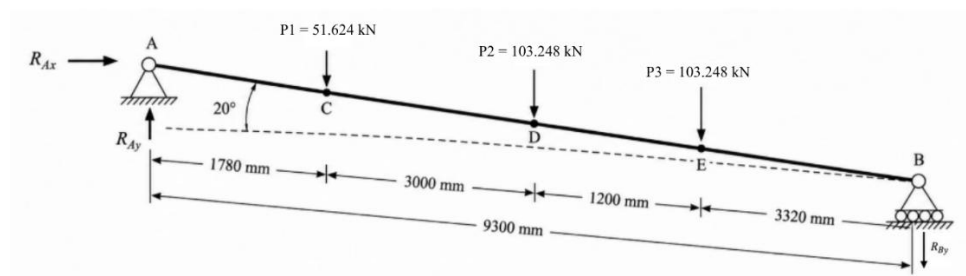
$$P_{3y} = P_3 \cos 20^\circ$$

$$P_{3y} = 109.872 \cos 20^\circ = 103.248 \text{ kN}$$

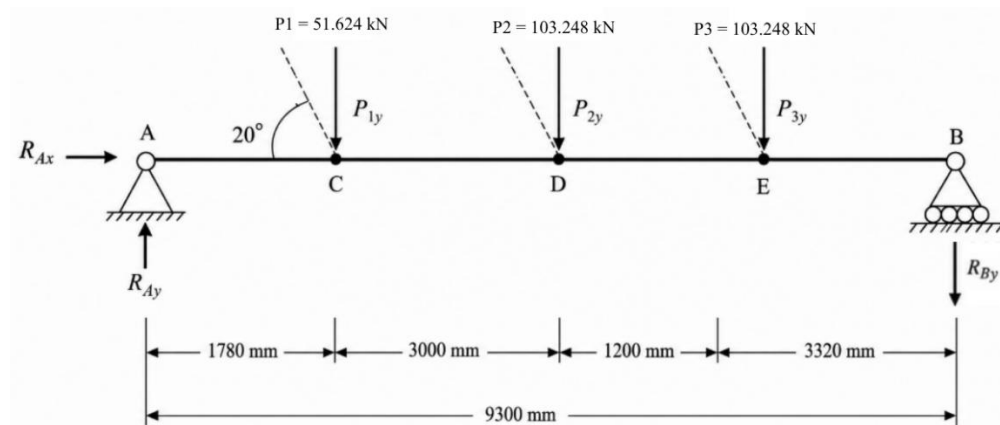
4.5.3 Free Body Diagram (FBD)

Free Body Diagram (FBD) merupakan representasi sederhana dari sistem struktur yang digunakan untuk mengidentifikasi seluruh gaya yang bekerja pada *Stern Ramp Door* akibat pembebanan kendaraan. Penyusunan FBD bertujuan untuk mempermudah analisis keseimbangan gaya dan momen sehingga dapat ditentukan besarnya reaksi tumpuan serta momen lentur yang terjadi pada struktur.

Pada penelitian ini, *Stern Ramp Door* dimodelkan sebagai balok sederhana yang memiliki tumpuan engsel pada titik A dan tumpuan rol pada titik B. Beban kendaraan dimodelkan sebagai tiga gaya terpusat (*concentrated load*) yang mewakili distribusi beban roda depan, roda tengah, dan roda belakang, yaitu sebesar 51.624 kN, 103.248 kN, dan 103.248 kN. Jarak antar pembebanan diperoleh berdasarkan dimensi kendaraan dan ukuran *stern Rampdoor* KRI Makassar-590 yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 4. 4 *Free Body Diagram*



Gambar 4. 5 Free Body Diagram Transform Sudut

Berdasarkan *Free Body Diagram* pada Gambar 4.5, reaksi tumpuan dihitung menggunakan persamaan keseimbangan statika, yaitu keseimbangan gaya pada arah horizontal, keseimbangan gaya pada arah vertikal, dan keseimbangan momen.

Keseimbangan Momen terhadap Titik A dihitung menggunakan persamaan (2.6)

$$\sum M_A = 0$$

$$(P_{1y} \times 1,78) + (P_{2y} \times 4,78) + (P_{3y} \times 5,98) - (R_{By} \times 9,30) = 0$$

$$(54,936 \cos 20^\circ \times 1,78) + (109,872 \cos 20^\circ \times 4,78) + (109,872 \cos 20^\circ \times 5,98) - 9,30R_{By} = 0$$

$$(51,624 \times 1,78) + (103,248 \times 4,78) + (103,248 \times 5,98) - 9,30R_{By} = 0$$

$$91,891 + 493,526 + 617,423 - 9,30R_{By} = 0$$

$$1202,840 = 9,30R_{By}$$

$$R_{By} = \frac{1202,840}{9,30}$$

$$R_{By} = 129,337 \text{ kN}$$

Keseimbangan Momen terhadap Titik B dihitung menggunakan persamaan (2.7)

$$\sum M_B = 0$$

$$(R_{Ay} \times 9,30) - (P_{1y} \times 7,52) - (P_{2y} \times 4,52) - (P_{3y} \times 3,32) = 0$$

$$9,30R_{Ay} - (54,936 \cos 20^\circ \times 7,52) - (109,872 \cos 20^\circ \times 4,52) - (109,872 \cos 20^\circ \times 3,32) = 0$$

$$9,30R_{Ay} - (51,624 \times 7,52) - (103,248 \times 4,52) - (103,248 \times 3,32) = 0$$

$$9,30R_{Ay} - 388,212 - 466,681 - 342,783 = 0$$

$$9,30R_{Ay} = 1197,676$$

$$R_{Ay} = \frac{1197,676}{9,30}$$

$$R_{Ay} = 128,782 \text{ kN}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} - P_{1y} - P_{2y} - P_{3y} = 0$$

$$128,782 + 129,337 - 51,624 - 103,248 - 103,248 = 0$$

$$258,119 - 258,120 \approx 0$$

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{Ax} - P_{1x} - P_{2x} - P_{3x} = 0$$

$$R_{Ax} - (54,936 \sin 20^\circ) - (109,872 \sin 20^\circ) - (109,872 \sin 20^\circ) = 0$$

$$R_{Ax} - 18,789 - 37,578 - 37,578 = 0$$

$$R_{Ax} = 93,945 \text{ Kn}$$

Diagram Momen Lentur (BMD)

$$M_A = 0$$

$$M_C = R_{Ay} \times 1,78$$

$$M_C = 128,782 \times 1,78$$

$$M_C = 229,23 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_D = R_{Ay} \times 4,78 - P_{1y} \times 3,00$$

$$M_D = (128,782 \times 4,78) - (51,624 \times 3,00)$$

$$M_D = 615,58 - 154,87$$

$$M_D = 460,71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_E = R_{Ay} \times 5,98 - P_{1y} \times 4,20 - P_{2y} \times 1,20$$

$$M_E = (128,782 \times 5,98) - (51,624 \times 4,20) - (103,248 \times 1,20)$$

$$M_E = 770,12 - 216,82 - 123,90$$

$$M_E = 429,40 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

4.6 Perhitungan Batas Tegangan Izin Berdasarkan BKI

Perhitungan batas tegangan izin dilakukan sebagai acuan untuk mengevaluasi kekuatan struktur *Stern Ramp Door* terhadap beban yang bekerja. Batas tegangan izin ditentukan berdasarkan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) *Rules for Hull Volume II* Tahun 2014, dengan memperhitungkan faktor bahan (*material factor*) yang bergantung pada nilai tegangan luluh (*yield strength*) material. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja struktural ASTM A36 dengan nilai tegangan luluh minimum sebesar 250 MPa. dihitung menggunakan persamaan (2.15)

$$k = \frac{235}{R_{eh}}$$

Dimana :

K = Faktor keamanan material

R_{eh} ASTM A36 = 250 Mpa

Sehingga diperoleh factor keamanan material :

$$k = \frac{235}{250}$$

$$k = 0.94$$

Perhitungan tegangan *Ramp Door* mengacu pada BKI Vol. II Sec. 6 Po. J.3. Untuk menjaga keamanan, konstruksi pada *Ramp Door* dirancang sedemikian rupa sehingga tegangan lentur *Ramp Door* tidak terlampaui batas yang dihitung menggunakan persamaan 2.12

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= \frac{120}{k} \\ &= \frac{120}{0,94} \\ &= 127,66 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Sedangkan batas tegangan geser dihitung menggunakan persamaan berikut, dihitung menggunakan persamaan (2.13) :

$$\begin{aligned}\tau_{max} &= \frac{80}{k} \\ &= \frac{80}{0,94} \\ &= 85,11 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Dan batas tegangan *Equivalent* dihitung menggunakan berikut, dihitung menggunakan persamaan (2.14) :

$$\begin{aligned}\sigma_{v_{max}} &= \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \frac{150}{k} \text{ N/mm}^2 \\ &= \frac{150}{0,94} \\ &= 159,58 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

4.7 Perhitungan Tegangan *Rampdoor* Eksisting

Perhitungan tegangan pada *Ramp Door* eksisting dilakukan untuk mengetahui besarnya tegangan yang timbul akibat beban kendaraan yang bekerja pada struktur. Perhitungan ini menggunakan data pembebanan yang telah ditentukan dan mengacu pada persamaan mekanika material. Hasil perhitungan selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi kekuatan desain eksisting serta membandingkannya dengan desain hasil modifikasi.

1) Luas Penampang *Rampdoor* Eksisting

Luas penampang *Rampdoor* eksisting dihitung berdasarkan dimensi masing-masing komponen penyusun struktur. b merupakan lebar penampang, h merupakan tinggi atau tebal penampang, sedangkan A merupakan luas penampang yang diperoleh dari perkalian $b \times h$. Kolom Jumlah menunjukkan banyaknya komponen, dan Jumlah A merupakan total luas penampang dari setiap komponen.

Tabel 4. 5 Luas Penampang *Rampdoor* Eksisting

No.	Item	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Unit	Jumlah
1.	Plat Atas & Bawah	16.850	10 mm	168500	2	337000
2.	Longitudinal	450	8	3600	10	36000
	Total					373000 mm ²

2) Titik Berat Penampang *Rampdoor* Eksisting

Titik berat penampang *Rampdoor* eksisting dihitung berdasarkan luas penampang dan posisi masing-masing komponen terhadap garis acuan. A merupakan luas penampang, y_i merupakan jarak titik berat penampang terhadap garis acuan, sedangkan $A \times y_i$ merupakan hasil perkalian luas penampang dengan jarak titik berat yang digunakan dalam menentukan posisi titik berat total penampang.

Tabel 4. 6 Titik Berat Penampang *Ramp Door* Eksisting

No	Item	Jumlah A	y_i (mm)	$A \times y_i$ (mm)
1.	Plat Atas & Bawah	337000	235	79195000
2.	Longitudinal	36000	235	8460000
	Total			87655000

$$\begin{aligned}\text{Titik berat} &= \frac{87655000}{373000} \\ &= 235 \text{ mm} \\ &= 0,235 \text{ m}\end{aligned}$$

3) Momen Inersia *Rampdoor* Eksisting

Momen inersia penampang *Rampdoor* eksisting dihitung menggunakan Teorema Sumbu Sejajar (*Parallel Axis Theorem*). Idd merupakan momen inersia akibat perpindahan sumbu yang diperoleh dari $A \times y_i^2$, Io merupakan momen inersia masing-masing komponen terhadap sumbu pusatnya, sedangkan Inn merupakan momen inersia total setiap komponen yang diperoleh dari penjumlahan Idd dan Io.

Tabel 4. 7 Momen Inersia *Rampdoor* Eksisting

No	Item	Idd= $A \times y_i^2$ (mm ⁴)	Io= $1/12 \times b \times h^3$ (mm ⁴)	Inn=Idd+Io (mm ⁴)
1.	Plat Atas & Bawah	18.615.775.000	2.808.333	18.618.583.333
2.	Longitudinal	1.987.650.000	60.750.000	2.048.400.000
Total				20.666.983.333

$$\begin{aligned}\text{Momen Inersia} &= 20.666.983.333 \text{ mm}^4 \\ &= 0,020667 \text{ m}^4\end{aligned}$$

Keterangan :

A = luas penampang komponen (mm²)

y_i = Jarak titik berat komponen terhadap sumbu netral (mm)

Idd = momen inersia akibat perpindahan sumbu ($A \times y_i^2$) (mm⁴)

b = lebar penampang (mm)

h = tebal penampang (mm)

Io = momen inersia kompnen terhadap sumbu pusat $1/12 \times b$ (mm⁴)

Inn = momen inersia total komponen Inn=Idd+Io (mm⁴)

4) Perhitungan Tegangan *Rampdoor* Eksisting

Setelah nilai momen inersia penampang diperoleh, langkah selanjutnya adalah menghitung tegangan lentur yang terjadi pada *Rampdoor* eksisting. Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui besarnya tegangan akibat

momen lentur yang bekerja pada penampang. Tegangan lentur dihitung menggunakan Persamaan (2.10)

➤ Tegangan Lentur :

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= \frac{M \times y}{I} \\ &= \frac{460,71 \times 10^3 \times 0,235}{0,020667} \\ &= \frac{108.266,85}{0,020667} \\ &= 5.238.377,61 \text{ N/m}^2 \\ &= 5,24 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Besarnya Tegangan Geser yang terjadi pada penampang *Rampdoor* dihitung menggunakan persamaan (2.11)

➤ Tegangan Geser :

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{VQ}{Ib} \\ \tau &= \frac{429,40 \times 0,03876}{0,020667 \times 0,008} \\ \tau &= \frac{16,644744}{0,000165336} \\ \tau &= 100.674,96 \text{ N/m}^2 \\ \tau &= 100,67 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Tegangan ekuivalen dihitung untuk mengetahui besarnya tegangan total yang terjadi pada *Ramp Door* akibat kombinasi tegangan lentur dan tegangan geser. Perhitungannya mengacu pada Persamaan (2.14)

➤ Tegangan *Equivalent* :

$$\begin{aligned}\sigma &= 5,24 \text{ Mpa} \\ \sigma_{eq} &= \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \\ \sigma_{eq} &= \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \\ &= \sqrt{5,24^2 + 3(100,67)^2} \\ &= 174,44 \text{ MPa}\end{aligned}$$

4.8 Perhitungan Tegangan *Rampdoor Redesign*

Perhitungan tegangan pada desain baru dilakukan untuk mengetahui besarnya tegangan yang terjadi setelah dilakukan modifikasi pada struktur *Rampdoor*. Tahapan perhitungan dilakukan dengan metode yang sama seperti pada desain eksisting, sehingga hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara langsung. Nilai tegangan yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi pengaruh modifikasi terhadap kekuatan struktur *Rampdoor*.

1) Luas Penampang *Rampdoor Redesign*

Luas penampang *Rampdoor Redesign* dihitung berdasarkan dimensi setiap komponen struktur setelah dilakukan modifikasi. Pada tabel, b merupakan lebar penampang, h merupakan tebal penampang, A merupakan luas penampang hasil perkalian $b \times h$, sedangkan Jumlah menunjukkan total luas penampang dari masing-masing komponen.

Tabel 4. 8 Luas Penampang *Rampdoor Redesign*

No.	Item	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Unit	Jumlah
1.	Plat Atas	16850	14 mm	235900	1	235900
2.	Plat Bawah	16850	14 mm	235900	1	235900
2.	Longitudinal	450	8	3600	10	36000
4.	Longitudinal Tambahan	450	8	3600	8	28800
	Total					536600 mm ²

2) Titik Berat Penampang *Rampdoor Redesign*

Titik berat penampang *Rampdoor Redesign* dihitung berdasarkan luas penampang dan posisi masing-masing komponen terhadap garis acuan. A merupakan luas penampang, y_i merupakan jarak titik berat terhadap garis acuan, sedangkan $A \times y_i$ merupakan momen luas yang digunakan untuk menentukan titik berat total penampang

Tabel 4. 9 Titik Berat Penampang *Rampdoor Redesign*

No	Item	Jumlah A	y_i (mm)	$A \times X$ (mm)
1.	Plat Atas	337000	235	55436500
2.	Plat Bawah	235.900	235	55436500
3.	Longitudinal	36000	235	8460000
4.	Longitudinal Tambahan	28800	235	6768000
	Total			126101000

$$\begin{aligned}\text{Titik berat} &= \frac{126101000}{536600} \\ &= 235 \text{ mm} \\ &= 0,235 \text{ m}\end{aligned}$$

3) Momen Inersia *Rampdoor Redesign*

Momen inersia penampang *Rampdoor Redesign* dihitung menggunakan metode penampang gabungan dengan Teorema Sumbu Sejajar (Parallel Axis Theorem). Idd merupakan momen inersia akibat perpindahan sumbu, Io merupakan momen inersia terhadap sumbu pusat masing-masing komponen, sedangkan Inn merupakan momen inersia total setiap komponen.

Tabel 4. 10 Momen Inersia *Rampdoor Redesign*

No	Item	Idd=A × yi ² (mm ⁴)	Io=1/12 × b × h ³ (mm ⁴)	Inn=Idd+Io (mm ⁴)
1.	Plat Atas & Bawah	26056295000	7703267	26063998267
2.	Longitudinal	1.987.650.000	60.750.000	2.048.400.000
3.	Longitudinal <i>Redesign</i>	1590120000	48600000	1638720000
Total				29751118267

$$\begin{aligned}\text{Momen Inersia} &= 29.75111.8267 \text{ mm}^4 \\ &= 0,02975 \text{ m}^4\end{aligned}$$

4) Perhitungan Tegangan *Rampdoor Redesign*

Tegangan lentur pada *Rampdoor Redesign* dihitung untuk mengetahui besarnya tegangan akibat momen lentur yang bekerja pada struktur. Perhitungannya mengacu pada Persamaan (2.10)

➤ Tegangan Lentur :

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= \frac{M \times y}{I} \\ &= \frac{460,71 \times 10^3 \times 0,235}{0,02975} \\ &= \frac{108.266,85}{0,02975} \\ &= 3.639.222 \text{ N/m}^2 \\ &= 3,64 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Besarnya tegangan geser pada penampang *Rampdoor Redesign* dihitung menggunakan Persamaan (2.11)

➤ Tegangan Geser :

$$\tau = \frac{VQ}{Ib}$$

$$\tau = \frac{429,40 \times 0,03876}{0,02975 \times 0,008}$$

$$\tau = 69.935.899,16 \text{ N/m}^2$$

$$\tau = 69,94 \text{ Mpa}$$

Tegangan *Equivalent* dihitung untuk mengetahui besarnya tegangan total yang terjadi pada *Rampdoor Redesign* akibat kombinasi tegangan yang bekerja. Perhitungannya mengacu pada Persamaan (2.14)

➤ Tegangan *Equivalent* :

$$\sigma = 3,87 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$= \sqrt{3,64^2 + 3(69,94)^2}$$

$$= \sqrt{14.688,0604}$$

$$= 121,19 \text{ MPa}$$

4.9 Perhitungan Penggerak *Wire Rope* pada *Ramp Door*

Perhitungan *wire rope* dilakukan untuk mengetahui kemampuan *wire rope* yang digunakan pada sistem *Rampdoor* setelah dilakukan redesain. Redesain *Rampdoor* menyebabkan perubahan massa struktur sehingga perlu dilakukan pemeriksaan terhadap kemampuan *wire rope* dalam menerima gaya tarik yang bekerja. Berdasarkan gambar konstruksi, *wire rope* yang digunakan memiliki diameter 40 mm dengan konstruksi 6×WS(36) IWRC dan lapisan galvanis. Pada penelitian ini, *wire rope* dengan diameter 40 mm dipertahankan pada desain *Redesign* dan dilakukan pemeriksaan terhadap kemampuan menahan gaya tarik yang bekerja.

a. Berat *Rampdoor*

Massa *Ramp Door* hasil *Redesign* diperoleh sebesar:

$$m = 35.506,378 \text{ kg}$$

$$W = m \times g$$

$$W = 35.506,378 \times 9,81$$

$$W = 348.377,963 \text{ N}$$

$$W = 348,378 \text{ kN}$$

Dengan demikian, berat *Rampdoor Redesign* yang digunakan dalam perhitungan sistem penggerak adalah sebesar 348,378 kN.

b. Momen *Rampdoor*

Berdasarkan hasil perhitungan pembebanan *Rampdoor Redesign*, momen maksimum yang digunakan dalam perhitungan adalah:

$$M = 460,71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

c. Penentuan Gaya Tarik *Wire Rope*

Gaya tarik *wire rope* ditentukan berdasarkan hubungan antara momen dan lengan kerja sistem penggerak dengan persamaan:

$$T = \frac{M}{r}$$

Keterangan :

T = Gaya tarik *wire rope* (kN)

M = Momen maksimum *Rampdoor* (kN.m)

r = Lengan kerja / jarak sistem penggerak (m)

$$r = 1,45 \text{ m}$$

$$T = \frac{460,71}{1,45}$$

$$T = 317,73 \text{ kN}$$

d. Spesifikasi *Wire Rope*

Berdasarkan gambar konstruksi sistem pengaman stern door, spesifikasi *wire rope* yang digunakan adalah:

$$d = 40 \text{ mm}$$

$$6 \times WS(36) IW RC$$

dan menggunakan lapisan galvanis

Wire rope dengan spesifikasi tersebut dipertahankan pada desain *Redesign* karena diameter *wire rope Existing* tidak mengalami perubahan. Pemeriksaan dilakukan untuk mengetahui apakah *wire rope*

tersebut masih mampu menahan gaya tarik yang bekerja setelah perubahan massa *Rampdoor* akibat proses *Redesign*.

e. Perhitungan Faktor Keamanan *Wire Rope*

Faktor keamanan *wire rope* dihitung berdasarkan perbandingan antara *minimum breaking Force* (MBF) dengan gaya tarik yang bekerja pada *wire rope*:

$$SF = \frac{F_{mbf}}{T}$$

Keterangan :

SF = Faktor keamanan (Safety Factor)

F_{mbf} = Kekuatan putus minimum *wire rope* (kN)

T = Gaya Tarik yang bekerja pada *wire rope* (kN)

Berdasarkan spesifikasi *wire rope* 6×WS(36) IWRC dengan diameter 40 mm, nilai *Minimum Breaking Force* (MBF) harus diambil dari katalog atau sertifikat *wire rope* yang digunakan.

$$F_{mbf} = 1.800 \text{ kN}$$

$$SF = \frac{1.200}{317,73}$$

$$SF = 3,40$$

f. Kesimpulan Perhitungan *Wire Rope*

Berdasarkan hasil perhitungan, gaya tarik yang bekerja pada *wire rope* pada kondisi *Rampdoor Redesign* adalah sebesar:

$$T = 317,73 \text{ kN}$$

Dengan menggunakan *wire rope* berdiameter 40 mm dengan konstruksi 6×WS(36) IWRC dan nilai *minimum breaking Force* sebesar 1.200 kN, diperoleh faktor keamanan sebesar:

$$SF = 3,40$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa *wire rope* Ø40 mm memiliki kapasitas yang lebih besar dibandingkan gaya tarik yang bekerja pada kondisi desain yang dianalisis. Oleh karena itu, *wire rope* Ø40 mm dapat dipertahankan pada desain *Rampdoor Redesign* berdasarkan hasil pemeriksaan kapasitas terhadap gaya tarik yang dihitung.

Spesifikasi *wire rope* yang digunakan dalam perhitungan mengacu pada katalog Tokyo Rope untuk konstruksi 6×WS(36) IWRC sesuai standar JIS. Katalog yang digunakan sebagai acuan perhitungan disajikan pada Lampiran 2.

4.10 Perhitungan Pin

Perhitungan pin engsel dilakukan untuk mengetahui kemampuan pin dalam menahan gaya geser yang bekerja pada sambungan antara *Stern Ramp Door* dan struktur buritan kapal. Berdasarkan gambar konstruksi, pin engsel memiliki diameter sebesar 125 mm dan bekerja pada kondisi *double shear*, sehingga tegangan geser dihitung berdasarkan luas penampang efektif sebesar dua kali luas penampang pin (Budynas & Nisbett, 2020).

Diameter pin :

$$d = 125 \text{ mm}$$

Gaya yang bekerja :

$$F = 317,73 \times 10^3 N$$

- Luas Penampang Pin :

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi(125)^2}{4} = 12271.85 \text{ mm}^2$$

Keterangan :

A = Luas penampang pin (mm^2)

π = Konstanta (3,14159)

d = Diameter pin (mm)

- Tegangan Geser Pin :

$$\tau = \frac{F}{2A}$$

$$\tau = \frac{317730}{2(12271.85)}$$

$$\tau = 12.95 \text{ Mpa}$$

Keterangan :

τ = Tegangan geser yang terjadi pada pin (Mpa atau N/mm²)

F = Gaya yang bekerja pada pin (N)

A = Luas Penampang tunggal pin(mm²)

2 = Faktor untuk kondisi geser ganda (double shear)

- Faktor keamanan pin

Material pin diasumsikan menggunakan ASTM A36 dengan tegangan luluh sebesar

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

Untuk material ulet (ductile material), tegangan geser luluh dihitung menggunakan Teori Distortion Energy (Von Mises) yang dinyatakan sebagai

$$\tau_y = \frac{250}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_y = 144.34 \text{ Mpa}$$

Selanjutnya faktor keamanan pin dihitung dengan membandingkan tegangan geser luluh terhadap tegangan geser yang terjadi.

$$SF = \frac{\tau_y}{\tau}$$

$$SF = \frac{144.34}{12.95}$$

$$SF = 11.15$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh tegangan geser pada pin engsel sebesar 12,95 MPa. Nilai tersebut jauh lebih kecil dibandingkan tegangan geser luluh material ASTM A36 sebesar 144,34 MPa. Faktor keamanan pin yang diperoleh sebesar 11,15, sehingga pin engsel dinyatakan aman dalam menahan beban kerja yang diterima pada kondisi pembebanan yang dianalisis.

4.11 Analisis FEM *Rampdoor* Eksisting

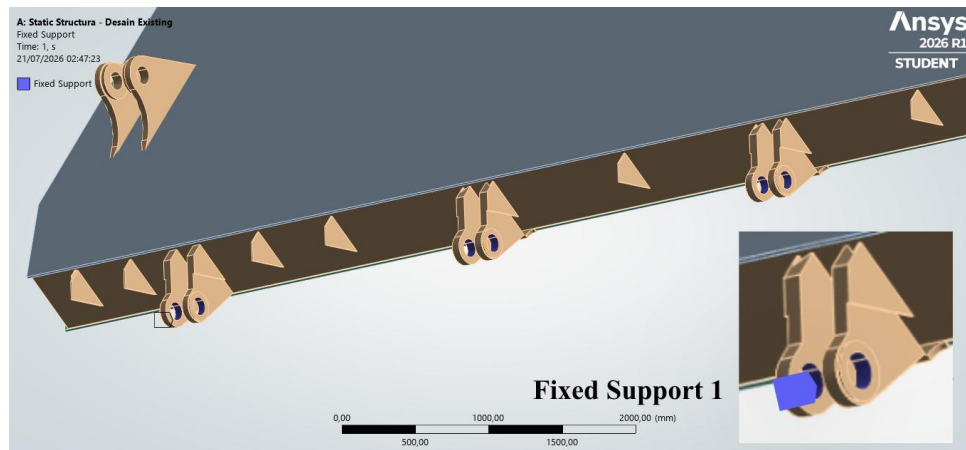
Analisis *Finite Element Method (FEM)* pada *Stern Ramp Door Existing* dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Workbench* 2025 R1 Student dengan jenis analisis *Static Structural*. Simulasi dilakukan menggunakan material ASTM A36 yang memiliki tegangan luluh sebesar 250 MPa. Pembebanan diberikan sesuai dengan hasil perhitungan manual, yaitu beban kendaraan *Dump Truck* sebesar 28 ton yang didistribusikan pada tiga titik pembebanan sesuai posisi roda kendaraan. Kondisi batas (*boundary condition*) diterapkan pada daerah engsel (*hinge*) dan tumpuan *Stern Ramp Door* sehingga menyerupai kondisi aktual saat proses bongkar muat.

Model struktur selanjutnya dilakukan proses *meshing* menggunakan elemen tetrahedral untuk memperoleh hasil analisis yang lebih akurat. Setelah seluruh parameter simulasi ditentukan, proses *solving* dilakukan sehingga diperoleh hasil berupa *Equivalent Stress (Von Mises)*, *Total Deformation*, dan *Safety Factor* sebagai parameter evaluasi kekuatan struktur.

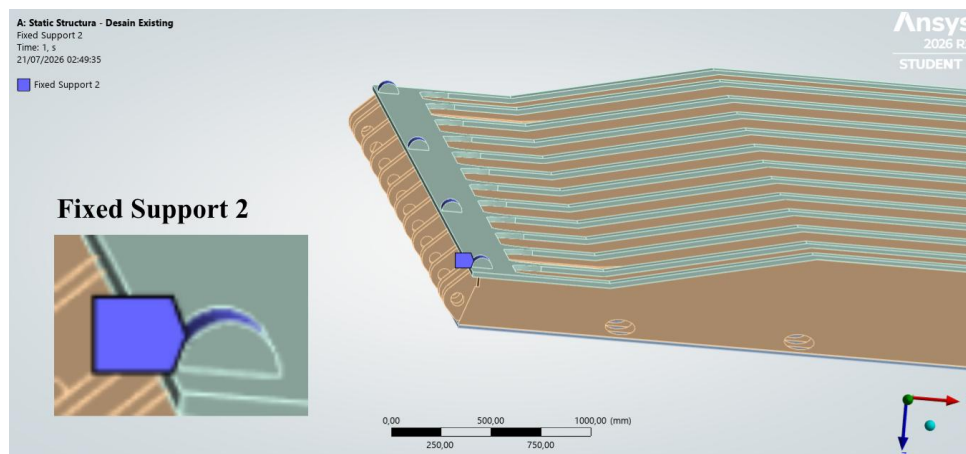
4.11.1. *Boundary Condition*

Boundary condition merupakan kondisi batas yang diberikan pada model elemen hingga untuk merepresentasikan kondisi aktual *Stern Ramp Door* selama menerima pembebanan. Penentuan *boundary condition* bertujuan agar perilaku model mendekati kondisi struktur yang sebenarnya.

Pada penelitian ini, Fixed Support 1 diterapkan pada daerah engsel (*hinge*) karena bagian tersebut terhubung dengan struktur buritan kapal sehingga dianggap tidak mengalami perpindahan selama proses analisis. Selain itu, Fixed Support 2 diterapkan pada bagian ujung bawah *Stern Ramp Door* untuk merepresentasikan tumpuan rol yang berfungsi sebagai penyangga sekaligus memungkinkan pergerakan sesuai mekanisme kerja *Ramp Door*. Dengan penerapan kedua kondisi batas tersebut, model elemen hingga diharapkan mampu menggambarkan kondisi operasional *Stern Ramp Door* secara lebih realistis.



Gambar 4. 6 *Fixed Support 1*



Gambar 4. 7 *Fixed Support 2*

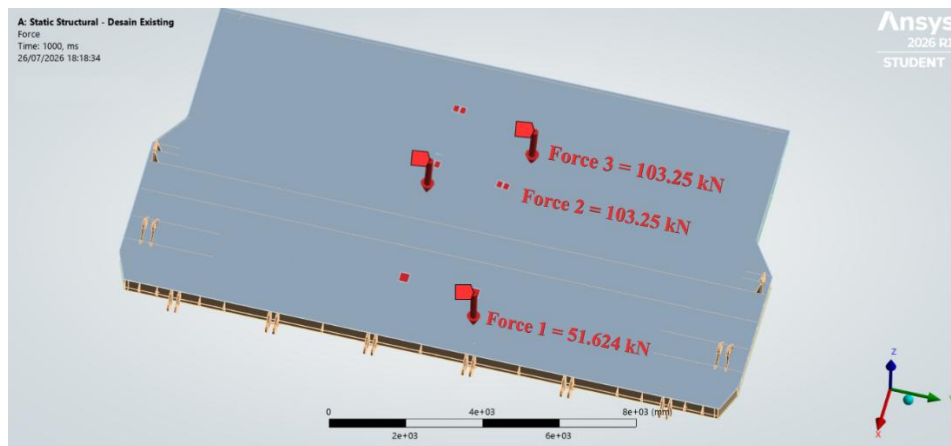
4.11.2. Peletakan Beban (*Force*)

Pembebanan pada simulasi diberikan berdasarkan hasil perhitungan manual yang telah dilakukan pada tahap penentuan kondisi pembebanan. Beban kendaraan kemudian dikonversi ke dalam satuan Newton dan diterapkan pada area kontak roda terhadap *Stern Ramp Door* sesuai dengan posisi kendaraan.

Pada penelitian ini, pembebanan dibagi menjadi tiga kelompok gaya, yaitu beban roda depan, beban roda tengah, dan beban roda belakang. Pembagian tersebut disesuaikan dengan konfigurasi sumbu (*axle*) kendaraan sehingga distribusi beban yang diterapkan pada model mendekati kondisi aktual saat kendaraan melintasi *Stern Ramp Door*. Setiap gaya diberikan

pada area kontak roda dengan arah vertikal ke bawah (*downward Force*) untuk merepresentasikan beban statis kendaraan yang bekerja pada struktur.

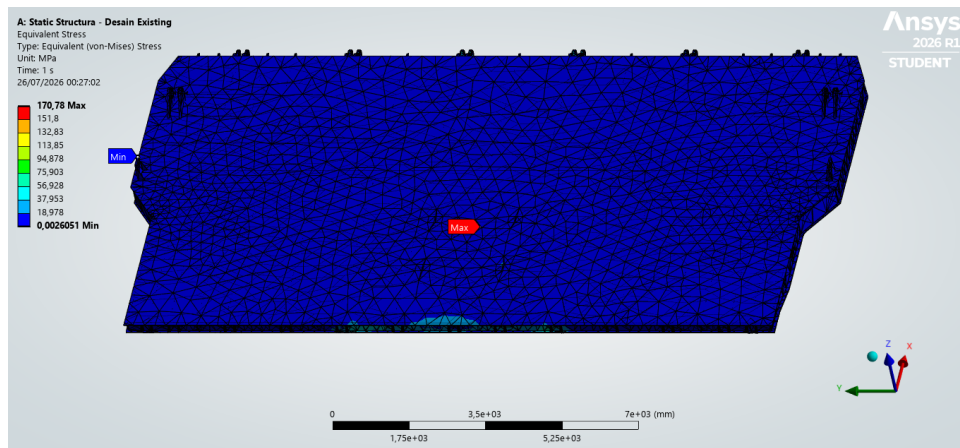
Penerapan pembebanan ini bertujuan agar distribusi tegangan dan deformasi yang dihasilkan dari analisis elemen hingga dapat menggambarkan perilaku struktur *Stern Ramp Door* secara lebih realistis sesuai dengan kondisi operasionalnya.



Gambar 4. 8 Input Force

4.11.3. Hasil Tegangan

Analisis *Equivalent Stress (Von Mises)* dilakukan untuk mengetahui tegangan ekuivalen maksimum yang terjadi pada struktur *Stern Ramp Door Existing* akibat pembebanan kendaraan. Hasil simulasi menggunakan ANSYS *Workbench* menunjukkan bahwa nilai *Equivalent Stress* maksimum sebesar 170,78 MPa. Nilai tegangan tersebut berada pada daerah yang mengalami konsentrasi tegangan akibat pembebanan roda kendaraan dan perubahan geometri pada sambungan struktur.



Gambar 4. 9 Hasil Ekuivalen Eksisting

$$\sigma_{Vmax} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \frac{150}{k}$$

$$\sigma_{Vmax} \leq \frac{150}{0,94}$$

$$\sigma_{Vmax} \leq 159,58 \text{ N/mm}^2$$

$$170,78 \text{ N/mm}^2 > 159,58 \text{ N/mm}^2$$

Maka nilai *Equivalent Stress* hasil simulasi telah melampaui batas tegangan yang diizinkan, sehingga struktur *Stern Ramp Door Existing* belum memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan aturan BKI. Oleh karena itu, diperlukan proses *Redesign* untuk menurunkan konsentrasi tegangan sehingga struktur memiliki tingkat keamanan yang lebih baik.

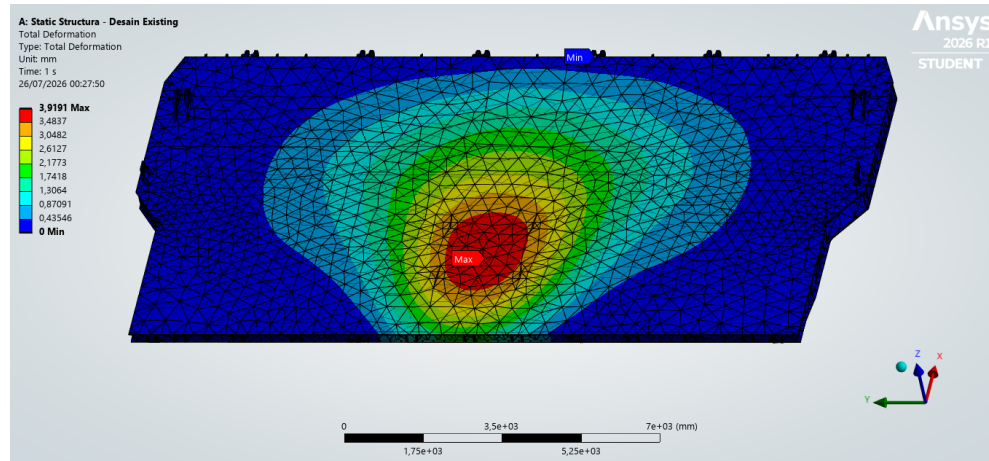
Tabel 4. 11 Hasil Perbandingan Equivalent Stress *Ramp Door Existing*

Parameter	Perhitungan Manual	Hasil Analisis	Batas Tegangan	Keterangan
<i>Equivalent Stress</i> (N/mm ²)	174,44 MPa	170,78 MPa	159,58	Tidak Memenuhi

4.11.4. Hasil Deformasi

Analisis deformasi dilakukan untuk mengetahui besarnya lendutan maksimum yang terjadi pada *Stern Ramp Door* akibat pembebanan kendaraan. Berdasarkan hasil simulasi *Finite Element Method (FEM)*, diperoleh nilai Total Deformasi maksimum sebesar 3,9191 mm. Deformasi terbesar terjadi pada bagian tengah *stern Ramp Door*, yaitu daerah yang

menerima pembebanan paling besar. Nilai deformasi tersebut kemudian dibandingkan dengan batas deformasi yang diizinkan berdasarkan panjang bentang struktur.



Gambar 4. 10 Hasil Deformasi

$$\delta_{izin} = \frac{L}{200}$$

$$\delta_{izin} = \frac{9300}{200}$$

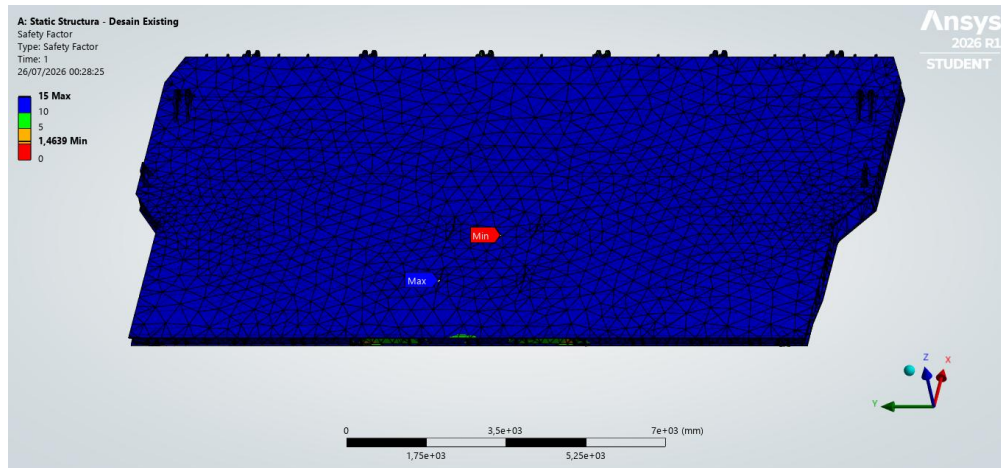
$$\delta_{izin} = 46,5 \text{ mm}$$

$$3,9191 \text{ mm} < 46,5 \text{ mm}$$

Maka deformasi maksimum hasil simulasi masih berada di bawah batas deformasi yang diizinkan, sehingga struktur masih memenuhi persyaratan kekakuan dan tidak mengalami lendutan yang berlebihan.

4.11.5. Hasil *Safety Factor*

Analisis *Safety Factor* dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan struktur terhadap beban kerja yang diberikan. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan ANSYS *Workbench*, diperoleh nilai *Safety Factor* minimum sebesar 1,4639. Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan manual untuk mengetahui tingkat kesesuaian kedua metode analisis.



Gambar 4. 11 Hasil *Safety Factor*

$$SF = \frac{\sigma_{allow}}{\sigma_{actual}}$$

$$SF = \frac{250}{170,78}$$

$$SF = 1,4639$$

$$SF = \text{Safety Factor} \geq 1,25$$

4.11.6. Hasil Analisis *Ramp Door Existing*

Berdasarkan hasil analisis *Finite Element Method (FEM)* yang tertera pada tabel, evaluasi kinerja struktur *Ramp Door* eksisting menunjukkan adanya kondisi tegangan yang tidak aman dan memerlukan perbaikan. Pada desain eksisting, nilai tegangan maksimum tercatat mencapai 170,78 MPa, di mana angka tersebut telah secara signifikan melampaui batas izin yang direkomendasikan, yaitu sebesar 159,58 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur saat ini rentan mengalami kegagalan material atau kerusakan saat menahan beban kerja. Meskipun demikian, untuk parameter deformasi, struktur eksisting tergolong sangat aman karena nilai lendutan maksimumnya hanya sebesar 3,9191 mm, berada jauh di bawah batas maksimal yang ditetapkan yaitu 46,5 mm. Sementara itu, nilai *Safety Factor* untuk desain eksisting tercatat di angka 1,4639 yang secara teknis masih memenuhi persyaratan minimum karena berada tepat di atas ambang batas kelayakan ($>1,25$). Secara keseluruhan, desain eksisting ini dinilai belum memenuhi untuk dipertahankan akibat adanya tegangan berlebih yang

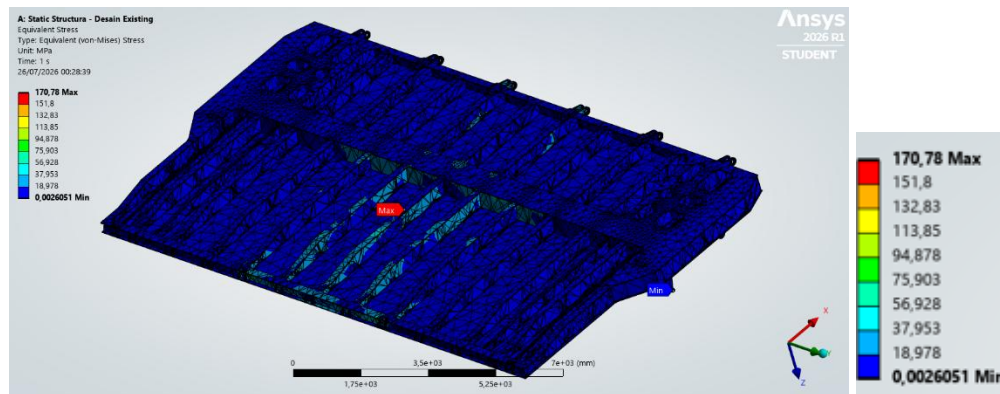
melampaui batas material izin, sehingga hal tersebut dijadikan landasan utama perlunya dilakukan modifikasi atau perancangan ulang (*Redesign*) demi mencapai tingkat keamanan operasional yang optimal.

4.12 Penerapan Metode SCAMPER

Metode SCAMPER diterapkan sebagai pendekatan sistematis dalam proses *Redesign* struktur *Stern Ramp Door* KRI Makassar-590. Penerapan metode ini diawali dengan mengidentifikasi kelemahan struktur *Existing* berdasarkan hasil analisis *Finite Element Method (FEM)*. Selanjutnya dilakukan penentuan komponen yang menjadi prioritas perbaikan, kemudian dikembangkan alternatif desain menggunakan elemen SCAMPER yang sesuai. Alternatif desain tersebut dievaluasi melalui pemodelan ulang sebelum divalidasi menggunakan perhitungan analitis dan simulasi FEM. Tahapan ini bertujuan menghasilkan desain yang mampu meningkatkan kekuatan struktur tanpa mengubah fungsi utama *Stern Ramp Door*.

4.12.1 Identifikasi Permasalahan Struktur *Existing*

Tahap identifikasi dilakukan berdasarkan hasil simulasi FEM pada model *Existing*. Analisis menunjukkan bahwa distribusi tegangan terbesar berada pada bagian longitudinal dan pelat bawah *Stern Ramp Door* yang menerima pembebanan kendaraan secara langsung. Nilai *Equivalent Stress* maksimum sebesar 170,78 MPa melebihi batas tegangan yang diisinkan berdasarkan Rules BKI, yaitu sebesar 159,59 Mpa.



Gambar 4. 12 Tampak Bawah Tegangan Maksimal

4.12.2 Penentuan Komponen yang diperbaiki

Berdasarkan hasil identifikasi, dipilih beberapa komponen yang mengalami konsentrasi tegangan tertinggi sebagai fokus pengembangan desain. Komponen tersebut meliputi longitudinal dan pelat bagian bawah (bottom plate). Pemilihan komponen tersebut didasarkan pada perannya sebagai jalur utama distribusi beban kendaraan menuju struktur utama *Stern Ramp Door* sehingga diharapkan mampu meningkatkan kekuatan struktur secara keseluruhan.

4.12.3 Pengembangan Ide Menggunakan Metode SCAMPER

Berdasarkan hasil identifikasi, dilakukan pengembangan alternatif desain menggunakan metode SCAMPER. Dari tujuh elemen SCAMPER, penelitian ini menerapkan dua elemen yang paling sesuai, yaitu *Modify* dan *Combine*. Pemilihan kedua elemen tersebut didasarkan pada hasil analisis FEM yang menunjukkan bahwa permasalahan utama struktur *Existing* terletak pada tingginya konsentrasi tegangan serta distribusi beban yang belum merata pada beberapa bagian *stern Ramp Door*.

Elemen *Modify* dipilih karena hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas struktur *Existing* belum mampu menahan pembebanan kendaraan secara optimal. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi dimensi melalui penambahan ketebalan *top plate* dan *bottom plate* pada area yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi. Perubahan dimensi ini bertujuan untuk meningkatkan kekakuan struktur, memperbesar momen inersia penampang, serta mengurangi tegangan dan deformasi yang terjadi akibat pembebanan.

Sementara itu, elemen *Combine* dipilih karena peningkatan kekuatan struktur tidak cukup hanya dilakukan melalui perubahan dimensi pelat. Berdasarkan hasil identifikasi, distribusi beban kendaraan masih terpusat pada beberapa elemen struktur sehingga diperlukan penambahan jalur distribusi beban. Oleh karena itu, dilakukan penambahan 8 longitudinal yang bekerja bersama struktur *Existing* sebagai elemen penguat. Penambahan longitudinal ini bertujuan untuk mendistribusikan beban kendaraan secara lebih merata, mengurangi konsentrasi tegangan pada area kritis, serta meningkatkan faktor keamanan struktur.

Dengan demikian, penerapan elemen *Modify* dan *Combine* dinilai paling sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu meningkatkan kekuatan struktur *Stern Ramp Door* tanpa mengubah fungsi utama, sistem operasi, maupun material dasar yang digunakan pada konstruksi *Existing*.

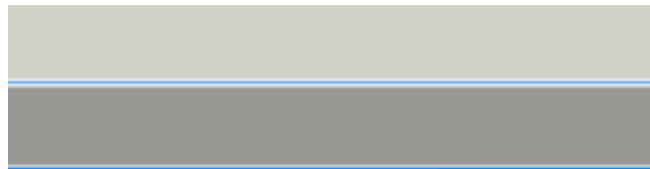
Tabel 4. 12 Elemen SCAMPER

Elemen	Implementasi
<i>Modify</i>	Menambahkan ketebalan plat <i>top plate</i> dan <i>bottom plate</i>
<i>Combine</i>	Menambahkan 8 longitudinal sebagai struktur penguat.



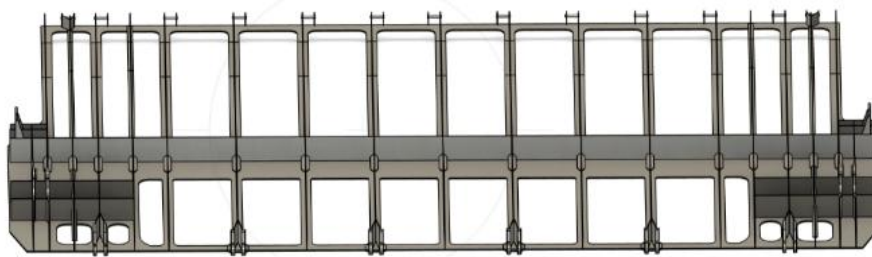
2 Edges | Min Distance : 10.00 mm

Gambar 4. 13 Sebelum Penambahan Ketebalan Plat

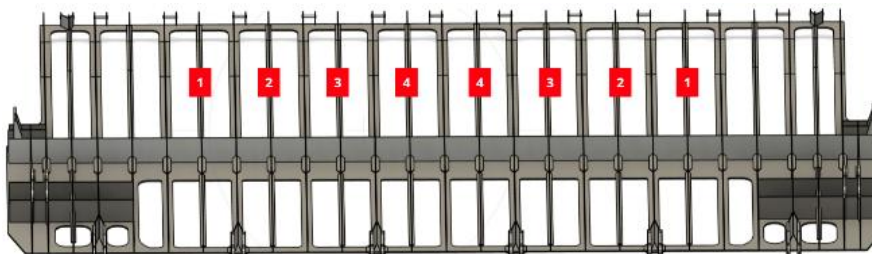


2 Edges | Min Distance : 14.00 mm

Gambar 4. 14 Sesudah Penambahan Ketebalan Plat



Gambar 4. 15 Sebelum Penambahan Longitudinal

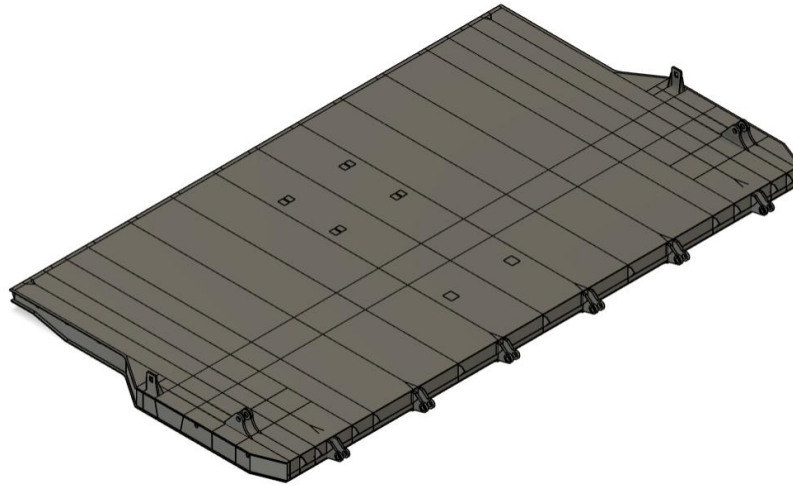


Gambar 4. 16 Sesudah Penambahan Longitudinal

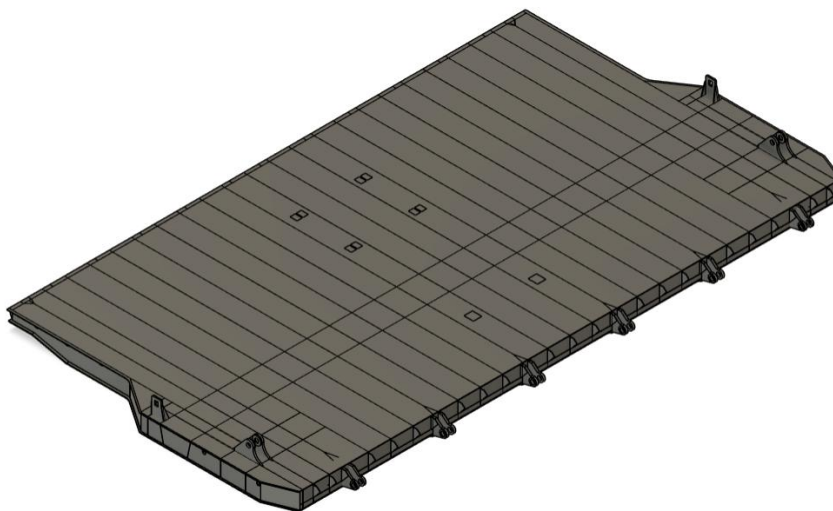
4.12.4 Evaluasi Alternatif Desain

Alternatif desain hasil penerapan metode SCAMPER kemudian dimodelkan kembali menggunakan *Autodesk Fusion 360*. Pada tahap ini dilakukan evaluasi untuk memastikan bahwa perubahan struktur tetap mempertahankan fungsi utama *stern Ramp Door*, tidak mengganggu sistem operasi, dan masih sesuai dengan dimensi utama konstruksi *Existing*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa

penambahan penguat dan perubahan ketebalan pelat dapat diterapkan tanpa mengubah mekanisme kerja *Ramp Door*.



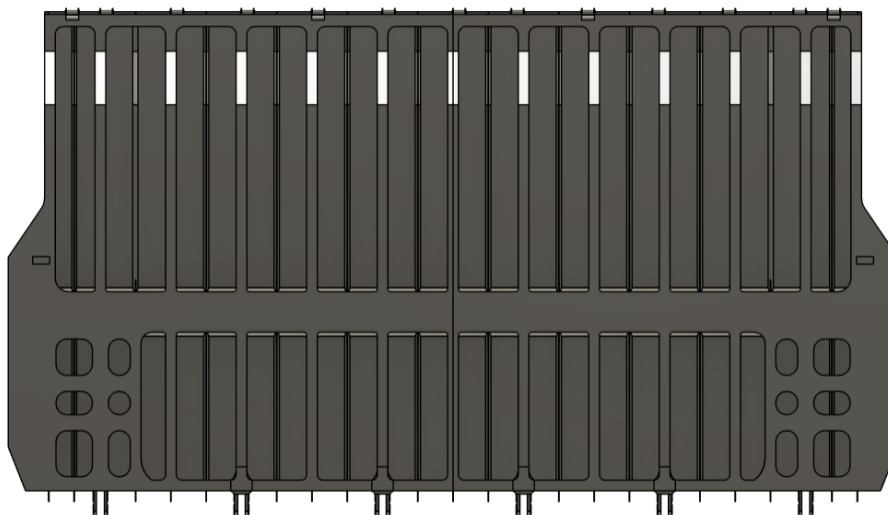
Gambar 4. 17 *Isometric View Rampdoor Existing*



Gambar 4. 18 *Isometric View Rampdoor Redesign*



Gambar 4. 19 *Bottom plate Rampdoor Existing*

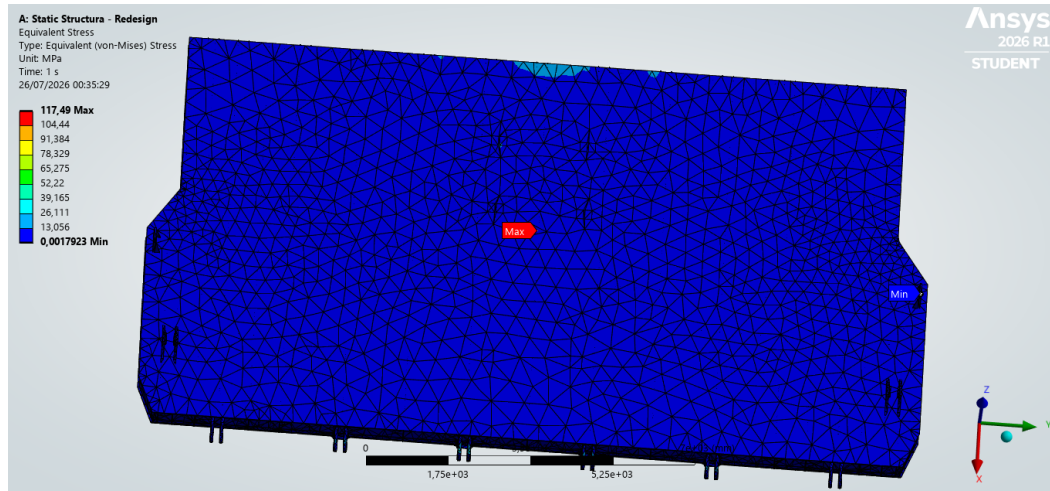


Gambar 4. 20 *Bottom plate Rampdoor Redesign*

4.12.5 Validasi Hasil *Redesign*

Validasi dilakukan melalui perhitungan analitis dan simulasi *Finite Element Method (FEM)*. Parameter yang dibandingkan meliputi *Equivalent Stress*, *Total Deformation*, dan *Safety Factor* antara model *Existing* dan *Redesign*. Hasil validasi menunjukkan bahwa *Redesign* mampu menurunkan tegangan ekuivalen dari 170,78 MPa menjadi 117,49 MPa, sehingga telah memenuhi batas tegangan yang diizinkan berdasarkan Rules BKI. Selain itu, nilai *Total Deformation* menurun dari 3,9191 mm menjadi 2,6963 mm, sedangkan nilai *Safety Factor* meningkat dari 1,4639 menjadi 2,1278. Penerapan metode SCAMPER berhasil meningkatkan kekuatan struktur *Stern Ramp Door* sehingga memenuhi persyaratan material ASTM A36 dan standar BKI.

- Hasil Tegangan *Rampdoor Redesign*



Gambar 4. 21 Hasil Tegangan *Redesign*

$$\sigma_{V\max} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \frac{150}{k}$$

$$\sigma_{V\max} \leq \frac{150}{0,94}$$

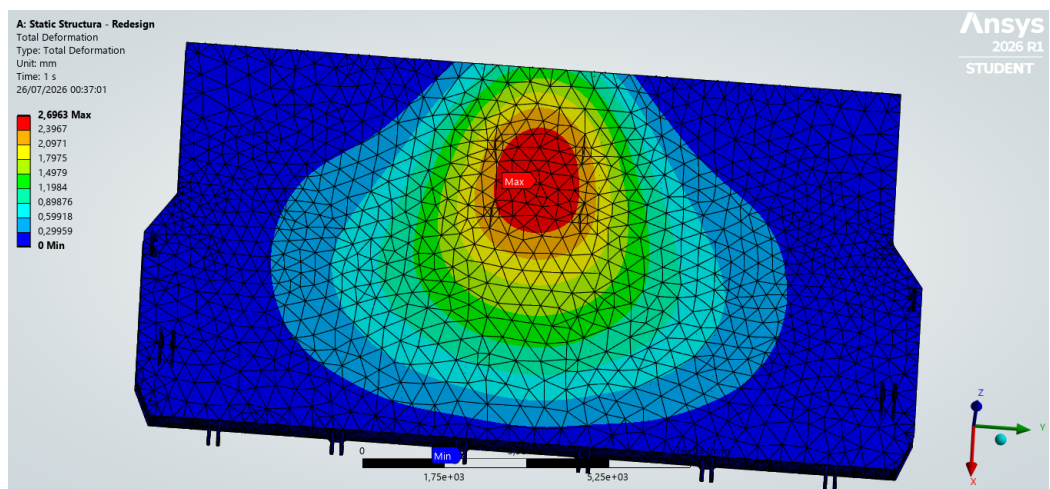
$$\sigma_{V\max} \leq 159,58 \text{ N/mm}^2$$

$$117,49 \text{ N/mm}^2 < 159,58 \text{ N/mm}^2$$

Tabel 4. 13 Hasil Perbandingan *Equivalent Stress Ramp Door Redesign*

Parameter	Perhitungan Manual	Hasil Analisis	Batas Tegangan	Keterangan
<i>Equivalent Stress</i> (N/mm ²)	121,19 MPa	117,49 MPa	159,58	Memenuhi

- Hasil Deformasi *Rampdoor Redesign*



Gambar 4. 22 Hasil Deformasi *Redesign*

$$\delta_{izin} = \frac{L}{200}$$

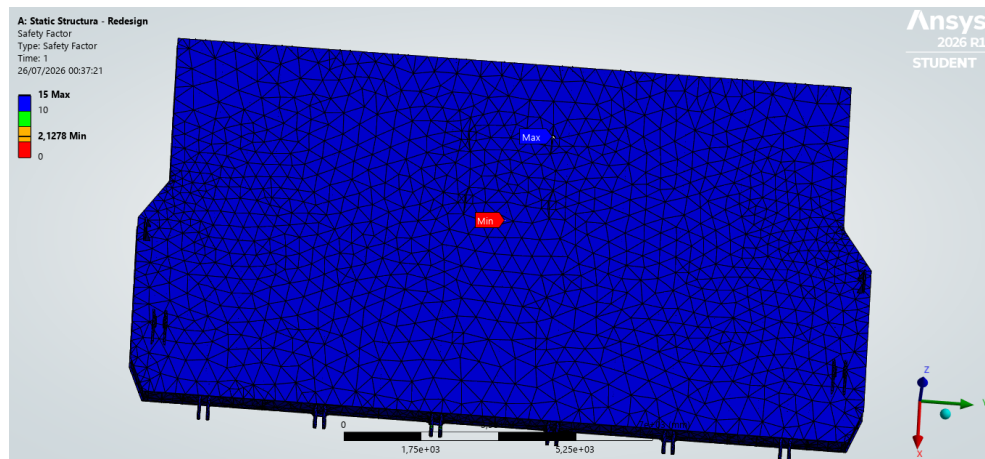
$$\delta_{izin} = \frac{9300}{200}$$

$$\delta_{izin} = 46,5 \text{ mm}$$

$$2,6963 \text{ mm} < 46,5 \text{ mm}$$

Deformasi maksimum hasil simulasi masih berada di bawah batas deformasi yang diizinkan, sehingga struktur masih memenuhi persyaratan kekakuan dan tidak mengalami lendutan yang berlebihan.

- Hasil *Safety Factor Rampdoor Redesign*



Gambar 4. 23 Hasil *Safety Factor Redesign*

$$SF = \frac{\sigma_{allow}}{\sigma_{actual}}$$

$$SF = \frac{250}{117,49}$$

$$SF = 2,1278$$

$$SF = \text{Safety Factor} \geq 1,25$$

4.12.6 Perbandingan *Existing* dan *Redesign*

Perbandingan antara desain eksisting dan *Redesign* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh modifikasi yang diterapkan melalui metode SCAMPER terhadap kinerja struktur *Rampdoor*. Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter berat struktur, tegangan maksimum, deformasi maksimum, dan *Safety Factor* yang diperoleh dari hasil analisis FEM.

Tabel 4. 14 Perbandingan Hasil *Existing* dan *Redesign*

Parameter	Batas Izin	<i>Existing</i>	<i>Redesign</i>	Perubahan
Tegangan	159,58 MPa	170,78 MPa	117,49 MPa	↓ 53,29 MPa (31,22%)
Deformasi	46,5 mm	3,9191 mm	2,6963 mm	↓ 1,2228 mm (31,22%)
<i>Safety factor</i>	>1,25	1,4639	2,1278	↑ 0,6639 (45,38%)

Berdasarkan Tabel 4.12, penerapan metode SCAMPER memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja struktur stern *Ramp Door*. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *Equivalent Stress* mengalami penurunan dari 170,78 MPa pada desain *Existing* menjadi 117,49 MPa pada desain *Redesign*, atau berkurang sebesar 53,29 MPa (31,22%). Nilai tersebut telah berada di bawah batas tegangan yang diizinkan berdasarkan Rules BKI, yaitu 159,58 MPa, sehingga desain hasil *Redesign* memenuhi persyaratan kekuatan struktur.

Selain itu, nilai *Total Deformation* juga mengalami penurunan dari 3,9191 mm menjadi 2,6963 mm, atau berkurang sebesar 1,2228 mm (31,22%). Meskipun nilai deformasi pada kedua model masih berada di bawah batas deformasi yang diizinkan sebesar 46,50 mm, hasil *Redesign* menunjukkan struktur yang lebih kaku sehingga lendutan akibat pembebanan menjadi lebih kecil.

Peningkatan kinerja struktur juga ditunjukkan oleh nilai *Safety Factor* yang meningkat dari 1,4639 pada desain *Existing* menjadi 2,1278 pada desain *Redesign*, atau meningkat sebesar 0,6639 (45,38%). Nilai tersebut menunjukkan bahwa modifikasi struktur melalui penambahan ketebalan plat atas dan plat bawah dan atas dari 10 mm menjadi 14 mm, serta penambahan 8 buah longitudinal, berhasil meningkatkan kemampuan struktur dalam mendistribusikan beban dan mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah kritis.

Secara keseluruhan, penerapan metode SCAMPER terbukti mampu menghasilkan desain *Stern Ramp Door* yang lebih optimal dibandingkan desain *Existing*. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan nilai tegangan dan deformasi, serta peningkatan Safety Factor, sehingga struktur hasil *Redesign* memiliki tingkat keamanan dan kekakuan yang lebih baik serta memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan Rules BKI.

”Halaman Sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan manual, analisis menggunakan *Finite Element Method (FEM)*, serta penerapan metode SCAMPER pada proses *Redesign Stern Ramp Door* kapal LPD KRI Makassar-590, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil analisis pada desain *Stern Ramp Door Existing* menunjukkan bahwa nilai *Equivalent Stress* maksimum sebesar 170,78 MPa, sehingga melebihi batas tegangan yang diizinkan berdasarkan Rules BKI, yaitu sebesar 159,58 MPa. Sementara itu, nilai *Total Deformation* sebesar 3,9191 mm masih berada di bawah batas deformasi yang diizinkan sebesar 46,50 mm, serta nilai *Safety Factor* sebesar 1,4639 masih memenuhi kriteria keamanan karena lebih besar dari 1,25. Namun demikian, tingginya nilai tegangan menunjukkan bahwa struktur *Existing* masih memerlukan pengembangan desain.
2. Penerapan metode SCAMPER dilakukan melalui tahapan *Modify* dan *Combine*. Pada tahap *Modify*, dilakukan penambahan ketebalan plat atas dan plat bawah dari 10 mm menjadi 14 mm. Selanjutnya, pada tahap *Combine*, dilakukan penambahan 8 buah longitudinal pada daerah yang menerima pembebanan terbesar. Modifikasi tersebut bertujuan untuk meningkatkan kekakuan struktur, memperbesar momen inersia penampang, serta memperbaiki distribusi pembebanan sehingga konsentrasi tegangan dapat dikurangi.
3. Hasil analisis *Finite Element Method (FEM)* pada desain *Redesign* menunjukkan peningkatan kinerja struktur dibandingkan desain *Existing*. Nilai *Equivalent Stress* menurun dari 170,78 MPa menjadi 117,49 MPa, atau mengalami penurunan sebesar 53,29 MPa (53,29%), sehingga telah memenuhi batas tegangan yang diizinkan berdasarkan Rules BKI. Selain itu, nilai *Total Deformation* menurun dari 3,9191 mm menjadi 2,6963 mm,

atau berkurang sebesar 1,2228 mm (31,22%), sedangkan nilai *Safety Factor* meningkat dari 1,4639 menjadi 2,1278, atau meningkat sebesar 45,38%.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan optimasi desain menggunakan variasi dimensi pelat, jumlah maupun konfigurasi longitudinal dan stiffener, sehingga diperoleh desain yang lebih ringan namun tetap memenuhi persyaratan kekuatan struktur.
2. Analisis struktur dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan beban dinamis, seperti pengaruh gerakan kapal (*heave*, *pitch*, dan *roll*), pembebanan berulang (*fatigue loading*), serta beban akibat kondisi gelombang agar hasil analisis lebih mendekati kondisi operasional sebenarnya.
3. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi eksperimental atau pengujian langsung terhadap model maupun prototipe *Stern Ramp Door* sehingga hasil simulasi *Finite Element Method (FEM)* dapat dibandingkan dengan kondisi aktual.
4. Pengembangan berikutnya dapat mempertimbangkan penggunaan material alternatif atau kombinasi material yang memiliki rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) lebih tinggi untuk meningkatkan efisiensi struktur tanpa mengurangi tingkat keamanan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, A., A. B. Mapangandro, Amalia Ika W, & M U Pawara. (2023). Fatigue Life Analysis of *Ramp Door* Ferry Ro-Ro Gt 1500 Using Finite Element Method. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, **15(1)**, 42–49.
<https://doi.org/10.29122/mipi.v15i1.4744>
- Alamsyah, A., Nurcholik, S. D., Suardi, S., Pawarah, M. U., & Jumalia, J. (2021). The Strength and Fatigue Life analysis of Sedan Car Ramp of The Ferry Ro-Ro 5000 GT Using Finite Element Method. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Kelautan*, **18(2)**, 101–110.
<https://doi.org/10.14710/kapal.v18i2.37518>
- Alamsyah, A., Wulandari, A. I., Pawara, M. U., & Al-Hafidz, M. Y. (2022). Analisis kekuatan struktur *Ramp Door* haluan pada kapal ferry Ro-Ro 1500 GT dengan variasi beban menggunakan Finite Element Method. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, **11(2)**, 248–259.
<https://doi.org/10.24127/trb.v11i2.2161>
- Beer, F. P., Johnston, E. R., Mazurek, D. F., Cornwell, P. J., & Self, B. (2015). *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics* (10th ed.). McGraw-Hill.
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2014). *Rules for the Classification and 2014 Edition Biro Klasifikasi Indonesia. II*.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Eberle, B. (1996). *SCAMPER: Games for Imagination Development*. Prufrock Press.
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2013). *Mechanics of Materials* (8th ed.). Cengage Learning.
- Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1997). *Mechanics of Materials*. PWS Publishing.
- Hafiyah, R. M. R., Hadi, S., & Wibowo, A. (2022). Redesain Meja Workshop Kayu untuk Praktik Mahasiswa Desain Produk Industri dengan Pendekatan SCAMPER. *Jurnal Desain Indonesia*, **4(2)**, 89–101.
<https://doi.org/10.52265/jdi.v4i2.116>
- Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering Mechanics: Statics* (14th ed.). Pearson.

- Logan, D. L. (2012). *A First Course in the Finite Element Method* (5th ed.). Cengage Learning.
- Logan, D. L. (2022). *A First Course in the Finite Element Method, Enhanced Edition* (6th ed.). Cengage Learning.
- Reddy, J. N. (2019). *Introduction to the Finite Element Method* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Rizki, M., Saputra, A., Ilham, M., Dermawan, N., Hazman, M. Al, Utomo, A. P., Nur, P., & Nugroho, A. (2025). *Analisis Kekuatan Struktur Rampdoor Kapal Ro-Ro 600 GT Menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM)*. **262–269**.
- Rules for Classification and Construction Part I Volume II: Rules for Hull*. (2017).
- Samudro, S. H., Yudo, H., & Zakki, A. F. (2019). Analisa kekuatan struktur stern *Ramp Door* pada kapal ferry Ro-Ro 1000 GT. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 7(4).
- TNI AL. (2006). *Spesifikasi Teknis dan Profil KRI Makassar-590*. Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut.
- Watson, D. G. M. (1998). *Practical Ship Design*. Elsevier.
- Yudo, H., Kiryanto, K., Adha, A. F., & Wibowo, R. (2023). Strength Analysis of LCT Lady Primus 39.5 m *Ramp Door* Structure Due to Changes in Tilt Angle Variations and Load Variations. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 8(2), 124–132.

LAMPIRAN

Lampiran 1. *Vehicle Loading Table*

VEHICLE LOAD										NOTE		O - - - - TO BE APPLIED AT NORMAL CONDITION ONLY ● - - - - TO BE APPLIED AT SEA GOING CONDITION X - - - - NOT TO BE APPLIED									
LOADING TABLE		MEDIUM TANK		ARMORED PERSONNEL CARRIER		MAIN BATTLE TANK		5 TON CARGO TRUCK (4x2)		8 TON CARGO TRUCK (6x4)		20 TON CARGO TRUCK (6x4)									
KIND OF VEHICLE	L	6540		6800		9540		7652		8150		10150									
	B	3660		2880		3540		2477		2490		2500									
	H	2310		2360		2620		3100		3150		3450									
GROSS WT (ton)		36.00		16.00		55.00		10.00		16.00		28.00									
CAR NO.		1		2		3		4		5		6									
AXLE LOAD (t)		 950 2050 950 3950		 1400 2000 1400 4800		 1200 2400 2400 1200 7200		 3000 1200 3000 4200		 3000 1200 3320 4200		 3000 1200 3320 4200									
WHEEL BASE (mm)		 950 2050 950 3950		 1400 2000 1400 4800		 1200 2400 2400 1200 7200		 3000 1200 3000 4200		 3000 1200 3320 4200		 3000 1200 3320 4200									
TIRE PRINT (mm)		 650 X 850		 480 X 700		 660 X 930		 2500 (lebar)		 2500 (lebar)		 2500 (lebar)									
EQUIPMENT		DECK STR. L. LOAD		ITEM		ITEM		ITEM		ITEM		ITEM									
POS. NO.		1		2		3		4		5		6									
1 STERN DOOR		○		○		●		○		●		○									
2 SIDE RAMP / DOOR		○		○		○		○		○		○									
3 RUN WAY		○		○		○		○		○		●									
4 VEHICLE LIFT		X		○		●		X		○		○									
REVISION		ALTERATION		DATE		SIGN		CLAS NUMBER		YARD HULL NO.		Description:									
REV.		A3		PAGE 1 OF 1		NONE		SEOHAE MARINE SYSTEM		DRAWN S.H.JEON		CHECKED S.T.LEE									
DWG. NO.		REV.		S.E.O-00-001		APPROVED S.T.LEE		LOADING TABLE		S.H.JEON		S.T.LEE									
CHANGED LOAD CONDITION OF STERN RAMP/DOOR		06.05.01		S.T.LEE		W.T : WATERTIGHT N.T : NON-TIGHT H.T : WEATHER TIGHT		CLAS NUMBER		YARD HULL NO.		Description:									
ALTERNATION		DATE		SIGN		W.T : WATERTIGHT N.T : NON-TIGHT H.T : WEATHER TIGHT		CLAS NUMBER		YARD HULL NO.		Description:									

“Halaman sengaja dikosongkan”

Lampiran 2. Katalog *Wire Rope*



IWRC 6 × WS (36) (JIS)

Construction 7 × 7 + 6 × WS [1 + 7 + (7 + 7) + 14]

Rope diameter mm	Outer wire diameter mm	Sectional area mm²	Breaking force		(Reference) Rough calculation Unit mass kg/m
			Ordinary lay • Lang's lay		
			Bright • Galvanized	Bright	
			Grade B	Grade T	
			kN	kN	
16	0.92	130	173	182	1.13
18	1.03	164	219	230	1.43
20	1.14	202	271	284	1.76
22.4	1.28	254	340	357	2.21
25	1.43	316	423	444	2.75
28	1.60	397	531	558	3.45
30	1.70	456	609	640	3.96
31.5	1.80	502	672	706	4.37
33.5	1.91	568	760	798	4.94
35.5	2.03	638	853	896	5.55
37.5	2.14	712	952	1000	6.19
40	2.27	810	1080	1140	7.04
42.5	2.40	914	1220	1280	7.95
45	2.58	1030	1370	1440	8.91
47.5	2.70	1140	1530	1600	9.93
50	2.86	1270	1690	1780	11.0
53	3.03	1420	1900	2000	12.4
56	3.20	1590	2120	2230	13.8
60	3.45	1820	2440	2560	15.8

(Remarks) 1. The figures shown in bold in this chart denote JIS values.

“Halaman sengaja dikosongkan”

Lampiran 3. *Detail Drawing*

“Halaman sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Nama : Nabilla Faizzatin Mardiyah

Tempat, Tanggal Lahir : Banyuwangi, 24 Januari 2004

Alamat : Desa Tegalharjo, Kec. Glenmore, Kab. Banyuwangi, Jawa Timur

Email : nabillafaizzatin@student.ppns.ac.id

Riwayat Pendidikan :

(2022 – 2026)	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
(2019 – 2022)	SMAN 1 Glenmore
(2016 – 2019)	SMPN 3 Glenmore
(2010 – 2016)	SDN 4 Tegalharjo

Pengalaman Organisasi :

Kepala Departemen Media dan Informasi Himpunan Mahasiswa Teknik Desain dan Manufaktur (2024-2025)

Pengalaman Magang :

Fasharkan Surabaya – Bengkel Mesin dan Bengkel Bangunan Kapal
(Agustus – Desember 2025)