



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (DC43340)

OPTIMALISASI JENIS *DOUBLE BOLLARD* PADA *HARBOUR TUG* BERDASARKAN VARIASI SUDUT PEMBEBANAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

ANA ANGELLINA
NRP. 0122040060

DOSEN PEMBIMBING :
TRI TIYASMIHADI, S.T., M.T.
Dr. KIKI DWI WULANDARI, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PERANCANGAN DAN KONSTRUKSI KAPAL
JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (DC43340)

OPTIMALISASI JENIS *DOUBLE BOLLARD* PADA *HARBOUR TUG* BERDASARKAN VARIASI SUDUT PEMBEBANAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

ANA ANGELLINA
NRP. 0122040060

DOSEN PEMBIMBING:
TRI TIYASMIHADI, S.T., M.T
Dr. KIKI DWI WULANDARI, S.T., M.T

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PERANCANGAN DAN KONSTRUKSI KAPAL
TEKNIK BANGUNAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**OPTIMALISASI JENIS *DOUBLE BOLLARD* PADA *HARBOUR TUG*
BERDASARKAN VARIASI SUDUT PEMBEBANAN MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

Disusun Oleh:
Ana Angellina
0122040060

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal
Jurusan Teknik Bangunan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 15 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji	NIDN	Tanda Tangan
1. Tri Tiyasmihadi, S.T., M.T.	(0018066204)	(.....)
2. Ir. Syafiuddin, S.T., M.T.	(0013108705)	(.....)
3. Prativi Khilyatul A., S.Pd., M.Pd.	(0712059004)	(.....)
4. Teguh Junian K., S.Kom., M.Kom.	(1101069702)	(.....)

Dosen Pembimbing	NIDN	Tanda Tangan
1. Tri Tiyasmihadi, S.T., M.T.	(0018066204)	(.....)
2. Dr. Kiki Dwi Wulandari, S.T., M.T.	(0003069103)	(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,

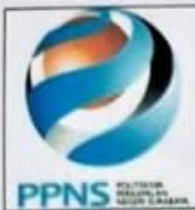


Ir. Priyambodo Nur A. N., S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198103242014041001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,

Ir. Agung Prasetyo Utomo, S.Pd., M.T.
NIP. 198810142019031006

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I. 021
Date : 3 Nopember 2015
Rev. : 01
Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Ana Angellina

NRP. : 0122040060

Jurusan/Prodi : Teknik Bangunan Kapal/ D4 Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

OPTIMALISASI JENIS *DOUBLE BOLLARD* PADA *HARBOUR TUG* BERDASARKAN VARIASI SUDUT PEMBEBANAN 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, 19 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



Ana Angellina

NRP. 0122040060

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis sampaikan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan baik. Penyelesaian Tugas Akhir ini bertujuan untuk memenuhi salah satu persyaratan kelulusan guna memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T.). Adapun judul dari Tugas Akhir ini adalah: **“Optimalisasi Jenis *Double Bollard* pada *Harbour Tug* Berdasarkan Variasi Sudut Pembebanan Menggunakan Metode Elemen Hingga”**.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan dan penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, perkenankanlah penulis untuk mengucapkan terima kasih atas dukungan, bimbingan, serta doa selama proses pengerjaan dan penyusunan laporan Tugas Akhir ini kepada:

1. Kedua orang tua penulis yaitu Bapak Sunarman dan Ibu Widayati, serta Diva Clarissa selaku adik penulis yang senantiasa memberikan do'a, kepercayaan dan segala bentuk dukungan moril maupun materil yang diberikan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
3. Bapak Ir. Priyambodo Nur Ardi Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Bangunan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Ir. Agung Prasetyo, S.Pd., M.T. selaku Koordinator Program Studi D4 Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Izzul Fikry, S.T., M.T. selaku Koordinator Tugas Akhir.
6. Bapak Tri Tiyaasmihadi, S.T., M.T. dan Bu Dr. Kiki Dwi Wulandari, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing yang dengan sabar membimbing, memberikan arahan, masukan, serta kemudahan kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir sehingga setiap tahapan dapat dilalui dengan baik dan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan lancar.
7. Seluruh dosen dan karyawan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu pengetahuan kepada penulis selama penulis menuntut ilmu.

8. Terimakasih kepada PT. PAL Indonesia atas segala bantuan, dukungan, arahan, dan ilmu serta pengalaman yang telah diberikan selama penulis menuntut ilmu ketika *On the Job Training* (OJT).
9. Kepada seseorang yang tidak kalah penting kehadirannya, Aditya Ananda Rizki, Ciki, dan Putih. Terima kasih telah menjadi bagian dalam proses perjalanan penulis menyusun Tugas Akhir. Berkontribusi baik tenaga, waktu, menemani, mendukung, serta menghibur penulis dalam kesedihan, mendengarkan keluh kesah dan meyakinkan penulis untuk pantang menyerah hingga penyusunan Tugas Akhir ini terselesaikan.
10. Keluarga besar NIKKAPALA terkhususnya angkatan Wana Kasuarina yang telah menjadi rumah kedua, terima kasih atas rasa kekeluargaan, semangat, kerja sama, dan rasa saling mendukung sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dalam tepat waktu.
11. Seluruh teman – teman D4 Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal angkatan 2022 khususnya kelas C, Aura, Niluh, Retno, Afi, Sovi, Aryani, Tera yang selalu berbagi suka dan duka serta saling memberi semangat, bantuan dan motivasi selama pengerjaan Tugas Akhir ini.

Last but not least dalam 20 tahun kedepan, kamu mungkin akan merindukan kondisi kamu seperti saat ini, baik dalam hal usia, kesehatan, maupun momen yang sedang kamu alami. Oleh karena itu, penting untuk menghargai dan menikmati momen saat ini, daripada hanya memikirkan apa yang akan terjadi di masa depan.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki kekurangan dan berharap saran serta kritik yang membangun untuk perbaikan di masa depan. Penulis berharap laporan ini bermanfaat bagi pembaca dan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya. Penulis juga memohon maaf atas kesalahan yang mungkin ada.

Surabaya, 19 Agustus 2026

Penulis

OPTIMALISASI JENIS *DOUBLE BOLLARD* PADA *HARBOUR TUG* BERDASARKAN VARIASI SUDUT PEMBEBANAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Ana Angellina

ABSTRAK

Double bollard adalah perlengkapan tambat yang berfungsi menahan gaya tarik tali selama operasi *berthing* pada *harbour tug*. Variasi arah pembebanan selama operasi dapat memengaruhi respon struktur sehingga diperlukan pemilihan jenis *double bollard* yang paling optimal. Penelitian ini bertujuan menentukan spesifikasi *double bollard* berdasarkan *Equipment Number*, *design load*, analisis struktur *Double Bollard Type A* dan *Type B*, serta menentukan jenis yang optimal menggunakan metode elemen hingga. Geometri *double bollard* mengacu pada standar ISO 13795 dan *design load* berdasarkan nilai *bollard pull*. Terdapat variasi sudut pembebanan horizontal, yaitu 0° hingga 90° , dengan sudut vertikal 25° . Parameter yang dievaluasi meliputi tegangan, deformasi, dan *safety factor*. Hasil penelitian menunjukkan ukuran *Equipment Number* yaitu *nominal size 250A* dan *design load* sebesar 639,66 kN. *Double Bollard Type A* mengalami kondisi paling kritis pada *load case 6* dengan tegangan maksimum 308,93 Mpa, deformasi 0,19 mm, dan *safety factor* 0,76. *Double Bollard Type B* mengalami kondisi paling kritis pada *load case 6* dengan tegangan maksimum 93,27 Mpa, deformasi 0,04 mm, dan *safety factor* 2,52. Sehingga, *Double Bollard Type B* dipilih sebagai desain optimal karena memenuhi kriteria kekuatan pada seluruh variasi pembebanan dibandingkan dengan *Type A*.

Kata kunci : *berthing*, *bollard pull*, *design load*, *equipment number*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

OPTIMIZATION OF DOUBLE BOLLARD TYPES FOR HARBOUR TUGS BASED ON VARIATIONS IN LOADING ANGLES USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Ana Angellina

ABSTRACT

Double bollards secure mooring lines against pulling forces during harbor tug berthing operations. Since varying load directions influence structural responses, selecting an optimal design is critical. This study determines double bollard specifications using Equipment Number, design load, and finite element method (FEM) structural analysis to compare Double Bollard Type A and Type B. Dimensional geometry follows ISO 13795 standards, with design loads derived from bollard pull values. Simulations incorporate horizontal loading angles of 0° to 90° , combined with a 25° vertical angle. The evaluated parameters include equivalent stress, total deformation, and safety factors. The calculation yields a nominal Equipment Number size of 250A and a design load of 639.66 kN. Type A exhibits its most critical state in load case 6, generating 308,93 Mpa maximum stress, 0,19 mm deformation, and a 0,76 safety factor. In contrast, Type B encounters its peak critical condition in load case 6, producing 93,27 Mpa stress, 0,04 mm deformation, and a 2,52 safety factor. Therefore, Type B is selected as the optimal design because it meets the strength criteria for all load variations compared to Type A.

Keywords: berthing, bollard pull, design load, equipment number

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Tugboat</i>	5
2.1.1 <i>Harbour tug</i>	5
2.1.2 <i>Escort Tug</i>	6
2.1.3 <i>Ocean-Going Tug</i>	6
2.1.4 <i>Anchor Handling Tug (AHT/AHTS)</i>	7
2.2 <i>Bollard</i>	7
2.2.1 Fungsi <i>Bollard</i>	8
2.2.2 Jenis-Jenis <i>Bollard</i>	8
2.2.3 Faktor Pemilihan Jenis <i>Bollard</i>	12
2.2.4 Kriteria Penentuan <i>Double Bollard Optimal</i>	13
2.3 <i>Equipment Number</i>	13

2.4	Pembebanan pada Struktur	15
2.4.1	<i>Berthing</i>	16
2.4.2	<i>Bollard pull</i>	17
2.4.3	<i>Design Load</i>	17
2.4.4	<i>Load Case</i>	17
2.4.5	<i>Vektor Gaya</i>	18
2.5	Analisis Tegangan pada Struktur	21
2.5.1	Tegangan	21
2.5.2	Tegangan Geser	22
2.5.3	Tegangan Tarik	22
2.5.4	Tegangan <i>Von misses</i>	23
2.5.5	Tegangan Izin	24
2.6	Deformasi	24
2.7	<i>Safety factor</i>	25
2.8	Material <i>Bollard</i>	26
2.9	Metode Elemen Hingga	27
2.10	Konvergensi <i>Meshing</i>	27
2.10.1	Parameter <i>Meshing</i>	28
2.11	<i>Rules</i>	28
2.12	Penelitian Terdahulu	29
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		32
3.1	Diagram Alir Penelitian	33
3.2	Langkah-Langkah Penelitian	34
3.2.1	Identifikasi dan Perumusan Masalah	34
3.2.2	Studi Literatur	35
3.2.3	Pengumpulan Data	35
3.2.4	Perhitungan <i>Equipment Number</i> , <i>Design Load</i> , dan <i>Load Case</i>	35
3.2.5	Permodelan	35
3.2.6	Uji Konvergensi <i>Meshing</i>	36
3.2.7	Pemberian Beban dan Analisis Running	36
3.2.8	Perbandingan Nilai Tegangan	36
3.2.9	Analisis Perbandingan	36
3.2.10	Output Data	36

3.2.11	Kesimpulan dan Saran.....	37
3.3	Rencana Pengerjaan	37
3.4	Validitas Penelitian.....	37
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		39
4.1	Data Kapal.....	39
4.2	Perhitungan <i>Equipment Number</i>	39
4.2.1	Penentuan <i>Size Double bollard</i>	40
4.3	Pembebanan yang Ditanggung <i>Double bollard</i>	43
4.3.1	<i>Bollard Pull</i>	43
4.3.2	<i>Design Load</i>	44
4.3.3	<i>Load Case</i>	44
4.3.4	Perhitungan Tegangan Izin.....	45
4.4	Simulasi dan Analisis Kekuatan dengan Metode Elemen Hingga.....	46
4.4.1	Permodelan <i>Double bollard</i>	46
4.4.2	Analisis Menggunakan Metode Elemen Hingga.....	48
4.4.3	Pemilihan Material	49
4.4.4	Pemilihan <i>Geometry</i>	49
4.4.5	<i>Meshing</i>	50
4.4.6	<i>Fixed Geometry</i>	52
4.4.7	<i>Solve</i>	53
4.4.8	Simulasi.....	54
4.5	Hasil Simulasi pada <i>Double bollard Type A</i>	54
4.5.1	<i>Load Case 1</i>	54
4.5.2	<i>Load Case 2</i>	55
4.5.3	<i>Load Case 3</i>	55
4.5.4	<i>Load Case 4</i>	56
4.5.5	<i>Load Case 5</i>	57
4.5.6	<i>Load Case 6</i>	58
4.5.7	<i>Load Case 7</i>	59
4.6	Hasil Simulasi pada <i>Double bollard Type B</i>	60
4.6.1	<i>Load Case 1</i>	60
4.6.2	<i>Load Case 2</i>	61
4.6.3	<i>Load Case 3</i>	62

4.6.4	<i>Load Case 4</i>	63
4.6.5	<i>Load Case 5</i>	63
4.6.6	<i>Load Case 6</i>	64
4.6.7	<i>Load Case 7</i>	65
4.7	Pembahasan Simulasi Metode Elemen Hingga <i>Double Bollard Type A</i>	66
4.7.1	Nilai Tegangan pada <i>Double Bollard Type A</i>	66
4.7.2	Nilai <i>Safety Factor</i> pada <i>Double Bollard Type A</i>	68
4.8	Pembahasan Simulasi Metode Elemen Hingga <i>Double Bollard Type B</i>	69
4.8.1	Nilai Tegangan pada <i>Double Bollard Type B</i>	69
4.8.2	Nilai <i>Safety Factor</i> pada <i>Double Bollard Type B</i>	71
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		73
5.1	Kesimpulan	73
5.2	Saran	74
DAFTAR PUSTAKA		75
LAMPIRAN 1		77
LAMPIRAN 2		81
LAMPIRAN 3		85
LAMPIRAN 4		89
BIODATA PENULIS		93

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Equipment Number</i>	15
Tabel 2. 2 <i>Tug Assignment Guidelines for Vessels Berthing</i>	16
Tabel 2. 3 <i>Classification of Tugs</i>	16
Tabel 2. 4 <i>Design Load</i>	17
Tabel 2. 5 Tabel k_L Material	22
Tabel 2. 6 Karakteristik Mekanik Material ASTM A36.....	27
Tabel 2. 7 Penelitian Terdahulu.....	29
Tabel 3. 1 Rencana Pengerjaan	37
Tabel 4. 1 Data Ukuran Utama Kapal	39
Tabel 4. 2 <i>Equipment Number Towline</i>	40
Tabel 4. 3 <i>Nominal Size Double Bollard Type A</i>	41
Tabel 4. 4 Spesifikasi <i>Double Bollard Type A</i>	41
Tabel 4. 5 <i>Nominal Size Double Bollard Type B</i>	42
Tabel 4. 6 Spesifikasi <i>Double Bollard Type B</i>	42
Tabel 4. 7 <i>Load case</i>	44
Tabel 4. 8 Validasi Model dengan <i>Katalog</i>	47
Tabel 4. 9 <i>Size mesh double bollard type A</i>	50
Tabel 4. 10 <i>Size mesh double bollard type B</i>	52
Tabel 4. 11 Rekap Tegangan <i>Double Bollard Type A</i> pada Setiap <i>Load Case</i>	66
Tabel 4. 12 Rekap <i>Safety Factor Double Bollard Type A</i> pada Setiap <i>Load Case</i>	68
Tabel 4. 13 Rekap Tegangan <i>Double Bollard Type B</i> pada Setiap <i>Load Case</i>	69
Tabel 4. 14 Rekap <i>Safety Factor Double Bollard Type B</i> pada Setiap <i>Load Case</i>	71

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Harbour tug</i>	5
Gambar 2. 2 <i>Escort tug</i>	6
Gambar 2. 3 <i>Ocean-Going Tug</i>	7
Gambar 2. 4 <i>Anchor handling tug</i>	7
Gambar 2. 5 <i>Bitt Bollard</i>	9
Gambar 2. 6 <i>Tee Bollard</i>	9
Gambar 2. 7 <i>Staghorn Bollard</i>	10
Gambar 2. 8 <i>Single Cruciform Bollard</i>	11
Gambar 2. 9 <i>Double Cruciform Bollard</i>	11
Gambar 2. 10 <i>Double bollard ISO 13795 Type A</i>	12
Gambar 2. 11 <i>Double bollard ISO 13795 Type B</i>	12
Gambar 2. 12 <i>Profile View</i> dengan A_t diarsir.....	14
Gambar 2. 13 <i>Front View</i> dengan A diarsir	14
Gambar 2. 14 <i>Mooring dan Towline</i>	18
Gambar 2. 15 <i>Proyeksi Gaya Horizontal dan Vertikal</i>	19
Gambar 2. 16 <i>Penguraian Gaya Longitudinal</i>	20
Gambar 2. 17 <i>Penguraian Gaya Vertikal</i>	21
Gambar 2. 18 <i>Meshing</i>	28
Gambar 3. 1 <i>Diagram Alir Metodologi</i>	33
Gambar 3. 2 <i>Diagram Alir Metodologi Lanjutan</i>	34
Gambar 4. 1 <i>Katalog double bollard type A</i>	41
Gambar 4. 2 <i>Katalog double bollard type B</i>	42
Gambar 4. 3 <i>Top view variasi sudut horizontal</i>	45
Gambar 4. 4 <i>Front view sudut vertikal 25°</i>	45
Gambar 4. 5 <i>Model double bollard type A</i>	46
Gambar 4. 6 <i>Model double bollard type B</i>	47
Gambar 4. 7 <i>Validasi Berat Double bollard Type A</i>	47
Gambar 4. 8 <i>Validasi Berat Double bollard Type B</i>	48
Gambar 4. 9 <i>Metode Elemen Hingga</i>	48
Gambar 4. 10 <i>Pemilihan Material</i>	49

Gambar 4. 11 <i>Geometry</i>	50
Gambar 4. 12 <i>Meshing Double bollard Type A</i>	50
Gambar 4. 13 Grafik <i>size mesh double bollard type A</i>	51
Gambar 4. 14 <i>Meshing Double bollard Type B</i>	51
Gambar 4. 15 Grafik <i>size mesh double bollard type B</i>	52
Gambar 4. 16 <i>Fixed geometry double bollard type A</i>	53
Gambar 4. 17 <i>Fixed geometry double bollard type B</i>	53
Gambar 4. 18 <i>Solve</i>	53
Gambar 4. 19 Tegangan <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 1</i>	54
Gambar 4. 20 Deformasi <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 1</i>	54
Gambar 4. 21 Tegangan <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 2</i>	55
Gambar 4. 22 Deformasi <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 2</i>	55
Gambar 4. 23 Tegangan <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 3</i>	56
Gambar 4. 24 Deformasi <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 3</i>	56
Gambar 4. 25 Tegangan <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 4</i>	57
Gambar 4. 26 Deformasi <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 4</i>	57
Gambar 4. 27 Tegangan <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 5</i>	58
Gambar 4. 28 Deformasi <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 5</i>	58
Gambar 4. 29 Tegangan <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 6</i>	59
Gambar 4. 30 Deformasi <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 6</i>	59
Gambar 4. 31 Tegangan <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 7</i>	60
Gambar 4. 32 Deformasi <i>Double bollard Type A</i> pada <i>Load Case 7</i>	60
Gambar 4. 33 Tegangan <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 1</i>	61
Gambar 4. 34 Deformasi <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 1</i>	61
Gambar 4. 35 Tegangan <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 2</i>	61
Gambar 4. 36 Deformasi <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 2</i>	62
Gambar 4. 37 Tegangan <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 3</i>	62
Gambar 4. 38 Deformasi <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 3</i>	62
Gambar 4. 39 Tegangan <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 4</i>	63
Gambar 4. 40 Deformasi <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 4</i>	63
Gambar 4. 41 Tegangan <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 5</i>	64
Gambar 4. 42 Deformasi <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 5</i>	64

Gambar 4. 43 Tegangan <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 6</i>	65
Gambar 4. 44 Deformasi <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 6</i>	65
Gambar 4. 45 Tegangan <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 7</i>	65
Gambar 4. 46 Deformasi <i>Double bollard Type B</i> pada <i>Load Case 7</i>	66
Gambar 4. 47 Grafik Tegangan <i>Double Bollard Type A</i> Setiap <i>Load Case</i>	67
Gambar 4. 48 Grafik <i>Safety Factor Double Bollard Type A</i> Setiap <i>Load Case</i>	68
Gambar 4. 49 Grafik Tegangan <i>Double Bollard Type B</i> Setiap <i>Load Case</i>	70
Gambar 4. 50 Grafik <i>Safety Factor Double Bollard Type B</i> Setiap <i>Load Case</i>	71

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut Pasal 1 Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran, kapal adalah kendaraan air dengan bentuk dan jenis tertentu yang digerakkan dengan tenaga angin, tenaga mekanik, energi lainnya, ditarik atau ditunda, termasuk kendaraan yang berdaya dukung dinamis, kendaraan di bawah permukaan air, serta alat apung dan bangunan terapung yang tidak berpindah-pindah. Dalam operasinya, kapal memerlukan berbagai perlengkapan yang berfungsi untuk menjamin keselamatan dan keamanan. Salah satu jenis kapal yang memiliki peran khusus di area pelabuhan adalah *harbour tug*. *Harbour tug* merupakan kapal bantu yang digunakan untuk membantu manuver kapal berukuran besar pada saat *berthing*, *unberthing*, maupun *towing* (Paulauskas et al., 2024).

Keberhasilan operasi *harbour tug* sangat dipengaruhi oleh keandalan perlengkapan tambat yang digunakan. Perlengkapan tersebut berfungsi sebagai media penyaluran gaya dari tali tambat menuju struktur kapal. Beberapa perlengkapan yang umum digunakan antara lain *bollard*, *towing hook*, dan *roller fairlead*. Diantara perlengkapan tersebut, *double bollard* merupakan komponen penyalur utama gaya tarik dari tali tambat menuju deck sehingga harus dirancang dengan baik sesuai spesifikasi berdasarkan *Equipment Number*.

Salah satu perlengkapan tambat yang memiliki peranan penting adalah *double bollard*. *Double bollard* berfungsi sebagai titik pengikat tali yang menerima dan meneruskan gaya tarik menuju struktur geladak kapal. Pada kapal umumnya, *double bollard* digunakan untuk menambatkan tali saat kapal berada di dermaga. Namun, pada *harbour tug* penggunaannya berkembang untuk menahan dan meneruskan gaya tarik tali saat membantu kapal besar dalam operasi *berthing*. Oleh karena itu, kekuatan struktur *double bollard* perlu

diperhatikan untuk memastikan kemampuan menahan beban operasional yang bekerja selama proses *berthing*.

Dalam kondisi operasi nyata, pembebanan yang diterima oleh *bollard* tidak selalu bekerja pada satu arah yang tetap. Posisi relatif kapal yang dibantu terhadap *harbour tug* dapat berubah selama proses *berthing*, sehingga menyebabkan arah tarikan tali menjadi bervariasi. Perubahan arah pembebanan tersebut dapat memengaruhi distribusi tegangan, deformasi, serta *safety factor* struktur *double bollard*. Oleh karena itu, analisis terhadap berbagai kondisi pembebanan perlu dilakukan untuk mengetahui respons struktur pada kondisi operasional yang berbeda.

Variasi arah pembebanan tersebut ditentukan berdasarkan arah gaya tarik yang terjadi selama operasi *berthing*. Perubahan posisi relatif antara *harbour tug* dengan kapal yang di *assist* menyebabkan tali tambat bekerja pada berbagai arah gaya yang diteruskan menuju struktur *double bollard*, sehingga tidak selalu berada pada satu arah yang tetap. Pada penelitian ini menggunakan variasi sudut pembebanan sebesar 0° - 90° sebagai *load case* untuk mempresentasikan kondisi operasional yang terjadi pada *harbour tug*. Setiap variasi sudut digunakan untuk menguraikan *design load* menjadi komponen gaya longitudinal, transversal, dan vertikal yang bekerja pada struktur *double bollard*.

Sehingga pada penelitian ini diperlukan analisis kekuatan struktur *double bollard* secara mendalam untuk memastikan kemampuannya dalam menahan beban tarik maksimum selama operasi *berthing*. Metode Elemen Hingga digunakan dalam penelitian ini karena mampu merepresentasikan perilaku struktur secara akurat terhadap pembebanan statis, sehingga dapat diperoleh distribusi tegangan, deformasi, dan *safety factor* sebagai dasar dalam menentukan jenis *double bollard* yang optimal serta sesuai dengan ketentuan *rules Lloyd's Register*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana menentukan spesifikasi *double bollard* yang sesuai pada *harbour tug* berdasarkan *Equipment Number* sesuai *rules Lloyd's Register*?
2. Bagaimana pengaruh variasi sudut pembebanan terhadap beban yang bekerja pada struktur *double bollard*?
3. Bagaimana pengaruh variasi sudut pembebanan terhadap tegangan, deformasi, dan *safety factor* yang terjadi pada struktur *double bollard type A* dan *type B* merujuk pada *rules Lloyd's Register*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang tertera diatas, dapat diambil tujuan penelitian sebagai berikut :

1. Mengetahui spesifikasi *double bollard* yang sesuai pada *harbour tug* berdasarkan *Equipment Number* sesuai *rules Lloyd's Register*.
2. Mengetahui pengaruh variasi sudut pembebanan terhadap beban yang bekerja pada struktur *double bollard*.
3. Mengetahui pengaruh variasi sudut pembebanan terhadap tegangan, deformasi, dan *safety factor* yang terjadi pada struktur *double bollard type A* dan *type B* merujuk pada *rules Lloyd's Register*.

1.4 Manfaat Penelitian

Dari penelitian yang dilakukan, berharap dapat menghasilakn manfaat sebagai berikut:

1. Bagi penulis pada penulisan tugas akhir ini dapat memperdalam pemahaman mengenai optimalisasi jenis *bollard* dan analisis kekuatan struktur *bollard* pada kapal *harbour tug* khususnya pada operasi *berthing*.
2. Bagi mahasiswa diharapkan mengetahui jenis-jenis *bollard* dan analisis struktur *bollard* pada saat operasi *berthing*.
3. Bagi institusi diharapkan dapat digunakan sebagai salah satu referensi tambahan dalam merancang *mooring arrangement*.

1.5 Batasan Masalah

Masalah yang dibahas pada penelitian ini agar lebih fokus, maka memberikan batasan masalah sebagai berikut :

1. Acuan rule yang digunakan adalah *Lloyd's Register*
2. Kondisi pembebanan yang dianalisis merupakan beban tarik statis berdasarkan *design load* yang dihitung sesuai *rules* selama operasi *berthing*
3. Permodelan dianalisis menggunakan metode elemen hingga
4. Analisa stabilitas, pasang dan surut, gaya akibat angin dan arus gelombang, serta kekuatan konstruksi kapal diabaikan
5. Analisis kapal yang digunakan adalah *harbour tug*
6. Material yang digunakan mengacu pada pasaran yaitu ASTM A36
7. Tidak menghitung biaya pembelian *bollard*
8. Tidak menghitung *fatigue life* dari *double bollard*
9. Tegangan pada tali tambat diabaikan
10. Laju korosi diabaikan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Tugboat*

Kapal tunda (*tugboat*) merupakan jenis kapal khusus yang digunakan untuk membantu pergerakan kapal lain melalui gaya dorong maupun tarik, terutama ketika kapal tersebut mengalami keterbatasan kemampuan manuver di area pelabuhan atau perairan sempit (Lee et al., 2021). *Tugboat* umumnya memiliki tenaga mesin yang besar dibandingkan ukurannya, sehingga mampu menghasilkan gaya tarik (*bollard pull*) yang tinggi. Fungsi utama *tugboat* adalah meningkatkan keselamatan dan efisiensi navigasi kapal, khususnya dalam proses sandar, lepas sandar, dan pengaturan posisi kapal.

2.1.1 *Harbour tug*

Menurut Sano (2023), *harbour tug* merupakan jenis kapal tunda yang digunakan di area pelabuhan untuk membantu kapal saat proses sandar (*berthing*) dan lepas sandar (*unberthing*). Kapal ini dirancang dengan tingkat manuver yang tinggi agar dapat bekerja di ruang terbatas serta mampu merespons perubahan arah dengan cepat. Perannya sangat penting dalam menjaga keselamatan operasi kapal di pelabuhan yang padat.



Gambar 2. 1 *Harbour tug*
(ruihangshipbuilding, n.d.)

2.1.2 *Escort Tug*

Menurut Mauro (2021), *escort tug* berperan penting untuk meningkatkan keselamatan navigasi, khususnya saat kapal melewati alur sempit atau mendekati pelabuhan. *Tug* ini tidak hanya berfungsi menarik atau mendorong, tetapi juga mampu memberikan gaya lateral untuk mengontrol arah kapal jika terjadi gangguan. *Escort tug* biasanya memiliki daya mesin besar dan desain yang memungkinkan stabilitas tinggi pada kecepatan tertentu.



Gambar 2. 2 *Escort tug*
(rivieramm, n.d.)

2.1.3 *Ocean-Going Tug*

Ocean-Going Tug adalah kapal tunda yang digunakan untuk penarikan jarak jauh di laut lepas, seperti menarik kapal rusak atau barge dari satu lokasi ke lokasi lain (Qi et al., 2025). *Tug* jenis ini dirancang lebih kuat dan tahan terhadap kondisi gelombang laut yang besar, serta dilengkapi dengan kapasitas bahan bakar yang besar untuk perjalanan panjang.



Gambar 2. 3 *Ocean-Going Tug*
(rivieramm, n.d.)

2.1.4 *Anchor Handling Tug (AHT/AHTS)*

Anchor handling tug merupakan kapal tunda yang digunakan dalam industri lepas pantai, khususnya untuk menangani jangkar (Bolong et al, 2026). Selain menarik jangkar, kapal ini juga digunakan untuk memindahkan peralatan berat dan membantu operasi logistik di laut. Kapal ini biasanya memiliki dek yang luas serta perlengkapan khusus seperti *winch* berkapasitas besar.



Gambar 2. 4 *Anchor handling tug*
(damen, n.d.)

2.2 *Bollard*

Bollard merupakan perangkat yang ada di kapal atau di pelabuhan yang digunakan untuk menambat kapal di dermaga atau perangkat untuk mengikatkan tali pada kapal (Elia & Putra, 2021). *Bollard* biasanya terbuat dari

besi cor dan ditanamkan pada fondasi atau bibir dermaga sehingga mampu untuk menahan beban tarik yang bekerja pada penambat kapal di dermaga dan *bollard* yang dipasang pada kapal berfungsi untuk melilitkan tali di kapal pada *bollard* tersebut pada bagian haluan, buritan, dan badan kapal.

2.2.1 Fungsi *Bollard*

Salah satu perlengkapan tambat yang memiliki peranan penting adalah *bollard*. Secara umum, *bollard* merupakan perlengkapan yang digunakan sebagai titik pengikatan tali tambat untuk menahan dan meneruskan gaya tarik yang bekerja selama proses tambat kapal (Wu et al., 2023). Beban yang diterima *bollard* berasal dari gaya tarik tali yang dapat berubah sesuai kondisi operasi dan lingkungan. Oleh karena itu, struktur *bollard* harus dirancang memiliki kekuatan yang memadai agar mampu menahan beban kerja yang terjadi secara aman. Pada kapal *harbour tug*, penggunaan *double bollard* banyak diterapkan karena mampu mendistribusikan beban pada dua bitts sehingga kapasitas tambat yang dihasilkan menjadi lebih besar.

2.2.2 Jenis-Jenis *Bollard*

Bollard terdiri dari berbagai jenis, diantaranya:

1. *Bitt Bollard*

Bitt Bollard adalah salah satu jenis *bollard* yang paling umum digunakan pada kapal maupun dermaga. Tipe ini memiliki bentuk dasar berupa satu atau dua tiang vertikal (*bitt*) yang berdiri di atas pelat dasar dan berfungsi sebagai titik pengikat tali tambat (*mooring line*). Tipe *bollard* ini umumnya dipakai di dermaga lokal atau kapal kecil dengan beban tambat kecil sampai menengah. *Bitt bollard* terbuat dari besi cor (*cast iron*). Kapasitas *bitt bollard* adalah 15-200 ton. Gambar *bitt bollard* dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut :



Gambar 2. 5 Bitt Bollard
(Trelleborg, 2015)

2. Tee Bollard

Tee bollard atau yang sering disebut *T-head bollard* adalah salah satu jenis *bollard* yang memiliki bentuk kepala seperti huruf T dengan bagian atas (*top plate*) melebar ke kiri dan kanan seperti sayap. Bentuk ini memudahkan tali untuk dikaitkan dan mencegah tali slip terlepas saat menerima beban besar. Tipe *bollard* ini umumnya sering digunakan pada dermaga komersial, terminal peti kemas, pelabuhan curah, dan dermaga dengan intensitas sandar tinggi karena daya tahan dan kapasitas bebannya yang besar. Kapasitas *bollard* ini tersedia dalam 10-300 ton. Gambar *tee bollard* dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut:



Gambar 2. 6 Tee Bollard
(Trelleborg, 2015)

3. *Staghorn Bollard*

Staghorn bollard adalah salah satu jenis *bollard* yang memiliki bentuk bagian atas bulat di tengah dan di sampingnya terdapat tanduk-tanduk untuk meanmbatkan tali dengan mudah dari berbagai arah. Tipe *bollard* ini banyak digunakan di dermaga dengan aktivitas yang padat, kapal besar, dan kapal yang memerlukan penyesuaian arah tali yang fleksibel. Kapasitas *bollard* ini tersedia dalam 10-250 ton. Gambar *staghorn bollard* dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut:



Gambar 2. 7 *Staghorn Bollard*
(Trelleborg, 2015)

4. *Cruciform Bollard*

Cruciform bollard adalah salah satu jenis *bollard* yang memiliki bentuk kepala menyerupai salib, sehingga dapat memberikan empat arah utama untuk pengikatan tali tambat. Tipe *bollard* ini umumnya digunakan di dermaga, pelabuhan umum, dan di kapal pada bagian haluan. *Cruciform bollard* dibedakan menjadi 2, yaitu *Single Cruciform bollard* dan *double Cruciform bollard*. Gambar *Cruciform bollard* dapat dilihat pada Gambar 2.8 dan Gambar 2.9 berikut:



Gambar 2. 8 *Single Cruciform Bollard*
(boomarine, n.d.)



Gambar 2. 9 *Double Cruciform Bollard*
(ysmarines, n.d.)

5. *Double bollard*

Double bollard adalah salah satu jenis *bollard* yang terdiri dari dua tiang pendek yang dipasang berpasangan pada satu *base plate*. Tipe *bollard* ini umumnya digunakan di dermaga dan kapal. Kapasitas *bollard* ini tersedia dalam 10-150 ton. *Double bollard* ini terdapat 2 *type* yang berbeda. Gambar *double bollard* dapat dilihat pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11 berikut:



Gambar 2. 10 *Double bollard ISO 13795 Type A*
(hiseastocks, n.d.)



Gambar 2. 11 *Double bollard ISO 13795 Type B*
(hiseastocks, n.d.)

2.2.3 Faktor Pemilihan Jenis *Bollard*

Pemilihan *double bollard ISO 13795* pada penelitian ini didasarkan pada kesesuaiannya sebagai standar untuk *welded steel bollards for sea-going vessels*. ISO 13795 digunakan sebagai acuan dalam menentukan tipe dan geometri *double bollard* yang dimodelkan. Standar tersebut juga tercantum sebagai salah satu standar yang diakui oleh *rules Lloyd's Register* dalam ketentuan *mooring and towing fittings*.

ISO 13795 menyediakan *double bollard Type A* dan *Type B* dengan bentuk geometri yang berbeda. Perbedaan tersebut digunakan

untuk membandingkan respons struktur berupa tegangan, deformasi, dan *safety factor* pada variasi sudut pembebanan yang sama. Dalam penelitian ini, ISO 13795 hanya digunakan sebagai acuan geometri, sedangkan *design load* ditentukan berdasarkan *rules Lloyd's Register*.

2.2.4 Kriteria Penentuan *Double Bollard Optimal*

Dalam penelitian ini, penentuan jenis *double bollard* yang paling optimal didasarkan pada hasil analisis metode elemen hingga dengan mempertimbangkan beberapa parameter, yaitu nilai tegangan, deformasi, dan *safety factor*. Suatu konfigurasi dinilai lebih optimal apabila menghasilkan tegangan dan deformasi yang lebih rendah, *safety factor* yang lebih tinggi, serta memenuhi batas tegangan izin berdasarkan *rules Lloyd's Register*. Kriteria tersebut dipilih karena secara langsung merepresentasikan kemampuan struktur dalam menahan *design load* dan tingkat keamanan selama operasi *berthing*.

2.3 *Equipment Number*

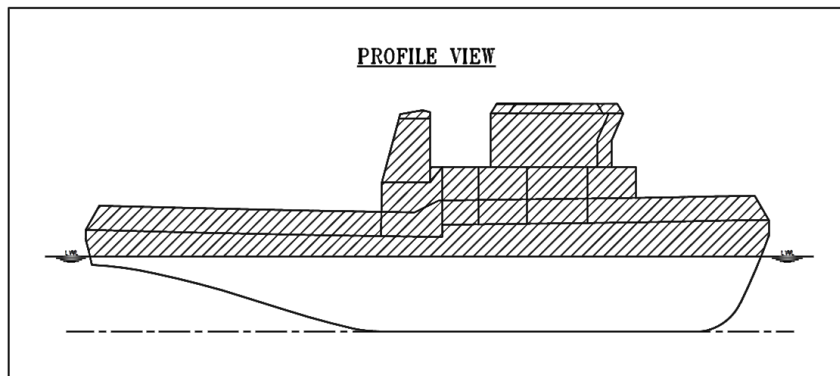
Dalam penentuan *mooring arrangement*, diperlukan perhitungan yang dimana menentukan spesifikasi *deck outfitting* yang sesuai dengan karakteristik kapal. Salah satu parameter utama yang digunakan adalah *Equipment Number* (EN), yaitu nilai yang merepresentasikan ukuran kapal berdasarkan dimensi utama dan digunakan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas serta spesifikasi perlengkapan tambat (*mooring equipment*) terutama *double bollard*. Berikut adalah rumus yang digunakan dalam *Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships, 2023 [Vol. 1, Part 3, Chapt. 5, Sec 2]*:

$$EN = \Delta^{2/3} + 2,5 At + A/10 \quad (2.1)$$

Dengan :

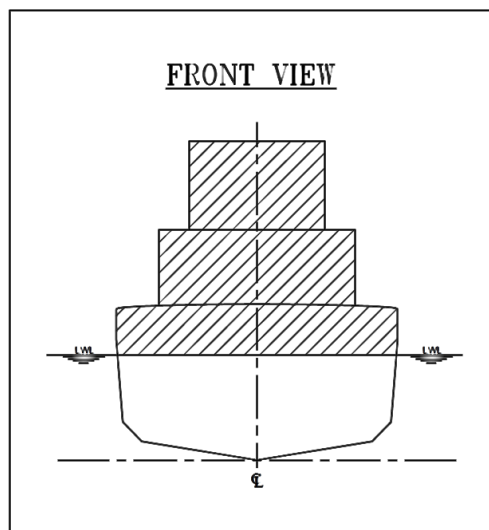
Δ = Displacement (ton)

At = Luas proyeksi melintang (m²) dari *hull, superstructure, houses, masts* diatas sarat desain ditunjukkan pada Gambar 2.12 berikut:



Gambar 2. 12 *Profile View* dengan A_t diarsir
(Penulis, 2026)

A = Luas tampilan profil (m^2) dari *hull, superstructure, houses, masts* diatas sarat desain ditunjukkan pada Gambar 2.13 berikut:



Gambar 2. 13 *Front View* dengan A diarsir
(Penulis, 2026)

Tabel 2. 1 *Equipment Number*

<i>Equipment Number</i>		<i>Equipment Letter</i>	<i>Towline</i>	
<i>Exceeding</i>	<i>Not Exceeding</i>		<i>Minimum length (m)</i>	<i>Minimum breaking strength (kN)</i>
50	70	A	180	98
70	90	B	180	98
90	110	C	180	98
110	130	D	180	98
130	150	E	180	98
150	175	F	180	98
175	205	G	180	112
205	240	H	180	129
240	280	I	180	150
280	320	J	180	174

Sumber : Lloyd's Register, 2023

Berdasarkan *Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships Lloyd's Register*, nilai *Equipment Number* (EN) digunakan untuk menentukan *minimum breaking strength* tali tambat yang selanjutnya menjadi dasar pemilihan *double bollard* berdasarkan katalog ISO 13795. *Double bollard* yang dipilih harus memiliki nilai *Safe Working Load* (SWL) yang memenuhi atau lebih besar dari beban kerja yang dipersyaratkan agar mampu menahan beban operasional dengan aman.

2.4 Pembebanan pada Struktur

Pembebanan pada penelitian ini didasarkan pada (*Maritime and Port Authority of Singapore*, 2025) yang menentukan kebutuhan kapal tunda berdasarkan karakteristik kapal. Nilai *bollard pull* dari kapal tunda yang terpilih selanjutnya digunakan sebagai dasar penentuan besar gaya pada analisis *double bollard*.

Tabel 2. 2 Tug Assignment Guidelines for Vessels Berthing

LOA (m) of Vessel	Number and Size of Tugs for Vessel with Power	Number and Size of Tugs for Vessel without Power
Up to 60m	1S	2S (Refer to Note 5)
61 to 122m	2S	2S + 1S (Refer to Note 6)
123 to 200m	2M	3M
201 to 280m	2B	3B

Sumber : Maritime and Port Authority of Singapore, 2025

Tabel 2. 3 Classification of Tugs

Size of Tugs	Bollard Pull
Small (S)	10 to 16 ton
Medium (M)	17 to 24 ton
Big (B)	25 to 45 ton
Extra Big (X-B)	Above 45 ton

Sumber : Maritime and Port Authority of Singapore, 2025

2.4.1 Berthing

Operasi *berthing* merupakan proses memandu kapal hingga mencapai posisi sandar di dermaga secara aman (Paulauskas et al., 2024). Pada kapal berukuran besar, proses ini umumnya dibantu oleh *harbour tug* karena kemampuan manuver kapal yang terbatas. Secara umum, operasi berthing terdiri atas tiga tahapan, yaitu fase pendekatan, fase pengontrolan, dan fase perapatan.

Pada fase pendekatan, *harbour tug* membantu mengarahkan kapal menuju area sandar. Selanjutnya pada fase pengontrolan, *harbour tug* mengendalikan posisi dan orientasi kapal melalui metode *push* maupun *pull*. Setelah itu, pada fase perapatan, kapal digerakkan secara perlahan hingga mencapai posisi sandar sebelum dilakukan proses penambatan ke dermaga.

Pada operasi berthing, metode *pull* dilakukan dengan menyalurkan gaya tarik melalui tali yang terhubung pada *double bollard*. Selama proses *berthing*, khususnya pada fase pengontrolan dan perapatan, perubahan posisi relatif antara *harbour tug* dan kapal yang dibantu menyebabkan arah tali berubah terhadap sumbu kapal.

2.4.2 Bollard pull

Bollard pull merupakan ukuran daya tarik kapal tunda dengan menggunakan tali tunda yang dibuktikan dengan sertifikat pengujian atau *test certificate* (Hardjono, 2016). Formula BHP ini mengabaikan faktor eksternal angin dan gelombang. Konversi BHP ke *Bollard Pull* (tons) tergantung sistem propulsi yang digunakan. Formula yang digunakan ini menggunakan propulsi dengan *kostnozzle*, dapat dilihat pada persamaan (2.2) berikut:

$$BP = \frac{BHP \times 1.26}{100} \quad (2.2)$$

Dengan :

BP = *Bollard pull* (Ton)

BHP = Kapasitas *main engine*

2.4.3 Design Load

Besarnya *design load* berasal dari nilai *bollard pull* yang sudah dikonversi menjadi kN. Berikut adalah rumus yang digunakan dalam *Rules and Regulations for the Classification of Ships, July 2022 [Part 4, Chap 3, Sec 7]*:

Tabel 2. 4 *Design Load*

Class Notation	Design Force or Bollard Pull as appropriate (kN)	Design Load (kN)
Tug	$T_{BP} < 400$	$2,5 \cdot T_{BP}$
	$400 < T_{BP} < 1000$	$((3400 - T_{BP})/1200) \cdot T_{BP}$
	$T_{BP} > 1000$	$2 \cdot T_{BP}$

Sumber : Lloyd's Register, 2022

2.4.4 Load Case

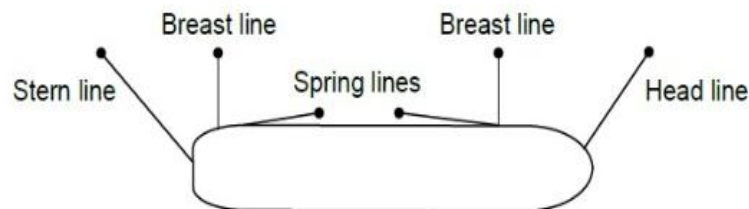
Dalam analisis struktur menggunakan metode elemen hingga, *load case* merupakan representasi kondisi pembebanan yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap berbagai kemungkinan beban yang terjadi selama operasi. Pada penelitian ini, penyusunan *load case* didasarkan pada perubahan arah gaya tarik yang bekerja pada *double bollard* selama operasi *berthing*. Perubahan posisi relatif antara *harbour*

tug dan kapal yang di *assist* menyebabkan arah tali terhadap sumbu kapal berubah-ubah, sehingga menghasilkan variasi komponen gaya yang diteruskan ke struktur *double bollard*. Oleh karena itu, variasi sudut horizontal digunakan untuk merepresentasikan kondisi operasional tersebut.

Design load yang diperoleh berdasarkan perhitungan *bollard pull* sesuai *rules Lloyd's Register* kemudian diuraikan ke dalam beberapa *load case* dengan variasi sudut horizontal sebesar 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , dan 90° . Sementara itu, sudut vertikal ditetapkan konstan sebesar 25° dengan mengacu pada rekomendasi OCIMF MEG-4, yang menyarankan agar sudut vertikal tali tetap berada dalam batas yang direkomendasikan. Setiap *load case* selanjutnya diuraikan menjadi komponen gaya pada sumbu longitudinal, transversal, dan vertikal menggunakan prinsip vektor gaya.

2.4.5 Vektor Gaya

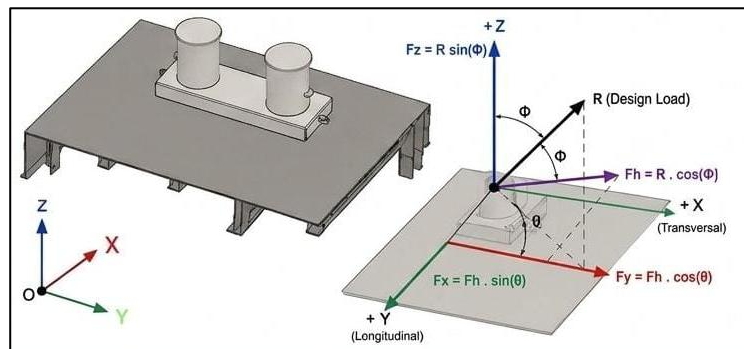
Analisis kekuatan struktur pada komponen *deck* kapal, seperti *double bollard*, didasarkan pada prinsip penguraian gaya vektor dalam ruang tiga dimensi (x, y, z). Gaya tarik yang dihasilkan oleh *harbour tug* tidak selalu bekerja pada satu garis lurus, melainkan membentuk sudut tertentu baik secara horizontal (θ) maupun vertikal (Φ) berdasarkan IMO MSC.1/Circular.1175/Rev.1, 2020 [*Appendix A - Mooring and Tow Lines*] dapat dilihat pada Gambar 2.14 berikut:



Gambar 2. 14 *Mooring dan Towline*
(IMO, 2022)

1. Proyeksi Gaya Horizontal dan Vertikal

Gaya tarik utama (R) yang bekerja pada sistem penambatan diuraikan menjadi dua komponen utama berdasarkan sudut vertikal (Φ). Sudut ini terbentuk karena adanya perbedaan ketinggian antara titik tangkap gaya pada kapal yang dibantu (*assisted ship*) dengan posisi komponen di atas dek. Representasi sudut tersebut ada pada Gambar 2.15 berikut:



Gambar 2. 15 Proyeksi Gaya Horizontal dan Vertikal

(Penulis, 2026)

- **Komponen Gaya Vertikal (F_z)**

Merupakan gaya yang bekerja tegak lurus terhadap geladak kapal dan cenderung memberikan beban tarik (*tensile load*) pada baut pengikat struktur.

$$F_z = R \cdot \sin(\Phi) \quad (2.3)$$

Dengan:

$$R = \text{Design load (N)}$$

$$F_z = \text{Gaya vertikal (N)}$$

- **Komponen Gaya Horizontal Total (F_h)**

Merupakan resultan gaya yang bekerja pada bidang datar dek kapal sebelum diuraikan lebih lanjut ke sumbu longitudinal dan transversal.

$$F_h = R \cdot \cos(\Phi) \quad (2.4)$$

Dengan:

$$R = \text{Design load (N)}$$

$$F_h = \text{Gaya horizontal (N)}$$

2. Penguraian Gaya Longitudinal dan Transversal

Gaya horizontal (F_h) diuraikan kembali ke dalam dua sumbu utama koordinat kapal untuk mengevaluasi distribusi beban pada struktur penopang. Berdasarkan prinsip trigonometri, penguraian gaya tersebut adalah sebagai berikut:

- **Komponen Longitudinal (F_y):**

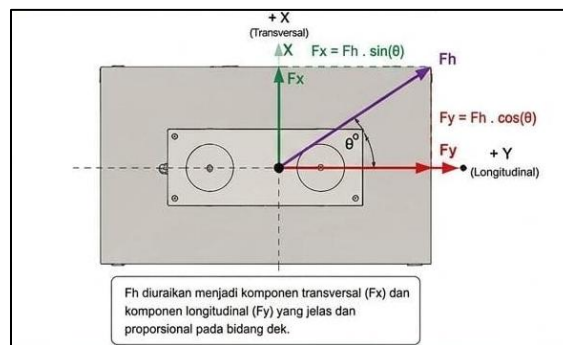
Gaya yang bekerja sejajar dengan sumbu memanjang kapal (haluan-buritan). Sumbu ini sangat krusial dalam menahan beban tarikan lurus.

$$F_y = F_h \cdot \cos(\theta) \quad (2.5)$$

Dengan:

F_y = Komponen longitudinal (N)

F_h = Gaya horizontal (N)



Gambar 2. 16 Penguraian Gaya Longitudinal
(Penulis, 2026)

- **Komponen Transversal (F_x)**

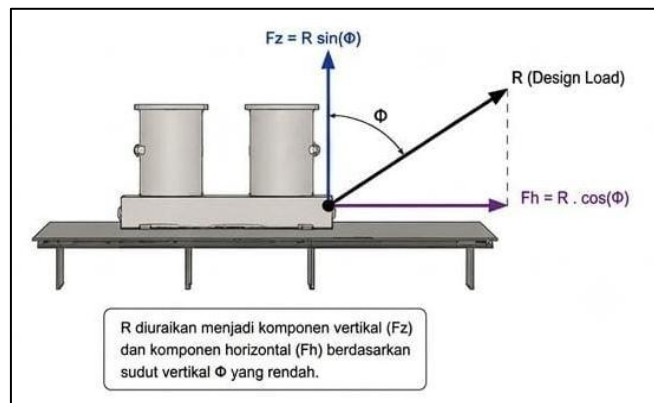
Gaya yang bekerja tegak lurus terhadap lambung kapal (melintang). Gaya ini memberikan tekanan samping yang signifikan pada struktur komponen.

$$F_x = F_h \cdot \sin(\theta) \quad (2.6)$$

Dengan:

F_x = Komponen transversal (N)

F_h = Gaya horizontal (N)



Gambar 2. 17 Penguraian Gaya Vertikal
(Penulis, 2026)

2.5 Analisis Tegangan pada Struktur

Analisis tegangan statis pada struktur *bollard* bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan *bollard* dalam menahan gaya tarik tali tambat yang bekerja secara konstan tanpa mempertimbangkan efek waktu atau dinamika (Cho et al., 2010). Tegangan yang dianalisis umumnya meliputi tegangan normal dan tegangan *equivalen von misses* yang timbul akibat beban tarik statis. Hasil analisis ini digunakan untuk memastikan bahwa tegangan yang terjadi masih berada di bawah tegangan izin sesuai aturan klasifikasi, sehingga *double bollard* aman digunakan pada kondisi operasi statis.

2.5.1 Tegangan

Tegangan (*stress*) adalah ukuran besarnya gaya yang bekerja di dalam suatu material akibat beban, yang dinyatakan per satuan luas (Hernández-Hernández et al., 2014). Sehingga, tegangan menunjukkan seberapa besar beban yang harus ditahan oleh material saat ditarik, ditekan, atau dibebani yang dapat menyebabkan perunahan bentuk. Secara matematis berikut adalah persamaannya:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

Dengan :

σ = Tegangan (N/mm²)

F = Gaya (N)

A = Luas penampang (mm²)

2.5.2 Tegangan Geser

Tegangan geser adalah jenis tegangan yang terjadi ketika gaya bekerja sejajar atau tangensial terhadap permukaan suatu material (Hernández-Hernández et al., 2014). Dalam konteks mekanika material dan analisis struktur, tegangan geser diukur sebagai gaya geser per satuan luas dan menunjukkan seberapa besar internal resistensi material terhadap deformasi akibat gaya paralel ini. Menurut (Haslinda, 2023), tegangan geser berbeda dari tegangan normal karena tidak bekerja secara tegak lurus terhadap bidang penampang, tetapi cenderung menyebabkan perpindahan relatif antar lapisan material yang dapat berkontribusi pada deformasi atau kegagalan geser jika melebihi ketahanan material itu sendiri. Menurut *rules Lloyd Register - Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships, 2023 [Vol. 1, Part 3, Chapt. 5, Sec 6]*, maka dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\sigma_{\text{geser}} = \frac{141}{k} \quad (2.8)$$

Dengan :

$$\sigma_{\text{geser}} = \text{Tegangan geser (N/mm}^2\text{)}$$

Tabel 2. 5 Tabel k_L Material

<i>Specified Minimum Yield Stress in MPa</i>	k_L
235	1,0
265	0,92
315	0,78
355	0,72
390	0,68
460	0,62

Sumber : Lloyd's Register, 2023

2.5.3 Tegangan Tarik

Tegangan tarik adalah jenis tegangan yang terjadi ketika suatu material dikenai gaya yang menarik dua bagian material tersebut menjauh satu sama lain, menyebabkan material mengalami pemanjangan di sepanjang arah gaya. Sehingga, gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang tegak

lurus aatau normal terhadap sumbunya. Secara matematis berikut adalah persamaannya:

$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (2.9)$$

Dengan :

σ_{tr} = Tegangan (N/mm²)

F_{tr} = Gaya tarik (N)

A = Luas penampang (mm²)

2.5.4 Tegangan *Von misses*

Menurut Cho et al., (2010), tegangan *Von misses* adalah tegangan ekuivalen yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi luluh material dengan menggabungkan seluruh komponen tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja secara bersamaan pada suatu titik. Dalam analisis kekuatan struktur, tegangan *Von misses* digunakan sebagai kriteria kegagalan berdasarkan teori energi distorsi, di mana material dinyatakan aman apabila nilai tegangan *Von misses* yang terjadi masih berada di bawah tegangan luluh atau tegangan izin material. Secara matematis berikut adalah persamaannya:

$$\sigma_{yp} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.10)$$

Dengan :

σ_{yp} = Tegangan *Von misses* (Mpa)

σ_1 = Tegangan utama 1 (Mpa)

σ_2 = Tegangan utama 2 (Mpa)

σ_3 = Tegangan utama 3 (Mpa)

2.5.5 Tegangan Izin

Tegangan izin adalah batas maksimum tegangan yang masih boleh bekerja pada suatu material atau struktur agar tetap berada dalam kondisi aman dan tidak mengalami kerusakan selama digunakan. Nilai ini ditetapkan lebih rendah dari kekuatan material sebenarnya untuk memberikan cadangan keamanan terhadap ketidakpastian beban, variasi material, serta kondisi operasi. Dengan menggunakan tegangan izin, perancangan struktur diharapkan mampu beroperasi secara andal tanpa terjadi deformasi berlebih maupun kegagalan. Menurut *rules Lloyd Register - Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships, 2023 [Vol. 1, Part 3, Chapt. 5, Sec 6]*, maka dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\sigma_{\text{izin}} = \frac{235}{k} \quad (2.11)$$

Dengan :

σ_{izin} = Tegangan izin (N/mm²)

k = faktor koreksi material

Tabel 2. 5 Tabel k_L Material

<i>Specified Minimum Yield Stress in MPa</i>	k_L
235	1,0
265	0,92
315	0,78
355	0,72
390	0,68
460	0,62

Sumber : Lloyd's Register, 2023

2.6 Deformasi

Deformasi struktur merupakan perubahan bentuk atau perpindahan yang terjadi akibat adanya pembebanan (Adin, 2025). Pada *double bollard*, deformasi terjadi ketika gaya tarik tali bekerja pada badan *bollard* dan diteruskan menuju pelat dasar serta struktur pendukung. Besarnya deformasi dipengaruhi oleh besar dan arah pembebanan, sifat material, bentuk geometri,

kondisi tumpuan, serta kekakuan struktur. Dalam penelitian ini, pembebanan diberikan pada permukaan badan silinder *double bollard* yang diasumsikan sebagai area kontak dengan tali. Gaya tarik tersebut menyebabkan badan bollard mengalami pembengkokan dan perpindahan ke arah pembebanan.

Selama tegangan yang terjadi masih berada di bawah tegangan luluh material, deformasi bersifat elastis sehingga struktur dapat kembali mendekati bentuk semula setelah beban dilepaskan. Namun, apabila tegangan melampaui tegangan luluh, struktur dapat mengalami deformasi permanen yang berpotensi mengurangi kemampuan struktur dalam menerima pembebanan. Dalam analisis metode elemen hingga, deformasi umumnya ditampilkan sebagai *total deformation*, yaitu nilai perpindahan total struktur akibat beban yang diberikan.

Pada penelitian ini, nilai deformasi maksimum digunakan untuk membandingkan kekakuan *double bollard Type A* dan *Type B* pada setiap variasi sudut pembebanan. Pada kondisi pembebanan, material, dan tumpuan yang sama, struktur dengan nilai deformasi lebih kecil menunjukkan kekakuan yang lebih baik. Namun, deformasi tidak digunakan sebagai satu-satunya dasar penilaian keamanan karena tidak terdapat batas deformasi izin yang spesifik untuk *double bollard* dalam *rules Lloyd's Register* maupun ISO 13795. Oleh karena itu, keamanan struktur terutama dievaluasi berdasarkan tegangan dan *safety factor*, sedangkan deformasi digunakan sebagai parameter pendukung dalam menentukan jenis *double bollard* yang lebih optimal.

2.7 Safety factor

Menurut (Wikipedia, 2026), Faktor keamanan (*safety factor* atau FoS) adalah rasio antara kemampuan kekuatan struktur atau material dengan beban aktual yang bekerja selama operasi. Ini menunjukkan seberapa besar margin keamanan suatu struktur dibandingkan dengan beban maksimum yang diharapkan agar struktur tersebut tetap aman dan tidak gagal, termasuk mempertimbangkan ketidakpastian pembebanan dan variabilitas sifat material. Secara umum, *safety factor* dihitung dengan membagi batas kekuatan material (misalnya *yield strength* atau *ultimate strength*) dengan tegangan atau beban yang terjadi dalam analisis, sehingga nilai *safety factor* lebih besar dari 1

menunjukkan struktur memiliki margin keamanan terhadap kegagalan (Pawara et al., 2022). Rasio ini digunakan untuk mengevaluasi apakah hasil analisis kekuatan seperti dari metode elemen hingga (*Finite Element Method*) telah memenuhi kriteria keselamatan yang ditetapkan oleh standar desain atau badan klasifikasi maritim.

$$Factor\ of\ Safety = \frac{yield\ stress}{working\ stress} \quad (2.12)$$

2.8 Material Bollard

Bollard pada bagian buritan (*aft bollard*) kapal *harbour tug* merupakan salah satu peralatan dek yang berfungsi penting dalam operasi *berthing*, sehingga harus memiliki kekuatan struktur yang memadai untuk menahan gaya tarik besar. Dalam penentuan material yang tepat, harus memiliki karakteristik mekanik minimum dari *double bollard* ISO 13795. Bahwa standar tersebut tidak menetapkan jenis atau *grade* baja tertentu, melainkan mensyaratkan penggunaan baja yang memiliki kemampuan las (*weldable steel*) dengan tegangan luluh (*yield strength*) minimum sebesar 235 MPa.

Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah baja karbon ASTM A36. Pemilihan ASTM A36 didasarkan pada karakteristik mekaniknya yang memenuhi persyaratan minimum ISO 13795, yaitu memiliki tegangan luluh minimum sebesar 250 MPa, sehingga lebih tinggi dari persyaratan minimum standar sebesar 235 MPa. Dengan karakteristik tersebut, ASTM A36 dinilai sesuai untuk digunakan sebagai material pemodelan dan analisis kekuatan *double bollard* pada penelitian ini.

Setiap material memiliki karakteristik mekanik yang berbeda-beda yang akan memengaruhi respons struktur terhadap pembebanan. Oleh karena itu, karakteristik mekanik material ASTM A36 yang digunakan dalam penelitian ini perlu diketahui sebagai dasar dalam proses analisis menggunakan metode elemen hingga. Parameter karakteristik mekanik dari material ASTM A36 dapat dilihat pada Tabel 2.6 berikut.

Tabel 2. 6 Karakteristik Mekanik Material ASTM A36

Strength (MPa)		Elongation at Break (%)		Modulus of Elasticity (GPa)	Shear Modulus	Bulk Modulus	Poisson Ratio
Tensile	Yield	200 mm	50 mm				
500	250	20	23	200	79,3	140	0,26

Sumber : Senthilkumar et al., 2023

2.9 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*Finite Element Method*) adalah suatu metode numerik untuk memperoleh solusi pendekatan dari suatu masalah yang dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial parsial, dimana domain masalah dipecah menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) sehingga perhitungan numerik dapat dilakukan dengan lebih efisien untuk berbagai masalah teknik dan struktur yang kompleks (Sulandari & Pranata, 2012). Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga untuk menganalisis kekuatan setiap bagian pada suatu material secara rinci. Sehingga, besar tegangan pada suatu struktur dapat diidentifikasi dengan lebih spesifik.

Analisis elemen hingga dapat dilakukan dengan *software* melalui tiga tahap, yaitu *preprocessor*, *solver*, dan *post-processor* (Ubaidah, 2024). Tahap *pre-processor* terdiri dari tahap penentuan material, pemodelan, pengaturan geometri, pengaturan *meshing*, dan penentuan kondisi batas. Sedangkan tahap *solver* merupakan tahap perhitungan persamaan elemen hingga yang bertujuan untuk mendefinisikan nilai-nilai pada setiap elemen atau *nodal*. Tahap akhir dari analisis elemen hingga adalah tahap *pro-processor*. Pada tahap ini, disajikan hasil analisis dalam bentuk citra atau visualisasi nilai-nilai yang telah didefinisikan pada tahap *solver*.

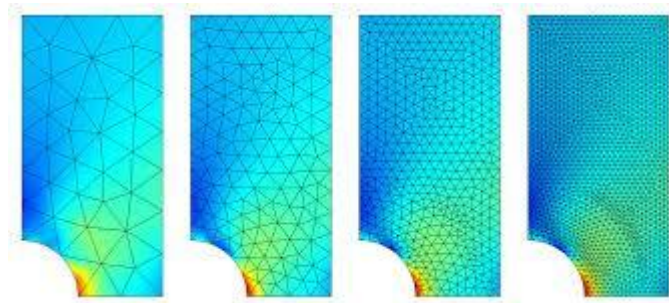
2.10 Konvergensi *Meshing*

Konvergensi mesh dilakukan untuk memastikan bahwa hasil analisis, khususnya nilai tegangan yang diamati, telah mencapai tingkat akurasi yang memadai dan tidak lagi mengalami perubahan yang signifikan akibat perubahan ukuran mesh (Patil, H., & Jeyakarthikeyan, 2018). Proses ini merupakan bagian penting dari *pre-processing* sebelum analisis dilakukan,

karena jaringan elemen tersebut akan menjadi dasar untuk menyusun persamaan numerik yang digunakan dalam perhitungan tegangan, regangan, dan perpindahan struktur di bawah beban tertentu.

2.10.1 Parameter *Meshing*

Salah satu pendekatan yang sering digunakan adalah uji konvergensi mesh, konvergensi mesh dimaksudkan untuk memastikan simulasi memiliki hasil penyelesaian yang akurat. Mesh yang besar dapat memberikan hasil yang tidak akurat, sehingga disarankan menggunakan mesh yang lebih kecil (Faveryan et al., 2024). Ketika perubahan nilai tersebut berada di bawah ambang toleransi tertentu (misalnya persentase kecil seperti $<10\%$), maka solusi dianggap sudah konvergen dan mesh tersebut dapat dipilih sebagai representasi yang akurat dari perilaku fisik struktur. Prosedur ini tidak hanya memastikan bahwa solusi numerik tidak terlalu dipengaruhi oleh ukuran elemen, tetapi juga membantu menghindari komputasi yang berlebihan pada mesh yang terlalu halus tanpa peningkatan akurasi signifikan.



Gambar 2. 18 *Meshing*
(encrypted, n.d.)

2.11 Rules

Pemilihan *rules Lloyd's Register* didasarkan pada fakta bahwa perusahaan tempat pelaksanaan OJT secara konsisten menerapkan standar klasifikasi *Lloyd's Register* dalam perancangan, evaluasi, dan inspeksi struktur kapal. Penggunaan *rules Lloyd's Register* memastikan bahwa analisis dan perencanaan yang dilakukan selaras dengan praktik industri yang berlaku di perusahaan, sehingga hasil kajian dapat langsung diimplementasikan dan relevan terhadap kebutuhan operasional nyata. Selama masa OJT,

implementasi *rules Lloyd's Register* dilakukan dalam penentuan kapasitas peralatan *deck*, evaluasi kekuatan struktur, penetapan *equipment number*, serta verifikasi desain berdasarkan persyaratan keselamatan dan keandalan struktur kapal. Penelitian ini menggunakan beberapa *rules Lloyd's Register*, yaitu *Lloyd's Register Rules and Regulations - Rules and Regulations for the Classification of Ships, July 2022* dan *Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships, January 2023*.

2.12 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang digunakan penulis sebagai acuan penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini dapat dilihat pada tabel 2.5 dibawah ini.

Tabel 2. 7 Penelitian Terdahulu

No	Parameter	Judul Terdahulu			Penulis
		Analisis Kekuatan <i>Cruciform Bollard</i> pada <i>Harbour tug</i> dengan Variasi Pembebanan menggunakan Metode Elemen Hingga (Rahmana, 2021)	Analisis Kekuatan Pondasi <i>Bollard</i> Pada Tongkang Santan 195 Dengan Metode Elemen Hingga (Samudera, Irwan Putera., Hartono Yudo, 2017)	Analisis Kekuatan <i>Double Bollard Cruciform</i> dengan Variasi Diameter pada Kapal <i>Loading Facility</i> Mengguna kan Metode Elemen Hingga (Rahmania h, 2024)	Optimalisasi Jenis <i>Double Bollard</i> pada <i>Harbour Tug</i> Berdasarkan Variasi Sudut Pembebanan Menggunakan Metode Elemen Hingga

No	Parameter	Judul Terdahulu			Penulis
1	Jenis Kapal	Kapal <i>Harbour tug</i>	Kapal Tongkang	Kapal <i>Loading Facility</i>	Kapal <i>Harbour tug</i>
2	Perbandingan	Variasi pembebanan (25%, 50%, 75%, 100%, 110% daripada SWL) .	Variasi jumlah bracket (2, 3, 4 bracket) dan arah derajat (0°, 30°, 45°, 60°, 90°).	Variasi diameter (10", 12", 14", 16")	Variasi jenis <i>double bollard</i> (ISO 13795 <i>Type A</i> dan ISO 13795 <i>Type B</i>) dan variasi sudut pembebanan (horizontal 0°-90° dan vertikal 25°)
3	Analisis	Gaya tarik maksimal, tegangan, tegangan maksimum dengan pengganti material, deformasi maksimum dengan pengganti material.	Tegangan dan regangan.	Gaya tarik maksimal, tegangan, deformasi, <i>safety factor</i> , beban maksimal (SWL) dan kabaruan desain.	<i>Nominal size terbaru</i> , tegangan maksimum, deformasi, <i>safety factor</i> , dan pembaruan jenis <i>double bollard</i> .
4	Hasil	Hasil yang didapatkan	Hasil yang didapatkan	Hasil yang didapatkan	Hasil yang didapatkan

No	Parameter	Judul Terdahulu			Penulis
		adalah dari 5 kondisi pembebanan dapat dikatakan aman karena tegangan aktual tidak lebih dari tegangan izin dan nilai <i>safety factor</i> tidak lebih dari 1,67.	adalah nilai analisis kekuatan pada pondasi <i>bollard</i> dan mengetahui i beberapa variasi pada <i>bollard</i> untuk mengurangi i kerusakan ketika tegangan maksimum .	adalah dari 4 variasi diameter dapat dikatakan aman karena tegangan aktual tidak lebih dari tegangan izin.	adalah dari 7 variasi sudut pembebanan pada kedua jenis <i>double bollard</i> diperoleh jenis <i>double bollard type</i> B yang optimal karena tegangan aktual tidak lebih dari tegangan izin dan nilai <i>safety factor</i> tidak lebih dari 1 pada semua kondisi sudut pembebanan.

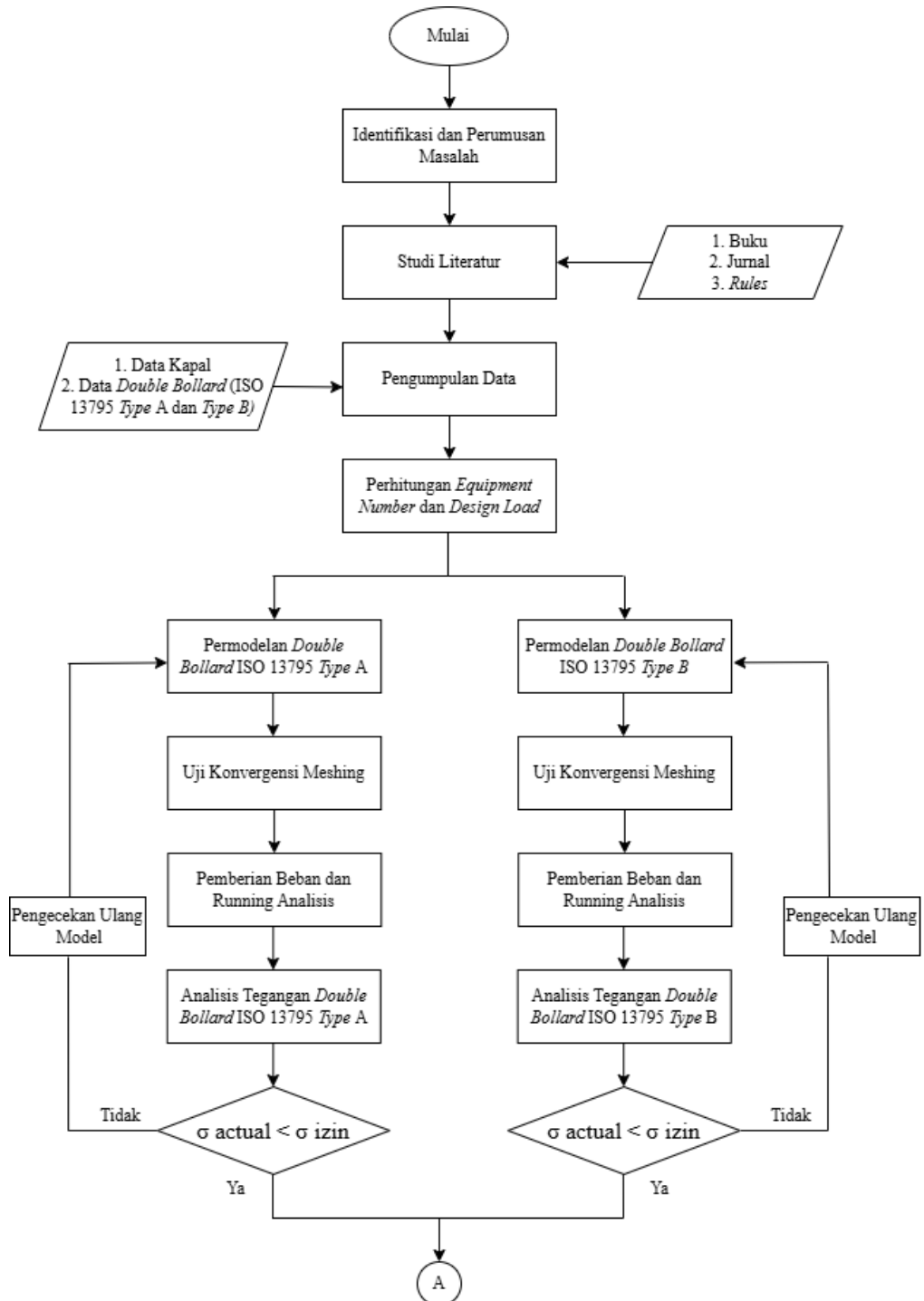
Sumber : Penulis, 2026

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3

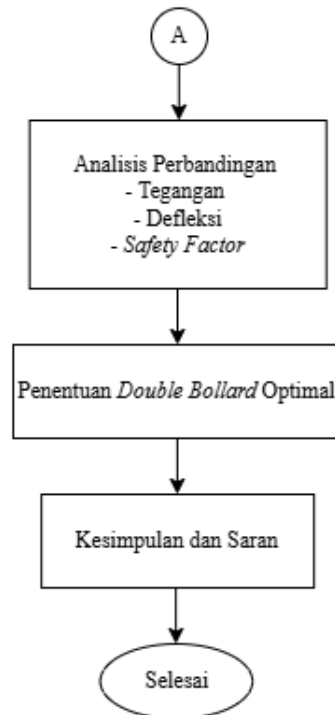
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Metodologi

(Penulis, 2026)



Gambar 3. 2 Diagram Alir Metodologi Lanjutan

(Penulis, 2026)

3.2 Langkah-Langkah Penelitian

Berdasarkan diagram alir penelitian tersebut dapat dijelaskan lagi terkait langkah-langkah dalam pengerjaan penelitian:

3.2.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan terkait kebutuhan pemilihan jenis *double bollard* pada *harbour tug* yang mampu menahan gaya tarik pada berbagai arah pembebanan. Perbedaan geometri antara *double bollard Type A* dan *Type* dapat menghasilkan respons struktur yang berbeda ketika menerima beban tarik. Oleh karena itu, permasalahan penelitian dirumuskan untuk menentukan spesifikasi *double bollard* berdasarkan *Equipment Number*, menentukan *design load*, menganalisis tegangan, deformasi, dan *safety factor* pada kedua tipe *double bollard*, serta menentukan jenis yang paling optimal berdasarkan hasil analisis metode elemen hingga.

3.2.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh dasar teori dan data pendukung penelitian. Sumber yang digunakan meliputi jurnal nasional dan internasional, buku, standar ISO 13795, *rules Lloyd's Register*, katalog *double bollard*, serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan analisis kekuatan struktur, pembebanan *bollard*, dan metode elemen hingga. Studi literatur digunakan sebagai dasar penentuan geometri model, material, pembebanan, kondisi batas, serta kriteria evaluasi hasil analisis.

3.2.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui data kapal dan dokumen pendukung yang diperoleh dari lokasi OJT maupun sumber referensi yang relevan. Data yang digunakan meliputi *general arrangement* kapal, data utama kapal untuk perhitungan *Equipment Number*, data konstruksi atau lokasi pemasangan *double bollard*, spesifikasi material, serta katalog *double bollard Type A* dan *Type B* berdasarkan ISO 13795. Data tersebut digunakan sebagai dasar pemodelan geometri, penentuan kondisi batas, dan perhitungan pembebanan pada analisis metode elemen hingga.

3.2.4 Perhitungan *Equipment Number*, *Design Load*, dan *Load Case*

Data data yang sudah dikumpulkan diolah kembali dengan perhitungan yang ada sesuai dengan *rules Lloyd's Register* yang digunakan, seperti perhitungan *Equipment Number*, *Design Load*, dan *Load Case* yang ada pada Bab II di persamaan (2.1) sampai (2.6).

3.2.5 Permodelan

Permodelan 3D dilakukan dengan *software* fusion atau autocad. Model yang dibuat sesuai dengan spesifikasi yang ada dalam data yang telah didapatkan (katalog). Dalam uji validasi penelitian, model yang telah dibuat dapat dibandingkan dengan katalog dan diperoleh nilai dari selisih dari keduanya dengan batas yang dapat ditoleransi.

3.2.6 Uji Konvergensi *Meshing*

Pada tahap ini, dilakukan pengujian terhadap model 3D dengan jumlah elemen yang berbeda. *Meshing* dilakukan untuk membagi struktur model menjadi elemen kecil sebagai batas dari struktur objek dengan parameter tertentu. Konvergensi mesh yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan cara pada ukuran mana yang paling stabil yang dapat ditunjukkan dengan grafik yang berisi nilai tegangan dan ukuran mesh. Dengan begitu dapat dilihat presentase yang paling kecil dari beberapa ukuran mesh tersebut.

3.2.7 Pemberian Beban dan Analisis Running

Pemberian beban dapat dilihat pada perhitungan diatas, yaitu dari gaya tarik maksimum. Lalu dapat dianalisis untuk melihat kekuatan yang didapatkan dari setiap jenis *double bollard*. Hasil dari persamaan dari *load case* ada pada Bab II di persamaan (2.3) sampai (2.6).

3.2.8 Perbandingan Nilai Tegangan

Perbandingan nilai tegangan dapat dilakukan antara perhitungan manual (izin) dengan hasil dari analisis FEM. Acuan dari perhitungan tersebut adalah hasil analisis FEM tidak lebih besar daripada perhitungan manual. Jika tidak memenuhi maka diperlukan pengecekan ulang pada permodelan. Persamaan tegangan izin ada pada bab II di (2.11).

3.2.9 Analisis Perbandingan

Analisis perbandingan tersebut dapat dilihat dari nilai antara kedua jenis *double bollard* berdasarkan hasil analisis metode elemen hingga. Nilai yang dapat dianalisis meliputi, tegangan, deformasi, dan *safety factor* yang ada di Bab II pada persamaan (2.12).

3.2.10 Output Data

Output data yang dihasilkan adalah penentuan jenis *double bollard* yang optimal. Penentuan tersebut mengacu pada nilai dari beberapa analisis perbandingan yang telah dilakukan berdasarkan kriteria

penentuan *double bollard* optimal yang ada di Bab II pada point 2.2.4, sehingga jenis tersebut yang dapat menjadi alternatif yang tepat.

3.2.11 Kesimpulan dan Saran

Pada akhir tahapan ini, dapat dilakukan kesimpulan dari penelitian tersebut. Setelah diperoleh kesimpulan, maka didapatkan saran yang dapat membangun pengembangan dari tugas akhir selanjutnya.

3.3 Rencana Pengerjaan

Penelitian ini dapat berlangsung dengan baik dan selesai tepat waktu karena adanya perencanaan pengerjaan yang telah disusun sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Rencana Pengerjaan

No.	Kegiatan	Bulan Ke-					
		1	2	3	4	5	6
1	Pengajuan Proposal						
2	Studi Literatur						
3	Pengumpulan Data						
4	Pembuatan Model dan Analisa						
5	Pembahasan						
6	Kesimpulan dan Saran						

Sumber : Penulis, 2026

3.4 Validitas Penelitian

Menurut pandangan ilmiah, *expert judgment* didefinisikan sebagai pendapat atau penilaian terinformasi yang didasarkan pada pelatihan, latar belakang keilmuan, serta pengalaman mendalam yang dimiliki oleh seorang ahli di bidang spesifik, terutama ketika data empiris yang tersedia kurang memadai atau terbatas (Skjong & Wentworth, 2001). Kegiatan *expert judgement* ini bertujuan untuk menilai kesesuaian desain, asumsi pembebanan, dan tahapan analisis yang diterapkan dalam penelitian, sehingga model yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi aktual serta memenuhi prinsip-prinsip rekayasa yang berlaku.

Proses *expert judgement* dilakukan oleh:

1. Tri Tiyasmihadi, S.T., M.T., dosen Program Studi Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang memiliki kompetensi pada bidang desain dan konstruksi kapal. Evaluasi dilakukan terhadap model yang mencakup perbandingan berat antara model 3D dengan berat aktual yang tercantum dalam katalog produk.
2. Kiki Dwi Wulandari, S.T., M.T., dosen bidang Konstruksi dan Struktur Kapal serta Manajemen Proyek. Evaluasi dilakukan terhadap asumsi pembebanan, variasi *load case*, serta metode analisis struktur.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Kapal

Data kapal yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah data ukuran utama kapal (*Principal Dimension*), gambar rencana umum (*General Arrangement*), gambar konstruksi, gambar detail *double bollard*. Seluruh gambar tersebut dijelaskan pada Lampiran 1 hingga Lampiran 4, dan ukuran utama kapal dijelaskan pada Tabel 4.1 ini.

Tabel 4. 1 Data Ukuran Utama Kapal

Data Ukuran Utama Kapal	
<i>Type</i>	<i>Harbour tug</i>
<i>Length Overall</i> (LOA)	28,25 m
<i>Length Waterline</i> (LWL)	27,60 m
<i>Length Between Perpendicular</i> (LBP)	26,00 m
<i>Breadth</i> (B)	8,30 m
<i>Depth</i> (H)	3,90 m
<i>Draft</i> (T)	3,10 m
<i>Speed</i>	14,00 knot
<i>Main Engine</i>	2 x 1035 BHP

Sumber : Penulis, 2026

4.2 Perhitungan *Equipment Number*

Dalam proses perhitungan *equipment number* ini dilakukan sebagai dasar penentuan spesifikasi *double bollard* yang akan digunakan dalam permodelan. Perhitungan dilakukan dari awal karena data *existing* yang dapat dijadikan acuan tidak tersedia secara memadai. Oleh karena itu, penentuan spesifikasi *double bollard* dilakukan berdasarkan pendekatan perhitungan *equipment number* sesuai *rules Lloyd's Register* pada Bab II di persamaan (2.1), sehingga diperoleh *nominal size double bollard* yang sesuai dengan kebutuhan operasional.

$$\begin{aligned}
 EN &= \Delta^{2/3} + 2,5 At + A/10 \\
 &= 401,39^{2/3} + 2,5 (57,39) + (92,4/10) \\
 &= 207,13
 \end{aligned}$$

Dengan :

Δ = Displacement (ton)

At = Luas proyeksi melintang (m^2) dari *hull, superstruture, houses, masts* diatas sarat desain

A = Luas tampilan profil (m^2) dari *hull, superstruture, houses, masts* diatas sarat desain

Maka, *range equipment number* adalah 205-240

Tabel 4. 2 *Equipment Number Towline*

Equipment Number		Equipment Letter	Towline	
Exceeding	Not Exceeding		Minimum length (m)	Minimum breaking strength (kN)
50	70	A	180	98
70	90	B	180	98
90	110	C	180	98
110	130	D	180	98
130	150	E	180	98
150	175	F	180	98
175	205	G	180	112
205	240	H	180	129
240	280	I	180	150
280	320	J	180	174

Sumber : Lloyd's Register, 2023

Didapatkan *minimum breaking strength* = 129 kN

Dimana, *nominal size* untuk menentukan spesifikasi *double bollard* didapat dari *minimum breaking strength* dengan nilai 129 kN.

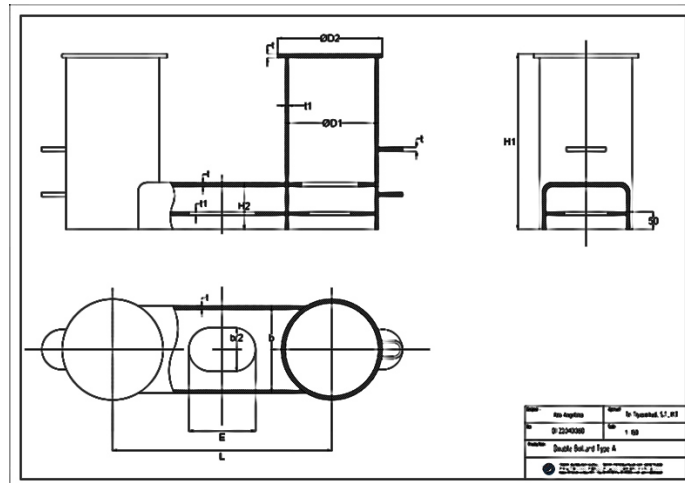
4.2.1 Penentuan Size *Double bollard*

Penentuan *size double bollard* dilakukan berdasarkan *minimum breaking strength* yang telah diperoleh dari hasil perhitungan sebelumnya. Nilai *minimum breaking strength* tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan *nominal size double bollard* beserta

dimensi utama dan berat *double bollard* berdasarkan katalog sebagai parameter dalam analisis struktur.

1. *Double bollard Type A*

Dalam penelitian ini, dipilih *double bollard type A* dengan *nominal size 250A* sebagai subjek analisis struktur karena memiliki karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan desain.



Gambar 4. 1 Katalog *double bollard type A*
(Seakong Marine Machinery Co, n.d.)

Tabel 4. 3 *Nominal Size Double Bollard Type A*

Nominal size	SWL		Weight (kg)
	Mooring (t)	Towing (t)	
150	5,5	10	29
200	8,4	13	46
250A	16	27	107
250B	13	22	91
300A	34	62	281
300B	19	36	166

Sumber : Seakong Marine Machinery Co

Tabel 4. 4 Spesifikasi *Double Bollard Type A*

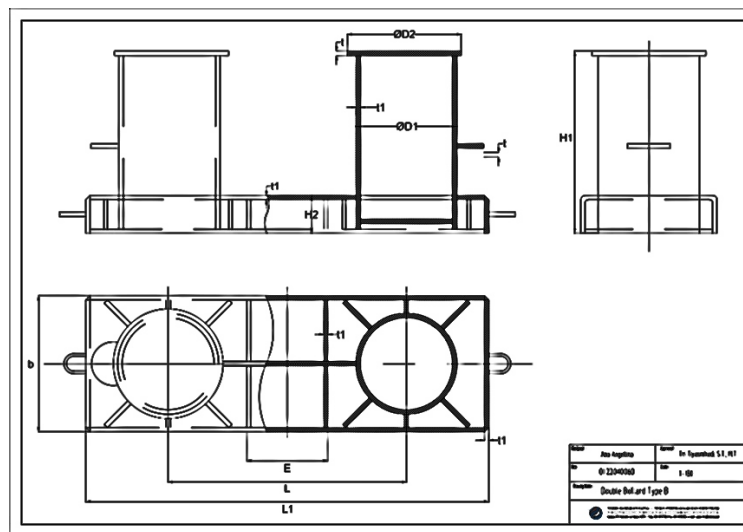
Nominal size	D1	D2	H1	H2	b	L	E	t	t1
150	165,2	185	330	90	155	400	-	8	6
200	216,3	240	395	115	205	500	-	8	6
250A	267,4	290	505	135	250	630	-	12	9
250B	267,4	290	505	135	250	630	-	10	8

300A	318,5	340	600	150	290	800	300	21,5	16
300B	318,5	340	600	150	290	800	300	12	9

Sumber : Seakong Marine Machinery Co

2. Double bollard Type B

Dalam penelitian ini, dipilih *double bollard type B* dengan *nominal size 250A* sebagai subjek evaluasi struktur karena memiliki karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan desain.



Gambar 4. 2 Katalog *double bollard type B*
(Seakong Marine Machinery Co, n.d.)

Tabel 4. 5 *Nominal Size Double Bollard Type B*

Nominal size	SWL		Weight (kg)
	Mooring (t)	Towing (t)	
150	5,5	10	29
200	8,4	13	46
250A	16	27	107
250B	13	22	91
300A	34	62	281
300B	19	36	166

Sumber : Seakong Marine Machinery Co

Tabel 4. 6 Spesifikasi *Double Bollard Type B*

Nominal size	D1	D2	H1	H2	b	L	L ₁	E	t	t ₁
150	165,2	185	320	80	225	400	670	145	8	8

200	216,3	240	365	85	290	500	860	160	8	8
250A	267,4	290	470	100	360	630	1065	215	12	11
250B	267,4	290	470	100	360	630	1065	215	10	8
300A	318,5	340	575	125	430	800	1300	325	22	20
300B	318,5	340	575	125	430	800	1300	325	12	9

Sumber : Seakong Marine Machinery Co

4.3 Pembebanan yang Ditanggung *Double bollard*

Proses penentuan pembebanan pada *double bollard* diawali dari spesifikasi kapal, khususnya kapasitas *main engine* sebagai parameter utama. Kapasitas *main engine* tersebut digunakan untuk memperkirakan kemampuan tarik kapal yang dinyatakan dalam *bollard pull*. Selanjutnya, nilai *bollard pull* dijadikan dasar dalam menentukan *design load* yang bekerja pada *bollard* sesuai dengan *rules Lloyd's Register*.

4.3.1 *Bollard Pull*

Nilai *bollard pull* (BP) ditentukan berdasarkan kapasitas *main engine* yang tercantum pada data *principal dimension*. Daya mesin utama (BHP) digunakan sebagai dasar untuk mengestimasi kemampuan tarik kapal, dimana semakin besar BHP maka semakin besar pula *bollard pull* yang dihasilkan. Rumus *bollard pull* yang digunakan terdapat pada Bab II di persamaan (2.2).

$$\begin{aligned}
 \text{Bollard pull} &= \frac{\text{BHP} \times 1,26}{100} \\
 &= \frac{2070 \times 1,26}{100} \\
 &= 26,08 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Dengan :

$$\text{BP} = \text{Bollard pull (Ton)}$$

$$\text{BHP} = \text{Kapasitas main engine}$$

Dikonversi,

$$\begin{aligned}
 \text{Bollard pull} &= 26,08 \text{ ton} \times g \\
 &= 26,08 \text{ ton} \times 9.81 \\
 &= 255,86 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

4.3.2 Design Load

Berdasarkan *Rules and Regulations for the Classification of Ships, July 2022 [Part 4, Chap 3, Sec 7]* dan Tabel 2.2 khususnya pada *tug*, nilai *design load* berasal dari nilai *bollard pull* yang sudah dikonversi menjadi kN.

$$\text{Bollard pull} = 255,86 \text{ kN}$$

Maka,

$$\text{Design force} : \text{bollard pull} > 400 \text{ kN}$$

$$\text{Design load} = 2.5 \times \text{bollard pull}$$

$$= 2,5 \times 255,86 \text{ kN}$$

$$= 639,66 \text{ kN}$$

$$= 639.661 \text{ N}$$

4.3.3 Load Case

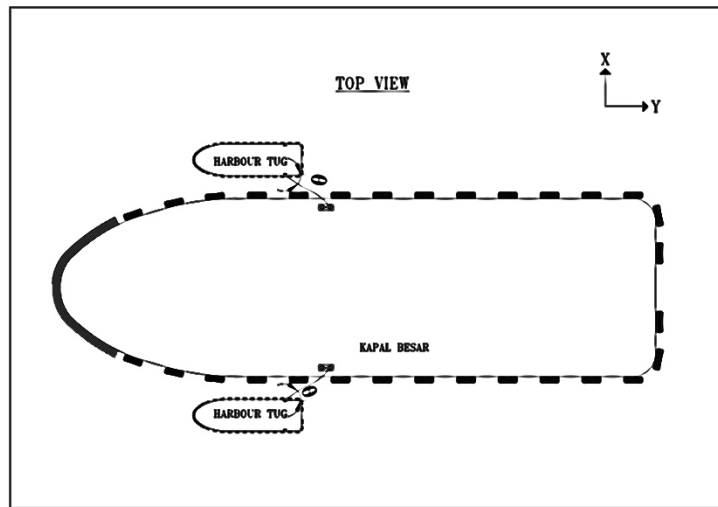
Penentuan skenario pembebanan (*load case*) dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan struktur *double bollard* terhadap variasi arah gaya tarik yang mungkin terjadi selama operasional kapal di pelabuhan. Mengacu pada prosedur teknis, *design load* yang dihasilkan oleh *harbour tug* sebesar 639.661 N yang didistribusikan ke dalam tujuh skenario utama berdasarkan variasi sudut horizontal (θ) 0° - 90° dengan sudut vertikal (Φ) tetap sebesar 25° .

Tabel 4. 7 Load Case

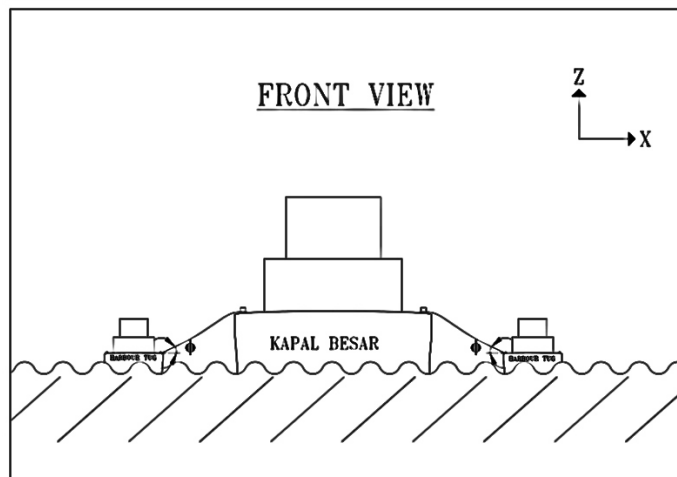
No	Load Case	Sudut Horiz (θ)	Sudut Vert (ϕ)	Transversal (Fx) (N)	Longitudinal (Fy) (N)	Vertical (Fz) (N)
1	Case 1	0	25	0	579.730	270.332
2	Case 2	15	25	150.045	559.976	270.332
3	Case 3	30	25	289.865	502.061	270.332
4	Case 4	45	25	409.931	409.931	270.332
5	Case 5	60	25	502.061	289.865	270.332
6	Case 6	75	25	559.976	150.045	270.332
7	Case 7	90	25	579.730	0	270.332

Sumber : Penulis, 2026

Dengan load case yang terdapat pada tabel 4.3, dapat dibuktikan dengan beberapa sketsa desain seperti berikut :



Gambar 4. 3 *Top view* variasi sudut horizontal
(Penulis, 2026)



Gambar 4. 4 *Front view* sudut vertikal 25°
(Penulis, 2026)

4.3.4 Perhitungan Tegangan Izin

Menurut *rules Lloyd Register - Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships*, 2023 [Vol. 1, Part 3, Chapt. 5, Sec 6], untuk menghitung tegangan izin pada *double bollard* dapat menggunakan persamaan pada Bab II di persamaan (2.12) berikut:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{izin ASTM A36}} &= \frac{235}{k} \\ &= \frac{235}{1}\end{aligned}$$

$$= 235 \text{ MPa}$$

Dengan :

k = faktor koreksi material (1,0)

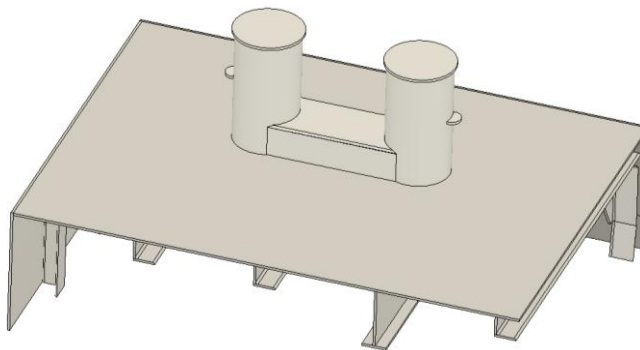
Berdasarkan hasil perhitungan tegangan izin tersebut diperoleh hasil sebesar 235 MPa yang dapat digunakan sebagai acuan dalam penerimaan tegangan aktual dari simulasi *software* dan hasil simulasi sendiri tidak boleh lebih besar dari nilai tegangan yang diizinkan.

4.4 Simulasi dan Analisis Kekuatan dengan Metode Elemen Hingga

Tahapan analisis kekuatan struktur dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan simulasi numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM). Metode ini dipilih untuk memprediksi distribusi tegangan, deformasi, serta faktor keamanan pada struktur *double bollard* saat menerima beban operasional dari berbagai sudut tarikan yang telah ditentukan pada skenario *load case*.

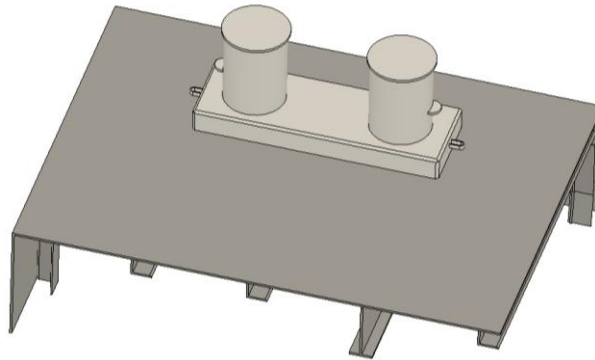
4.4.1 Permodelan *Double bollard*

Proses pemodelan geometri merupakan tahap awal yang krusial sebelum dilakukan analisis numerik guna memastikan representasi fisik struktur mendekati kondisi aktual di atas geladak kapal. Pada tahapan ini, pemodelan dilakukan terhadap dua varian desain, yaitu *double bollard type A* dan *double bollard type B*, yang masing-masing memiliki karakteristik spesifikasi berbeda berdasarkan katalog standar komponen perkapalan. Model masing-masing *double bollard* dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 dibawah ini :



Gambar 4. 5 Model *double bollard type A*

(Penulis, 2026)



Gambar 4. 6 Model *double bollard type B*

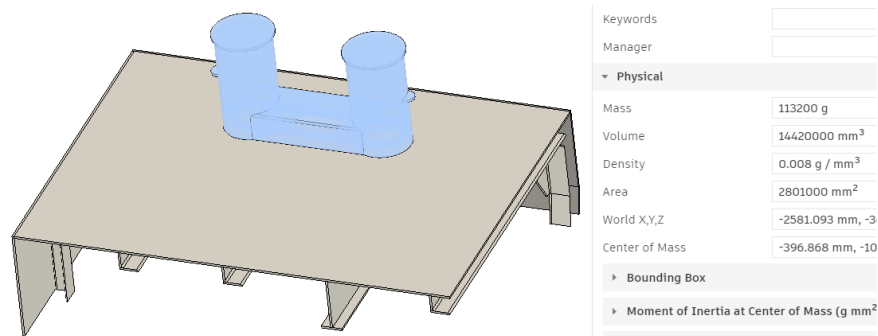
(Penulis, 2026)

Berdasarkan model yang telah dibuat, harus divalidasi terlebih dahulu. Validasi yang digunakan adalah dengan membandingkan antar model yang sudah dibuat dengan katalog double bollard ISO 13795 yang dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.

Tabel 4. 8 Validasi Model dengan *Katalog*

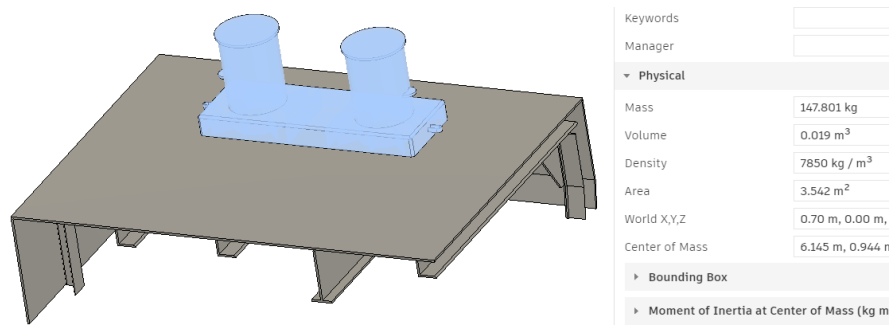
Komponen	Berat di Katalogue (kg)	Berat di Model (kg)	Selisih
<i>Double bollard Type A</i>	107	113,2	5,8%
<i>Double bollard Type B</i>	150	147,801	-1,5%

Sumber : Penulis, 2026



Gambar 4. 7 Validasi Berat *Double bollard Type A*

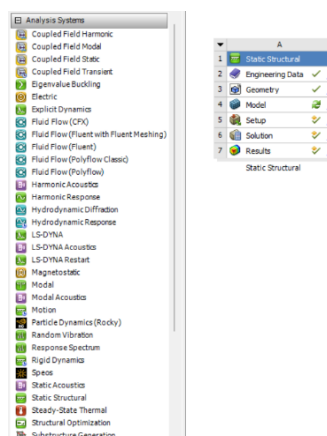
(Penulis, 2026)



Gambar 4. 8 Validasi Berat *Double bollard Type B*
(Penulis, 2026)

4.4.2 Analisis Menggunakan Metode Elemen Hingga

Analisis kekuatan struktur diawali dengan mempersiapkan kerangka kerja simulasi. Prosedur ini dilakukan dengan memilih modul *Explicit Dynamics* pada panel sistem, kemudian mengintegrasikannya ke dalam *Project Schematic*. Modul ini mencakup rangkaian tahapan sistematis yang harus diselesaikan secara berurutan, mulai dari input data material (*Engineering Data*), pembuatan atau impor geometri (*Geometry*), pengaturan diskritisasi dan hubungan antar komponen (*Model*), penentuan parameter beban dan batas (*Setup*), hingga proses komputasi (*Solution*) dan visualisasi data hasil simulasi (*Result*). Keseluruhan alur kerja simulasi tersebut dapat dilihat secara mendetail pada Gambar 4.9 di bawah ini:

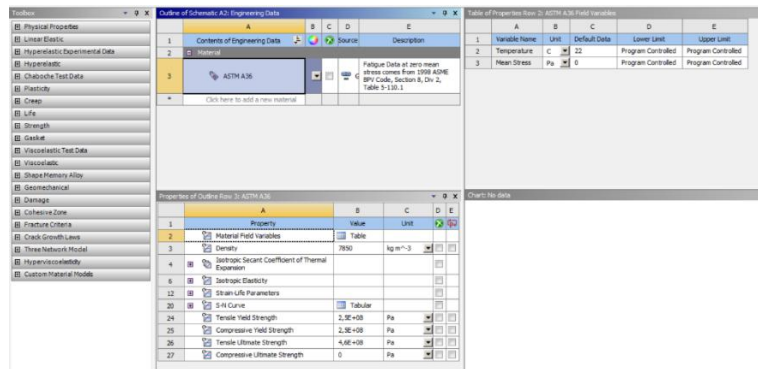


Gambar 4. 9 Metode Elemen Hingga
(Penulis, 2026)

4.4.3 Pemilihan Material

Pemilihan material digunakan untuk menentukan jenis material pada double bollard sesuai dengan keadaan asli dari material tersebut. Material yang digunakan pada double bollard adalah ASTM A36 dengan spesifikasi terdapat pada Bab II Tabel 2.5.

Gambar pemilihan material pada analisis dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut :

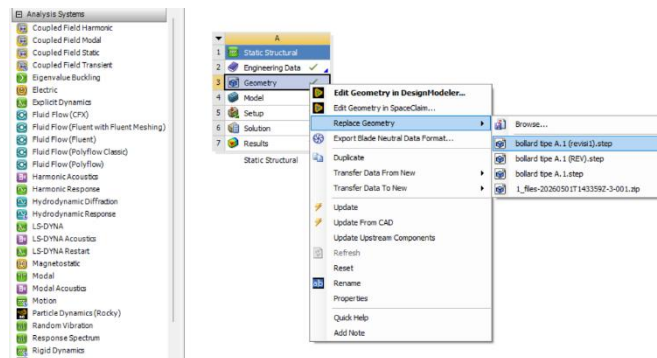


Gambar 4. 10 Pemilihan Material

(Penulis, 2026)

4.4.4 Pemilihan Geometry

Tahapan *geometry* merupakan proses penentuan dan pemuatan model *double bollard* yang telah didesain sebelumnya untuk diproses ke fase simulasi berikutnya. Akses menuju pengaturan simulasi lebih lanjut dilakukan dengan melakukan interaksi pada opsi model, di mana pada tahap ini, *geometry* akan dipersiapkan untuk proses diskritisasi (*meshing*) dan penentuan kondisi batas. Detail dari prosedur pemilihan dan aktivasi model *geometry* ini dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut:



Gambar 4. 11 *Geometry*

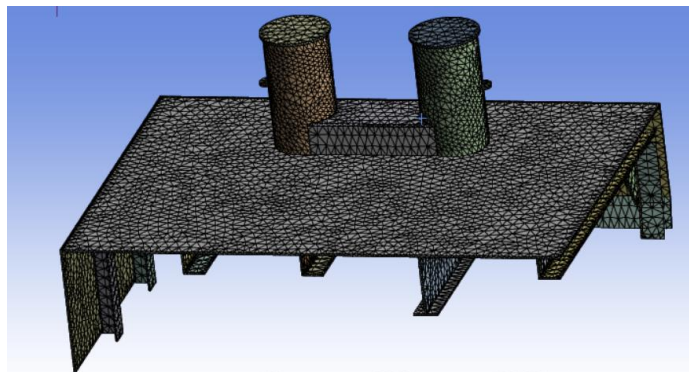
(Penulis, 2026)

4.4.5 *Meshing*

Proses *meshing* dilakukan dengan membagi geometri *double bollard* menjadi elemen-elemen kecil guna memetakan distribusi tegangan secara detail. Parameter utama yang ditentukan dalam tahapan ini meliputi dimensi elemen dan tipe elemen yang digunakan.

1. *Double bollard Type A*

Pada langkah *meshing* ini, ukuran elemen mulai ditentukan sebesar 20 mm dengan *load case* 1 yaitu 0° yang kemudian diikuti dengan studi konvergensi mesh untuk memperoleh hasil yang paling optimal. Pada proses ini, dipilih tipe elemen *tetrahedral* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 *Meshing Double bollard Type A*

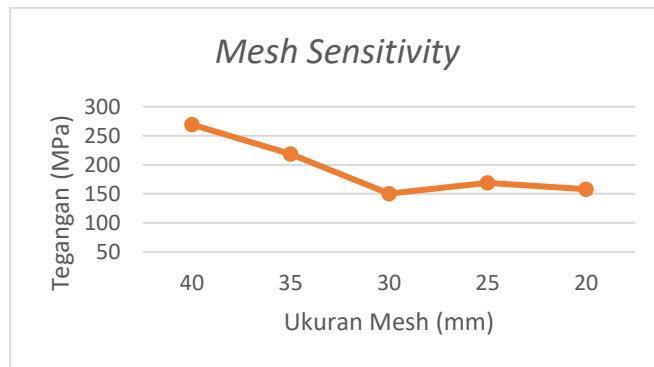
(Penulis, 2026)

Ukuran mesh yang digunakan sebesar 20 mm hingga 40 mm dengan tegangan dan presentase pada Tabel 4.9 dan garfik *mesh sensitivity* pada Gambar 4.13.

Tabel 4. 9 *Size mesh double bollard type A*

MESHING			
No	Size Mesh (mm)	Equivalent Stress (MPa)	Presentase
1	40	269,27	
2	35	218,31	18,9%
3	30	150,26	31,2%
4	25	168,65	12,2%
5	20	158,08	6,3%

Sumber : Penulis, 2026

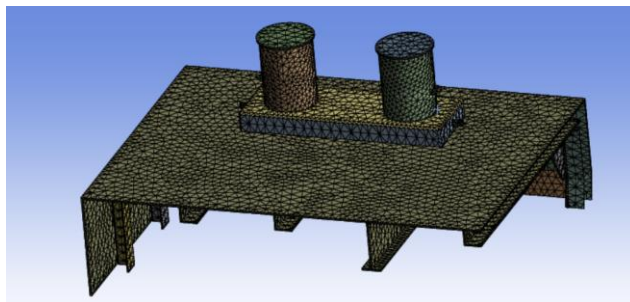


Gambar 4. 13 Grafik *size mesh double bollard type A*
(Penulis, 2026)

Berdasarkan hasil uji sensitivitas yang telah dilakukan, ditentukan bahwa ukuran mesh sebesar 20 mm merupakan ukuran mesh paling optimal dengan nilai tegangan *Von Misses* sebesar 158,08 MPa. Pemilihan ini didasarkan pada pencapaian tahap konvergensi dengan nilai persentase perbedaan terendah yaitu sebesar 6,3%, yang menunjukkan bahwa hasil simulasi telah stabil dan memiliki tingkat akurasi yang tinggi.

2. *Double bollard Type B*

Sebagai langkah awal, ukuran elemen mulai ditentukan sebesar 20 mm dengan *load case* 1 yaitu 0° yang kemudian diikuti dengan studi konvergensi mesh untuk memperoleh hasil yang paling optimal. Pada proses ini, dipilih tipe elemen *tetrahedral* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.14.



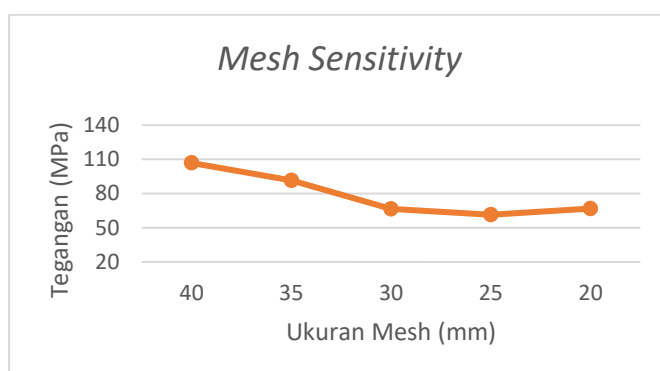
Gambar 4. 14 *Meshing Double bollard Type B*
(Penulis, 2026)

Ukuran mesh yang digunakan sebesar 20 mm hingga 40 mm dengan tegangan dan presentase pada Tabel 4.10 dan garfik *mesh sensitivity* pada Gambar 4.15.

Tabel 4. 10 *Size mesh double bollard type B*

MESHING			
No	Size Mesh (mm)	Equivalent Stress (MPa)	Presentase
1	40	106,83	
2	35	91,4	14,4%
3	30	66,6	27,1%
4	25	61,4	7,8%
5	20	66,70	8,6%

Sumber : Penulis, 2026

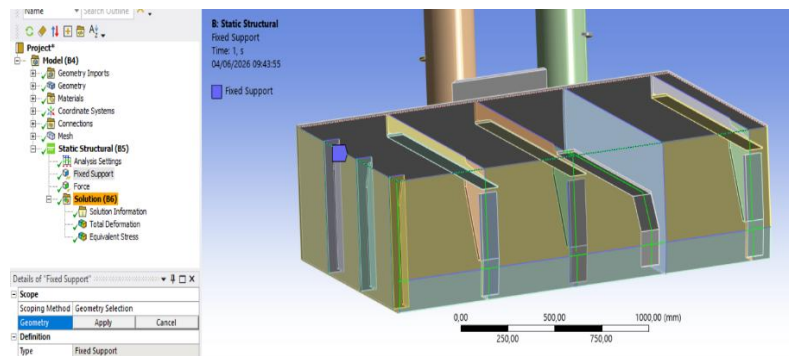


Gambar 4. 15 Grafik *size mesh double bollard type B*
(Penulis, 2026)

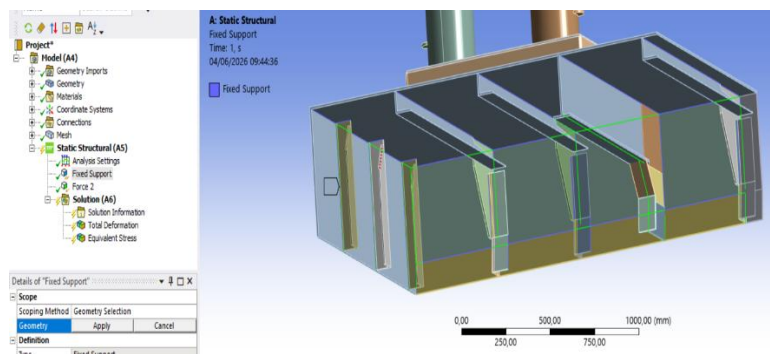
Berdasarkan hasil uji sensitivitas yang telah dilakukan, ditentukan bahwa ukuran mesh sebesar 25 mm merupakan ukuran mesh paling optimal dengan nilai tegangan *Von Misses* sebesar 61,4 MPa. Pemilihan ini didasarkan pada pencapaian tahap konvergensi dengan nilai persentase perbedaan terendah yaitu sebesar 7,8%, yang menunjukkan bahwa hasil simulasi telah stabil dan memiliki tingkat akurasi yang tinggi.

4.4.6 *Fixed Geometry*

Penentuan *fixed* model yang akan dilakukan adalah *fixed geometry* yang ada pada tahap ini. Dimana pada tahap ini penentuan letak *fixed* terletak pada *deck* kapal, yaitu sambungan las pada setiap profilnya yang akan ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17.



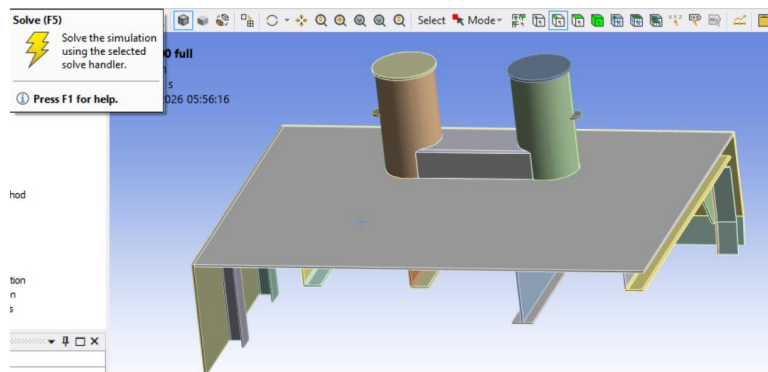
Gambar 4. 16 *Fixed geometry double bollard type A*
(Penulis, 2026)



Gambar 4. 17 *Fixed geometry double bollard type B*
(Penulis, 2026)

4.4.7 *Solve*

Solve adalah tahapan terakhir yang dilakukan dalam analisis ini. Pada tahapan ini, terdapat data yang harus diinput untuk memperoleh result yang diperlukan, yaitu force dan koordinat sesuai dengan masing-masing *load case* yang dapat dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 18 *Solve*
(Penulis, 2026)

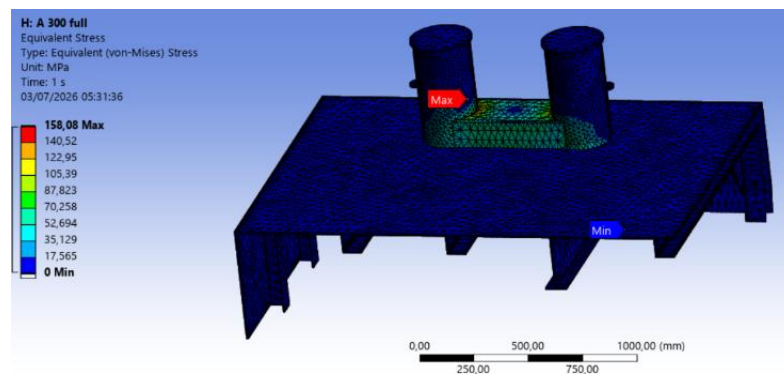
4.4.8 Simulasi

Pada tahapan simulasi sering terjadi kesalahan seperti *failed meshing* sehingga perlu dilakukan pengecekan ulang model. Model yang telah benar maka dapat dilanjutkan sesuai dengan urutan simulasi diatas dan diperoleh hasil analisis berupa *stress* dan deformasi sesuai dengan masing-masing *load case* dengan beban yang berbeda beda.

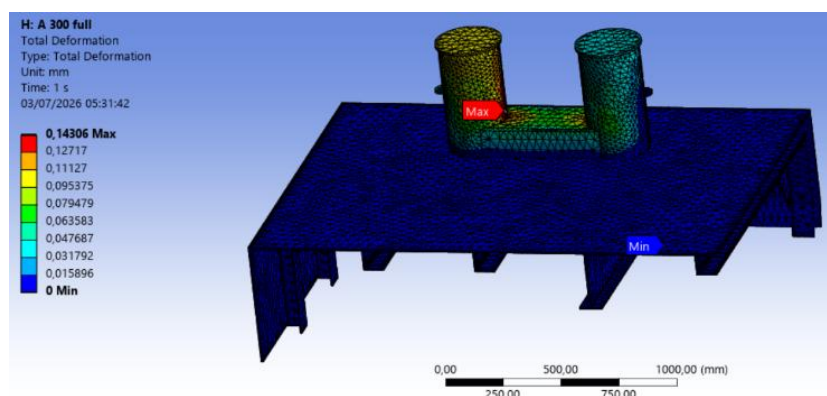
4.5 Hasil Simulasi pada *Double bollard Type A*

4.5.1 *Load Case 1*

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20.



Gambar 4. 19 Tegangan *Double bollard Type A* pada *Load Case 1*
(Penulis, 2026)

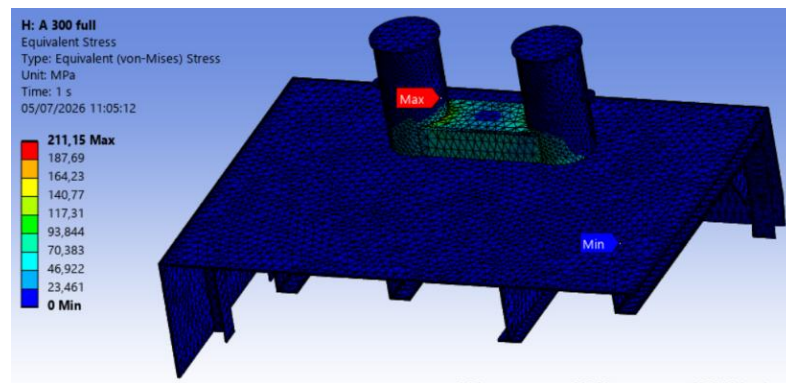


Gambar 4. 20 Deformasi *Double bollard Type A* pada *Load Case 1*
(Penulis, 2026)

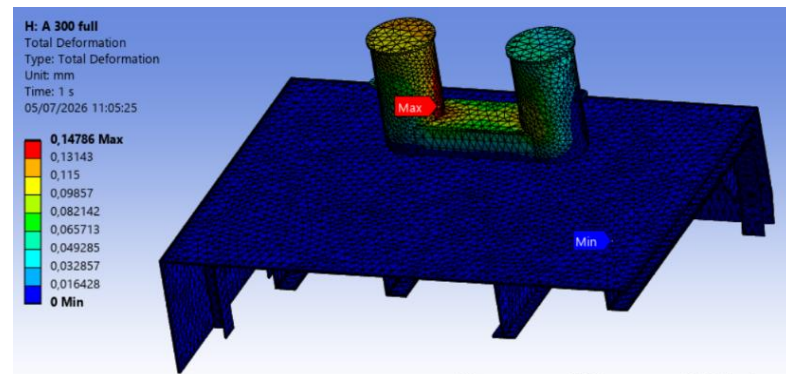
Hasil simulasi pada *double bollard type A* pada *load case 1* menghasilkan tegangan sebesar 158,08 MPa dan deformasi sebesar 0,14 mm

4.5.2 Load Case 2

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22.



Gambar 4. 21 Tegangan *Double bollard Type A* pada *Load Case 2*
(Penulis, 2026)

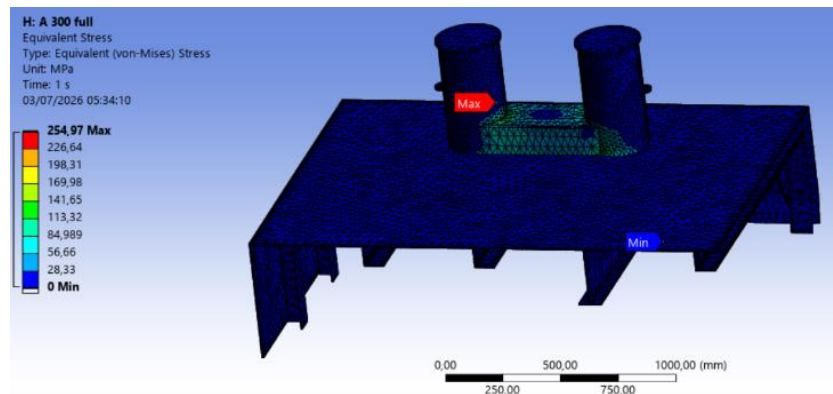


Gambar 4. 22 Deformasi *Double bollard Type A* pada *Load Case 2*
(Penulis, 2026)

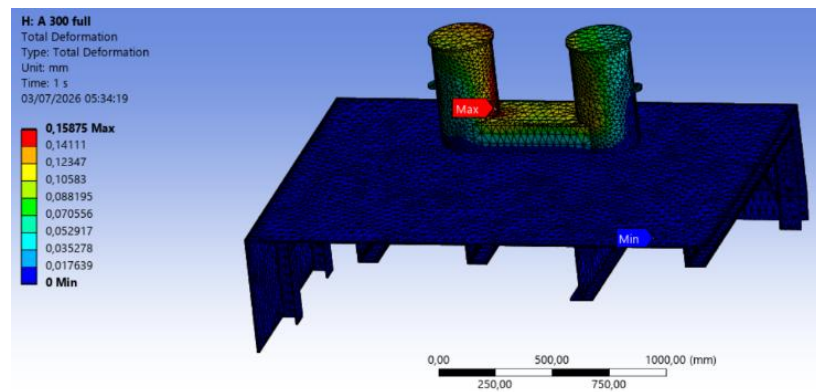
Hasil simulasi pada *double bollard type A* pada *load case 2* menghasilkan tegangan sebesar 211,15 MPa dan deformasi sebesar 0,15 mm.

4.5.3 Load Case 3

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.23 dan Gambar 4.24.



Gambar 4. 23 Tegangan *Double bollard Type A* pada *Load Case 3*
(Penulis, 2026)

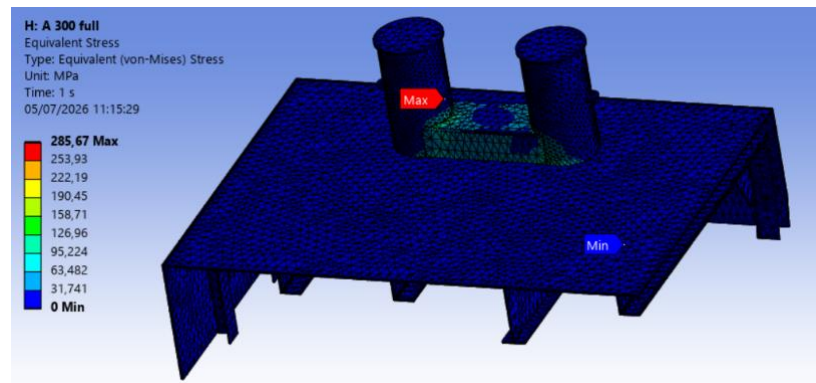


Gambar 4. 24 Deformasi *Double bollard Type A* pada *Load Case 3*
(Penulis, 2026)

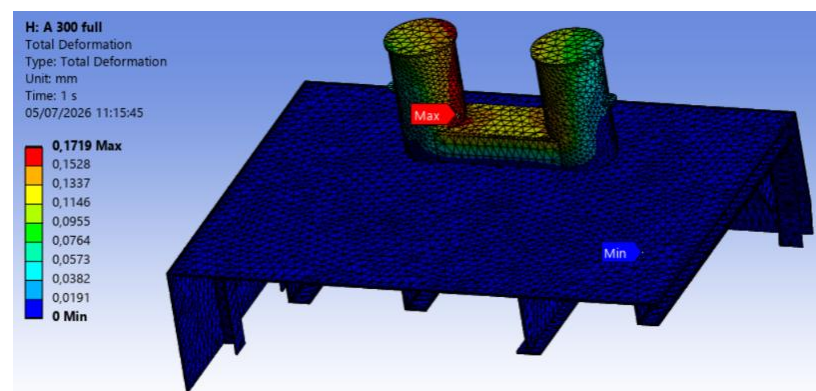
Hasil simulasi pada *double bollard type A* pada *load case 3* menghasilkan tegangan sebesar 254,97 MPa dan deformasi sebesar 0,16 mm.

4.5.4 *Load Case 4*

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.25 dan Gambar 4.26.



Gambar 4. 25 Tegangan *Double bollard Type A* pada *Load Case 4*
(Penulis, 2026)

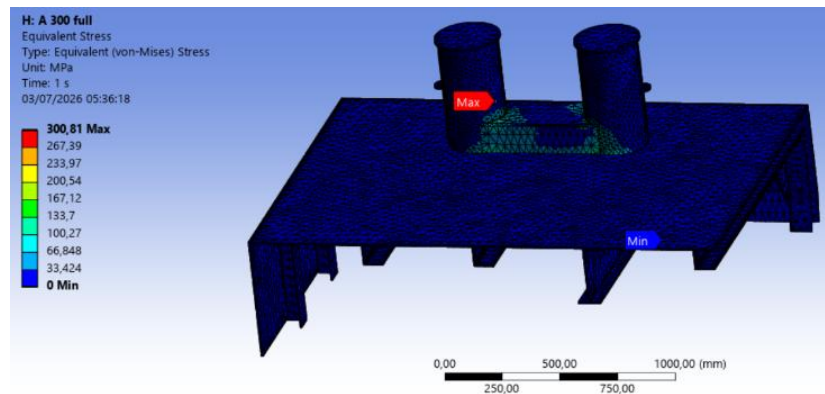


Gambar 4. 26 Deformasi *Double bollard Type A* pada *Load Case 4*
(Penulis, 2026)

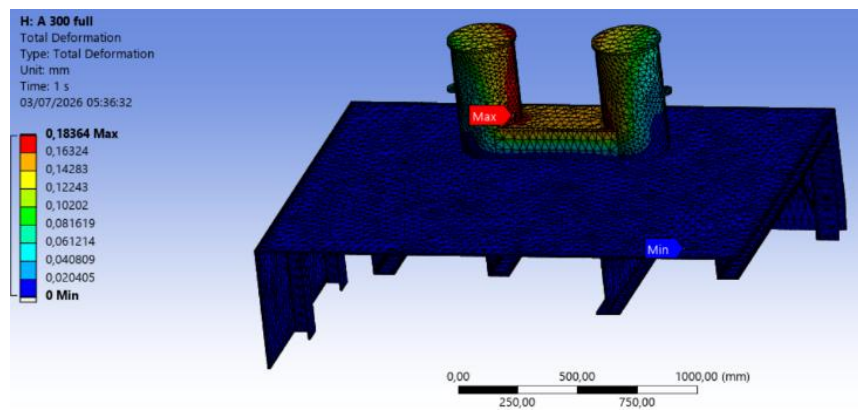
Hasil simulasi pada *double bollard type A* pada *load case 4* menghasilkan tegangan sebesar 285,67 MPa dan deformasi sebesar 0,17 mm.

4.5.5 *Load Case 5*

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.27 dan Gambar 4.28.



Gambar 4. 27 Tegangan *Double bollard Type A* pada *Load Case 5*
(Penulis, 2026)

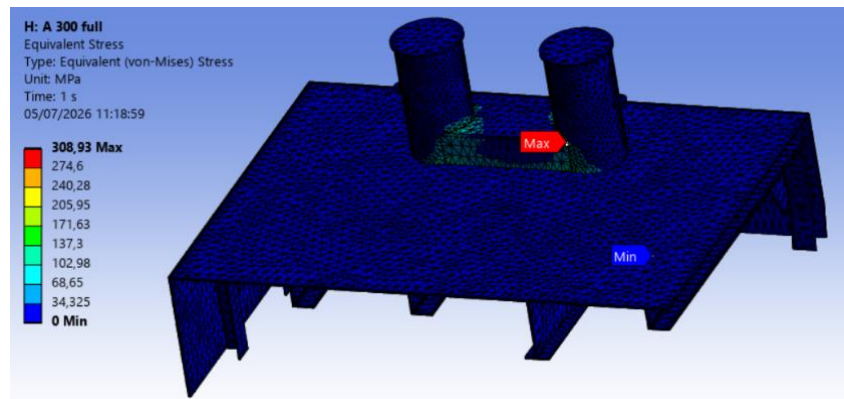


Gambar 4. 28 Deformasi *Double bollard Type A* pada *Load Case 5*
(Penulis, 2026)

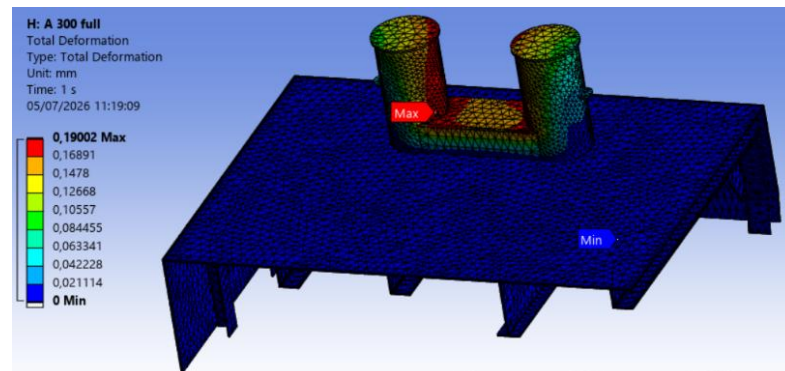
Hasil simulasi pada *double bollard type A* pada *load case 5* menghasilkan tegangan sebesar 300,81 MPa dan deformasi sebesar 0,18 mm.

4.5.6 *Load Case 6*

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.27 dan Gambar 4.28.



Gambar 4. 29 Tegangan *Double bollard Type A* pada *Load Case 6*
(Penulis, 2026)

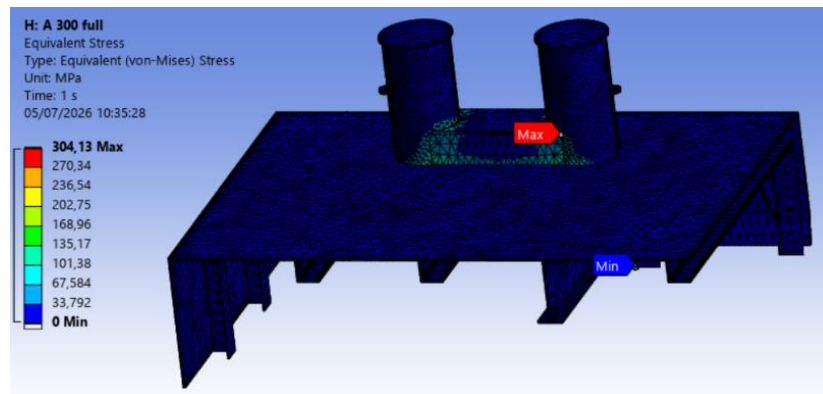


Gambar 4. 30 Deformasi *Double bollard Type A* pada *Load Case 6*
(Penulis, 2026)

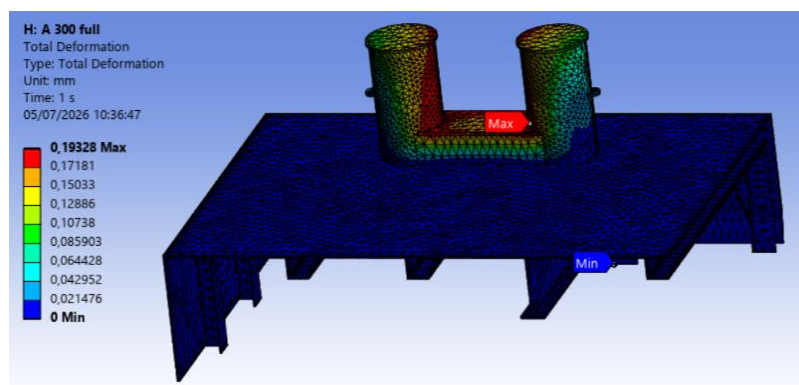
Hasil simulasi pada *double bollard type A* pada *load case 6* menghasilkan tegangan sebesar 308,93 MPa dan deformasi sebesar 0,19 mm.

4.5.7 Load Case 7

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.31 dan Gambar 4.32.



Gambar 4. 31 Tegangan *Double bollard Type A* pada *Load Case 7*
(Penulis, 2026)



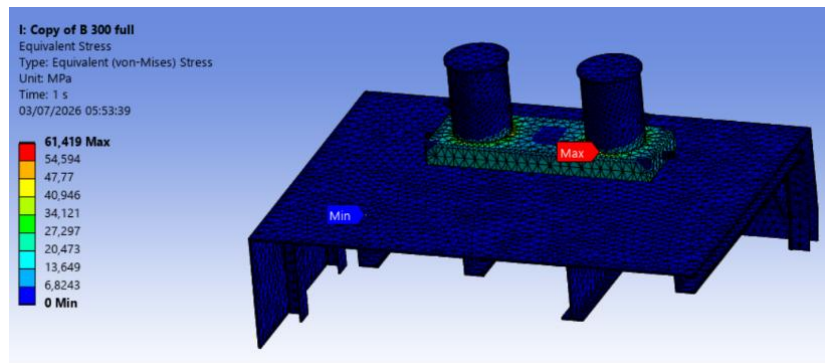
Gambar 4. 32 Deformasi *Double bollard Type A* pada *Load Case 7*
(Penulis, 2026)

Hasil simulasi pada *double bollard type A* pada *load case 7* menghasilkan tegangan sebesar 304,13 MPa dan deformasi sebesar 0,19 mm.

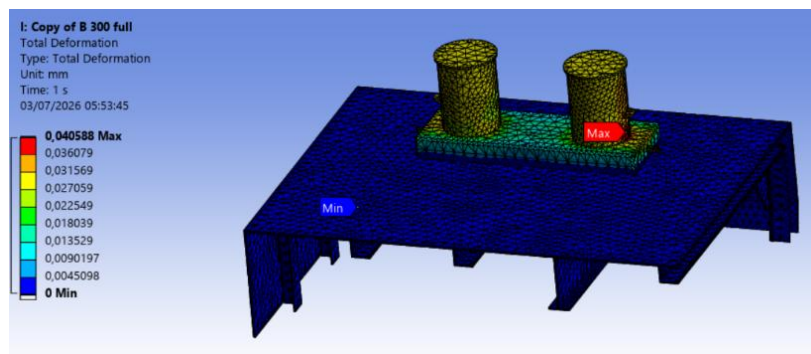
4.6 Hasil Simulasi pada *Double bollard Type B*

4.6.1 *Load Case 1*

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.33 dan Gambar 4.34.



Gambar 4. 33 Tegangan *Double bollard Type B* pada *Load Case 1*
(Penulis, 2026)

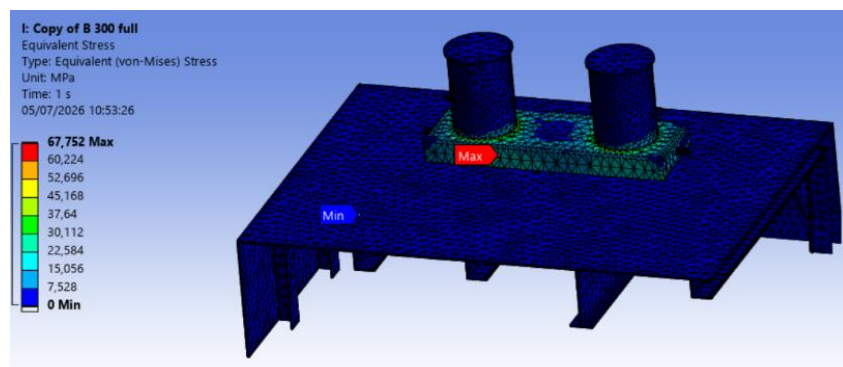


Gambar 4. 34 Deformasi *Double bollard Type B* pada *Load Case 1*
(Penulis, 2026)

Hasil simulasi pada *double bollard type B* pada *load case 1* menghasilkan tegangan sebesar 61,4 MPa dan deformasi sebesar 0,04 mm.

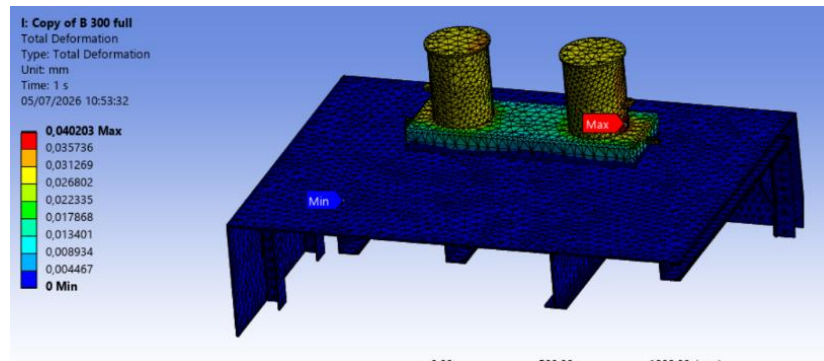
4.6.2 *Load Case 2*

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.35 dan Gambar 4.36.



Gambar 4. 35 Tegangan *Double bollard Type B* pada *Load Case 2*

(Penulis, 2026)



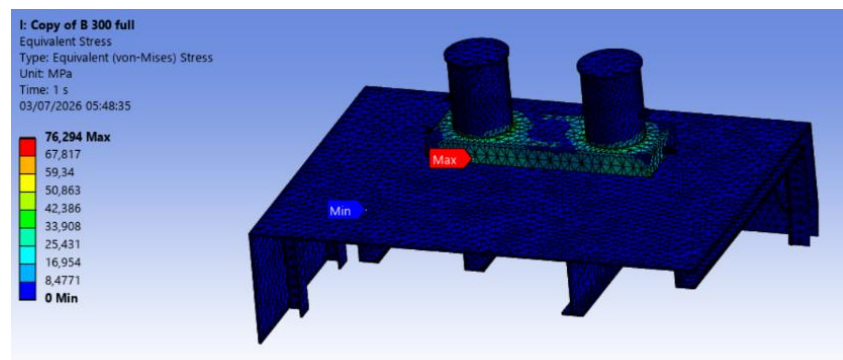
Gambar 4. 36 Deformasi *Double bollard Type B* pada *Load Case 2*

(Penulis, 2026)

Hasil simulasi pada *double bollard type B* pada *load case 2* menghasilkan tegangan sebesar 67,75 MPa dan deformasi sebesar 0,04 mm.

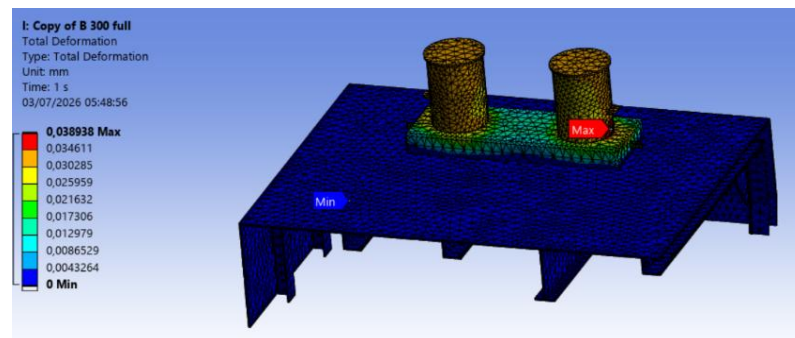
4.6.3 Load Case 3

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.37 dan Gambar 4.38.



Gambar 4. 37 Tegangan *Double bollard Type B* pada *Load Case 3*

(Penulis, 2026)



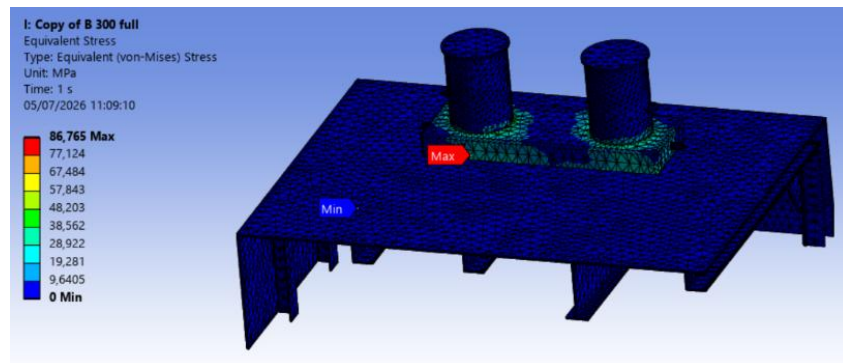
Gambar 4. 38 Deformasi *Double bollard Type B* pada *Load Case 3*

(Penulis, 2026)

Hasil simulasi pada *double bollard type B* pada *load case 3* menghasilkan tegangan sebesar 76,3 MPa dan deformasi sebesar 0,038 mm.

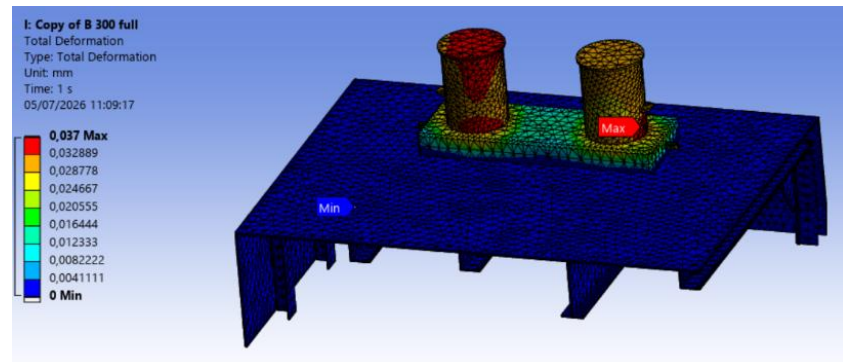
4.6.4 Load Case 4

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.39 dan Gambar 4.40.



Gambar 4. 39 Tegangan Double bollard Type B pada Load Case 4

(Penulis, 2026)



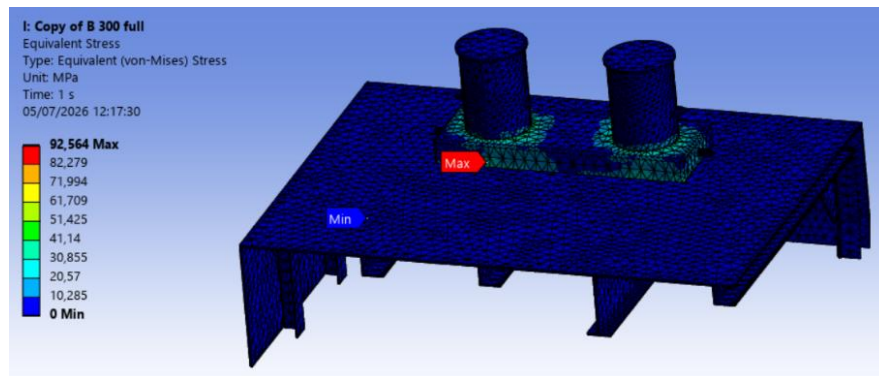
Gambar 4. 40 Deformasi Double bollard Type B pada Load Case 4

(Penulis, 2026)

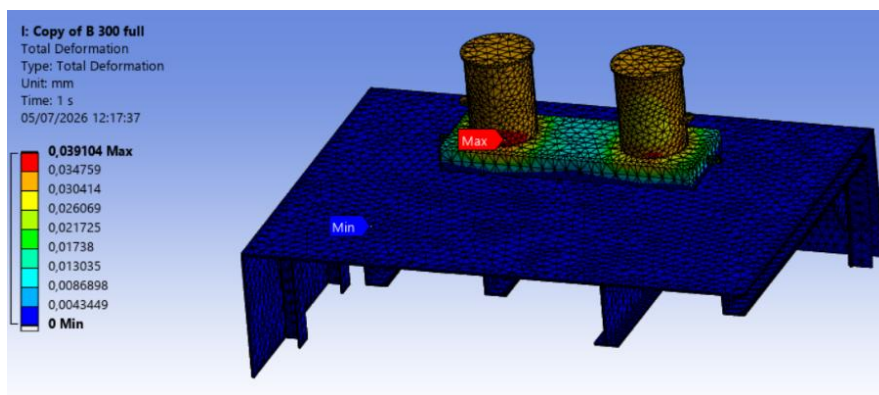
Hasil simulasi pada *double bollard type B* pada *load case 4* menghasilkan tegangan sebesar 86,68 MPa dan deformasi sebesar 0,037 mm.

4.6.5 Load Case 5

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.41 dan Gambar 4.42.



Gambar 4. 41 Tegangan *Double bollard Type B* pada *Load Case 5*
(Penulis, 2026)

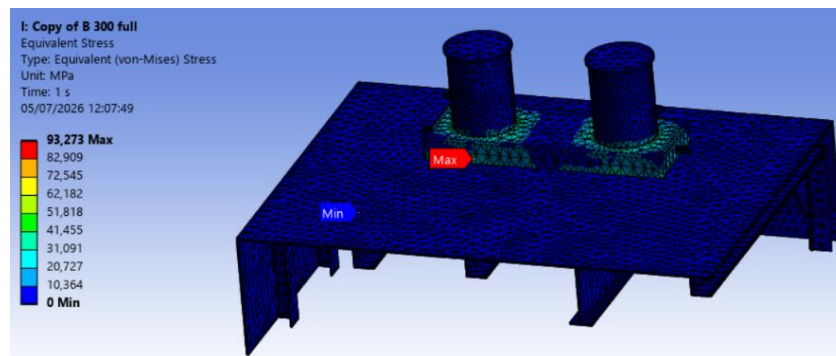


Gambar 4. 42 Deformasi *Double bollard Type B* pada *Load Case 5*
(Penulis, 2026)

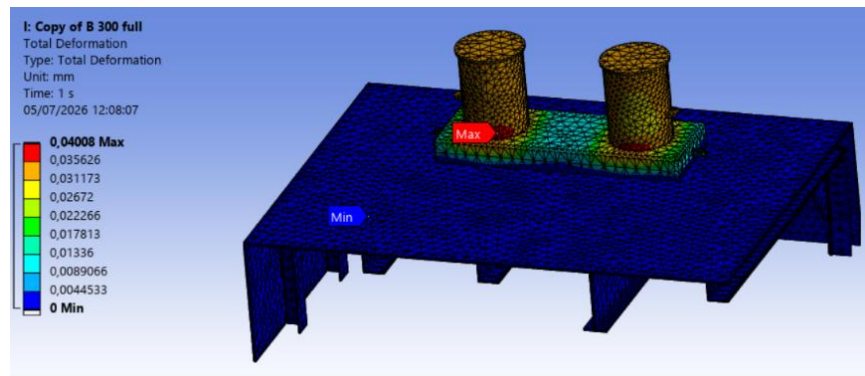
Hasil simulasi pada *double bollard type B* pada *load case 5* menghasilkan tegangan sebesar 93,56 MPa dan deformasi sebesar 0,039 mm.

4.6.6 *Load Case 6*

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.43 dan Gambar 4.44.



Gambar 4. 43 Tegangan *Double bollard Type B* pada *Load Case 6*
(Penulis, 2026)

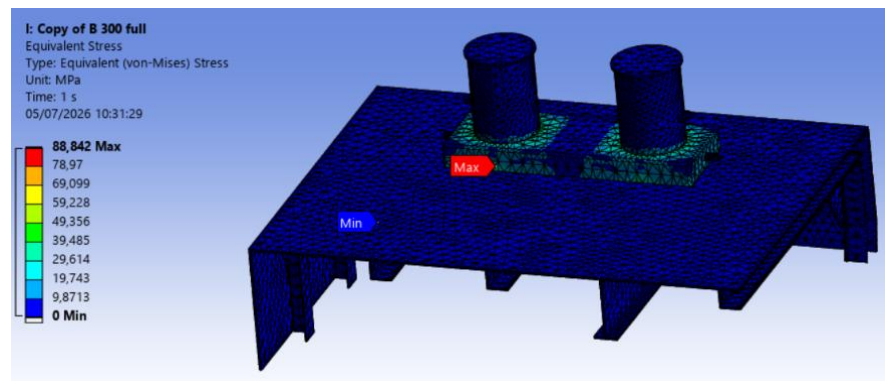


Gambar 4. 44 Deformasi *Double bollard Type B* pada *Load Case 6*
(Penulis, 2026)

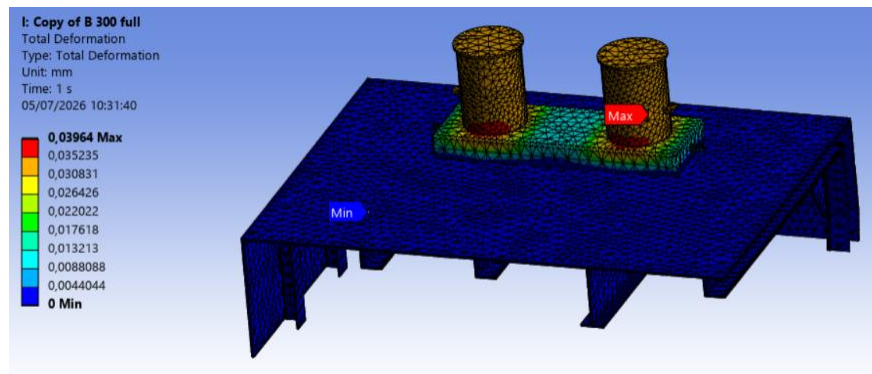
Hasil simulasi pada *double bollard type B* pada *load case 6* menghasilkan tegangan sebesar 93,27 MPa dan deformasi sebesar 0,04 mm.

4.6.7 Load Case 7

Hasil simulasi meliputi tegangan dan deformasi yang menggunakan material ASTM A36 dapat dilihat pada Gambar 4.45 dan Gambar 4.46.



Gambar 4. 45 Tegangan *Double bollard Type B* pada *Load Case 7*
(Penulis, 2026)



Gambar 4. 46 Deformasi *Double bollard Type B* pada *Load Case 7*

(Penulis, 2026)

Hasil simulasi pada *double bollard type B* pada *load case 7* menghasilkan tegangan sebesar 88,84 MPa dan deformasi sebesar 0,039 mm.

4.7 Pembahasan Simulasi Metode Elemen Hingga *Double Bollard Type A*

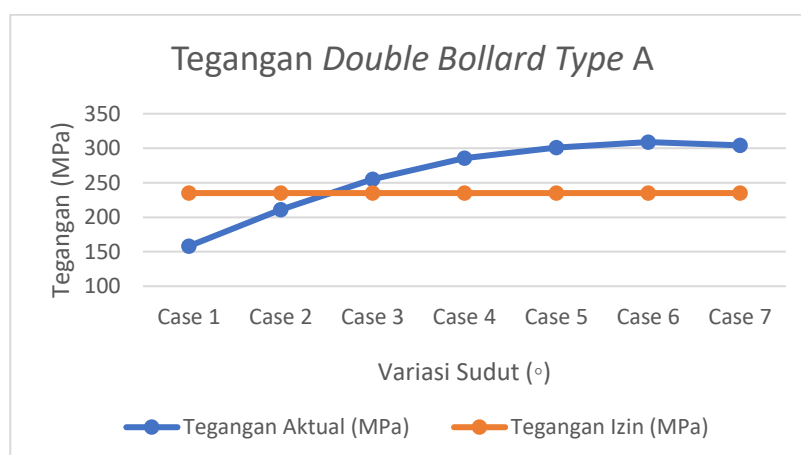
4.7.1 Nilai Tegangan pada *Double Bollard Type A*

Berdasarkan simulasi pada point 4.5, dapat diperoleh tegangan aktual *double bollard* pada setiap *load case* yang dapat dilihat pada Tabel 4.11 dan Gambar 4.37 Berikut :

Tabel 4. 11 Rekap Tegangan *Double Bollard Type A* pada Setiap *Load Case*

NO	<i>Load Case</i>	Tegangan Aktual (MPa)	Tegangan Izin (MPa)	Deformasi <i>Maximum</i> (mm)	Keterangan
1	<i>Case 1</i>	158,08	235	0,14	Memenuhi
2	<i>Case 2</i>	211,15	235	0,15	Memenuhi
3	<i>Case 3</i>	254,97	235	0,16	Tidak Memenuhi
4	<i>Case 4</i>	285,67	235	0,17	Tidak Memenuhi
5	<i>Case 5</i>	300,81	235	0,18	Tidak Memenuhi
6	<i>Case 6</i>	308,93	235	0,19	Tidak Memenuhi
7	<i>Case 7</i>	304,13	235	0,19	Tidak Memenuhi

Sumber : Penulis, 2026



Gambar 4. 47 Grafik Tegangan *Double Bollard Type A* Setiap *Load Case* (Penulis, 2026)

Pada Gambar 4.37 diatas, garis oranye menunjukkan batas tegangan izin material ASTM A36 yaitu 235 MPa dan garis biru menunjukkan nilai tegangan aktual *double bollard type A*. Pada *case 1* diperoleh tegangan sebesar 158,08 MPa, *case 2* diperoleh tegangan sebesar 211,15 MPa, *case 3* diperoleh tegangan sebesar 254,97 MPa, *case 4* diperoleh tegangan sebesar 285,67 MPa, *case 5* diperoleh tegangan sebesar 300,81 MPa, *case 6* diperoleh tegangan sebesar 308,93 MPa, dan *case 7* diperoleh tegangan sebesar 304,13 MPa.

Dari hasil simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa dalam pembuatan *double bollard type A* dengan material ASTM A36 pada *case 1* dan *case 2*, tegangan yang terjadi dinyatakan aman karena tegangan aktual lebih kecil daripada tegangan izin, sedangkan pada *case 3* hingga *case 7* tegangan yang terjadi dinyatakan tidak aman karena tegangan aktual melebihi dari tegangan izin berdasarkan kriteria kekuatan yang merujuk pada penelitian (Arifudin et al., 2023).

Selain tegangan, hasil evaluasi juga menunjukkan adanya variasi deformasi maksimum pada setiap *Load Case*. Nilai deformasi maksimum terbesar terjadi pada *case 6* dan *case 7* sebesar 0,19 mm, sedangkan nilai deformasi maksimum terkecil terjadi pada *Case 1* sebesar 0,14 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa *Load Case* yang menghasilkan tegangan maksimum tidak selalu menghasilkan

deformasi maksimum, sehingga respon struktur dipengaruhi oleh arah pembebanan serta distribusi kekakuan struktur pada masing-masing kondisi pembebanan.

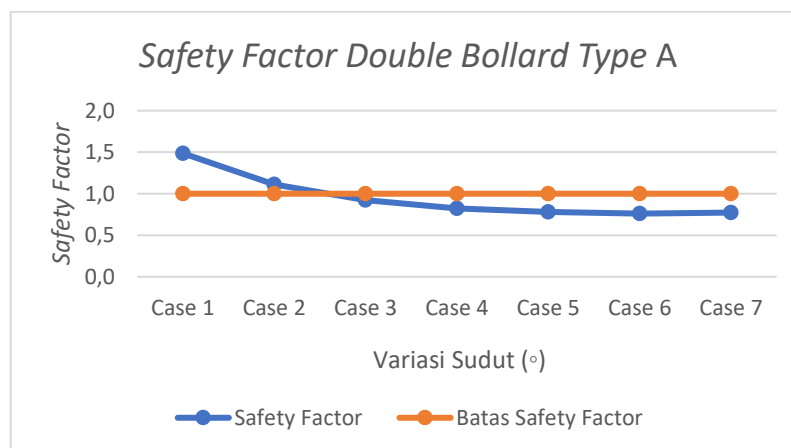
4.7.2 Nilai *Safety Factor* pada *Double Bollard Type A*

Berdasarkan simulasi pada point 4.5, dapat diperoleh *safety factor* *double bollard* pada setiap *load case* yang dapat dilihat pada Tabel 4.12 dan Gambar 4.48 Berikut :

Tabel 4. 12 Rekap *Safety Factor Double Bollard Type A* pada Setiap *Load Case*

NO	<i>Load Case</i>	Tegangan Aktual (MPa)	Tegangan Izin (MPa)	<i>Safety Factor</i>	Batas <i>Safety Factor</i>	Keterangan
1	<i>Case 1</i>	158,08	235	1,49	1	Memenuhi
2	<i>Case 2</i>	211,15	235	1,11	1	Memenuhi
3	<i>Case 3</i>	254,97	235	0,92	1	Tidak Memenuhi
4	<i>Case 4</i>	285,67	235	0,82	1	Tidak Memenuhi
5	<i>Case 5</i>	300,81	235	0,78	1	Tidak Memenuhi
6	<i>Case 6</i>	308,93	235	0,76	1	Tidak Memenuhi
7	<i>Case 7</i>	304,13	235	0,77	1	Tidak Memenuhi

Sumber : Penulis, 2026



Gambar 4. 48 Grafik *Safety Factor Double Bollard Type A* Setiap *Load Case* (Penulis, 2026)

Pada Gambar 4.48 diatas, garis oranye menunjukkan batas *safety factor* izin material ASTM A36 yaitu 1 dan garis biru menunjukkan nilai *safety factor* aktual *double bollard type A*.

Pada *case 1* diperoleh *safety factor* sebesar 1,49, *case 2* diperoleh *safety factor* sebesar 1,11, *case 3* diperoleh *safety factor* sebesar 0,92, *case 4* diperoleh *safety factor* sebesar 0,82, *case 5* diperoleh *safety factor* sebesar 0,78, *case 6* diperoleh *safety factor* sebesar 0,76, dan *case 7* diperoleh *safety factor* sebesar 0,77.

Dari hasil simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa dalam pembuatan *double bollard type A* dengan material ASTM A36 pada *case 1* dan *case 2*, *safety factor* yang terjadi dinyatakan aman karena *safety factor* aktual lebih besar daripada *safety factor* izin. Pada *case 3* hingga *case 7*, *safety factor* yang terjadi dinyatakan tidak aman karena *safety factor* aktual lebih kecil daripada *safety factor* izin.

4.8 Pembahasan Simulasi Metode Elemen Hingga *Double Bollard Type B*

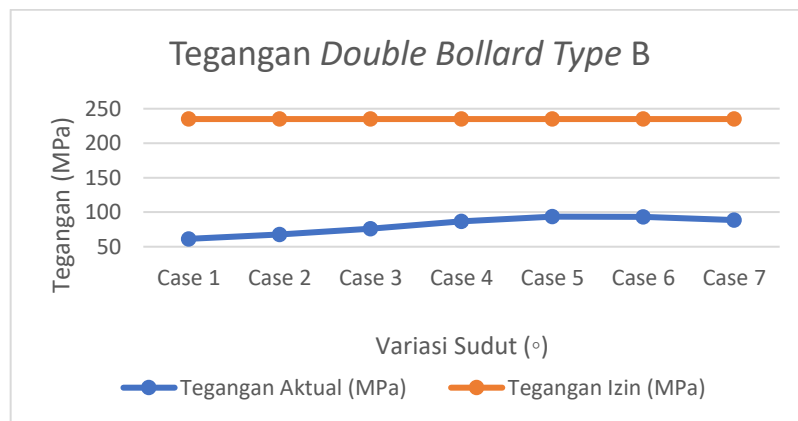
4.8.1 Nilai Tegangan pada *Double Bollard Type B*

Berdasarkan simulasi pada point 4.6, dapat diperoleh tegangan aktual *double bollard* pada setiap *load case* yang dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan Gambar 4.39 Berikut :

Tabel 4. 13 Rekap Tegangan *Double Bollard Type B* pada Setiap *Load Case*

NO	<i>Load Case</i>	Tegangan Aktual (MPa)	Tegangan Izin (MPa)	Deformasi <i>Maximum</i> (mm)	Keterangan
1	<i>Case 1</i>	61,40	235	0,040	Memenuhi
2	<i>Case 2</i>	67,75	235	0,040	Memenuhi
3	<i>Case 3</i>	76,30	235	0,038	Memenuhi
4	<i>Case 4</i>	86,68	235	0,037	Memenuhi
5	<i>Case 5</i>	92,56	235	0,039	Memenuhi
6	<i>Case 6</i>	93,27	235	0,040	Memenuhi
7	<i>Case 7</i>	88,84	235	0,039	Memenuhi

Sumber : Penulis, 2026



Gambar 4. 49 Grafik Tegangan *Double Bollard Type B* Setiap *Load Case*
(Penulis, 2026)

Pada Gambar 4.49 diatas, garis oranye menunjukkan batas tegangan izin material ASTM A36 yaitu 235 Mpa dan garis biru menunjukkan nilai tegangan aktual *double bollard type B*. Pada *case 1* diperoleh tegangan sebesar 61,40 MPa, *case 2* diperoleh tegangan sebesar 67,75 MPa, *case 3* diperoleh tegangan sebesar 76,30 MPa, *case 4* diperoleh tegangan sebesar 86,68 MPa, *case 5* diperoleh tegangan sebesar 92,56 MPa, *case 6* diperoleh tegangan sebesar 93,27 MPa, dan *case 7* diperoleh tegangan sebesar 88,84 MPa.

Dari hasil simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa dalam pembuatan *double bollard type B* dengan material ASTM A36 pada *case 1* hingga *case 7*, tegangan yang terjadi dinyatakan aman karena tegangan aktual lebih kecil daripada tegangan izin berdasarkan kriteria kekuatan yang merujuk pada penelitian (Rahmana, 2021; Rahmaniah, 2024).

Selain tegangan, hasil evaluasi juga menunjukkan adanya variasi deformasi maksimum pada setiap *Load Case*. Nilai deformasi maksimum terbesar terjadi pada *case 1*, *case 2*, dan *case 6* sebesar 0,04 mm, sedangkan nilai deformasi maksimum terkecil terjadi pada *case 3* sebesar 0,038 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa *Load Case* yang menghasilkan tegangan maksimum tidak selalu menghasilkan deformasi maksimum, sehingga respon struktur dipengaruhi oleh arah

pembebanan serta distribusi kekakuan struktur pada masing-masing kondisi pembebanan.

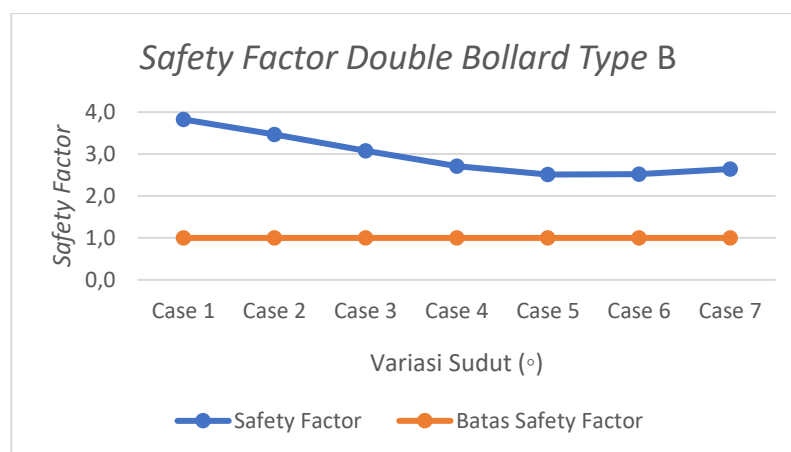
4.8.2 Nilai *Safety Factor* pada *Double Bollard Type B*

Berdasarkan simulasi pada point 4.6, dapat diperoleh *safety factor* *double bollard* pada setiap *load case* yang dapat dilihat pada Tabel 4.14 dan Gambar 4.50 Berikut :

Tabel 4. 14 Rekap *Safety Factor Double Bollard Type B* pada Setiap *Load Case*

NO	<i>Load Case</i>	Tegangan Aktual (MPa)	Tegangan Izin (MPa)	<i>Safety Factor</i>	Batas <i>Safety Factor</i>	Keterangan
1	<i>Case 1</i>	61,40	235	3,83	1	Memenuhi
2	<i>Case 2</i>	67,75	235	3,47	1	Memenuhi
3	<i>Case 3</i>	76,30	235	3,08	1	Memenuhi
4	<i>Case 4</i>	86,68	235	2,71	1	Memenuhi
5	<i>Case 5</i>	92,56	235	2,51	1	Memenuhi
6	<i>Case 6</i>	93,27	235	2,52	1	Memenuhi
7	<i>Case 7</i>	88,84	235	2,65	1	Memenuhi

Sumber : Penulis, 2026



Gambar 4. 50 Grafik *Safety Factor Double Bollard Type B* Setiap *Load Case* (Penulis, 2026)

Pada Gambar 4.50 diatas, garis oranye menunjukkan batas *safety factor* izin material ASTM A36 yaitu 1 dan garis biru menunjukkan nilai *safety factor* aktual *double bollard type B*.

Pada *case* 1 diperoleh *safety factor* sebesar 3,83, *case* 2 diperoleh *safety factor* sebesar 3,47, *case* 3 diperoleh *safety factor* sebesar 3,08, *case* 4 diperoleh *safety factor* sebesar 2,71, *case* 5 diperoleh *safety factor* sebesar 2,51, *case* 6 diperoleh *safety factor* sebesar 2,52, dan *case* 7 diperoleh *safety factor* sebesar 2,65.

Dari hasil simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa dalam pembuatan *double bollard type* B dengan material ASTM A36 pada *case* 1 hingga *case* 7, *safety factor* yang terjadi dinyatakan aman karena *safety factor* aktual lebih kecil daripada *safety factor* izin.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan perhitungan *Equipment Number* (EN) sesuai *rules Lloyd's Register*, diperoleh spesifikasi *double bollard* dengan ukuran *nominal size* 250A sebagai acuan pemilihan geometri model berdasarkan katalog ISO 13795 dan material yang digunakan adalah ASTM A36.
2. Pada hasil perhitungan pembebanan, diperoleh nilai *bollard pull* sebesar 255,86 kN yang selanjutnya digunakan sebagai dasar penentuan *design load*. Mengacu pada *rules Lloyd's Register*, diperoleh *design load* sebesar 639,66 kN. Beban tersebut kemudian diuraikan menjadi tujuh variasi *load case*, yaitu sudut horizontal 0° - 90° dengan sudut vertikal tetap sebesar 25° . Variasi sudut horizontal mengubah arah distribusi gaya pada *double bollard*. Semakin besar sudut pembebanan, gaya transversal semakin meningkat, sedangkan gaya longitudinal semakin menurun. Karena sudut vertikal tetap 25° , komponen gaya vertikal juga tetap. Arah gaya yang semakin tegak lurus dapat menghasilkan kondisi struktur yang lebih kritis karena meningkatkan pengaruh gaya transversal.
3. Hasil analisis metode elemen hingga menunjukkan bahwa variasi sudut pembebanan memengaruhi nilai tegangan, deformasi, dan *safety factor* pada kedua jenis *double bollard*. Pada *double bollard type A*, kondisi paling kritis pada *load case* 6 dengan tegangan maksimum sebesar 308,93 MPa, deformasi maksimum sebesar 0,19 mm, dan *safety factor* sebesar 0,76. Sedangkan *double bollard type B*, kondisi paling kritis pada *load case* 6 dengan tegangan maksimum sebesar 93,27 MPa, deformasi maksimum sebesar 0,04 mm, dan *safety factor* sebesar 2,52. Sehingga *double bollard type B* merupakan desain paling optimal untuk *harbour tug* karena menghasilkan tegangan dan deformasi lebih rendah serta *safety*

factor lebih tinggi dibandingkan *type A* pada seluruh variasi sudut pembebanan, sehingga memenuhi kriteria kekuatan struktur.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diperoleh saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut :

1. Melakukan analisis dinamis agar kondisi operasi *harbour tug* dapat dipresentasikan lebih realistis dan sesuai dengan kondisi operasional.
2. Menganalisis struktur pendukung *double bollard* (*deck plate, stiffener, bracket*) sehingga distribusi beban pada seluruh sistem struktur dapat diketahui.
3. Melakukan validasi hasil analisis metode elemen hingga melalui pengujian eksperimental atau data operasional untuk meningkatkan keakuratan hasil simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adin, A. A. S. (2025). Design of conveyor using the finite element method and finite element analysis. *JTTM: Jurnal Terapan Teknik Mesin*, 6(2), 252–259. <https://doi.org/10.37373/jttm.v6i2.1633>
- Arifudin, A. M. N., Wicaksono, M. A. W., & Wulandari, A. I. (2023). Study of Towing Lug Strength in 300 feet Barge at Docking Process. *Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Kelautan*, 20(2), 154–162.
- Bolong, J. A. A. A., Sutoyo, Eddi, & Hermanto, F. (2026). *Analisis Proses Anchor Handling Dengan Penggunaan Full Thruster*. 5(2), 952–958.
- Cho, S., Choung, J., Oh, C., Lee, K., & Kim, J. (2010). Ultimate load capacities of mooring bollards and hull foundation structures. *Ocean Engineering*, 37(8–9), 770–776. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.02.011>
- Elia, S. J., & Putra, W. H. A. (2021). Analisis Kemampuan Pendeteksian Pengujian Eddy Current Testing (ECT) terhadap Crack pada Bollard dengan Bahan Casting. *Jurnal Teknik ITS*, 10(1). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i1.61079>
- Faveryan, I. B., Syahputra, M. F., Sari, T. K. R., & Tridayana, P. A. (2024). Uji Konvergensi Mesh Model Elemen Hingga Struktur Mass Timber dengan Abaqus CAE. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 25(1), 46–53. <https://doi.org/10.35313/potensi.v25i2.6095>
- Hardjono, S. (2016). Analisa daya mesin dan bollard pull kapal tunda untuk kapal peti kemas post-panamax di pelabuhan kalibaru. *Warta Penelitian Perhubungan*, 28, 158–170.
- Haslinda, H. (2023). Analisis Kekuatan Tegangan Geser Pada Baja Karbon Sedang. *Insta Adpertisi Journal*, 3(2), 29–35.
- Hernández-Hernández, V., Benítez, M., Espinosa-Soto, C., & Alvarez-Buylla, E. R. (2014). *Mechanical forces as information : an integrated approach to plant and animal development*. 5(June), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00265>
- Lee, S., Lee, J. H., Roh, M., Ham, S., Lee, H., & Kim, K. (2021). *An optimization model of tugboat operation for conveying a large surface vessel*. 8(November 2020), 654–675. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab006>
- Maritime and Port Authority of Singapore. (2025). Tug Assignment Guidelines for Vessels Berthing Under Own Power or Required to be Towed in Port. *Singapore: MPA*.
- Mauro, F. (2021). Thrusters modelling for escort Tug capability predictions [Preprint]. *University of Strathclyde*, 1.
- Patil, H., & Jeyakarthikeyan, P. V. (2018). Mesh convergence study and estimation

- of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402((1)). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012065>
- Paulauskas, V., Paulauskas, D., & Simutis, M. (2024). Estimation of Tug Pulling Power (Bollard Pull) and Number of Tugs Required During Ship Mooring Operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/jmse12111959>
- Pawara, M. U., Ikhwan, R. J., Siahaan, A. R., Mursyid, A., & Arifuddin, N. (2022). A Finite Element Analysis of Structural Strength of Ferry Ro-Ro's Car Deck. *Jurnal Inovasi Vokasional Dan Teknologi*, 22(1), 47–60.
- Qi, K., Zhang, J., & Zhang, L. (2025). *A Review of Research Progress on Cables and Towed Objects of the Ocean Engineering Towing System*.
- Rahmana, N. C. P. (2021). *Analisis Kekuatan Cruciform Bollard pada Harbour Tug dengan Variasi Pembebanan menggunakan Metode Elemen Hingga*. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Surabaya.
- Rahmania, F. A. (2024). *Analisis Kekuatan Double Cruciform Bollard dengan Variasi Diameter pada Kapal Loading Facility Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Surabaya.
- Register, L. (2022). *Rules and Regulations for the Classification of Ships*.
- Samudera, Irwan Putera., Hartono Yudo, E. S. (2017). Analisa Kekuatan Pondasi Bollard Pada Tongkang Santan 195 Dengan Metode Elemen Hingga. *JURNAL TEKNIK PERKAPALAN*, Vol. 5, No.
- Sano, M. (2023). *Mathematical model and simulation of cooperative manoeuvres among a ship and tugboats*. 74(2), 127–148.
- Senthilkumar, S., Manivannan, S., Venkatesh, R., & Karthikeyan, M. (2023). Influence of heat input on the mechanical characteristics, corrosion and microstructure of ASTM A36 steel welded by GTAW technique. *Heliyon*, 9(9), e19708. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19708>
- Skjong, R., & Wentworth, B. H. (2001). *Expert Judgment and Risk Perception. IV*.
- Sulandari, Y. A. S. N., & Pranata, Y. A. (2012). Metode Elemen Hingga Sambungan Balok-Kolom. *Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 76–141.
- Ubaidah, D. P. (2024). *Optimasi Struktur Bilga pada Kapal Tanker dengan Metode Elemen Hingga*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Wikipedia. (2026). *Factor of safety*. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Factor_of_safety
- Wu, L., Xiang, Z., Shu, D., Liu, M., Yang, J., & Li, M. (2023). Dynamic Inversion Model of the Mooring Force on a Floating Bollard of a Sea Lock. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/jmse11071374>

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS



PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS



PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS



PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS



PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS



PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS



PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS



PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS



PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

PPNS

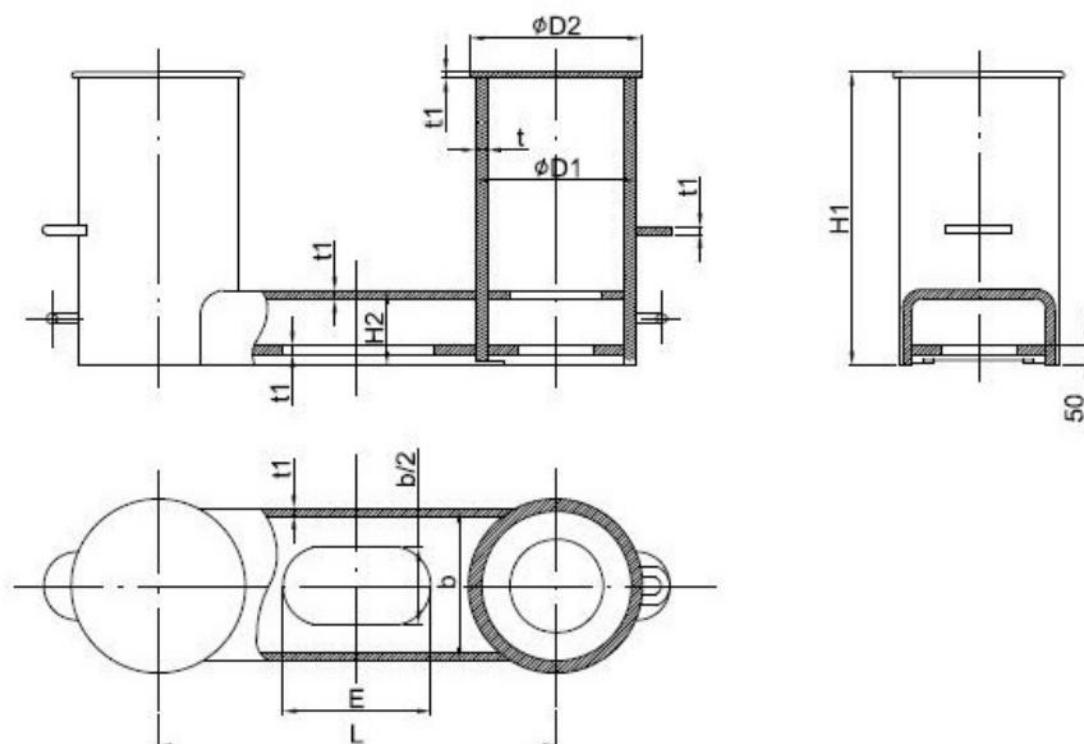
PPNS

PPNS



LAMPIRAN 1
Katalog Double Bollard Type A

Double Bollards ISO13795-2012 Type A

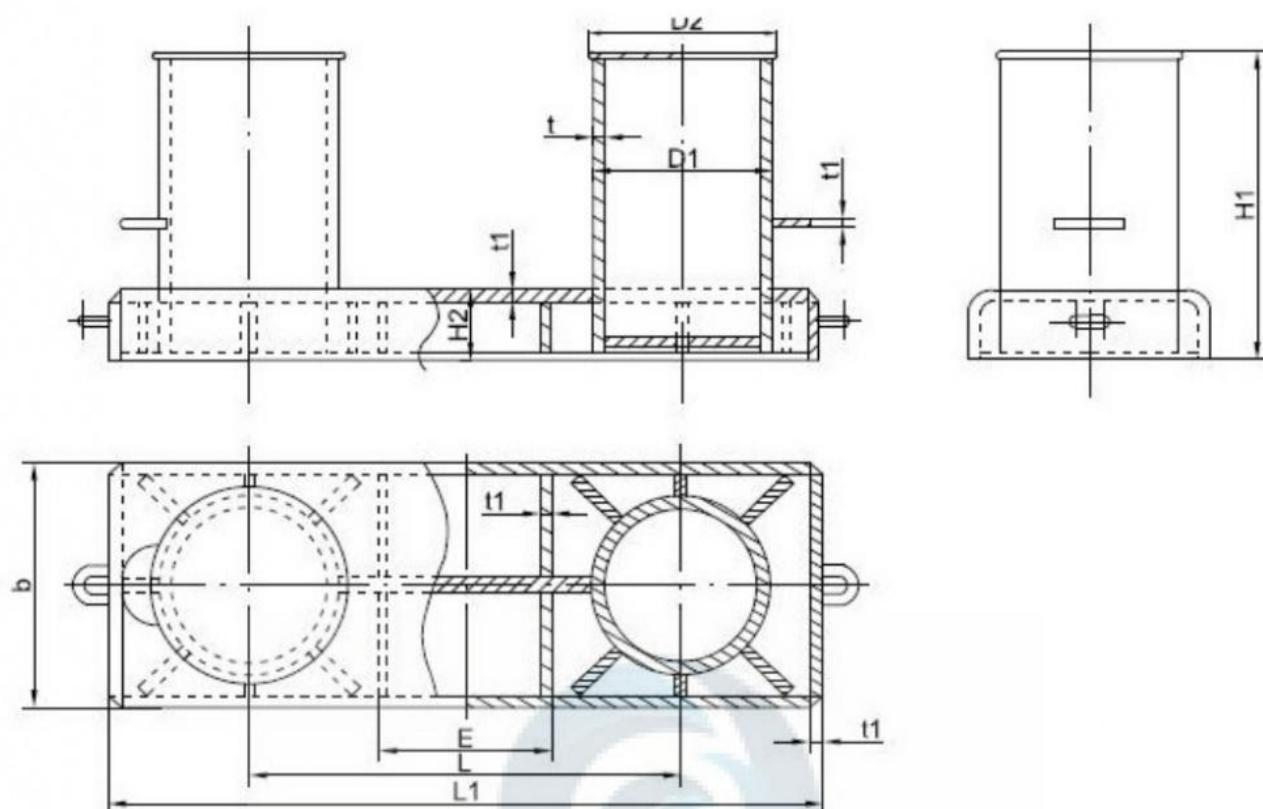


Nominal size Dn	D1	D2	H1	H2	b	L	E	t	t1	SWL		Weight (kg)
										Mooring (t)	Towing (t)	
150	165.2	185	330	90	155	400	-	8.0	6	5.5	10	29
200	216.3	240	395	115	205	500	-	8.0	6	8.4	13	46
250A	267.4	290	505	135	250	630	-	12.0	9	16	27	107
250B	267.4	290	505	135	250	630	-	10.0	8	13	22	91
300A	318.5	340	600	150	290	800	300	21.5	16	34	62	281
300B	318.5	340	600	150	290	800	300	12.0	9	19	36	166
350A	355.6	380	685	175	340	890	350	26.0	19	45	85	431
350B	355.6	380	685	175	340	890	350	14.0	10	25	50	241
400A	406.4	430	730	185	380	1 000	380	28.0	20	61	106	570
400B	406.4	430	730	185	380	1 000	380	15.0	11	33	67	322
450A	457.2	480	770	195	425	1 100	410	29.0	21	77	124	712
450B	457.2	480	770	195	425	1 100	410	14.5	11	39	78	379
500A	508.0	530	830	230	480	1 250	460	32.0	23	101	154	960
500B	508.0	530	830	230	480	1 250	460	14.5	11	47	93	465
550A	558.8	580	900	270	520	1 380	540	31.0	22	115	165	1123
550B	558.8	580	900	270	520	1 380	540	21.0	16	80	159	787
600	609.4	630	950	300	560	1 550	600	33.0	23	143	193	1391



LAMPIRAN 2
Katalog Double Bollard Type B

Double Bollards ISO13795-2012 Type B



Nominal size Dn	D1	D2	H1	H2	b	L	L1	E	t	t1	SWL		Weight (kg)
											Mooring (t)	Towing (t)	
150	165,2	185	320	80	225	400	670	145	8,0	8	5,5	10	45
200	216,3	240	365	85	290	500	860	160	8,0	8	8,4	13	68
250A	267,4	290	470	100	360	630	1 065	215	12,0	11	16	27	150
250B	267,4	290	470	100	360	630	1 065	215	10,0	8	13	22	119
300A	318,5	340	575	125	430	800	1 300	325	21,5	20	34	62	383
300B	318,5	340	575	125	430	800	1 300	325	12,0	9	19	36	203
350A	355,6	380	655	145	480	890	1 475	360	26,0	23,5	45	85	582
350B	355,6	380	655	145	480	890	1 475	360	14,0	13	25	50	333
400A	406,4	430	705	160	550	1 000	1 630	400	28,0	26	61	106	793
400B	406,4	430	705	160	550	1 000	1 630	400	15,0	13,5	33	67	441
450A	457,2	480	745	170	620	1 100	1 810	430	29,0	26	77	124	979
450B	457,2	480	745	170	620	1 100	1 810	430	14,5	13	39	78	517
500A	508,0	530	790	190	690	1 250	2 040	500	32,0	29	101	154	1321
500B	508,0	530	790	190	690	1 250	2 040	500	14,5	13	47	93	631
550A	558,8	580	840	210	750	1 380	2 240	560	31,0	28	115	165	1530
550B	558,8	580	840	210	750	1 380	2 240	560	21,0	19	80	159	1059
600	609,4	630	875	225	820	1 550	2 490	660	33,0	28	143	193	1850



LAMPIRAN 3
General Arrangement





LAMPIRAN 4

Data Konstruksi



BIODATA PENULIS



Nama : Ana Angellina
Nama Panggilan : Ana
Tempat, Tanggal Lahir : Mojokerto, 18 April 2004
Agama : Islam
Jenis Kelamin : Perempuan
Alamat : Losari Barat Gg 4 No. 176, Ds. Sidoharjo, Kec.
Gedeg. Kab. Mojokerto, Jawa Timur
No. HP : 085778841565
Email : ana.angellina669@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

2010 – 2016 : SD Negeri Gedongan 1
2016 – 2019 : SMP Negeri 2 Kota Mojokerto
2019 – 2022 : SMA Negeri 1 Gedeg
2022 – 2026 : Program Studi D4 Teknik Perancangan dan
Konstruksi Kapal

