



SKRIPSI – ME141501

Penilaian Risiko Tubrukan Kapal dan Konsekuensi terhadap Kerusakan Struktur Kapal pada Alur Pelayaran Barat Surabaya

Pandhu Hayu Amarta
NRP 04211440000045

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.
A.A.B. Dinariyana Dwi .P. S.T., MES., Ph.D.

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



SKRIPSI - ME 141501

Penilaian Risiko Tubrukan Kapal dan Konsekuensi terhadap Kerusakan Struktur Kapal di Alur Pelayaran Barat Surabaya

Pandhu Hayu Amarta
NRP 04211440000045

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.
A.A.B. Dinariyana Dwi .P. S.T., MES., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



SKRIPSI - ME 141501

Ship Collision Risk Assessment and Structural Damage Consequence in the Surabaya West Access Channel

Pandhu Hayu Amarta
NRP 04211440000045

Supervisors
Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.
A.A.B. Dinariyana Dwi .P. S.T., MES., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

Penilaian Risiko Tubrukan Kapal dan Konsekuensi terhadap Kerusakan Struktur Kapal di Alur Pelayaran Barat Surabaya

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi *Reliability, Availability, Management
and Safety* (RAMS)

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

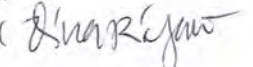
Pandhu Hayu Amarta
NRP. 04211440000045

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.

()

A.A.B. Dinariyana Dwi .P. S.T., MES., Ph.D.

()

LEMBAR PENGESAHAN

PENILAIAN RISIKO TUBRUKAN KAPAL DAN KONSEKUENSI TERHADAP KERUSAKAN STRUKTUR KAPAL DI ALUR PELAYARAN BARAT SURABAYA

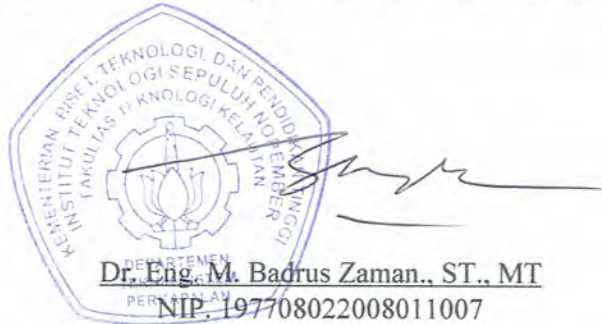
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi *Reliability, Availability, Management
and Safety* (RAMS)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Pandhu Hayu Amarta
NRP. 04211440000045

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



Penilaian Risiko Tubrukan Kapal dan Konsekuensi terhadap Kerusakan Struktur Kapal di Alur Pelayaran Barat Surabaya

Nama Mahasiswa : Pandhu Hayu Amarta
NRP : 04211440000045
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan ITS
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.
Dosen Pembimbing 2 : A.A.B. Dinariyana Dwi .P. S.T., MES., Ph.D.

Abstrak

Alur Pelayaran Barat Surabaya merupakan salah satu alur pelayaran dengan aktivitas lalu lintas kapal tersibuk di Indonesia. Tingginya tingkat kepadatan lalu lintas kapal yang beroperasi di Alur Pelayaran Barat Surabaya membuktikan bahwa lokasi tersebut merupakan salah satu alur pelayaran penting di Indonesia. Selain itu, pada alur tersebut menjadi lokasi dari beberapa dermaga yang mengakomodasi aktivitas kawasan industri dan pelayaran kapal penumpang nasional yang berpotensi terus meningkat di masa mendatang. Dengan tingginya arus lalu lintas kapal yang melalui Alur Pelayaran Barat Surabaya berdampak pada peningkatan potensi kecelakaan kapal yang dapat terjadi berupa tubrukan antar kapal di alur pelayaran. Sehingga pada kajian ini dilakukan penilaian risiko berupa perhitungan frekuensi dan konsekuensi tubrukan kapal yang terjadi.

Kajian risiko tubrukan dilakukan untuk mengetahui frekuensi terjadinya tubrukan kapal yang terjadi di Alur Pelayaran Barat Surabaya pada beberapa skenario yaitu *head on*, *crossing*, dan *overtaking*. Perhitungan frekuensi tubrukan kapal dilakukan dengan menggunakan metode perhitungan manual berdasarkan *IWRAP Theory* yang divalidasi menggunakan hasil perhitungan *software* IWRAP. Berdasarkan hasil analisis frekuensi tubrukan kapal, didapatkan hasil dari *crossing collision*, *head on collision*, dan *overtaking collision* dengan nilai berturut-turut yaitu sebesar $2,1519025 \times 10^{-2}$, $9,176182 \times 10^{-3}$, dan $6,74 \times 10^{-3}$. Hasil validasi yang didapatkan yaitu sebesar 93,55% untuk *crossing collision*; 97,15% untuk *head on collision*; dan 98,06% untuk *overtaking collision*. Selain itu, hasil perhitungan analisis konsekuensi tubrukan, didapatkan nilai 44,312 MJ yang menyatakan besar energi yang terdisipasi ketika terjadi tubrukan. Hasil tersebut dikategorikan sebagai *moderate damage*. Dengan hasil perhitungan frekuensi tubrukan kapal, dapat dinyatakan bahwa lokasi yang menjadi studi kasus memiliki nilai risiko di bawah 1 kejadian dalam satu tahun. Sehingga, dapat dinyatakan bahwa risiko dapat diterima. Namun demikian, diperlukan tindakan mitigasi untuk mengakomodasi perkembangan jumlah pelayaran di Alur Pelayaran Barat Surabaya untuk waktu mendatang.

Kata kunci : Tubrukan kapal, penilaian risiko, *IWRAP Theory*, kerusakan struktur

Ship Collision Risk Assessment and Structural Damage Consequence in the Surabaya West Access Channel

Name of Student : Pandhu Hayu Amarta
NRP : 04211440000045
Department : Marine Engineering
Supervisor 1 : Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.
Supervisor 2 : A.A.B. Dinariyana Dwi .P. S.T., MES., Ph.D.

Abstract

Surabaya West Access Channel (SWAC) is one of the busiest access channel in Indonesia. The high of traffic density in Surabaya West Access Channel proof that it has important role to support economic activity and national shipping lane. Furthermore, there are several jetty which is operated and integrated with Java Integrated Industrial and Port Estate (JIPE) and national passenger ship line which potentially grow up in the future. In line with the high of commodity distribution traffic and the high of economic activity which use Surabaya West Access Channel as the area of voyage operation will increase the frequency of ship traffic. As the impact of shipping frequency enhancement, it will also increase the potential of ship collision frequency in this access channel. In this bachelor thesis, the writer would like to conduct an analysis of ship collision risk assessment and the consequence of structural damage due to the collision which could happen.

The ship collision risk assessment is conducted to assess the frequency of ship collision which could happen in the Surabaya West Access Channel by several scenarios such as head on, overtaking, and crossing collision. The manual calculation of ship collision frequency will be conducted according to the IWRAP Theory which will be validated using the result of IWRAP processing. According to the result of manual calculation, the result of *crossing collision*, *head on collision*, and *overtaking collision* are 0,021519025, 0,009176182, and 0,00674. The result of data validation of manual calculation and IWRAP process are 93,55% for *crossing collision*; 97,15% for *head on collision*; and 98,06% for *overtaking collision*. The result of collision consequence analysis, has result 44,312 MJ which is represented as the value of dissipated energy when the ships are collided. The result is considered as *moderate damage* for both the struck and striking ship. According to the result of collision analysis, it can be considered that the risk is acceptable and the Surabaya West Access Channel where the analysis are conducted is safe for the shipping operation. However, to accommodate the growth of shipping operation in Surabaya West Access Channel, the development of Surabaya West Access Channel as mitigation is recommended for future.

Keywords : Ship Collision, Risk Assessment, IWRAP Theory, Structural Damage

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Azza Wa Jalla, yang telah memberikan rahmat dan anugerah-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Penilaian Risiko Tubrukan Kapal dan Konsekuensi terhadap Kerusakan Struktur Kapal di Alur Pelayaran Barat Surabaya** dengan baik dan tepat waktu. Tugas akhir tersebut diajukan sebagai salah satu persyaratan kelulusan program studi sarjana Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam proses penyelesaian Tugas Akhir dan keberhasilan menempuh program studi sarjana, tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada pihak-pihak di bawah ini, yaitu :

1. Kedua orang tua penulis, Ibu Tulus Rahayu dan Bapak Supandri yang selalu mendukung dan memberikan semangat kepada penulis setiap kegiatan dan aktivitas hingga saat ini serta mengingatkan untuk taat beribadah.
2. Saudara penulis, Almh. Girdha Silvia Martasari sebagai sosok kakak terbaik dan Indhira Amarta Mahanani sebagai seorang adik yang dengan canda dan tawanya memberikan semangat bagi penulis.
3. Bapak Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen wali yang telah banyak memberikan bimbingan dan pendidikan baik akademik maupun non akademik sehingga kami sebagai mahasiswa wali dapat belajar bekerja keras, pantang menyerah, dan bekerjasama.
4. Bapak Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing penulis dan dosen pengampu Laboratorium RAMS yang telah membimbing penulis dalam menyelesaikan penelitian Tugas Akhir dan memberikan motivasi untuk terus belajar dan mengembangkan diri.
5. Bapak A.A.B. Dinariyana D. P., S.T., MES., Ph.D., selaku dosen pembimbing kedua sekaligus Kepala Laboratorium RAMS yang telah membimbing penulis dalam menyelesaikan penelitian Tugas Akhir, memberikan motivasi, dan pelajaran baik akademik dan non akademik berupa karakter, etika, dan sikap.
6. Bapak Irfan Syarief Arief, S.T., M.T., Bapak Ir. Sardono Sarwito, M.Sc., Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T., M.T., yang telah membimbing penulis dalam mata kuliah Desain II, III, dan IV serta seluruh dosen, tenaga kependidikan serta manajemen Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK – ITS.
7. Ibu Dr. Maria Anityasari, Bapak Dr. Eng. Trika Pitana, S.T., M.Sc., Ibu Dr. rer. nat. Maya Shovitri., M.Sc., Mas Muh. Wahyu Islami, dan seluruh keluarga International Office dan *volunteer* yang telah menjadi bagian dari pembelajaran dan pengembangan diri penulis terkait sikap, etika, profesionalitas, dan banyak hal baru.
8. Seluruh kawan-kawan pejuang tugas akhir yaitu Halimah, Chika, Hutrizain, Rizqi Mubarak, Dimas, Mas Ario, Mbak Ika, Jangka yang telah saling menyemangati dan berjuang bersama untuk menyelesaikan tugas akhir.

9. Kawan seperjuangan angkatan MERCUSUAR '14 yaitu Soleh, Ikbar, Afif, Azizah, Mayong, Denny, Trisatya, Suud, Cide, Jujui, Horas, dan teman-teman angkatan yang telah menjadi teman dan bagian dari pengalaman penulis.
10. Seluruh member RAMS serta Bu Dila, Mbak Emmy, Mbak Uchi, Mbak Putri, Mas Thariq, dan Mas Manik yang telah menjadi rekan dan tempat belajar bagi penulis selama menjadi member RAMS.
11. Seluruh kakak tingkat BISMARCK '12 dan BARAKUDA '13 yang telah memberikan teladan dan bagian dari pengalaman penulis dalam belajar menjadi mahasiswa dan anggota yang baik di lingkungan HIMASISKAL.
12. Seluruh adik-adik angkatan SALVAGE'15, VOYAGE'16, dan teman-teman Paguyuban Solo ITS yang menjadi kawan selama menempuh pendidikan di ITS.
13. Seluruh teman-teman Kos Qur'an dan seluruh anggota Ukhuwah Mercusuar yang selalu mengajarkan untuk selalu taat kepada Allah dan Rasulullah, serta selalu mengajarkan ilmu bagi penulis.
14. Keluarga Pasukan 17 dan saudara anggota Siswa Pecinta Alam SMA N 3 Surakarta.
15. Kepada pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini jauh dari sebuah kesempurnaan, oleh karenanya kritik dan saran sangat terbuka untuk menjadikan karya yang lebih baik dan memberikan kebermanfaatan.

Penulis berharap bahwa karya tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan bagi seluruh pembaca di kemudian hari.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL.....	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Alur Pelayaran	5
2.2 Penilaian Risiko	6
2.3 Prediksi Frekuensi Tubrukan Kapal dan Kandas	7
2.4 Frekuensi Kejadian Tubrukan Kapal	7
2.5 <i>Head on dan Overtaking Collision</i>	9
2.6 <i>Crossing Collision</i>	10
2.7 Kerusakan Struktur	12
BAB III METODE PENELITIAN	15
3.1 Perumusan Masalah.....	15
3.2 Studi Literatur.....	16
3.3 Pengumpulan Data.....	16
3.4 Penentuan Skenario Tubrukan Kapal	17
3.5 Analisis Frekuensi dengan Perhitungan Manual	18
3.5.1 Analisis Frekuensi <i>Crossing Collision IWRAP Theory</i>	18
3.5.2 Analisis <i>Head-On dan Overtaking Collision</i>	20
3.6 Analisis Konsekuensi	21
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Pengolahan Data Kapal	28
4.2 Analisis <i>Crossing Collision</i>	31
4.3 Analisis <i>Head-on Collision</i>	34
4.4 Analisis <i>Overtaking Collision</i>	38
4.5 Analisis Perhitungan Matematis Energi Terdisipasi.....	41
4.6 Analisis Kerusakan Struktur Kapal	44
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN	53
LAMPIRAN	58
BIODATA PENULIS.....	68

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Rute Pelayaran Tol Laut.....	2
Gambar 2. 1. Peta Alur Pelayaran Barat Surabaya.....	5
Gambar 2. 2. Ilustrasi <i>head on collision</i> , ratio μ , sebaran data pada skenario <i>head on</i>	8
Gambar 2. 3. Lintasan kapal yang terjadi pada skenario <i>crossing collision</i>	8
Gambar 2. 4. Definisi dari <i>Diameter Collision</i> , D_{ij}	10
Gambar 2. 5. Perhitungan dari D_{ij} sebagai <i>geometrical collision diameter</i>	11
Gambar 2. 6. Ilustrasi jalur kapal yang bersinggungan dan membentuk sudut θ	11
Gambar 2. 7. Kerusakan Struktur akibat skenario tubrukan kapal dan kandas	13
Gambar 2. 8. Sistem koordinat yang digunakan dalam analisis tubrukan kapal	13
Gambar 3. 1. Flowchart Pengerjaan	15
Gambar 3. 2. Gambar Citra Satelit Lokasi Studi Kasus	17
Gambar 3. 3 Model <i>leg</i> yang didapatkan dari hasil <i>density plot</i> pada IWRAP	19
Gambar 3. 4. Konsekuensi tubrukan kapal yang dianalisis	21
Gambar 3. 5. Gambar bidang <i>midship section</i> kapal kontainer.....	23
Gambar 3. 6. Jendela kerja perangkat lunak ANSYS	24
Gambar 3. 7. Hasil <i>meshing</i> bidang pada ANSYS	24
Gambar 3. 8. <i>Input velocity</i> pada ANSYS.....	25
Gambar 3. 9. Hasil <i>input hydrostatic pressure</i>	25
Gambar 3. 10. Ilustrasi bidang geometri yang terpengaruh oleh gaya	26
Gambar 4. 1. Model <i>leg</i> yang digunakan dalam analisis.....	27
Gambar 4. 2. Tampilan <i>traffic editor</i> pada perangkat lunak IWRAP.....	29
Gambar 4. 3. Jendela <i>Leg Editor</i> menu <i>tab General</i> pada IWRAP.....	30
Gambar 4. 4. Tampilan <i>Leg Editor</i> menu distribusi pada IWRAP.....	30
Gambar 4. 5. <i>Leg</i> atau alur kapal yang terbentuk.....	32
Gambar 4. 6 Ilustrasi model lintasan yang digunakan dalam analisis <i>overtaking collision</i>	38
Gambar 4. 7. Ilustrasi total deformasi pada permodelan 3D	45
Gambar 4. 8. Ilustrasi <i>directional deformation</i> menggunakan permodelan 3D	46
Gambar 4. 9. Ilustrasi <i>equivalent stress</i> pada 3D model Analysis	47

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Lalu Lintas Kapal pada Alur Pelayaran Barat Surabaya	6
Tabel 3. 1. Klasifikasi Kapal berdasarkan jenis dan bulan pada tahun 2015	18
Tabel 4. 1. Pengelompokan data kapal berdasarkan panjang dan jenis kapal	28
Tabel 4. 2. Total Perhitungan Manual	33
Tabel 4. 3. Total Perhitungan menggunakan IWRAP	34
Tabel 4. 4. Hasil validasi perhitungan pada skenario <i>head on collision</i>	37
Tabel 4. 5. Hasil Validasi Perhitungan pada Overtaking Collision	40
Tabel 4. 6. <i>Sample</i> data kapal dalam analisis konsekuensi tubrukan kapal	41
Tabel 5. 1. Hasil Permodelan 3D menggunakan ANSYS	49

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

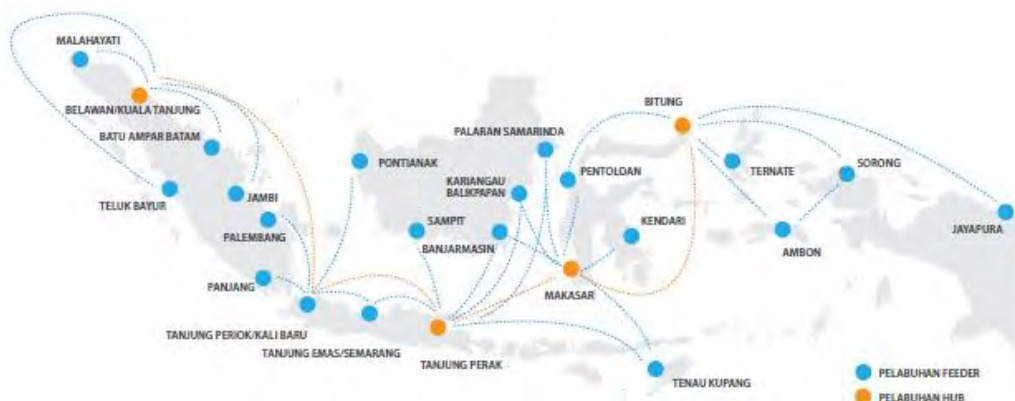
1.1 Latar Belakang

Pelayaran merupakan salah satu moda transportasi yang dinilai murah untuk digunakan sebagai sarana melakukan mobilisasi barang atau penumpang dalam jumlah banyak ke wilayah lain. Dengan kata lain, penyelenggaraan jasa transportasi pelayaran memegang peranan penting dalam aktivitas ekonomi dan mobilisasi manusia dari satu wilayah ke wilayah lain. Selain itu, Indonesia merupakan negara kepulauan yang menjadikan transportasi pelayaran menjadi salah satu tulang punggung bagi distribusi komoditas ke seluruh penjuru tanah air. Keadaan tersebut didukung dengan populasi penduduk di Indonesia yang berdasarkan data dari Sensus Penduduk 2010 mencatat bahwa penduduk Indonesia mencapai 237.641.326 jiwa yang tersebar di daerah-daerah Indonesia. Tingginya jumlah penduduk tersebut sejalan dengan tingginya kebutuhan komoditas yang dibutuhkan penduduk untuk memenuhi kebutuhan seperti pangan dan barang-barang konsumsi lainnya. Selain itu, moda transportasi perairan digunakan untuk menyelenggarakan distribusi energi di seluruh Indonesia seperti pengangkutan bahan bakar minyak, LPG, dan juga batubara. Variasi jenis komoditas atau obyek yang diangkut oleh moda transportasi pelayaran menjadikan jenis-jenis kapal yang beroperasi di jalur pelayaran juga bervariasi sesuai dengan peruntukannya. Keberadaan industri penyedia jasa pelayaran memerlukan dukungan dari sarana prasarana lain yang digunakan untuk menyelenggarakan pelayaran yang lancar, tertib, dan aman. Salah satu sarana yang penting dalam pelayaran nasional adalah penyelenggaraan alur laut yang aman bagi lalu lintas kapal.

Sesuai dengan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia (PM) Nomor 129 tahun 2016 menyatakan pada Bab III pasal 4 bahwa penyelenggaraan alur pelayaran dilakukan untuk:

- a. Ketertiban lalu lintas kapal
- b. Memonitor pergerakan kapal.
- c. Mengarahkan pergerakan kapal, dan
- d. Pelaksanaan hak lintas damai kapal-kapal asing.

Salah satu alur pelayaran tersibuk di Indonesia adalah Alur Pelayaran Barat Surabaya (APBS) yang mengakomodasi berbagai jenis pelayaran baik dari kapal nasional maupun internasional. Alur Pelayaran Barat Surabaya memiliki panjang 25 *nautical mile* dengan lebar alur 150 meter yang menjadi perairan tertutup yang terletak di antara Pulau Madura dan Pulau Jawa bagian Timur. Pada alur pelayaran tersebut menjadi lokasi dari beberapa dermaga yang dimiliki oleh Pemerintah maupun swasta seperti Pelabuhan Tanjung Perak, Dermaga Terminal Peti Kemas Surabaya, Terminal Teluk Lamong, Pelabuhan SIAM Maspion, Dermaga Petrokimia, dan dermaga lain yang beroperasi pada perairan tersebut. Keadaan tersebut juga didukung dengan keberadaan *Java Integrated Industry and Port Estate* (JIPE) yang mengintegrasikan kawasan industri dengan pelabuhan menjadikan moda transportasi berpotensi untuk terus meningkat seiring dengan perkembangan aktivitas industri dan perdagangan.



Gambar 1. 1 Rute Pelayaran Tol Laut

Sumber: *Annual Report* PT. Pelindo III (Persero) tahun 2015

Seperti yang terdapat pada Gambar 1.1 di atas yang menyatakan strategi tol laut Indonesia, Pelabuhan Tanjung Perak menjadi salah satu pelabuhan *hub* nasional yang melayani beberapa rute yang menghubungkan beberapa pelabuhan pengumpan dan pelabuhan *hub* lainnya. Dengan keadaan tersebut maka keberadaan Alur Pelayaran Barat Surabaya cukup vital bagi pelayaran nasional. Dengan peningkatan lalu lintas kapal maupun potensi terjadinya tubrukan juga akan mengalami peningkatan. Peluang terjadi kecelakaan dapat muncul karena beberapa faktor seperti tingginya kepadatan atau *traffic* kapal yang melintasi alur pelayaran tersebut, adanya instalasi-instalasi laut yang berada pada alur tersebut, maupun keberadaan *buoy* serta instalasi lain yang menjadi rintangan pada alur tersebut. Adanya potensi tubrukan kapal yang terjadi pada alur pelayaran tersebut perlu dikaji untuk menganalisis frekuensi terjadi tubrukan kapal. Maka diperlukan kajian penilaian risiko tubrukan kapal yang terjadi di Alur Pelayaran Barat Surabaya pada beberapa skenario yaitu *head on* (berhadapan), *overtaking* (mendahului), maupun *crossing* (bersimpangan). Untuk menganalisis tingkat kerusakan struktur apabila terjadi kecelakaan, maka diperlukan analisis kerusakan struktur kapal. Sehingga dari kedua kajian yang dilakukan tersebut dapat diketahui apakah frekuensi terjadi tubrukan kapal dapat dinilai aman yaitu kurang dari 1 kejadian dalam satu tahun dan bagaimana dampak kerusakan struktur apabila kecelakaan kapal terjadi. Harapan dari kajian yang dilakukan yaitu didapatkan tindakan mitigasi untuk menghindari terjadinya tubrukan kapal dan dampak dari kecelakaan tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam melaksanakan kajian tersebut, terdapat beberapa masalah yang dirumuskan agar proses pengkajian dapat dilakukan secara terarah yaitu :

1. Bagaimana potensi terjadinya tubrukan kapal pada skenario kondisi *head-on situation*, *crossing situation*, dan *overtaking situation*?

2. Bagaimana dampak dari tubrukan kapal yang terjadi terhadap kerusakan struktur kapal?
3. Bagaimana tindakan mitigasi yang dapat ditempuh untuk menghindari terjadinya tubrukan kapal di Alur Pelayaran Barat Surabaya?

1.3 Batasan Masalah

Agar dapat dilakukan kajian yang lancar dan terarah maka diperlukan beberapa batasan masalah, diantaranya adalah:

1. Skenario yang digunakan dalam kajian yaitu pada kondisi *head on*, *overtaking*, dan *crossing situation*.
2. Lokasi yang digunakan sebagai studi kasus adalah Alur Pelayaran Barat Surabaya yaitu pada alur di sekitar Terminal Peti Kemas Surabaya.
3. Kajian dilakukan menggunakan perhitungan manual yang didasarkan pada teori *IWRAP* yang dikembangkan oleh Peter Friis-Hansen (Technical University of Denmark)
4. Analisis kerusakan struktur yang dilakukan menggunakan 2 *sample* data kapal yang dilakukan dengan menggunakan metode matematis dan melakukan permodelan 3D menggunakan *midship section* dan *forepeak section*.

1.4 Tujuan Penelitian

Dari perumusan masalah diatas maka dapat ditentukan tujuan dari Tugas Akhir ini, yaitu :

1. Menentukan frekuensi terjadinya tubrukan kapal pada skenario *head-on*, *overtaking*, dan *crossing*.
2. Melakukan penilaian hasil analisis frekuensi untuk menentukan tingkat risiko terjadinya tubrukan kapal.
3. Melakukan analisis terjadinya kerusakan struktur kapal akibat adanya tubrukan kapal dengan menggunakan metode perhitungan matematis dan permodelan 3D.

1.5 Manfaat

Manfaat yang didapatkan dari dilakukannya kajian berikut adalah:

1. Perhitungan yang dilakukan dapat menjadi gambaran potensi terjadinya tubrukan kapal dan dapat digunakan sebagai informasi tambahan bagi pihak-pihak penyelenggara operasional dan pemanduan lalu lintas pelayaran di Alur Pelayaran barat Surabaya khususnya di sekitar Pelabuhan Tanjung Perak.
2. Kajian yang dilakukan dapat menjadi saran tambahan dalam tindakan pemanduan dan operasi pelayaran di Kesyahbandaran dan Operasional Pelabuhan Tanjung Perak.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Alur Pelayaran

Alur Pelayaran Barat Surabaya merupakan alur pelayaran yang dibentuk di perairan antara Pulau Jawa bagian timur dan Pulau Madura yang memiliki panjang 25 *nautical mile* dengan lebar alur 150 meter dan kedalaman -13 meter. Keberadaan alur pelayaran di Indonesia diatur di dalam Peraturan Menteri Perhubungan No. 129 Tahun 2016 tentang Alur Pelayaran di Laut dan Bangunan dan/ atau Instalasi di Perairan. Alur pelayaran sebagaimana yang tertuang dalam peraturan tersebut mengandung pengertian yaitu perairan yang dari segi kedalaman, lebar, dan bebas hambatan pelayaran lainnya dianggap aman dan selamat untuk dilayari kapal angkutan laut. Alur pelayaran digunakan sebagai perlintasan yaitu suatu perairan yang memiliki satu atau lebih jalur lalu lintas yang saling berpotongan dengan satu atau lebih jalur utama lainnya. Alur pelayaran dapat digunakan sebagai rute dua arah dimana lajur satu dan lainnya diberikan batas-batas yang ditetapkan sebagai jalur lalu lintas agar kapal-kapal yang melalui jalur tersebut aman dan terbebas dari bahaya kesulitan navigasi.



Gambar 2. 1. Peta Alur Pelayaran Barat Surabaya
Sumber: export-jatim.or.id

Gambar 2.1 merupakan peta Alur Pelayaran Barat Surabaya yang memberikan gambaran jalur pelayaran kapal ketika berlayar di dalam alur. Pada alur pelayaran tersebut menjadi lokasi dari beberapa dermaga yang dioperasikan baik oleh perusahaan negara maupun swasta. Selain itu alur tersebut menjadi salah satu alur pelayaran tersibuk di Indonesia. Frekuensi lalu lintas kapal yang melalui Alur Pelayaran Barat Surabaya

mengalami peningkatan, terbukti seperti yang terdapat pada tabel 2.1 yang memuat informasi jumlah lalu lintas kapal yang melalui Alur Pelayaran Barat Surabaya.

Tabel 2. 1. Lalu Lintas Kapal pada Alur Pelayaran Barat Surabaya

Tahun	Pelabuhan Tanjung Perak	Gresik	Jumlah
2010	14197 unit	5650 unit	19847 unit
2011	14117 unit	5625 unit	19742 unit
2012	14733 unit	5851 unit	20624 unit
2013	16798 unit	7295 unit	24093 unit

Sumber: *Annual Report* PT. Pelindo III (Persero) tahun 2013

Berdasarkan Tabel 2.1 tersebut, kondisi arus lalu lintas pelayaran yang terdapat di Alur Pelayaran Barat cenderung mengalami kenaikan. Kenaikan jumlah kapal meningkat dari tahun 2011 hingga tahun 2013 dengan peningkatan mencapai lebih dari 2.500 kapal dalam kurun waktu 2 tahun tersebut. Sehingga kondisi pada waktu yang akan datang berpotensi untuk semakin meningkat.

2.2 Penilaian Risiko

Menurut IMO (IMO, 2007), risiko didefinisikan sebagai kombinasi dari frekuensi dan tingkat kerusakan yang ditimbulkan sebagai sebuah konsekuensi. Frekuensi merupakan banyaknya kejadian yang dihitung per satuan waktu tertentu. Dan konsekuensi merupakan keluaran atau dampak yang ditimbulkan oleh terjadinya kecelakaan. Penilaian risiko dilakukan dengan tujuan untuk menilai apakah suatu risiko dapat diterima dan dinyatakan aman pada suatu kasus tertentu atau tidak. Analisis dilakukan dengan melaksanakan peninjauan pada:

- Tingkat risiko, dilakukan dengan menentukan frekuensi terjadinya kejadian dengan tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh konsekuensi.
- Peluang terjadi risiko, dilakukan dengan melakukan identifikasi area dari model risiko yang memiliki tingkat kemunculan kejadian tertinggi.
- Tingkat kerusakan, didapatkan dengan mengidentifikasi area dari model risiko yang berkontribusi menimbulkan kerusakan terbesar.

Dari analisis risiko tersebut kemudian dilakukan pengendalian terhadap risiko yaitu dengan cara sebagai berikut:

- Mereduksi frekuensi terjadinya potensi gangguan dengan perbaikan desain, prosedur, aturan, pelatihan, dan lain sebagainya.
- Melakukan mitigasi dari efek kerusakan yang digunakan untuk mencegah terjadinya kecelakaan.
- Melakukan mitigasi dari konsekuensi kecelakaan.

Tindakan yang telah disebutkan pada halaman sebelumnya merupakan cara-cara yang digunakan untuk mereduksi potensi terjadinya risiko secara efektif. Pada akhirnya suatu penilaian risiko akan menghasilkan tindakan rekomendasi yang dapat diterapkan sebagai keluaran dari penilaian risiko.

2.3 Prediksi Frekuensi Tubrukan Kapal dan Kandas

Kajian terhadap terjadinya tubrukan kapal dan kapal kandas telah dilaksanakan sejak 1974 oleh Fujii dan juga MacDuff yang menginisiasi analisis tubrukan kapal yang terjadi di Selat Dover dan melakukan kalkulasi terhadap kemungkinan teoritis terjadinya tubrukan dan kandas pada kapal. Prosedur konseptual yang digunakan untuk menghitung frekuensi terjadi tubrukan atau kandas pada kapal dapat dilakukan menggunakan formula yang telah dirumuskan oleh Fujii. Pada perhitungan tersebut, beberapa komponen yang terlibat yaitu Ng , yang didefinisikan sebagai *geometric number* yang dinyatakan sebagai kandidat kapal yang terlibat dalam peristiwa tubrukan kapal atau kandasnya kapal, dan juga Pc , yaitu *causation factor* yang menjadi pengali dari nilai *geometric number* yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda_{col} = Pc \times Ng \quad (2-1)$$

Nilai dari *geometric number* dapat ditentukan melalui persamaan yang berasal dari metode yang digunakan untuk melakukan analisis sebagai contoh yaitu metode yang dikembangkan oleh Peter Friis-Hansen tahun 2007. Perhitungan tersebut dapat dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan analisis dan pengelompokan lalu lintas kapal berdasarkan pada beberapa kelompok kapal yang diklasifikasikan berdasarkan jenis kapal, ukuran kapal, dimuati atau dalam kondisi *ballasting*, menggunakan *bulbous bow* atau tidak, dan klasifikasi lainnya yang terdapat pada setiap alur pada satuan waktu tertentu. (Hansen, 2007)

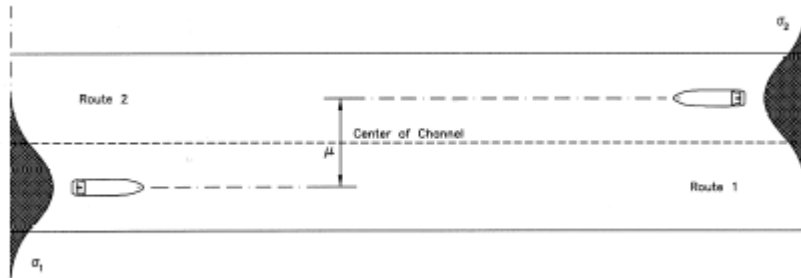
Sedangkan nilai *causation factor* memiliki nilai yang berbeda-beda di setiap lokasi studi kasus. Hal itu dapat terjadi karena dalam perhitungan *causation factor* dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti kondisi jarak pandang, cuaca, kelembaban, dan lain sebagainya. Pada beberapa metode, *causation factor* ditentukan melalui *Fault Tree Analysis* maupun melalui *Bayesian Network*.

2.4 Frekuensi Kejadian Tubrukan Kapal

Analisis frekuensi terjadinya tubrukan kapal digunakan untuk menilai tingkat keselamatan alur pelayaran kapal yang memiliki densitas atau tingkat lalu lintas pelayaran yang tinggi. Suatu alur dapat dinyatakan aman apabila jumlah kejadian hasil analisis memiliki nilai kurang dari 1 terjadi dalam satu tahun. Menurut *IWRAP Theory* (Friis-Hansen, 2007), secara umum tubrukan kapal dapat dikelompok menjadi 2 jenis yaitu :

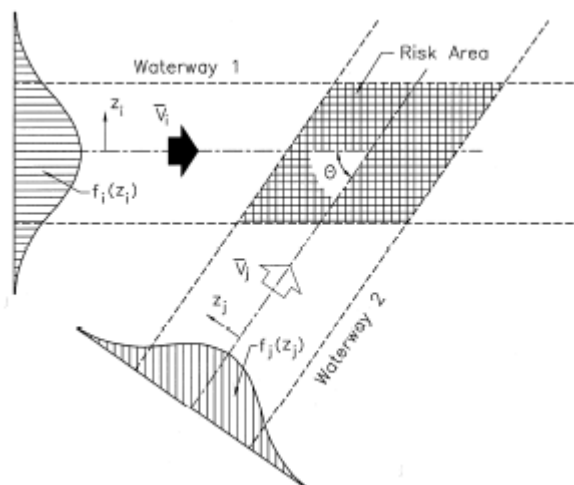
- a. Tubrukan yang terjadi di sepanjang segmen, seperti *overtaking* atau *head on collision*.
- b. Tubrukan kapal ketika 2 kapal atau lebih saling bersimpangan dalam alur satu sama lain yaitu berupa *merging* atau *crossing*.

Prosedur perhitungan dari nilai kandidat tubrukan, N_G , berbeda pada kedua tipe tersebut karena pada tubrukan kapal yang terjadi di sepanjang segmen atau lintasan kapal didasarkan pada perhitungan lalu lintas kapal yang tersebar secara lateral sedangkan pada kapal yang saling bersimpangan memiliki keadaan independen terhadap sebaran obyeknya.



Gambar 2. 2. Ilustrasi *head on collision*, ratio μ , sebaran data pada skenario *head on*.
Sumber: (Hansen, 2007)

Pada Gambar 2.2 menjelaskan tentang skenario dari *head on collision* dimana kapal bergerak pada satu segmen lintasan. Pada ilustrasi tersebut, kapal diasumsikan terdistribusi secara normal yang berarti kecenderungan kapal yang melintas bergerak di tengah alur. Sedangkan μ menyatakan jarak antar *centerline* kapal yang melintas. Peluang terjadinya tubrukan pada skenario *head on* akan semakin kecil apabila nilai dari μ yang menyatakan jarak antar *centerline* kapal semakin besar.



Gambar 2. 3. Lintasan kapal yang terjadi pada skenario *crossing collision*.
Sumber: (Hansen, 2007)

Sedangkan pada Gambar 2.3, lintasan kapal yang saling bersimpangan membentuk sudut dan “*risk area*” dengan besar area terarsir akan ditentukan melalui persamaan *diameter collision*. Area risiko yang terbentuk pada *crossing collision* dipengaruhi oleh sebaran

kapal tetapi kemungkinan kapal bertemu satu sama lain tidak terpengaruh. *Diameter collision* akan menentukan banyaknya nilai dari *geometric number* dari kapal yang menjadi kandidat dari terjadinya *crossing collision*.

2.5 Head on dan Overtaking Collision

Head on collision dan *overtaking collision* merupakan tubrukan kapal yang ditinjau pada satu segmen panjang lintasan kapal. Besarnya nilai dari *overtaking collision* dan *head on collision* dipengaruhi oleh beberapa nilai dari data sebagai berikut :

- Panjang segment, L_w , yaitu panjang lintasan yang dianalisis.
- Komposisi lalu lintas pelayaran seperti banyaknya kapal yang melintas pada kurun waktu tertentu yang diklasifikasikan berdasarkan ukuran dan jenis kapal dan dinotasikan sebagai Q_i dan Q_j pada setiap arah atau jalur, serta kecepatan masing-masing yang dinotasikan sebagai V_i dan V_j .
- Distribusi peluang geometris, $f_i(y)$ dan $f_j(y)$, pada lalu lintas pelayaran kapal pada kondisi lateral yang tersebar pada alur. Sebaran kapal pada alur dapat dinyatakan terdistribusi normal karena pada dasarnya kapal pada masing-masing alur akan berlayar di tengah alur dan dinyatakan bernilai positif bagi kapal yang bergerak menuju ke arah kanan dari arah berlayar.

Untuk analisis tubrukan kapal dengan kondisi *head on*, nilai dari *geometric number* yang menyatakan sebagai kandidat tubrukan untuk kapal yang berlayar sepanjang segmen alur pada arah (1) dan (2) dapat dinyatakan dirumuskan sebagai berikut:

$$N_G^{head-on} = L_w \sum_{i,j} P_{G_{I,j}}^{head-on} \frac{V_{ij}}{V_i V_j} (Q_i Q_j) \quad (2-2)$$

Dimana, $V_{ij} = V_i + V_j$ merupakan kecepatan relatif kedua kapal yang bergerak di sepanjang alur dan P_G merupakan peluang kedua kapal terlibat kecelakaan pada saat bergerak saling berhadapan. Peluang tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$P_g = \Phi\left(\frac{B_{ij} - \mu_{ij}}{\sigma_{ij}}\right) - \Phi\left(-\frac{B_{ij} + \mu_{ij}}{\sigma_{ij}}\right) \quad (2-3)$$

Nilai dari $\Phi(x)$ menyatakan perhitungan dilakukan menggunakan fungsi distribusi normal, $\mu_{ij} = \mu_i + \mu_j$, dinyatakan sebagai *mean* dari jarak berlayar dari 2 kapal pada masing-masing jalur. σ_{ij} dinyatakan dengan $\sigma_{ij} = \sqrt{(\sigma_i)^2 + (\sigma_j)^2}$ yang merupakan standar deviasi dari masing-masing alur, dan $B_{ij} = \frac{B_i + B_j}{2}$ dinyatakan sebagai rata-rata dari lebar kapal yang melalui alur tersebut. Frekuensi dari *head on collision*, yang dinyatakan sebagai $\lambda_{col}^{head-on}$ didapatkan dari perkalian nilai *geometric number* atau $N_G^{head-on}$ dengan *causation factor* dari *head on collision* atau $P_c^{head-on}$. Pada DROGDEN yaitu kajian yang mempelajari *causation factor*, nilai dari *causation factor* dinyatakan sebesar 1.3×10^{-4} yang digunakan untuk kondisi *head on* dan *overtaking collision*. Terdapat beberapa nilai dari *causation factor* yang dihasilkan dari beberapa penelitian seperti pada penelitian yang dilakukan pada *Oil and Chemical Spill in Danish Waters* yang menyatakan nilai *causation factor* sebesar 3×10^{-4} dan nilai *causation factor* yang didasarkan pada

penelitian oleh Fujii pada *collision statistic in Japanese waters*, dengan estimasi nilai $P_c = 4,9 \times 10^{-5}$.

Untuk perhitungan *overtaking collision* maka *geometric number* dari kandidat kapal yang bertubrukan menggunakan formula (2-2) dengan kecepatan relatif yang dihitung sesuai rumus berikut, $V_{ij} = V_i - V_j$, apabila nilai $V_{ij} < 0$ maka kapal i dinyatakan tidak dapat mendahului kapal j . Sehingga persamaan untuk menghitung peluang dari *overtaking* adalah,

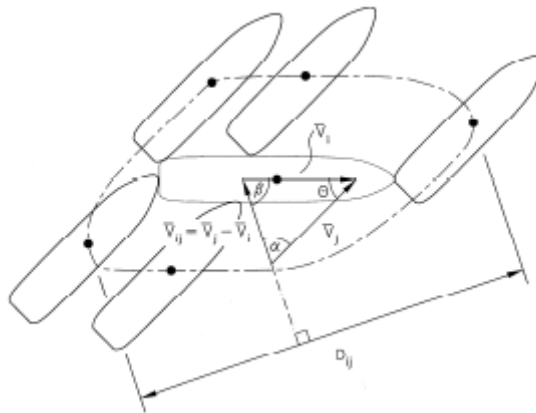
$$P_{G_{ij}} = P\left[y_i - y_j < \frac{B_i + B_j}{2}\right] - p\left[y_i - y_j < -\frac{B_i + B_j}{2}\right] \quad (2-4)$$

2.6 Crossing Collision

Frekuensi dari *crossing collision* ditentukan oleh besarnya sudut yang terbentuk oleh dua buah jalur kapal yang saling bersimpangan. Pada gambar 2.3 menunjukkan dua buah jalur yang digunakan sebagai perlintasan kapal dan saling bertemu dengan membentuk sudut sebesar θ . Nilai dari *geometric number* dari kandidat kapal yang terlibat dalam *crossing collision* dapat dihitung dengan persamaan (5) yaitu,

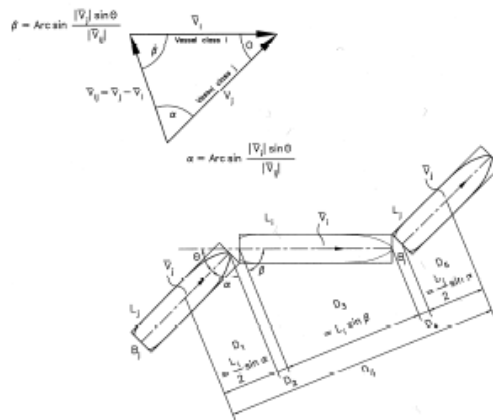
$$N_G^{crossing} = \sum_{i,j} \frac{Q_i Q_j}{v_i v_j} D_{ij} V_{ij} \frac{1}{\sin \theta} \text{ untuk sudut sebesar } 10^\circ < [\theta] < 170^\circ \quad (2-5)$$

Dengan $V_{ij} = \sqrt{(V_i)^2 + (V_j)^2 - 2 \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos \theta}$ adalah kecepatan relatif dari kedua kapal yang terlibat dalam skenario tersebut. D_{ij} didefinisikan sebagai diameter dari area tubrukan sesuai dengan yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Definisi dari Diameter Collision, D_{ij}
Sumber: (Hansen, 2007)

Gambar 2.4 merupakan ilustrasi dari D_{ij} atau *collision diameter* yang didefinisikan sebagai besarnya area yang terbentuk oleh beberapa kapal yang berada pada area yang sama dengan luasan tertentu dan membentuk radius daerah tubrukan.



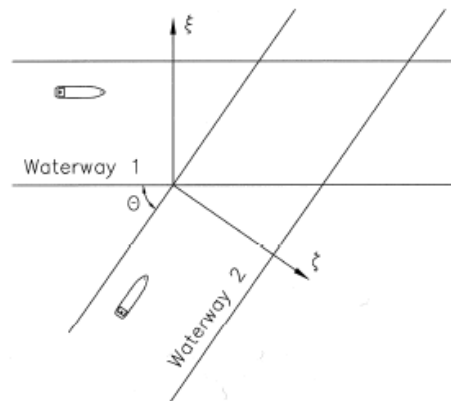
Gambar 2. 5. Perhitungan dari D_{ij} sebagai *geometrical collision diameter*
Sumber: (Hansen, 2007)

Gambar 2.5 merupakan perhitungan nilai dari D_{ij} , apabila diasumsikan bahwa *collision diameter* terbentuk oleh 3 kapal tersebut maka nilai D_{ij} merupakan hasil penjumlahan dari nilai D_i merupakan hasil dari persamaan , D_2 , D_4 , merupakan nilai dari B_i , D_3 dinyatakan dengan persamaan $L_i \sin \beta$, dan D_5 merupakan hasil dari perhitungan $\frac{L_j}{2} \sin \alpha$. Maka nilai dari D_{ij} dapat dihitung dari persamaan berikut,

$$D_{ij} = \frac{L_i V_j + L_j V_i}{V_{ij}} \sin \theta + B_j \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_i}{V_{ij}} \right)^2 \right\} + B_i \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_j}{V_{ij}} \right)^2 \right\} \quad (2-6)$$

Dimana nilai dari V_{ij} yang merupakan kecepatan relatif dari 2 kelompok kapal yang dianalisis yang ditentukan dengan persamaan berikut,

$$V_{ij} = \sqrt{(V_i)^2 + (V_j)^2 - 2 \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos \theta} \quad (2-7)$$



Gambar 2. 6. Ilustrasi jalur kapal yang bersinggungan dan membentuk sudut θ
Sumber: (Hansen, 2007)

Gambar 2.6 merupakan ilustrasi yang menjelaskan 2 jalur kapal yang saling bersinggungan dan membentuk sudut (θ). Sudut tersebut merupakan sudut simpangan yang akan digunakan dalam melakukan perhitungan secara manual. Frekuensi dari tubrukan pada skenario *crossing* ditentukan dengan persamaan yaitu,

$$\lambda_{ship-ship} = Pc_{ij} N_{GI} \quad (2-8)$$

Nilai dari frekuensi tersebut merupakan hasil kali dari *causation factor* (Pc) dan *geometrical number* (N_G) yang didapatkan dari perhitungan dengan persamaan (2-5).

2.7 Kerusakan Struktur

Tubrukan kapal dan kandasnya kapal menjadi beberapa faktor penyebab kerusakan struktur kapal dan menimbulkan kerusakan yang memiliki dampak lebih lanjut yaitu berupa karamnya kapal, kebocoran muatan yang menimbulkan polusi, maupun menimbulkan korban jiwa. Pada setiap skenario tubrukan kapal, terdapat beberapa metode analisis yang digunakan untuk menentukan energi yang terdisipasi atau tersalurkan dari obyek kapal penubruk (*striking vessel*) kepada obyek kapal yang tertubruk (*struck vessel*) pada saat tubrukan. Dampak dari energi yang disalurkan tersebut dapat berupa kerusakan struktur pada kapal baik deformasi struktur, sobek atau berlubang pada konstruksi kapal, maupun kerusakan yang masif yang ditentukan oleh besarnya energi yang disalurkan.

Secara umum, konsekuensi tubrukan kapal terbagi menjadi 2 yaitu *external dynamics* dan *internal mechanics* (Burmeister, 2007). *External dynamics* diasumsikan bahwa kapal yang tertubruk (*struck ship*) berada pada kondisi statis dan kapal yang menubruk (*striking vessel*) berada pada keadaan bergerak. Sedangkan *internal mechanics* merupakan respon dari struktur kapal tersebut. *External dynamics* menjelaskan bahwa gerakan bangunan kapal yang kaku dan energi terdisipasi melalui tubrukan yang terjadi pada struktur. Sedangkan pada *internal mechanics* berfokus pada proses dari terjadinya deformasi struktur dan kerusakan akibat dari tubrukan yang terjadi. Dalam menyelesaikan permasalahan tersebut, terdapat beberapa pendekatan yang digunakan untuk menyelesaikan tinjauan *external dynamics* yaitu :

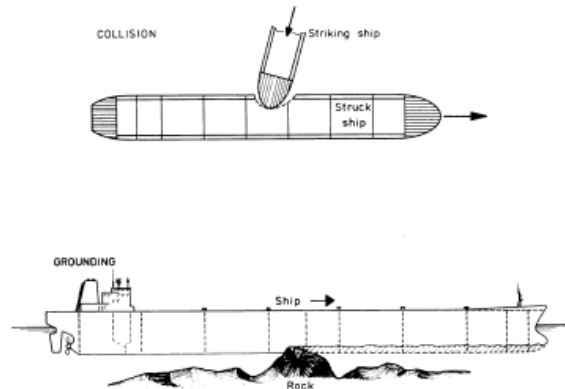
- Pendekatan numerik, yaitu penyelesaian masalah dengan menggunakan solusi dari persamaan dari gerakan dari 2 kapal sebagai permasalahan yang dianalisis.
- Pendekatan analitis, yaitu penentuan momentum dari tubrukan yang terjadi antar kapal dengan menggunakan eksperimen, maupun pembuatan permodelan menggunakan perangkat lunak.

Energi primer yang diserap pada mekanisme deformasi merupakan salah satu contoh dari *internal mechanic model* yang terjadi. Pada kapal yang tertabrak, kerusakan yang ditimbulkan dapat berupa:

- Terpotong atau hancurnya struktur horizontal kapal terutama pada geladak dan konstruksi dasar kapal.

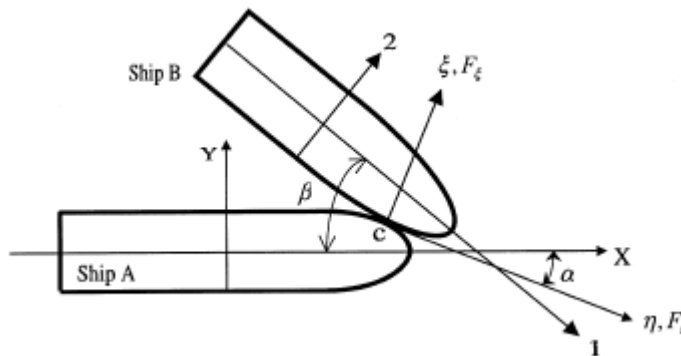
- Deformasi membrane dari permukaan badan kapal dan konstruksi longitudinal.
- Kerusakan pada konstruksi transversal kapal.

Sedangkan bagi kapal yang menabrak, maka kerusakan yang dapat dialami adalah kerusakan pelat longitudinal dan konstruksi pada haluan.



Gambar 2. 7. Kerusakan Struktur akibat skenario tubrukan kapal dan kandas
Sumber : (Zhang, 1999)

Gambar 2.7 merupakan ilustrasi kerusakan struktur yang diakibatkan oleh tubrukan kapal maupun kandasnya kapal. Besarnya energi kinetik yang terserap dan menghasilkan deformasi dari struktur kapal dapat dinyatakan sebagai *inelastic condition*.



Gambar 2. 8. Sistem koordinat yang digunakan dalam analisis tubrukan kapal

Gambar 2.8 merupakan sistem koordinat yang digunakan untuk menganalisis tubrukan kapal dan kapal. Secara teori analisis dinyatakan bahwa *striking ship* (A) yang berlayar dengan kecepatan V_{ax} dan kecepatan V_{ay} pada *sway direction*, menabrak kapal yang disebut sebagai *struck ship* (B), berlayar dengan kecepatan V_{b1} dan kV_{b2} yang dinyatakan sebagai *sway speed*. Titik yang dinyatakan sebagai ξ -direction bersifat normal

terhadap permukaan terdampak, sudut antara sumbu X dan sumbu η adalah α , dan sudut antara sumbu X terhadap sumbu l .

Pada analisis konsekuensi tubrukan kapal, besarnya energi dapat dihitung berdasarkan prinsip konservasi energi dan persamaan momentum. Perhitungan energi yang terserap dapat dihitung menggunakan persamaan yang melibatkan *displacement* kapal Δ_i dan Δ_j , dengan persamaan sebagai berikut:

$$E = \frac{1}{2}(I+m_{ax}).(\Delta_i v_i^2 + \Delta_j v_j^2) - \frac{1}{2}(I+m_{ax})^2 \cdot \frac{\Delta_i^2 v_i^2 + \Delta_j^2 v_j^2 + 2\Delta_i v_i \Delta_j v_j \cos\theta}{(1+m_{ax}).\Delta_i + (1+m_{ay}).\Delta_j} \quad (2-9)$$

i merupakan notasi bagi kapal yang menubruk sedangkan j merupakan kapal yang tertubruk.

Besarnya ukuran kerusakan atau volume kerusakan material dipengaruhi oleh besarnya energi yang terserap pada saat tubrukan (Burmeister, 2007). Minorsky (1959) melakukan perhitungan dari 26 data tubrukan kapal skala penuh dengan kecepatan, sudut tubrukan, dan besarnya ukuran kerusakan yang telah diketahui. Maka kajian lanjutan dilakukan dengan dan telah dimodifikasi melalui pendekatan linier oleh Pedersen dan Zhang (2000) dengan persamaan berikut,

$$E = 0,777.\varepsilon_c.\sigma_o.R_j + 3,5.\left(\frac{t}{d}\right)^{0,67}.\sigma_o.R_i \quad (2-10)$$

R_i = volume material yang mengalami kerusakan kapal yang tertubruk

σ_o = tegangan aliran material

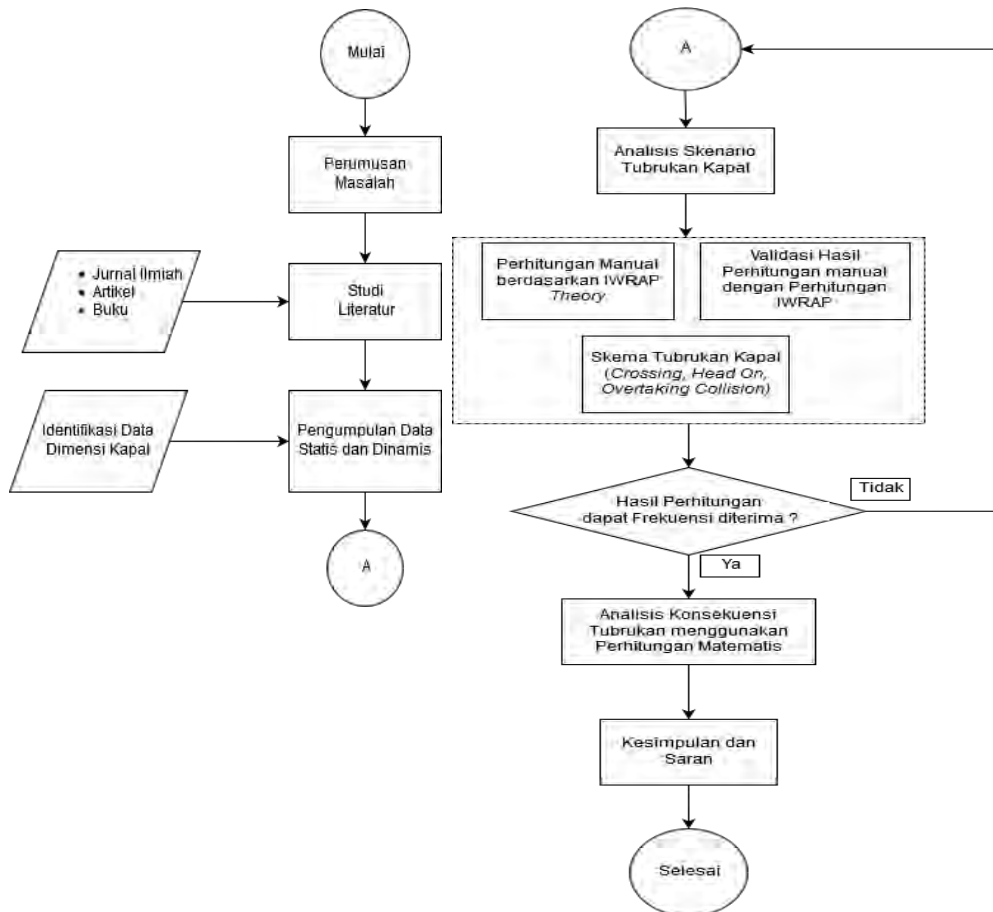
ε_c = tegangan kritis

R_j = volume kerusakan material yang terjadi pada *bow* kapal penubruk

t = ketebalan pelat rata-rata

d = lebar pelat pada *cross sectional area*

BAB III METODE PENELITIAN



Gambar 3. 1. Flowchart Pengerjaan

Gambar 3.1 merupakan flowchart alur pengerjaan tugas akhir yang menjadi acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini yaitu :

3.1 Perumusan Masalah

Pada tahap ini, perumusan masalah menjadi tahap awal dalam pengerjaan tugas akhir ini. Perumusan masalah dilakukan dengan menggali informasi dengan melakukan mempelajari kajian yang telah dilaksanakan sebelumnya. Perumusan masalah yang didapatkan penulis merupakan pengembangan dari beberapa kajian yang telah dilaksanakan sebelumnya yaitu gagasan analisis risiko tubrukan selama proses *ship to ship transfer* bakar Adhita (2017) dan estimasi frekuensi tubrukan kapal selama proses *pipeline decommissioning* pada *crossing* II Alur Pelayaran Barat Surabaya oleh Pratiwi

(2015) dimana pada kedua kasus tersebut kapal yang dijadikan sebagai obyek penelitian dalam keadaan dinamis-statis. Sehingga pada tugas akhir ini penulis mengembangkan gagasan tersebut sebagai tubrukan kapal-kapal yang terjadi pada saat kedua obyek dalam keadaan dinamis. Hal itu didasari oleh perkembangan jumlah kapal yang melintasi Alur Pelayaran Barat Surabaya yang memiliki lebar alur 150 meter. Dengan kondisi terkini dimana alur yang cukup sempit dan tingginya arus lalu lintas kapal yang berpotensi terus meningkat setiap tahunnya, pada lokasi tersebut berpotensi pula terjadi peningkatan frekuensi tubrukan kapal pada kondisi *head on*, *crossing*, maupun *overtaking situation*. Sehingga diperlukan kajian untuk mengetahui frekuensi terjadinya tubrukan kapal yang mungkin terjadi serta dilakukan kajian konsekuensi kerusakan struktur kapal sebagai dampak dari tubrukan kapal yang terjadi.

3.2 Studi Literatur

Setelah perumusan masalah dilakukan, maka selanjutnya dilakukan studi literatur yang memiliki topik terkait yang dapat mendukung pelaksanaan tugas akhir penulis. Teori-teori yang terkait dengan permasalahan tersebut diperlukan sebagai dasar untuk menyelesaikan permasalahan yang digagas. Berikut beberapa literatur berupa artikel, jurnal, maupun buku yang telah dipelajari penulis untuk mendukung penyelesaian permasalahan yang digagas:

- a. IWRAP Mk. II *Working Document; Basic Modelling Principles for Prediction of Collision and Grounding Frequencies* (Peter Friis-Hansen, 2007)
- b. *The Mechanics of Ship Collision* (Zhang, 1999)
- c. Artikel dan jurnal tentang *Ship Collision*
- d. Artikel dan jurnal tentang konsekuensi kerusakan struktur akibat tubrukan kapal.

3.3 Pengumpulan Data

Pada tahapan ini penulis melakukan pengumpulan data yang diperlukan dalam penyelesaian tugas akhir ini. Data-data yang diperlukan diantaranya adalah:

- a. Data statis kapal yaitu berupa data lalu lintas kapal yang terdapat pada lokasi studi kasus pada kurun waktu tertentu. Data statis memuat informasi tentang identitas kapal berupa nama kapal, MMSI, dan rute kapal, serta berisikan informasi dimensi kapal berupa panjang dan lebar kapal yang diperlukan dalam proses perhitungan melalui metode manual maupun metode komputasi menggunakan IWRAP.
- b. Data dinamis kapal yaitu data yang didapatkan dari *Automatic Identification System* (AIS). Data dinamis dijadikan sebagai *input* yang dimasukkan ke dalam IWRAP yang akan menghasilkan *density*

plot. Dari hasil *input* tersebut akan digunakan untuk menentukan pembuatan model *leg* pada lokasi yang dianalisis.

Data yang didapatkan memerlukan pelengkapan kembali seperti data dimensi berupa panjang dan lebar kapal. Pada proses ini, penulis menggunakan bantuan situs www.marinetraffic.com dan juga situs Biro Klasifikasi Indonesia untuk melakukan identifikasi data yang diperlukan.

3.4 Penentuan Skenario Tubrukan Kapal

Dalam menentukan skenario tubrukan, penulis melakukan *density plot* terlebih dahulu melalui IWRAP dengan menggunakan data dinamis yang didapatkan melalui AIS. Data yang digunakan untuk proses tersebut merupakan data lalu lintas kapal selama 5 bulan yaitu pada bulan Januari hingga Mei 2015. Proses *density plot* digunakan untuk mengetahui lokasi alur yang sering dilewati kapal. Sehingga dengan acuan *density plot* tersebut model *leg* atau lintasan dapat dibuat menggunakan IWRAP untuk mendapatkan posisi *leg*, panjang *leg*, dan sudut dari *leg* tersebut.



Gambar 3. 2. Gambar Citra Satelit Lokasi Studi Kasus
Sumber: *Software Google Earth*

Gambar 3.2 merupakan gambar hasil *plot* koordinat dari *leg* yang didapatkan melalui IWRAP. Dalam proses penentuan sudut, penulis menggunakan bantuan dari *Google Earth* untuk mengetahui lintasan yang terbentuk dan melakukan pengukuran sudut secara manual. Pada lokasi yang ditentukan tersebut terdapat 3 kemungkinan situasi tubrukan kapal yaitu *head on*, *overtaking*, dan *crossing collision*. *Head on* berpotensi terjadi pada *leg* 1 yang menjadi lintasan bagi kapal yang bergerak menuju arah Terminal Peti Kemas Surabaya maupun Pelabuhan Tanjung Perak dengan kapal yang berlayar menuju arah Barat kembali menuju Perairan Gresik. Pada *leg* yang sama, *overtaking* dapat terjadi

ketika kapal bergerak menuju arah Terminal Peti Kemas dan Pelabuhan Tanjung Perak. Sedangkan *crossing collision* berpotensi terjadi bagi kapal yang akan memasuki Terminal Peti Kemas yaitu dari *leg* 1 menuju *leg* 3 maupun kapal yang berlayar menuju ke *leg* 2 yaitu berlayar menuju Pelabuhan Tanjung Perak. Dari ketiga *leg* yang berhasil dimodelkan, terbentuk 3 sudut yaitu 60° , 130° , dan juga 170° .

3.5 Analisis Frekuensi dengan Perhitungan Manual

Analisis frekuensi masing-masing skenario dilakukan berdasarkan pada teori yang terdapat pada IWRAP untuk mengetahui frekuensi terjadinya tubrukan kapal dengan skenario *head-on*, *crossing*, dan *overtaking*. Sebelum melakukan perhitungan secara manual diperlukan pengelompokan data kapal yang didasarkan pada jenis dan panjang kapal.

Tabel 3. 1. Klasifikasi Kapal berdasarkan jenis dan bulan pada tahun 2015

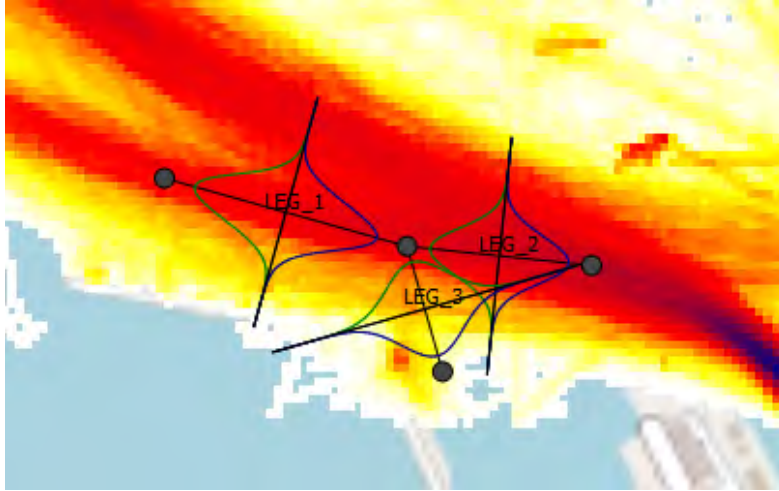
Panjang	Tipe Kapal					
	Kapal Tanker	Kapal Container	Kapal Ro-Ro	Support Ship	General Cargo	Kapal Penumpang
0-25	3	0	0	10	3	0
25-50	178	27	26	231	375	65
50-75	319	278	182	231	776	36
75-100	242	1267	189	14	267	206
100-125	84	1157	539	1	64	17
125-150	37	586	105	0	10	355
150-175	90	151	57	0	9	4
175-200	29	40	0	0	14	0
200-225	0	0	0	0	1	0
225-250	0	0	0	0	0	0
250-275	0	0	0	0	0	0
275-300	0	0	0	0	0	0

Tabel 3.1 merupakan tabel hasil pengelompokan data statis kapal berdasarkan jenis dan panjang kapal. Data tersebut menyatakan jumlah kapal pada masing-masing kelompok dengan jumlah total data sebesar 8.275 buah kapal selama tahun 2015. Data tersebut akan dianalisis berdasarkan kelompok-kelompok kapal yang telah dilakukan.

3.5.1 Analisis Frekuensi *Crossing Collision* IWRAP Theory

Analisis frekuensi tubrukan kapal pada skenario *crossing collision* dilakukan dengan dengan metode perhitungan manual dan dilakukan validasi menggunakan IWRAP. Validasi dilakukan dengan membandingkan kedua hasil metode tersebut

untuk mengetahui selisih perhitungan. Analisis dapat dilakukan berdasarkan data kapal yang telah dimiliki yaitu berupa dimensi kapal, jumlah kapal, kecepatan kapal, dan sudut yang terbentuk.



Gambar 3. 3 Model *leg* yang didapatkan dari hasil *density plot* pada IWRAP

Gambar 3.3 merupakan gambar *leg* yang digunakan untuk melakukan analisis *crossing collision*. Setelah bentuk model dari analisis *crossing collision* didapatkan, maka perhitungan kecepatan relatif dari kedua kelompok kapal dapat dilakukan. Kecepatan relatif dapat dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$V_{ij} = \sqrt{(V_i)^2 + (V_j)^2 - 2 \cdot V_i \cdot V_j \cos \theta}$$

Setelah melakukan perhitungan kecepatan relatif, maka dilakukan perhitungan *diameter of collision* menggunakan persamaan di bawah ini,

$$D_{ij} = \frac{L_i \cdot V_j + L_j \cdot V_i}{V_{ij}} \sin \theta + B_j \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_i}{V_{ij}} \right)^2 \right\} + B_i \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_j}{V_{ij}} \right)^2 \right\}$$

Persamaan tersebut digunakan untuk mengetahui diameter atau radius daerah bagi kapal untuk terlibat dalam *crossing collision*. Dari persamaan tersebut dilakukan penentuan nilai *geometric number* untuk mengetahui banyaknya kapal yang menjadi kandidat dalam tubrukan *crossing*. Nilai dari *geometric number* dihitung dengan menggunakan persamaan,

$$N_G^{crossing} = \sum_{i,j} \frac{Q_i Q_j}{v_i v_j} D_{ij} V_{ij} \frac{1}{\sin \theta} \quad \text{untuk sudut sebesar } 10^\circ < [\theta] < 170^\circ$$

Nilai dari frekuensi merupakan hasil kali dari nilai *geometric number* dengan nilai *causation factor*. Pada kajian yang penulis lakukan, penulis menggunakan nilai *causation factor* yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh Yeyes Mulyadi (2014) dengan nilai P_c didapatkan sebesar $1,08 \times 10^{-4}$ untuk skenario *Crossing*

Collision. Nilai dari frekuensi yang didapatkan akan dilakukan validasi menggunakan hasil dari perhitungan menggunakan perangkat lunak IWRAP untuk mengetahui besarnya selisih data perhitungan.

3.5.2 Analisis *Head-On* dan *Overtaking Collision*

Analisis *head on* dan *overtaking* dilakukan pada lokasi yang sama yaitu *leg 1* yang dianalisis sebagai lokasi terjadinya kedua skenario tersebut. Metode yang digunakan yaitu metode perhitungan manual dengan teori yang sama dengan perhitungan *crossing collision* serta dilakukan validasi data *sample* menggunakan IWRAP untuk mengetahui kesesuaian hasil perhitungan. Pada analisis frekuensi tubrukan pada *head on* dan *overtaking*, diperlukan identifikasi panjang dari segmen lintasan yang dianalisis serta penentuan kecepatan relatif dari kedua metode tersebut. Dalam analisis skenario *head on* dan *overtaking* diperlukan identifikasi terlebih dahulu data-data yang diperlukan yaitu data panjang *segment* dalam hal ini penulis menggunakan panjang lintasan *leg 1* sepanjang 795,41 meter, dan menggunakan kelompok kapal dengan data dimensi dan kecepatan kapal yang telah dianalisis. Data V_i dan V_j pada analisis tersebut didefinisikan sebagai komponen kecepatan dari kedua kapal yang saling berpapasan yaitu i merupakan komponen yang berada pada lintasan i sedangkan j merupakan komponen kecepatan kapal yang melaju pada lintasan j yang kemudian kedua elemen kecepatan tersebut akan digunakan untuk menghitung kecepatan relatif. Perbedaan dari perhitungan *head on* dan *overtaking* yaitu dalam perhitungan kecepatan relatif yaitu :

- Pada *head on collision*, kecepatan relatif merupakan hasil penjumlahan dari kecepatan kapal pada lintasan i dan j dengan persamaan,

$$V_{ij} = V_i + V_j$$
- Pada *overtaking collision*, kecepatan relatif merupakan hasil pengurangan dari kecepatan kapal di kedua lintasan,

$$V_{ij} = V_i - V_j$$

Nilai Q menyatakan sebagai banyaknya lalu lintas kapal yang melewati jalur i (Q_i) dan jalur j (Q_j). Selain itu perhitungan dari nilai P_G yang digunakan pada skenario *overtaking* dan *head on* didasarkan pada fungsi distribusi normal dengan rata-rata jarak antara kedua kapal dinyatakan sebagai $\mu_{ij} = \mu_i + \mu_j$. Kemudian komponen perhitungan juga mempertimbangkan nilai dari standar deviasi kapal dan juga rata-rata lebar kapal, persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai P_G yaitu,

$$P_g = \Phi\left(\frac{B_{ij} - \mu_{ij}}{\sigma_{ij}}\right) - \Phi\left(-\frac{B_{ij} + \mu_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)$$

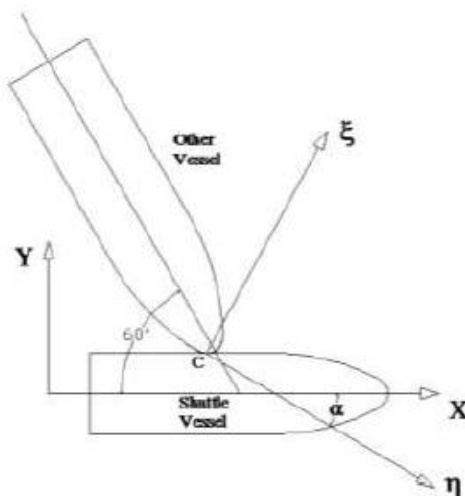
Perhitungan P_G dilakukan dengan menggunakan teori distribusi normal, penulis menggunakan *Microsoft Excel* dalam melakukan perhitungan tersebut. Dari perhitungan nilai P_G , digunakan untuk melakukan perhitungan nilai *geometric number* dengan persamaan berikut ini,

$$N_G^{head-on} = L_W \sum_{i,j} P_{G I,j}^{head-on} \frac{V_{ij}}{V_i V_j} (Q_i Q_j)$$

Nilai dari *geometric number* akan digunakan dalam hitungan frekuensi tubrukan pada kedua skenario tersebut. Frekuensi dari kecelakaan pada skenario *head-on collision* dapat dihitung dengan mengalikan nilai dari $N_G^{head-on}$ dengan *causation factor* yang nilainya yaitu sebesar $0,5 \times 10^{-4}$ dan $1,3 \times 10^{-4}$ merupakan nilai *causation probability* dari *Head On* dan *Overtaking* yang didapatkan dari perangkat lunak IWRAP. Setelah didapatkan nilai dari masing-masing kelompok yang dianalisis, dilakukan validasi untuk menguji kesesuaian perhitungan dengan menggunakan IWRAP. Validasi dilakukan dengan mengambil *sample data* dari perhitungan manual yang kemudian menjadi data masukan bagi IWRAP.

3.6 Analisis Konsekuensi

Analisis konsekuensi dilakukan dengan menganalisis kerusakan struktur kapal yang ditimbulkan akibat dari terjadi tubrukan kapal. Konsekuensi muncul sebagai dampak dari terjadinya tubrukan. Konsekuensi tubrukan berupa kerusakan struktur kapal dianalisis dengan melakukan perhitungan menggunakan metode perhitungan matematis untuk mengetahui besarnya energi yang terdisipasi ketika tubrukan kapal terjadi.



Gambar 3. 4. Konsekuensi tubrukan kapal yang dianalisis

Gambar 3.4 merupakan ilustrasi dari terjadi tubrukan kapal yang terjadi antara *shuttle vessel* dan *other vessel*. Analisis dapat dilakukan dengan meninjau terlebih dahulu koordinat terjadinya tubrukan pada satu titik tertentu yang dinyatakan sebagai (x_c, y_c) pada *shuttle vessel*. η menyatakan sebagai arah permukaan terdampak oleh *other vessel* terhadap *shuttle vessel*. Sudut yang dibentuk oleh η dan sumbu x dinyatakan sebagai α sedangkan ξ dinyatakan sebagai arah permukaan terdampak oleh *shuttle vessel*

terhadap *other vessel*. Sudut yang dibentuk antara *centerline other vessel* terhadap *centerline shuttle vessel*. Persamaan energi yang digunakan adalah persamaan berikut,

$$E\xi = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{D\xi \cdot \mu \cdot D\eta}$$

Nilai dari $D\xi$ dan $D\eta$ dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$D\xi = \frac{Da\xi}{Ma} + \frac{Db\xi}{Mb}$$

$$D\eta = \frac{Da\eta}{Ma} + \frac{Db\eta}{Mb}$$

$$\zeta = V_{ax} \cdot \cos\alpha + V_{ay} \cdot \sin\alpha - V_{b1} \cdot \cos(\beta - \alpha) - V_{b2} \cdot \sin(\beta - \alpha)$$

Dimana :

$$D_{a\xi} = \frac{1}{1+m_{ax}} \cdot \sin^2\alpha + \frac{1}{1+m_{ay}} \cdot \cos^2\alpha + \frac{1}{1+j_a} \cdot \frac{[y_c \cdot \sin\alpha - (x_c - x_a) \cdot \cos\alpha]^2}{R_a^2}$$

$$D_{a\eta} = \frac{1}{1+m_{ax}} \sin\alpha \cos\alpha + \frac{1}{1+m_{ay}} \sin\alpha \cos\alpha +$$

$$\frac{1}{1+j_a} \cdot \frac{[y_c \sin\alpha - (x_c - x_a) \cos\alpha][y_c \cos\alpha - (x_c - x_a) \sin\alpha]}{R_b^2}$$

$$D_{b\xi} = \frac{1}{1+m_{b1}} \sin^2(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+m_{b2}} \cos^2(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+j_b} \cdot \frac{[(y_c - y_b) \sin\alpha - (x_c - x_b) \cos\alpha]^2}{R_a^2}$$

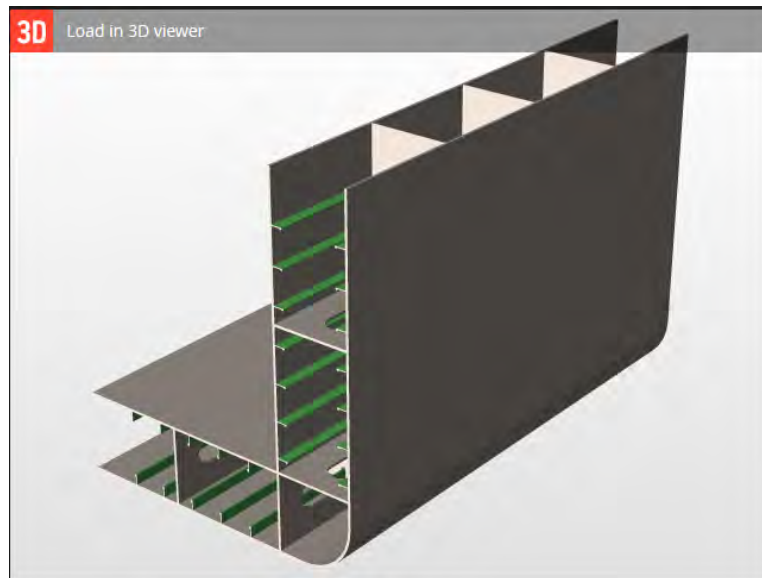
$$D_{b\eta} = \frac{1}{1+m_{b1}} \sin(\beta - \alpha) \cos(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+m_{b2}} \sin(\beta - \alpha) \cos(\beta - \alpha) +$$

$$\frac{1}{1+j_b} \cdot \frac{[(y_c - y_b) \sin\alpha - (x_c - x_b) \cos\alpha][(y_c - y_b) \cos\alpha - (x_c - x_b) \sin\alpha]}{R_b^2}$$

Dalam analisis yang dilakukan oleh penulis, penulis melakukan pembatasan bahwa kapal lain bergerak relatif terhadap kapal a. M_a menyatakan berat kapal A sedangkan M_b menyatakan berat dari kapal B. Penulis menggunakan 4 kapal *sample* sebagai kapal yang melintas di sekitar kapal lain yang ditinjau. Notasi m_{ax} dan m_{b1} menyatakan koefisien massa pada *surge motion* dengan range nilai 0,02-0,07. Notasi m_{ay} dan m_{b2} menyatakan koefisien massa dari *sway motion* dari kapal A dan B dengan nilai 0,3-1,3. Notasi j_a dan j_b menyatakan koefisien massa dari *yaw motion* kedua kapal dengan nilai 0,21. $(x_a, 0)$ menyatakan koordinat *center of gravity* kapal A sebagai *striking vessel* dan (x_b, y_b) dinyatakan sebagai koordinat *center of gravity* kapal B sebagai *struck vessel*. Notasi R menyatakan radius dari inersia kapal yang dinyatakan dengan nilai $\frac{1}{4}$ panjang kapal. Dalam keadaan *crossing collision*, saat tubrukan terjadi pada kapal A menerima energi dari kapal B dan bergerak menyimpang dari posisi awal dengan kecepatan V_{ay} . Kapal B yang terlibat dalam tubrukan menerima energi dari kapal A dan bergerak menyimpang dari posisi awal dengan kecepatan V_{b2} . Asumsi dari

nilai *coefficient of friction* antara kedua kapal bernilai $\mu_0 = 0,6$ sehingga nilai E_z dapat dianalisis kemudian.

Selain metode analisis menggunakan perhitungan matematis untuk mengetahui besarnya energi yang terdisipasi, penulis juga melakukan analisis menggunakan permodelan 3D menggunakan ANSYS AUTODYN sebagai perangkat lunak analisis *explicit dynamics*. Pada analisis tersebut, penulis menggunakan 2 buah *geometry bodies* yaitu berbentuk *midship section* dari kapal kontainer berukuran panjang 14,58 meter, lebar 10 meter, dengan tinggi 10 meter dan *forepeak section* dengan ukuran panjang sumbu x 12,88 meter, sumbu y 7,45 meter, dan sumbu z 12,5 meter. Bidang *midship section* mewakili bagian kapal yang tertabrak dan akan dianalisis menggunakan *external dynamics* sedangkan bidang *forepeak section* mewakili bentuk dari haluan kapal yang menubruk kapal. Dalam analisis tersebut digunakan beberapa asumsi yaitu sudut tubrukan adalah 90° , kecepatan tubrukan adalah 3,4 m/s, massa jenis air laut 1.025 kg/m^3 , gaya magnitude $1 \times 10^8 \text{ N}$, dan percepatan gravitasi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$.

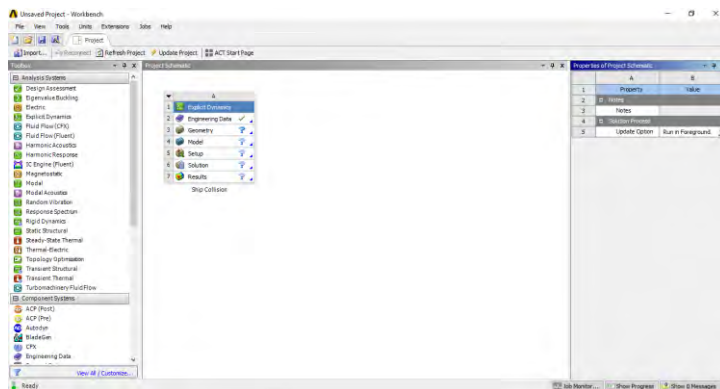


Gambar 3. 5. Gambar bidang *midship section* kapal kontainer
Sumber : <https://grabcad.com/library/midship-section-of-a-cargo-ship-1>

Gambar 3.5 merupakan gambar bidang *midship section* yang digunakan sebagai obyek yang dianalisis secara *explicit dynamics*. Kemudian bidang tersebut dilanjutkan dengan perbaikan bidang dengan menggunakan SolidWork 2016. Perbaikan dilakukan dengan melakukan *mirror* pada bidang tersebut untuk menghasilkan sisi setengah bidang *midship*. Kemudian dilakukan pembuatan bidang *forepeak section* yang merepresentasikan haluan kapal dari kapal penabrak dengan dimensi yang telah disebutkan. Bidang yang telah diolah tersebut akan menjadi *input data* dalam analisis

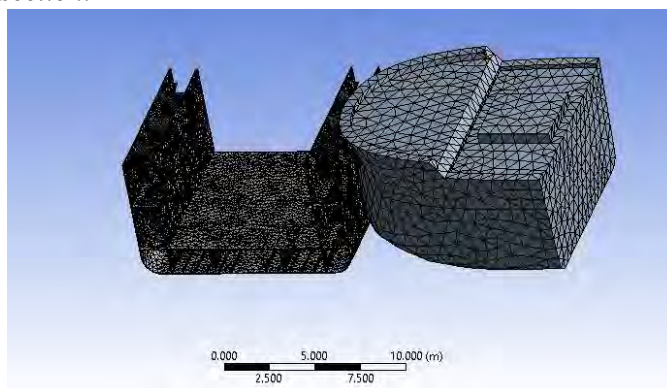
tubrukan. Berikut merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam proses analisis 3D model dengan menggunakan *explicit dynamics* pada ANSYS:

1. Dengan menggunakan ANSYS Workbench digunakan pilihan opsi *analysis system* dengan jenis *explicit dynamic*. Jenis tersebut digunakan dalam melakukan analisis struktur. Gambar 3.6. merupakan jendela kerja pada ANSYS Workbench



Gambar 3. 6. Jendela kerja perangkat lunak ANSYS

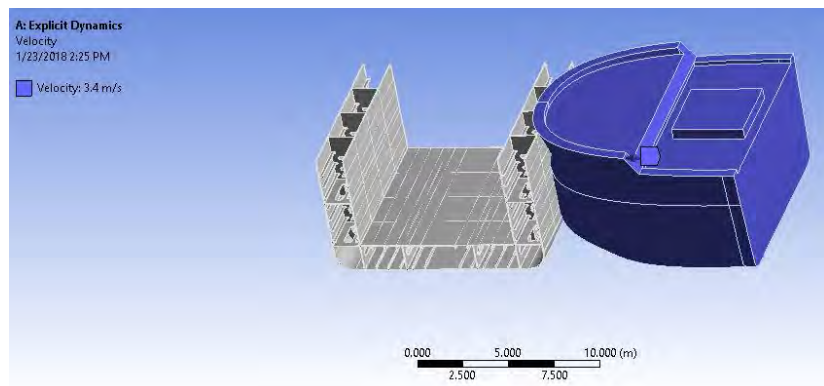
2. Dilakukan pemilihan jenis material yang akan digunakan dalam analisis dengan menggunakan *engineering data*. Dalam opsi tersebut, dilakukan pemilihan material berupa *structural steel* yang digunakan dalam analisis. Karakteristik dari material tersebut adalah :
 - Temperatur lingkungan : 22°C
 - Massa jenis material : 7.850 kg/m³
 - Kalor spesifik : 434 J/kg.C
3. Melakukan *import geometry* yang akan dianalisis dengan memilih *input data* yang telah diolah.
4. Melakukan *meshing* bidang yang dianalisis yaitu *midship section* dan *forepeak section*.



Gambar 3. 7. Hasil *meshing* bidang pada ANSYS

5. Melakukan *input data* dalam *explicit dynamics* yaitu :

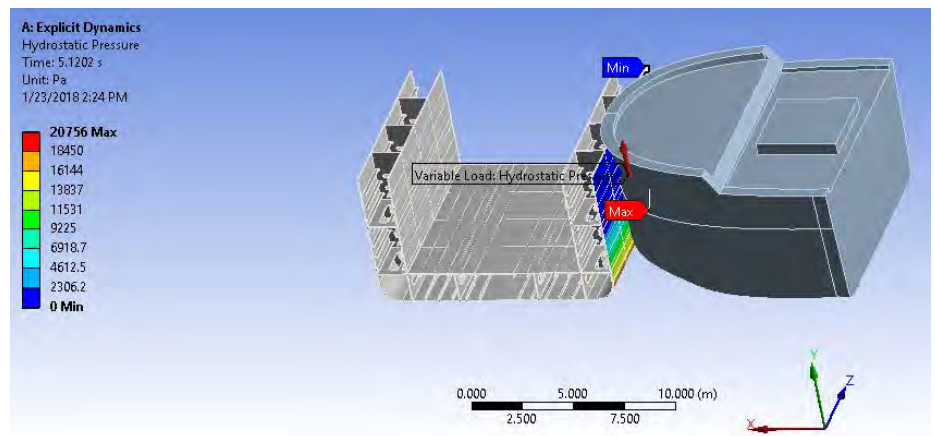
- *Velocity (initial condition)* : 3,4 m/s (ke arah sumbu x)



Gambar 3. 8. *Input velocity* pada ANSYS

Gambar 3.8 menunjukkan *input* kecepatan bidang *forepeak section* dengan kecepatan 3,4 m/s ke arah sumbu (y) yang menabrak bidang *midship section*.

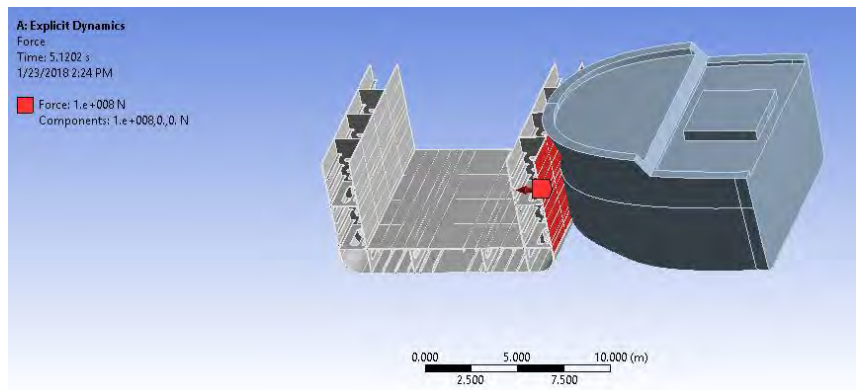
- *Hydrostatic Pressure*
 - Densitas fluida : 1.025 kg/m³
 - Percepatan hidrostatik : 9,81 m/s²
 - *Free surface* : 5 meter dari *baseline*



Gambar 3. 9. Hasil *input hydrostatic pressure*

Gambar 3.9. menunjukkan *input* besarnya tekanan hidrostatik yang dialami kapal dengan sarat 5 meter dan besar tekanan hidrostatik tertinggi yaitu 20.756 Pa.

- *Force* : 100.000 N



Gambar 3. 10. Ilustrasi bidang geometri yang terpengaruh oleh gaya

Gambar 3.10 merupakan ilustrasi bidang geometri yang terpengaruh oleh besar gaya asumsi yaitu 100.000 N.

6. Melakukan *input* analisis yang akan dilakukan yaitu :

- *Total Deformation*
- *Directional Deformation*
- *Equivalent Stress*
- *Total Velocity*

Analisis tersebut dilakukan setiap 30 s *timeframe* dan dilakukan dengan iterasi perhitungan sebanyak 100.000 iterasi. Dengan hasil iterasi tersebut, didapatkan hasil analisis kerusakan struktur dalam ilustrasi 3 dimensi untuk mengetahui dampak dari benturan atau tubrukan yang terjadi.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada pengerjaan tugas akhir yang dilakukan, penulis melakukan analisis frekuensi tubrukan kapal dengan studi kasus pada Alur Pelayaran Barat Surabaya (APBS) dengan lokasi perairan menuju Terminal Peti Kemas Surabaya sekaligus jalur menuju Pelabuhan Tanjung Perak. Penulis menggunakan perangkat lunak IWRAP dalam proses pembuatan model atau *leg* yang akan dianalisis. Pada proses tersebut, penulis menggunakan dua jenis data yang terdiri dari :

- a. Data statis, yaitu data yang berisikan riwayat lalu lintas kapal selama tahun 2015 yang diperoleh dari Kantor Otoritas dan Kesyahbandaran Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya dengan jumlah data kapal sebanyak 8.275 kapal dengan berbagai jenis dan panjang kapal.
- b. Data dinamis yang merupakan data hasil perekaman *Automatic Identification System* yang telah diolah dengan format .csv sebagai data masukan pada perangkat lunak IWRAP. Data tersebut penulis gunakan sebagai referensi proses *density plot* sebagai acuan pembuatan mode.

Analisis dilakukan dengan metode perhitungan manual berdasarkan teori IWRAP dan melakukan validasi hasil perhitungan manual dengan data hasil perhitungan menggunakan IWRAP.



Gambar 4. 1. Model *leg* yang digunakan dalam analisis

Gambar 4.1 merupakan model leg yang digunakan penulis dalam melakukan analisis frekuensi tubrukan kapal. Pada analisis ini, penulis menggunakan 3 jenis skenario yaitu *head on collision*, *overtaking collision*, dan *crossing collision*.

Analisis skenario *head on collision* dilakukan oleh penulis pada *leg 1* sepanjang 795,41 meter dengan menggunakan seluruh data yang telah dikelompokkan. Analisis

dilakukan dengan model kelompok kapal i bergerak menuju Pelabuhan Tanjung Perak dan kelompok kapal j bergerak menuju Perairan Gresik. Sedangkan analisis skenario *overtaking collision* dilakukan pada menggunakan *leg 1* dengan arah peninjauan yaitu *overtaking* pada kapal yang bergerak menuju arah Pelabuhan Tanjung Perak. Analisis *crossing collision* dilakukan menggunakan model yang dibuat berdasarkan dari *density plot* yang telah dilakukan. Terdapat 3 *leg* hasil pembuatan model dengan masing-masing membentuk sudut sebesar 60° , 130° , dan 170° .

Dalam melakukan analisis terhadap 3 skenario tersebut, diperlukan data kecepatan kapal. Pada data statis tidak tercantum data kecepatan kapal, begitu pula pada data dinamis memerlukan metode yang lebih rumit untuk menentukan kecepatan dari pembacaan data riwayat perekaman AIS yang diterima setiap 6 detik. Maka dari itu penulis menggunakan referensi dari publikasi *loss prevention bulletin* yang disusun oleh Asosiasi Pelaut Jepang terhadap kapal pada saat berada di area alur pelabuhan. Pada artikel tersebut ditentukan bahwa kapal pada jarak 4L memasuki pelabuhan tujuan bergerak dengan kecepatan 6,6 knots dan 3,3 knots..

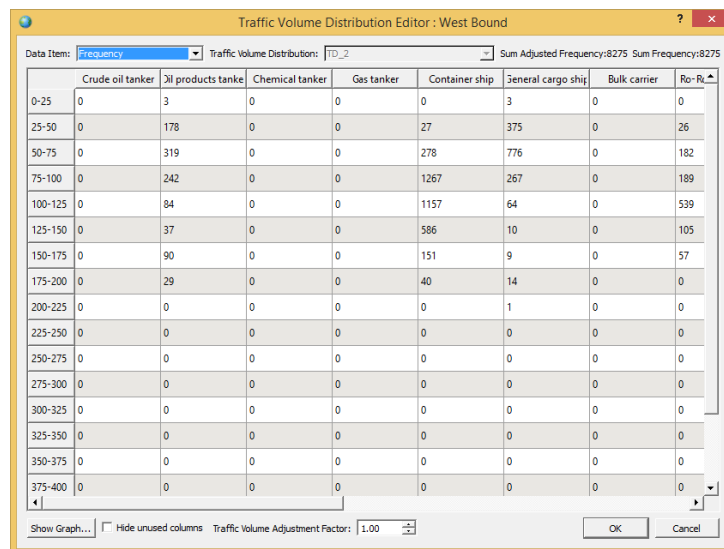
4.1 Pengolahan Data Kapal

Data statis dan dinamis dari lalu lintas kapal dalam kurun waktu tertentu memiliki peran penting dalam pelaksanaan analisis frekuensi tubrukan kapal. Pada pengerjaan tugas akhir ini, penulis melakukan identifikasi dan pelengkapan beberapa data statis yang dibutuhkan dalam analisis. Dengan data yang terdiri dari 8.275 unit kapal yang terdiri dari berbagai jenis dan ukuran kapal. Data tersebut telah dikelompokkan berdasarkan jenis dan bulan pada tahun 2015. Dari data tersebut, penulis melakukan pengelompokan lebih lanjut berdasarkan jenis kapal dan panjang kapal yang dikelompokkan dalam *range* data 25 meter.

Tabel 4. 1. Pengelompokan data kapal berdasarkan panjang dan jenis kapal

Panjang (meter)	Tipe Kapal					
	Kapal Tanker	Kapal Container	Kapal Ro-Ro	Support Ship	General Cargo	Kapal Penumpang
0-25	3	0	0	10	3	0
25-50	178	27	26	231	375	65
50-75	319	278	182	231	776	36
75-100	242	1267	189	14	267	206
100-125	84	1157	539	1	64	17
125-150	37	586	105	0	10	355
150-175	90	151	57	0	9	4
175-200	29	40	0	0	14	0
200-225	0	0	0	0	1	0
225-250	0	0	0	0	0	0
250-275	0	0	0	0	0	0
275-300	0	0	0	0	0	0

Tabel 4.1 menunjukkan sebaran data berdasarkan panjang dan jenis kapal yang disesuaikan dengan format IWRAP. Pengelompokan data tersebut digunakan pula dalam proses perhitungan menggunakan IWRAP dengan memasukkan data tersebut kedalam *traffic editor* pada perangkat lunak IWRAP. Dalam *traffic editor* tersebut, jumlah kapal berdasarkan jenis kapal dapat disesuaikan dengan data yang dimiliki oleh pengguna. Sehingga perbedaan hasil perhitungan akibat perbedaan jumlah data dapat dihindari.



The screenshot shows the 'Traffic Volume Distribution Editor : West Bound' window. It features a table with columns for ship types and length ranges. The data is as follows:

Length Range	Crude oil tanker	Oil products tanker	Chemical tanker	Gas tanker	Container ship	General cargo ship	Bulk carrier	Ro-Ro
0-25	0	3	0	0	0	3	0	0
25-50	0	178	0	0	27	375	0	26
50-75	0	319	0	0	278	776	0	182
75-100	0	242	0	0	1267	267	0	189
100-125	0	84	0	0	1157	64	0	539
125-150	0	37	0	0	586	10	0	105
150-175	0	90	0	0	151	9	0	57
175-200	0	29	0	0	40	14	0	0
200-225	0	0	0	0	0	1	0	0
225-250	0	0	0	0	0	0	0	0
250-275	0	0	0	0	0	0	0	0
275-300	0	0	0	0	0	0	0	0
300-325	0	0	0	0	0	0	0	0
325-350	0	0	0	0	0	0	0	0
350-375	0	0	0	0	0	0	0	0
375-400	0	0	0	0	0	0	0	0

At the bottom of the window, there are controls for 'Show Graph...', 'Hide unused columns', 'Traffic Volume Adjustment Factor: 1.00', and 'OK'/'Cancel' buttons.

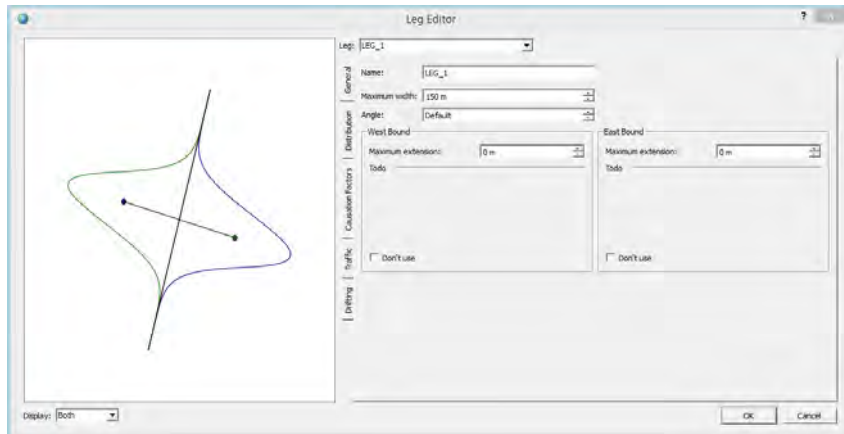
Gambar 4. 2. Tampilan *traffic editor* pada perangkat lunak IWRAP

Gambar 4.2 merupakan tampilan dari jendela *traffic editor* yang digunakan oleh pengguna perangkat lunak untuk melakukan pengeditan data yang digunakan dalam analisis tubrukan kapal. Pada tampilan tersebut terdapat beberapa pilih jenis data (*data item*) yang memungkinkan untuk diganti beberapa diantaranya ialah frekuensi setiap jenis dan panjang kapal, kecepatan kapal, dan juga sarat air rata-rata. Tetapi yang memberikan pengaruh secara langsung dalam perhitungan adalah frekuensi panjang kapal dan kecepatan kapal karena menjadi komponen yang digunakan dalam perhitungan. Setelah data-data yang diperlukan teridentifikasi dan telah dikelompokkan sedemikian rupa, maka proses analisis dapat dilakukan menggunakan metode manual dan juga metode komputasi IWRAP.

Analisis menggunakan perhitungan komputasi menggunakan perangkat lunak IWRAP dilakukan oleh penulis dengan menentukan bentuk model terlebih dahulu. Dengan cara yang telah dijelaskan sebelumnya, model dibuat mengacu pada *density plot* yang telah dilakukan melalui *input data* yang menyesuaikan dengan posisi dimana kapal berlayar pada alur dengan frekuensi tinggi. Alur yang terbentuk merupakan susunan dari beberapa *waypoint* yang dinyatakan dalam bentuk titik-titik. Setelah model ditetapkan dan dilakukan pembuatan model lintasan, maka dilakukan proses penyesuaian model dengan menggunakan beberapa menu *editor* yang tersedia di dalam perangkat lunak IWRAP sesuai dengan data statis yang digunakan dalam analisis.

Terdapat beberapa *tab* pilihan *editor* yang dapat dipilih untuk melakukan penyesuaian yaitu :

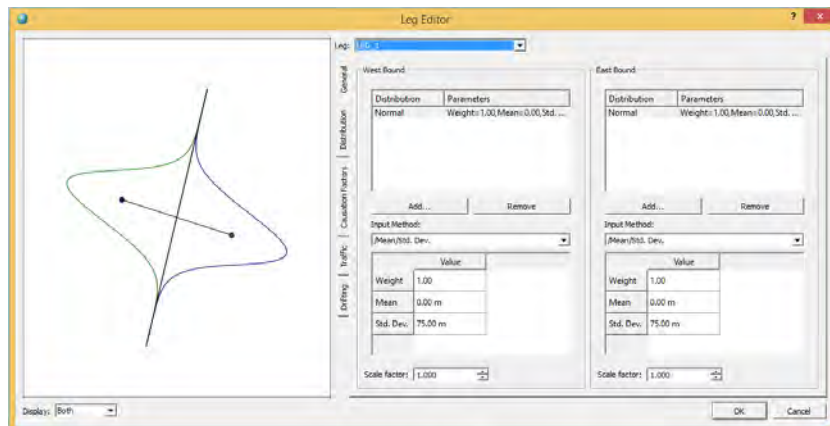
- a. *General*, digunakan untuk melakukan penyesuaian umum dari model seperti penggantian nama dari *leg* sesuai keinginan, penentuan lebar alur maksimal, sudut yang dianalisis, dan beberapa *editor* lain.



Gambar 4. 3. Jendela *Leg Editor* menu *tab General* pada IWRAP

Gambar 4.3 menunjukkan tampilan jendela *leg editor* yang digunakan untuk menyesuaikan model yang telah dibuat dalam IWRAP. Pada tahap ini, penulis mengubah nilai *maximum width* sebesar 150 m menyesuaikan dengan lebar alur pada Alur Pelayaran Barat Surabaya.

- b. *Distribution*, pada menu tersebut pengguna dapat menyesuaikan jenis distribusi yang diterapkan dalam model yang dibuat. Beberapa opsi distribusi diantaranya, distribusi normal, uniform, dan lain sebagainya.



Gambar 4. 4. Tampilan *Leg Editor* menu distribusi pada IWRAP

Gambar 4.4 merupakan tampilan *leg editor* pada menu *distribution*. Pada tahap ini, penulis melakukan penyesuaian distribusi lalu lintas kapal pada model tersebut yaitu *distribusi normal* dan melakukan pengubahan pada *standard dev.* menjadi bernilai 75 meter dengan *mean* sebesar 0 di kedua sisi kurva distribusi.

- c. *Causation Factor*, pada menu ini penulis tidak melakukan pengubahan. Nilai dari seluruh *causation factor* yang digunakan ditentukan secara *default* oleh sistem.
- d. *Traffic*, pada tab editor *traffic* ini pengguna dapat melakukan pengubahan *input data* seperti pengubahan banyaknya *traffic* kapal melalui *traffic editor*, melakukan penyesuaian kecepatan yang disesuaikan dengan data penulis, dan lain sebagainya.
- e. *Drifting*, pada tab editor tersebut digunakan untuk menambahkan parameter perhitungan apabila terdapat analisis *drifting* yang dilakukan. Penulis tidak menggunakan opsi *drifting* karena tidak menjadi jenis skenario yang dianalisis oleh penulis.

4.2 Analisis Crossing Collision

Analisis frekuensi tubrukan kapal dengan skenario *crossing collision* dilakukan berdasarkan tahap perhitungan manual yang terdapat dalam *IWRAP Theory* yang dipublikasikan oleh Peter Friis-Hansen pada tahun 2007 (*Technical University of Denmark*). Untuk melakukan validasi perhitungan dan mengukur keakuratan perhitungan manual, penulis akan membandingkan antara hasil perhitungan manual dengan hasil perhitungan menggunakan komputasi IWRAP. Sebelum melakukan perhitungan, terlebih dahulu penulis melakukan pembuatan model lintasan seperti yang dijelaskan dalam poin 4.1 tentang pengolahan data. Dalam menentukan model, penulis terlebih dahulu melakukan proses *density plot* dan membuat model lintasan yang akan dianalisis menggunakan perangkat lunak IWRAP.

Dalam perhitungan manual, terdapat beberapa data yang digunakan sebagai bagian dari komponen perhitungan. Berikut beberapa data yang diperlukan :

- L_i, L_j menyatakan data panjang kapal yang berlayar pada jalur i dan jalur j .
- B_i, B_j , menyatakan data lebar kapal yang berlayar pada jalur i dan jalur j .
- V_i, V_j , menyatakan data kecepatan kapal yang melintasi jalur i dan jalur j .
- Q_i, Q_j , menyatakan jumlah kapal yang melintas pada kurun waktu tertentu.
- θ , merupakan sudut yang terbentuk dari dua jalur yang bersimpangan.

Dalam elemen perhitungan di atas, notasi i dan j menyatakan 2 kelompok kapal yang digunakan dalam analisis. Notasi i dapat diistilahkan sebagai kapal yang bergerak pada lintasan i , sedangkan notasi j menyatakan sebagai kapal yang bergerak pada lintasan j . Kedua elemen perhitungan tersebut memiliki unsur data panjang kapal, lebar kapal, kecepatan kapal, dan jumlah atau frekuensi kapal tersebut dalam kurun waktu tertentu.

Dan nilai sudut simpangan merupakan hasil dari pertemuan dua buah *leg* yang telah ditentukan di dalam model.



Gambar 4. 5. *Leg* atau alur kapal yang terbentuk

Gambar 4.5 di atas merupakan model yang digunakan untuk analisis *crossing collision*. Perhitungan manual yang dilakukan oleh penulis dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Menentukan data-data yang diperlukan dalam analisis. Sebagai contoh adalah data berikut ini :

Panjang kapal <i>i</i>	(L_i)	=	91,47	meter
Lebar kapal <i>i</i>	(B_i)	=	15,94	meter
Panjang kapal <i>j</i>	(L_j)	=	112,58	meter
Lebar kapal <i>j</i>	(B_j)	=	18,93	meter
Jumlah kapal <i>i</i>	(Q_i)	=	1267	
Jumlah kapal <i>j</i>	(Q_j)	=	1157	
Kecepatan kapal <i>i</i>	(V_i)	=	6,6 knots =	3,395 m/s
Kecepatan kapal <i>j</i>	(V_j)	=	3,3 knots =	1,6977 m/s
Sudut lintasan	(θ)	=	60°	
$\sin \theta$		=	0,866	
$\cos \theta$		=	0,5	

2. Menentukan nilai dari kecepatan relatif yang dihitung dengan persamaan kecepatan relatif *crossing collision* yaitu,

$$V_{ij} = \sqrt{(V_i)^2 + (V_j)^2 - 2 \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos \theta}$$

$$V_{ij} = \sqrt{(3,395)^2 + (1,6977)^2 - 2 \cdot (3,395) \cdot (1,6977) \cdot (0,5)}$$

$$V_{ij} = 5,7157 \text{ m/s}$$

3. Menghitung nilai dari *collision diameter* (D_{ij}),

$$D_{ij} = \frac{L_i.V_j + L_j.V_i}{V_{ij}} \sin \theta + B_j \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_i}{V_{ij}} \right)^2 \right\} + B_i \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_j}{V_{ij}} \right)^2 \right\}$$

$$D_{ij} = \frac{(91,47).(1,6977) + (112,58).(3,395)}{(5,7157)} \cdot 0,866 + (18,93) \left\{ 1 - \left(0,866 \cdot \frac{3,395}{5,7157} \right)^2 \right\} +$$

$$15,94 \left\{ 1 - \left(0,866 \cdot \frac{1,6977}{5,7157} \right)^2 \right\}$$

$$D_{ij} = 172,2599 \text{ meter}$$

4. Menghitung nilai dari *numerical geometry* untuk mengetahui kandidat kapal yang terlibat dalam analisis *crossing collision* dengan menggunakan persamaan,

$$N_G^{crossing} = \sum_{i,j} \frac{Q_i Q_j}{V_i V_j} D_{ij} V_{ij} \frac{1}{\sin \theta} \text{ untuk sudut sebesar } 10^\circ < [\theta] < 170^\circ$$

$$N_G^{crossing} = \frac{1267 \times 1157}{3,395 \times 1,6977} \times 172,2599 \times 5,7157 \times \frac{1}{0,866}$$

$$N_G = 4,78232$$

5. Kemudian dilakukan perhitungan frekuensi tubrukan kapal dengan nilai *causation factor* (P_c) = 0,000108 dengan persamaan,

$$\lambda = N_G \times P_c$$

$$= 4,78232 \times 0,000108$$

$$= 0,000516491$$

Metode perhitungan yang sama dilakukan pada seluruh kelompok data yang terdiri 40 baris x 40 kolom. Dari perhitungan manual tersebut didapatkan nilai seluruh perhitungan sebagai berikut ini,

Tabel 4. 2. Total Perhitungan Manual

Perhitungan	Total Frekuensi
Baris 1-10 Kolom A-AN	0,003145707
Baris 11-20 Kolom A-AN	0,011719336
Baris 21-30 Kolom A-AN	0,003124721
Baris 31-40 Kolom A-AN	0,003529261
Total	0,021519025

Tabel 4.2 merupakan tabel total hasil perhitungan yang dikelompokkan per 10 baris perhitungan yang menyatakan 10 kelompok kapal i dianalisis dengan 10 kolom yang menyatakan 10 kelompok kapal j . Total nilai perhitungan manual pada *crossing collision* yaitu $2,1519 \times 10^{-2}$. Sedangkan berdasarkan perhitungan yang dilakukan menggunakan perangkat lunak IWRAP didapatkan nilai dari beberapa jenis *crossing* yang serupa yaitu pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3. Total Perhitungan menggunakan IWRAP

Jenis Tubrukan	Frekuensi
Bend	0,011304642
Merging	0,001485605
Crossing	0,010211946
Total	0,023002193

Tabel 4.3 merupakan nilai dari perhitungan IWRAP, total perhitungan IWRAP merupakan hasil penjumlahan *bend*, *merging*, dan *crossing*. Hal itu dilakukan karena ketiga jenis tersebut memiliki persamaan, sehingga total dari nilai *crossing* dapat diartikan sebagai hasil penjumlahan 3 jenis tersebut dengan total nilai sebesar $2,300219 \times 10^{-2}$. Hasil validasi yang didapatkan adalah,

- Perhitungan manual = $2,1519 \times 10^{-2}$
- Komputasi IWRAP = $2,30022 \times 10^{-2}$

$$\begin{aligned} \text{Nilai validasi adalah} &= \frac{2,1519 \times 10^{-2}}{2,30022 \times 10^{-2}} \\ &= 93,55\%. \end{aligned}$$

Dengan hasil validasi sebesar 93,55%, terjadi selisih perhitungan sebesar 6,45%. Menurut penulis, selisih perhitungan dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti :

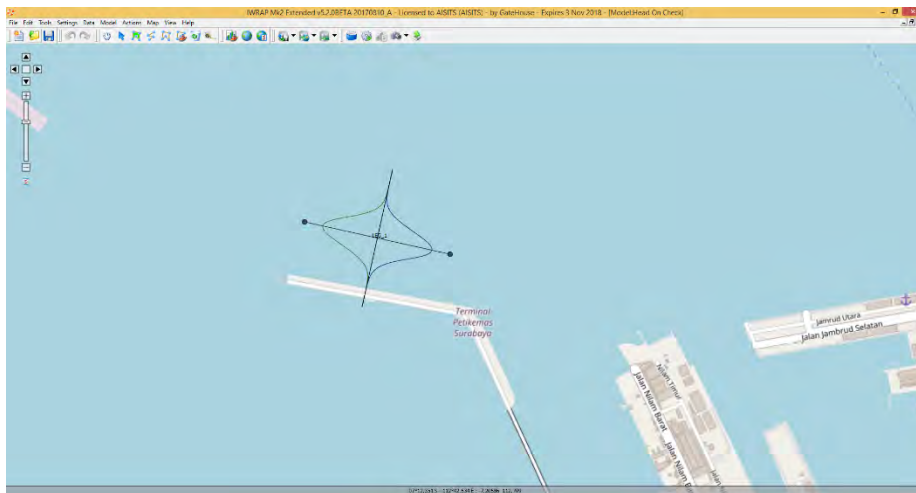
- Tidak dapat diketahui secara pasti, besar sudut yang digunakan oleh sistem dalam IWRAP dalam perhitungan. Dengan adanya perbedaan tersebut, berpotensi mempengaruhi nilai dari perhitungan yang digunakan.
- Causation Factor* yang digunakan oleh IWRAP dalam skenario *crossing collision* tersebut terjadi perbedaan. Karena pada sistem IWRAP tersebut hanya tersaji nilai *causation factor* yang digunakan untuk skenario *overtaking*, *crossing*, *alision*, dan *grounding*. Sehingga nilai dari P_c tersebut cukup berpengaruh terhadap hasil perhitungan.

Menurut penulis, peran IWRAP dalam melakukan perhitungan data yang cukup besar dan banyak diperlukan untuk menghindari kurang akuratnya perhitungan menggunakan manual dan juga meminimalisasi terjadinya kesalahan manusia dalam perhitungan.

4.3 Analisis *Head-on Collision*

Analisis perhitungan *head on collision* yang dilakukan oleh penulis menggunakan *leg 1* sebagai lokasi studi kasus. Perhitungan frekuensi terjadinya *Head-On Collision*, dilakukan dengan perhitungan manual berdasarkan perhitungan dari IWRAP *Theory*. Dengan panjang lintasan yaitu 795,41 meter, penulis menggunakan data yang sama

dengan analisis *crossing collision*. Analisis *head on collision* sangat ditentukan oleh panjang lintasan (L_w) dan perhitungan distribusi normal dalam analisis yang dihitung secara manual. Nilai panjang lintasan (L_w) didapatkan dari model yang telah dibuat oleh penulis di dalam IWRAP untuk mendapatkan hasil yang akurat. Selain itu panjang lintasan (L_w) dapat ditentukan pula berdasarkan koordinat *waypoint* yang membentuk lintasan. Koordinat tersebut dapat dimasukkan ke dalam *Google Earth* untuk mengetahui titik pasti yang terbentuk dari koordinat yang didapatkan untuk mengukur panjang lintasan menggunakan *Google Earth*.



Gambar 4. 4. Ilustrasi kapal yang bergerak saling berpapasan
Sumber: (Hansen, 2007)

Gambar 4.4 di atas merupakan hasil pembuatan model lintasan *head on collision* yang menggunakan *leg 1* pada hasil permodelan lintasan *crossing collision*. Kedua kurva tersebut merupakan kurva distribusi normal yang dibentuk pada sisi barat (*west bound*) dan sisi timur (*east bound*) dengan lebar lintasan menyesuaikan lebar Alur Pelayaran Barat Surabaya yaitu 150 meter. Nilai dari *mean* distribusi normal skenario *head on* adalah 0 dengan standar deviasi 75 meter.

Analisis *head on collision* dipengaruhi oleh panjang lintasan pada segmen studi kasus, banyaknya kapal pada kedua kelompok yang dianalisis (Q_i) dan (Q_j). Serta kecepatan kapal pada lintasan i dan j yang dinotasikan sebagai V_i dan V_j . Sehingga perlu dilakukan identifikasi terlebih dahulu data-data komponen perhitungan tersebut. Berikut merupakan contoh tahapan perhitungan dari skenario *head on collision*:

1. Identifikasi data yang diperlukan dalam perhitungan analisis skenario *head on collision*.

Panjang kapal i	(L_i)	=	91,47	meter
Lebar kapal i	(B_i)	=	15,94	meter
Panjang kapal j	(L_j)	=	91,47	meter

Lebar kapal j	(B_j)	=	15,94	meter
Jumlah kapal i	(Q_i)	=	1267	
Jumlah kapal j	(Q_j)	=	1267	
Kecepatan kapal i	(V_i)	=	6,6 knots =	3,395 m/s
Kecepatan kapal j	(V_j)	=	3,3 knots =	1,6977 m/s
Panjang lintasan	(L_w)	=	795,41	meter

2. Melakukan perhitungan kecepatan relatif sesuai dengan perhitungan skenario *head on collision* yaitu dengan menjumlahkan kedua kecepatan kelompok kapal yang dianalisis. Kecepatan relatif pada skenario *head on collision* dapat dihitung dengan persamaan,

$$V_{ij} = V_i + V_j$$

Dimana,

$$V_{ij} = 3,395 + 1,6977 \text{ m/s}$$

$$V_{ij} = 5,0927 \text{ m/s}$$

3. Mencari lebar rata-rata kapal dengan menjumlahkan kedua lebar kapal yang dianalisis dibagi 2 seperti berikut ini,

$$B_{ij} = \left(\frac{B_i + B_j}{2} \right)$$

$$B_{ij} = \left(\frac{15,94 + 15,94}{2} \right)$$

$$B_{ij} = 15,94 \text{ m/s}$$

4. Melakukan identifikasi data *mean* dan standar deviasi yang digunakan dalam perhitungan *collision probability* pada skenario *head on*. Perhitungan peluang tersebut menggunakan cara distribusi normal.

$$\text{Mean } i (\mu_i) = 0$$

$$\text{Mean } j (\mu_j) = 0$$

$$\text{Mean } ij (\mu_{ij}) = \mu_i + \mu_j$$

$$\text{Mean } ij (\mu_{ij}) = 0$$

$$\text{Standar Deviasi } i (\sigma_i) = 75$$

$$\text{Standar Deviasi } j (\sigma_j) = 75$$

$$\text{Standar Deviasi } ij (\sigma_{ij}) = \sqrt{(\sigma_i)^2 + (\sigma_j)^2}$$

$$\text{Standar Deviasi } ij (\sigma_{ij}) = \sqrt{(75)^2 + (75)^2}$$

$$\text{Standar Deviasi } ij (\sigma_{ij}) = 106,066$$

Perhitungan nilai *collision probability* (P_G) dilakukan dengan menggunakan persamaan,

$$P_g = \Phi \left(\frac{B_{ij} - \mu_{ij}}{\sigma_{ij}} \right) - \Phi \left(-\frac{B_{ij} + \mu_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)$$

$$P_g = \Phi \left(\frac{15,94 - 0}{106,066} \right) - \Phi \left(-\frac{15,94 + 0}{106,066} \right)$$

$$P_G = 0,55973 - 0,44027$$

$$P_G = 0,11946$$

5. Setelah didapatkan nilai dari *collision probability*, maka dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui besarnya *geometric number* pada kelompok yang dianalisis. Persamaan dari *geometric number* pada skenario *head on* ialah,

$$N_G^{head-on} = L_W \sum_{i,j} P_{G I,j}^{head-on} \frac{V_{ij}}{V_i V_j} (Q_i Q_j)$$

$$N_G^{head-on} = 795,41 \times 0,11946 \times \frac{5,0927}{3,395+1,6977} \times (1267 \times 1267)$$

$$N_G^{head-on} = 4,33298$$

6. Sehingga dengan *geometric number* yang telah didapatkan dan nilai dari *causation probability* (P_c) yang didapatkan dari IWRAP sebesar 0,00005. Maka, frekuensi tubrukan yang didapatkan dari hasil kali *geometric number* dengan *causation probability* adalah,

$$\lambda = P_c \times N_G$$

$$\lambda = 0,00005 \times 4,3398$$

$$\lambda = 0,000216649$$

Nilai frekuensi *head on collision* yang didapatkan dari perhitungan manual adalah sebesar $2,167 \times 10^{-4}$. Untuk melakukan pengecekan data hasil perhitungan manual, maka dilakukan perbandingan data menggunakan hasil perhitungan yang didapatkan melalui IWRAP (λ IWRAP) sebesar $2,1046 \times 10^{-4}$. Hasil dari validasi kedua metode perhitungan tersebut adalah sebagai berikut,

Tabel 4. 4. Hasil validasi perhitungan pada skenario *head on collision*

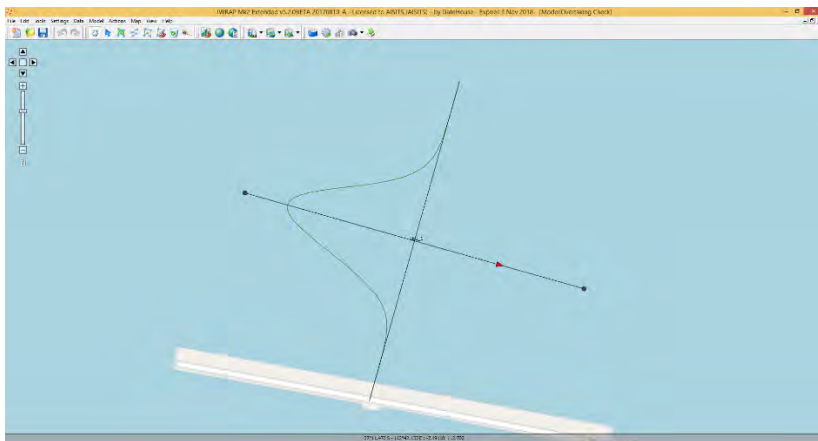
Pg Head On	=	0,119459256
Ng Head On	=	4,332980289
λ Manual	=	0,000216649
λ IWRAP	=	0,000210464
Error Check	=	97,15%

Tabel 4.4 merupakan tabel hasil pengecekan nilai frekuensi pada skenario *head on collision* dengan metode perhitungan manual dan perhitungan menggunakan IWRAP. Hasil validasi didapatkan nilai 97,15% dengan selisih data yaitu 2,85%. Menurut penulis, selisih perhitungan yang dialami oleh kedua metode tersebut cukup kecil. Tetapi selisih hasil perhitungan tersebut tidak serta merta dapat dihiraukan karena validasi yang dilakukan penulis merupakan validasi antar *sample data* dari 1 kelompok yang dipilih secara acak. Dengan perhitungan data yang besar dan banyak secara manual, berpotensi terjadi peningkatan nilai selisih data perhitungan. Hal itu dikarenakan nilai dari lebar kapal yang digunakan pada IWRAP ditentukan secara

default oleh sistem. Maka dari itu untuk meminimalisasi kesalahan hasil perhitungan manual, peran IWRAP dibutuhkan untuk melakukan perhitungan data analisis tubrukan yang lebih banyak. Sehingga kesalahan dalam melakukan perhitungan manual akibat kesalahan manusia yaitu kurang teliti maupun kesalahan perhitungan dapat dihindari.

4.4 Analisis *Overtaking Collision*

Analisis perhitungan *overtaking collision* yang dilakukan penulis menggunakan model lintasan *leg 1* yang ditinjau dari arah barat (*west bound*) pada lokasi yang sama dengan analisis *head on collision*. Model lintasan untuk *overtaking* dibuat dengan menggunakan IWRAP untuk mengilustrasikan sekaligus melakukan perhitungan terhadap *overtaking collision*. Hasil dari perhitungan tersebut akan dibandingkan dengan hasil perhitungan manual yang dihasilkan oleh penulis menggunakan perhitungan manual.



Gambar 4. 6 Ilustrasi model lintasan yang digunakan dalam analisis *overtaking collision*

Gambar 4.4 tersebut mengilustrasikan model lintasan yang digunakan dalam analisis *overtaking collision*. Arah kapal yang ditinjau yaitu kapal yang bergerak dari arah barat menuju ke timur. Sehingga, pada model tersebut kurva distribusi normal dibuat berada pada posisi *west bound* dengan indikator tanda panah mengarah ke *waypoint 2*. Pada analisis *overtaking*, penulis menggunakan lebar alur sebesar 150 meter, nilai *mean* yang bernilai 0, dan juga standar deviasi yang penulis tentukan bernilai 75 meter. Panjang dari *leg* tersebut sama dengan panjang *leg* yang digunakan dalam analisis *head on* yaitu sebesar 795,41 meter.

Analisis pada skenario *overtaking* yang dilakukan oleh penulis mengacu pada IWRAP *theory* dengan tahapan-tahapan perhitungan manual sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi data yang diperlukan dalam perhitungan analisis *overtaking collision* dengan data sebagai berikut,

Panjang kapal i	(L_i)	=	91,47	meter
Lebar kapal i	(B_i)	=	15,94	meter
Panjang kapal j	(L_j)	=	112,58	meter
Lebar kapal j	(B_j)	=	18,93	meter
Jumlah kapal i	(Q_i)	=	1267	
Jumlah kapal j	(Q_j)	=	1157	
Kecepatan kapal i	(V_i)	=	6,6 knots =	3,395 m/s
Kecepatan kapal j	(V_j)	=	3,3 knots =	1,6977 m/s
Panjang lintasan	(L_w)	=	795,41	meter

2. Melakukan perhitungan kecepatan relatif dengan persamaan yang disesuaikan dengan analisis *overtaking collision*. Kecepatan relatif pada skenario *overtaking collision* dapat dihitung dengan persamaan,

$$V_{ij} = V_i - V_j$$

Dimana,

$$V_{ij} = 3,395 - 1,6977 \text{ m/s}$$

$$V_{ij} = 1,6977 \text{ m/s}$$

3. Menghitung lebar rata-rata kapal yang didapatkan dari penjumlahan lebar kapal kelompok yang dianalisis dibagi 2, perhitungan dapat dilakukan sebagai berikut,

$$B_{ij} = \left(\frac{B_i + B_j}{2} \right)$$

$$B_{ij} = \left(\frac{15,94 + 18,93}{2} \right)$$

$$B_{ij} = 17,435 \text{ m/s}$$

4. Mengidentifikasi data *mean* dan standar deviasi yang nilainya sama dengan nilai parameter tersebut pada analisis *head on collision*.

$$\text{Mean } i (\mu_i) = 0$$

$$\text{Mean } j (\mu_j) = 0$$

$$\text{Mean } ij (\mu_{ij}) = 0$$

$$\text{Standar Deviasi } i (\sigma_i) = 75$$

$$\text{Standar Deviasi } j (\sigma_j) = 75$$

$$\text{Standar Deviasi } ij (\sigma_{ij}) = 106,066$$

Perhitungan nilai *collision probability* (P_G) dilakukan dengan menggunakan persamaan,

$$P_g = \Phi \left(\frac{B_{ij} - \mu_{ij}}{\sigma_{ij}} \right) - \Phi \left(-\frac{B_{ij} + \mu_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)$$

$$P_g = \Phi \left(\frac{17,435 - 0}{106,066} \right) - \Phi \left(-\frac{17,435 + 0}{106,066} \right)$$

$$P_G = 0,565284 - 0,434716$$

$$P_G = 0,130567$$

5. Setelah didapatkan nilai dari *collision probability*, maka dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui besarnya *geometric number* pada kelompok yang dianalisis. Persamaan dari *geometric number* pada skenario *overtaking collision* ialah,

$$N_{G \text{ overtaking}} = L_W \sum_{i,j} P_{G \text{ Ij}}^{\text{head-on}} \frac{V_{ij}}{V_i V_j} (Q_i Q_j)$$

$$N_{G \text{ overtaking}} = 795,41 \times 0,130567 \times \frac{1,6977}{3,395+1,6977} \times (1267 \times 1157)$$

$$N_{G \text{ overtaking}} = 1,44157$$

6. Sehingga dengan *geometric number* yang telah didapatkan dan nilai dari *causation probability* (P_c) yang didapatkan dari IWRAP sebesar 0,00011. Maka, frekuensi tubrukan yang didapatkan dari hasil kali *geometric number* dengan *causation probability* adalah,

$$\lambda = P_c \times N_G$$

$$\lambda = 0,00011 \times 1,44157$$

$$\lambda = 0,000159$$

Dari perhitungan data *sample* yang dilakukan menggunakan metode perhitungan manual, didapatkan nilai frekuensi analisis *overtaking collision* yaitu sebesar 0,000159. Untuk mengetahui selisih perhitungan manual dengan perhitungan menggunakan IWRAP, maka diperlukan validasi data dengan membandingkan kedua hasil perhitungan. Validasi yang dilakukan ialah sebagai berikut,

Tabel 4. 5. Hasil Validasi Perhitungan pada Overtaking Collision

Frekuensi	=	0,000216
Pg Overtaking	=	0,130567
Ng Overtaking	=	1,44157
λ Manual	=	0,000159
λ IWRAP	=	0,000155
Error Check	=	98,056%

Validasi yang dilakukan menghasilkan nilai sebesar 98,056% atau terjadi selisih perhitungan sebesar 1,944%. Menurut penulis, selisih data pada analisis *overtaking* disebabkan oleh hal yang sama dengan *head on collision* yaitu perbedaan penentuan lebar kapal antara perhitungan manual dan perhitungan IWRAP. Pada perhitungan manual, lebar kapal telah ditentukan menggunakan nilai rata-rata lebar kapal pada kelompok tersebut. Sedangkan pada perhitungan IWRAP, nilai lebar kapal ditentukan oleh sistem secara *default*. Menurut penulis, selisih perhitungan yang dihasilkan cukup kecil yaitu hampir 2%. Apabila data yang dianalisis memiliki jumlah yang lebih banyak dan menggunakan data yang lebih beragam, maka IWRAP dapat digunakan untuk meminimalisasi dan mempercepat proses perhitungan. Sehingga hasil yang didapatkan lebih akurat dan menghindari kesalahan perhitungan akibat faktor manusia.

4.5 Analisis Perhitungan Matematis Energi Terdisipasi

Analisis konsekuensi terhadap tubrukan kapal dilakukan oleh penulis pada skenario *crossing collision*. Analisis tersebut, dilakukan penulis dengan menggunakan metode matematis sesuai dengan teori perhitungan *external dynamic* yang dijelaskan pada *The Mechanics of Ship Collisions* yang dipublikasikan oleh Shengming Zhang pada January 1999. Pada perhitungan tersebut digunakan 2 jenis kapal kontainer dan general cargo untuk mengetahui besarnya energi yang terdisipasi dalam tubrukan tersebut.

Data *sample* kapal yang digunakan penulis adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 6. *Sample* data kapal dalam analisis konsekuensi tubrukan kapal

Nama kapal	Meratus Kapuas	Sinar Jepara	Satuan
Panjang	119,9	118,6	meter
Lebar	21,8	16,2	meter
Tinggi	7,3	7,8	meter
Sarat	5,3	6,1	meter
Motor Penggerak	2595,036	2534,634	kW
RPM	750	750	rpm
Motor Bantu	1336,294	1361,648	kW
DWT	8180	3630,4	ton
Kecepatan Service	11,5	10,2	knots
LWT	2122	1718	ton
Disp	10302	5348,4	ton

Tabel 4.6 merupakan data kapal yang digunakan sebagai data *sample* dalam melakukan analisis konsekuensi tubrukan kapal pada *crossing collision*.

Dalam analisis yang dilakukan, penulis melakukan pembatasan bahwa kapal lain bergerak relatif terhadap kapal b. M_a menyatakan berat kapal A sedangkan M_b menyatakan berat dari kapal B. Penulis menggunakan 2 kapal *sample* sebagai kapal yang melintas di sekitar kapal lain yang ditinjau. Notasi m_{ax} dan m_{b1} menyatakan koefisien massa pada *surge motion* dengan range nilai 0,02-0,07. Notasi m_{ay} dan m_{b2} menyatakan koefisien massa dari *sway motion* dari kapal A dan B dengan nilai 0,3-1,3. Notasi j_a dan j_b menyatakan koefisien massa dari *yaw motion* kedua kapal dengan nilai 0,21. $(x_a, 0)$ menyatakan koordinat *center of gravity* kapal A sebagai *striking vessel* dan (x_b, y_b) dinyatakan sebagai koordinat *center of gravity* kapal B sebagai *struck vessel*. Notasi R menyatakan radius dari inersia kapal yang dinyatakan dengan nilai $\frac{1}{4}$ panjang kapal. Dalam keadaan *crossing collision*, saat tubrukan terjadi pada kapal A menerima energi dari kapal B dan bergerak menyimpang dari posisi awal dengan kecepatan V_{ay} .

Kapal B yang terlibat dalam tubrukan menerima energi dari kapal A dan bergerak menyimpang dari posisi awal dengan kecepatan V_{b2} . Proses perhitungan matematis dari konsekuensi tubrukan dilakukan dengan tahapan berikut :

- a. Melakukan identifikasi data perhitungan sebagai berikut :

$$\text{Nilai } m_{ax} = m_{b1} = 0,07$$

$$\text{Nilai } m_{ay} = m_{b2} = 1,2$$

$$\text{Nilai } j_a = j_b = 0,21$$

$$\text{Nilai } R_a = \frac{1}{4} \times L_{pp} a = 29,975$$

$$\text{Nilai } R_b = \frac{1}{4} \times L_{pp} b = 29,65$$

$$X_a, Y_a = (100,90)$$

$$X_b, Y_b = (20,0)$$

$$X_c, Y_c = (20,10)$$

$$\text{Sudut } \alpha = 30^\circ. \text{ Dengan nilai } \sin \alpha = 0,5 \text{ dan } \cos \alpha = 0,866$$

$$\text{Sudut } \beta = 60^\circ. \text{ Dengan nilai } \cos \beta = 0,866 \text{ dan } \sin \beta = 0,5$$

$$v_{ax} = 6 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s}$$

$$v_{ay} = 2 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s}$$

$$v_{bx} = 3,3 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s}$$

$$v_{by} = 1,5 \text{ knots} = 0,771 \text{ m/s}$$

$$M_a = 4772,986 \text{ ton}$$

$$M_b = 3792,715 \text{ ton}$$

- b. Melakukan perhitungan *relative motion of striking ship and struck ship* menggunakan persamaan sebagai berikut beserta dengan hasil perhitungan,

$$D\alpha\xi = \frac{1}{1+m_{ax}} \cdot \sin^2 \alpha + \frac{1}{1+m_{ay}} \cdot \cos^2 \alpha + \frac{1}{1+j_a} \cdot \frac{[y_c \cdot \sin \alpha - (x_c - x_a) \cdot \cos \alpha]^2}{R_a^2}$$

$$D\alpha\xi = 5,649581$$

$$D\alpha\eta = \frac{1}{1+m_{ax}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \frac{1}{1+m_{ay}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \frac{1}{1+j_a} \cdot \frac{[y_c \cdot \sin \alpha - (x_c - x_a) \cdot \cos \alpha][y_c \cdot \cos \alpha + (x_c - x_a) \cdot \sin \alpha]}{R_a^2}$$

$$D\alpha\eta = 0,398$$

$$D\beta\xi = \frac{1}{1+m_{b1}} \cdot \sin^2(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+m_{b2}} \cdot \cos^2(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+j_b} \cdot \frac{[(y_c - y_b) \sin \alpha - (x_c - x_b) \cdot \cos \alpha]^2}{R_b^2}$$

$$D\beta\xi = 1,2186$$

$$D\beta\eta = \frac{1}{1+m_{b1}} \cdot \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+m_{b2}} \cdot \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+j_b} \cdot \frac{[(y_c - y_b) \sin \alpha - (x_c - x_b) \cdot \cos \alpha][(y_c - y_b) \cos \alpha + (x_c - x_b) \cdot \sin \alpha]}{R_b}$$

$$D\beta\eta = -0,3006$$

$$K\alpha\xi = \frac{1}{1+max} \sin\alpha \cdot \cos\alpha - \frac{1}{1+may} \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

$$+ \frac{1}{1+ja} \cdot \frac{[yc \cdot \sin\alpha - (xc-xa)\cos\alpha][yc \cdot \cos\alpha + (xc-xa)\sin\alpha]}{Ra^2}$$

$$K_{a\xi} = 1,417$$

$$K\alpha\eta = \frac{1}{1+max} \cdot \cos^2 \alpha + \frac{1}{1+may} \cdot \sin^2 \alpha + \frac{1}{1+ja} \cdot \frac{[yc \cdot \cos\alpha + (xc-xa)\sin\alpha]^2}{Ra^2}$$

$$K_{a\eta} = 0,8032$$

$$Kb\xi = \frac{1}{1+mb1} \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+mb2} \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos(\beta - \alpha)$$

$$+ \frac{1}{1+jb} \cdot \frac{[(yc-yb)\sin\alpha - (xc-xb)\cos\alpha][(yc-yb)\cos\alpha + (xc-xb)\sin\alpha]}{Rb^2}$$

$$K_{b\xi} = -0,1675$$

$$Kb\eta = \frac{1}{1+mb1} \cdot \cos^2(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+mb2} \cdot \sin^2(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+jb} \cdot \frac{[(yc-yb)\cos\alpha + (xc-xb)\sin\alpha]^2}{Rb^2}$$

$$K_{b\eta} = 0,8154$$

- c. Dalam proses perhitungan pergerakan relatif kapal, dilakukan perhitungan sebagai berikut,

$$\begin{array}{ll} \text{Nilai dari } Ma & = 4772,986 \text{ ton} \\ Mb & = 3792,715 \text{ ton} \end{array}$$

$$D_\xi = \frac{D\alpha\xi}{Ma} + \frac{Db\xi}{Mb}, D_\eta = \frac{D\alpha\eta}{Ma} + \frac{Db\eta}{Mb}$$

$$D_\xi = \frac{5,65}{4772,986} + \frac{1,2186}{3792,715}, D_\eta = \frac{0,398}{4772,986} + \frac{-0,3006}{3792,715}$$

$$D_\xi = 13,403 \times 10^{-4} \quad D_\eta = 1,585 \times 10^{-4}$$

$$D_\xi = \frac{K\xi}{Ma} + \frac{Kb\xi}{Mb}, D_\eta = \frac{K\alpha\eta}{Ma} + \frac{Kb\eta}{Mb}$$

$$K_\xi = \frac{1,417}{4772,986} + \frac{-0,1675}{3792,715}, K_\eta = \frac{0,8032}{4772,986} + \frac{0,8154}{3792,715}$$

$$K_\xi = 3,4106 \times 10^{-4} \quad K_\eta = 3,832 \times 10^{-4}$$

- d. Perhitungan selanjutnya adalah menghitung kecepatan relatif setelah terjadi tubrukan yaitu dengan persamaan,

$$\xi(0) = \xi a(0) - \xi b(0) = V_{ax} \cdot \sin \alpha + V_{ay} \cdot \cos \alpha + V_{b1} \sin(\beta - \alpha) - V_{b2} \cos(\beta - \alpha)$$

Data perhitungan yang diperlukan adalah,

$$\begin{aligned} v_{ax} &= 6 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s} \\ v_{ay} &= 2 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s} \\ v_{bx} &= 3,3 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s} \\ v_{by} &= 1,5 \text{ knots} = 0,771 \text{ m/s} \\ \xi(0) &= 3,361 \end{aligned}$$

- e. Perhitungan energi yang terdisipasi dilakukan dengan persamaan yaitu,

$$E_{\xi} = 0,5 \times \frac{1}{D\xi} \times 0,6 \times D\eta \times (\xi)^2 / 1000$$

Hasil perhitungan tersebut didapatkan nilai dari energi yang terdisipasi adalah 44,312 MJ.

Kategori energi yang terdisipasi pada tubrukan kapal dikelompokkan berdasarkan tingkatan berikut yaitu :

- 0 sampai 30 MJ = *minor damage*
- 30 sampai 100 MJ = *moderate damage*
- 100 sampai 200 MJ = *heavy damage*
- <200 MJ = *critical damage*

Berdasarkan perhitungan tersebut, hasil energi yang terdisipasi dalam tubrukan berada pada level *moderate damage* dengan nilai 44,312 MJ.

4.6 Analisis Kerusakan Struktur Kapal

Analisis kerusakan struktur kapal dilakukan oleh penulis dengan menggunakan ANSYS untuk melakukan peninjauan beberapa dampak dari tubrukan kapal yaitu berupa:

- a. *Total deformation* pada struktur *midship* kapal.
- b. Nilai dari *directional deformation* yang terjadi pada model analisis.
- c. Nilai *equivalent stress* yang ditimbulkan dari tubrukan *midship section* dan *forepeak section*.

Dalam analisis tersebut penulis menggunakan 2 buah bidang dengan masing-masing rincian data sebagai berikut:

- a. Bidang *midship section* yang merepresentasikan *struck ship*,
 - Panjang *midship* : 14,58 meter
 - Tinggi *midship* : 7,05 meter
 - Lebar *midship* : 10 meter

b. Bidang *forepeak section* yang merepresentasikan pada *striking ship*,

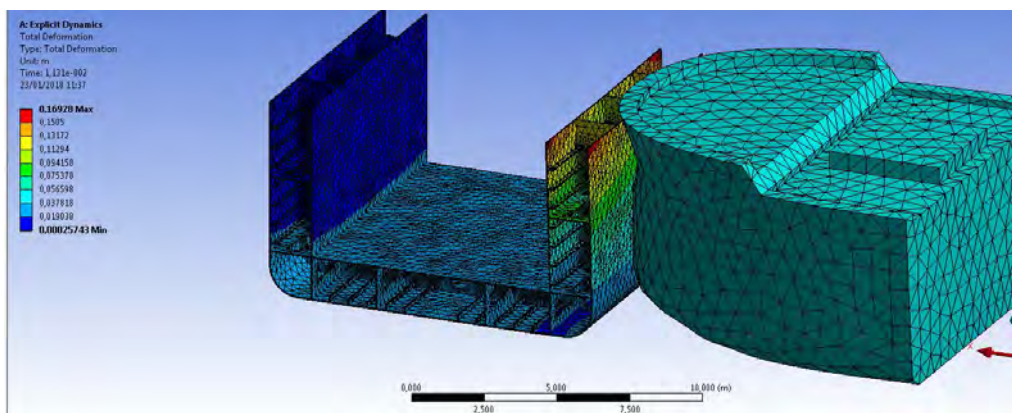
- Panjang bidang : 12,88 meter
- Tinggi bidang : 7,45 meter
- Lebar bidang : 12,5 meter

Dari hasil analisis tersebut, terdapat beberapa data-data asumsi yang dibutuhkan dalam melakukan permodelan 3D pada ANSYS yaitu,

- *Velocity (initial condition)* : 3,4 m/s (ke arah sumbu *x*)
- *Hydrostatic Pressure*
 - Densitas fluida : 1.025 kg/m³
 - Percepatan hidrostatik : 9,81 m/s²
 - *Free surface* : 5 meter dari *baseline*
- *Force* : 100.000 N

Berdasarkan peninjauan yang dilakukan pada analisis total deformasi kapal dengan permodelan 3D pada ANSYS didapatkan data hasil sebagai berikut,

- Deformasi minimal : $2,5743 \times 10^{-4}$ m
- Deformasi maksimal : $1,69 \times 10^{-1}$ m
- Iterasi : 100.000
- Analisis *Time Frame* : 30 s

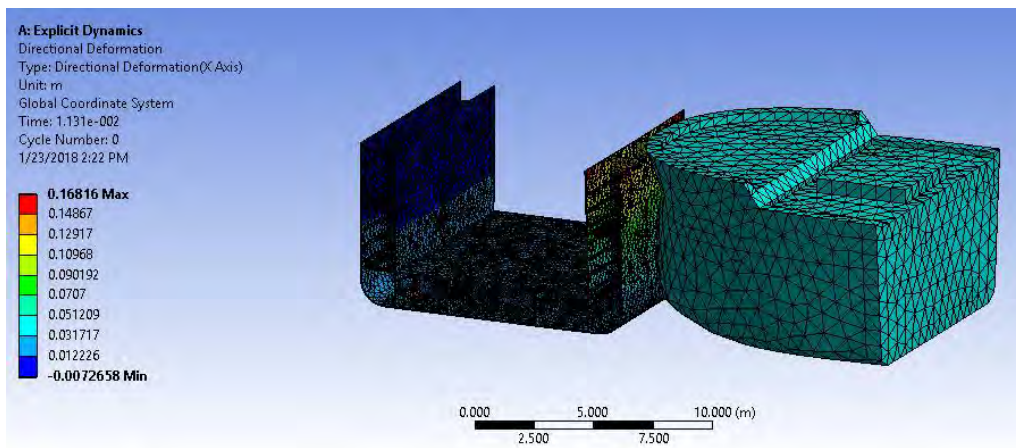


Gambar 4. 7. Ilustrasi total deformasi pada permodelan 3D

Pada gambar 4.7 tersebut menunjukkan ilustrasi dari total deformasi yang terjadi pada saat dua bidang tersebut mengalami tabrakan. Deformasi yang terjadi disebabkan oleh bidang *forepeak section* dengan asumsi kecepatan 3,4 m/s dan magnitude gaya yang terjadi pada saat tubrukan yaitu sebesar 1×10^8 N. Gradasi warna menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada hasil permodelan 3D yang dilakukan, dengan warna biru merepresentasikan deformasi terendah yang terjadi dan warna merah sebagai deformasi dengan nilai tertinggi yang terjadi pada kedua bidang.

Tinjauan nilai *directional deformation* dengan menggunakan permodelan 3D menghasilkan data sebagai berikut ini,

- Deformasi minimal : $-7,2658 \times 10^{-3}$ m
- Deformasi maksimal : $1,6816 \times 10^{-1}$ m
- Iterasi : 100.000
- Analisis *Time Frame* : 30 s

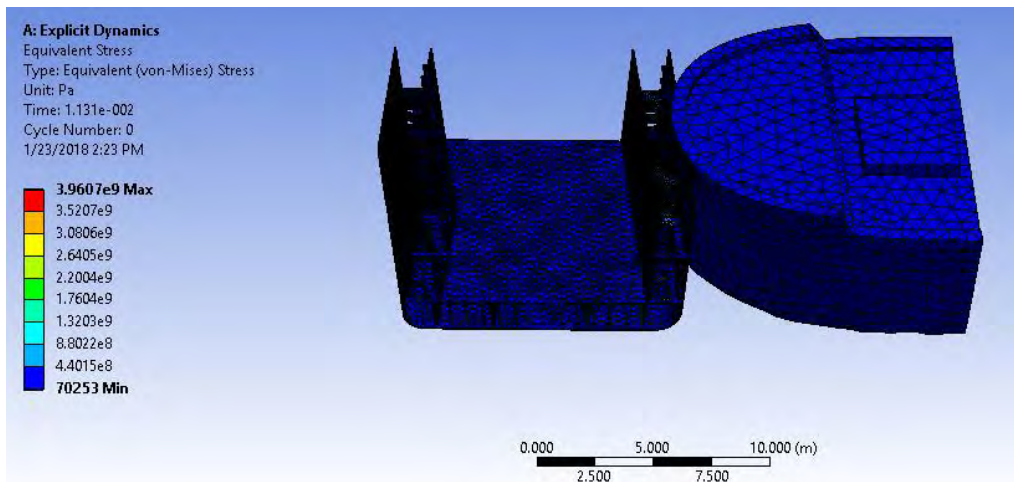


Gambar 4. 8. Ilustrasi *directional deformation* menggunakan permodelan 3D

Gambar 4.8 merupakan ilustrasi hasil analisis *directional deformation* yang dilakukan pada permodelan 3D menggunakan ANSYS pada saat bidang *forepeak section* menubruk bidang *midship*. Hasil menunjukkan bahwa nilai terbesar deformasi yang terjadi yaitu sebesar $1,6816 \times 10^{-1}$ meter yang diilustrasikan dengan warna merah dan hasil terendah adalah $-7,2658 \times 10^{-3}$ m dengan arah vektor minus (-) yang berarti berlawanan sumbu positif atau arah sebaliknya.

Analisis permodelan yang dilakukan untuk mengetahui *equivalent stress* yang terjadi pada permodelan 3D antara *midship section* dan *forepeak section* menghasilkan data sebagai berikut ini,

- *Stress* minimal : 70.253 Pa
- *Stress* maksimal : $3,9607 \times 10^9$ Pa
- Iterasi : 100.000
- Analisis *Time Frame* : 30 s
- Zona *stress* : *stress* terjadi pada bidang *midship section*



Gambar 4. 9. Ilustrasi *equivalent stress* pada 3D model Analysis

Gambar 4.9 menunjukkan terjadinya *stress* yang menjadi salah satu dampak dari tubrukan antara 2 geometri dalam analisis permodelan 3D. *Stress* yang ditimbulkan oleh tubrukan terjadi pada bidang *midship* yaitu pada struktur *double hull* yang diilustrasikan dengan warna hijau. Nilai *stress* yang didapatkan dari analisis tersebut yaitu $3,9607 \times 10^9$ Pa sebagai nilai terbesar yang diterima oleh struktur *midship* akibat dari permodelan tubrukan yang terjadi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil perhitungan yang telah dilakukan oleh penulis terkait analisis frekuensi tubrukan kapal pada 3 skenario yaitu *crossing collision*, *head on collision*, dan *overtaking collision* dan juga analisis konsekuensi tubrukan kapal di Alur Pelayaran Barat Surabaya, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Hasil analisis perhitungan frekuensi tubrukan kapal pada *crossing collision*, *head on collision*, dan *overtaking collision* berturut-turut menghasilkan nilai sebagai berikut sebesar $2,152 \times 10^{-2}$; $9,176 \times 10^{-3}$; dan $6,740 \times 10^{-3}$. Dengan hasil tersebut dilakukan validasi menggunakan *software* IWRAP dengan hasil validasi pada masing-masing skenario didapatkan nilai sebesar 93,55% untuk *crossing collision*; 97,15% untuk *head on collision*; dan 98,06% untuk *overtaking collision*. Perbedaan hasil perhitungan dari kedua metode disebabkan oleh perbedaan penentuan nilai yang dilakukan dalam metode manual dan IWRAP karena pada IWRAP terdapat beberapa parameter perhitungan yang ditentukan oleh sistem dalam perangkat lunak secara *default*. Sehingga menimbulkan perbedaan hasil kalkulasi pada kedua metode tersebut.
2. Berdasarkan dari hasil seluruh perhitungan, didapatkan bahwa risiko terjadinya tubrukan kapal masih dapat diterima karena menghasilkan nilai frekuensi tubrukan kurang dari 1 kejadian dalam waktu 1 tahun. Sehingga pada lokasi studi kasus masih dapat dinyatakan memenuhi kriteria aman atau tidak berisiko besar terhadap terjadinya kecelakaan kapal. Namun demikian, dengan seiring meningkatnya jumlah kapal yang melalui Alur Pelayaran Barat Surabaya, penulis merekomendasikan untuk dilakukan pengembangan lebih lanjut yang dapat berupa peningkatan lebar alur dan kedalaman alur sebagai tindakan mitigasi dalam mengurangi nilai risiko tubrukan kapal yang dapat terjadi. Sehingga sarana prasarana dapat mengakomodasi peningkatan frekuensi jumlah kapal di masa yang akan datang.
3. Berdasarkan permodelan 3D yang dilakukan sebagai simulasi dampak tubrukan kapal, didapatkan data hasil dengan nilai sebagai berikut:

Tabel 5. 1. Hasil Permodelan 3D menggunakan ANSYS

Jenis Analisis	Nilai Minimal	Nilai Maksimal	Unit
<i>Total Deformation</i>	$2,5743 \times 10^{-4}$	$1,6928 \times 10^{-1}$	meter
<i>Directional Deformation</i>	$-7,2658 \times 10^{-3}$	$1,6816 \times 10^{-1}$	meter
Equivalent Stress	70253	$3,9607 \times 10^9$	Pascal

5.2 Saran

Berdasarkan dari analisis dan seluruh proses yang telah dilakukan penulis dalam melakukan analisis frekuensi tubrukan kapal dengan skenario *crossing collision*, *head on collision*, dan *overtaking collision* serta konsekuensi terhadap kerusakan struktur kapal, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam melakukan analisis frekuensi dan konsekuensi tubrukan kapal yaitu :

1. Dalam melakukan analisis frekuensi tubrukan kapal di Alur Pelayaran Barat Surabaya, data kapal yang didapatkan dan digunakan dalam analisis tersebut merupakan data pada tahun 2015. Untuk melakukan kajian yang serupa, akan lebih baik apabila data statis dan data dinamis yang digunakan merupakan data terbaru. Sehingga hasil perhitungan yang dilakukan lebih baik dan sesuai dengan kondisi terkini di lapangan.
2. Dalam melakukan analisis serupa yang berkaitan dengan kerusakan struktur kapal, diperlukan perencanaan berupa pembuatan desain obyek kapal yang akan dilakukan dalam analisis. Untuk mendapatkan hasil yang lebih obyektif, dapat digunakan 2 obyek gambar berupa *solidpart* yang menggunakan jenis *plate* dan dilengkapi dengan konstruksi. Sehingga, hasil analisis tubrukan terhadap kerusakan struktur dapat dilakukan dengan lebih terukur.
3. Analisis konsekuensi tubrukan kapal terhadap kerusakan struktur kapal masih belum terlaksana dengan baik. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang lebih baik dalam menganalisis dampak tubrukan kapal terhadap kerusakan struktur kapal untuk mendapatkan hasil yang lebih obyektif dan hasil analisis yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhita, I. G. M. S., 2017. *Analisis Risiko Tubrukan Selama Proses Ship to Ship Transfer Bahan Bakar*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Aditya Rio Prabowo, D. M. B. J. M. S., 2017. Effect of the Rebounding of a Striking Ship on Structural Crashworthiness during Ship-Ship Collision. *Thin-Walled Structure*, pp. 225-239.
- Anon., 2011. *Rules for Classification and Construction*. Hamburg: Germanischer Lloyd SE.
- Anon., 2015. *Preventing Damage to Harbour Facilities and Ship Handling in Harbours*. s.l.:Japan P&I Club.
- Anon., 2017. *Marine Traffic*. [Online]
Available at: www.marinetraffic.com
[Accessed 18 November 2017].
- BKI, 2017. *Biro Klasifikasi Indonesia*. [Online]
Available at: www.armada.bki.co.id
[Accessed 15 November 2017].
- Burmeister, H. e. a., 2007. *Assessing the Frequency and Material Consequences of Collisions with Vessels Lying at an Anchorage in Line with IALA iWrapMk II*, Hamburg: Fraunhofer Center for Maritime Logistics and Services CML, Hamburg, Germany.
- Friis-Hansen, P., 2007. *Basic Modelling Principles for Prediction of Collision and Grounding Frequencies*, s.l.: Technical University of Denmark.
- Google, 2017. *Google Earth*. [Online]
Available at: www.googleearth.com
[Accessed 11 November 2017].
- IMO, 2002. *www.imo.org*. [Online]
Available at: <http://www.safedor.org/resources/1023-MEPC392.pdf>
[Accessed 11 November 2017].
- M. Hanninen, P. K., 2015. Estimating the Number of Tanker Collision in the Gulf of Finland in 2015.
- Modlen, G., 2008. *Introduction to Finite Element Analysis*. Manchester: The University of Manchester.

Mulyadi, Y., Kobayashi, E., Wakabayashi, N. & Pitana, T., 2014. *Development of Ship Shinking Frequency Model over Subsea Pipeline for Madura Strait using AIS Data*. s.l.:WMU Journal of Maritime Affairs.

Para, B. W., 2015. Kajian Keselamatan Aktivitas Transportasi terhadap Collision pada Buoy No. 15 Alur Pelayaran Barat Surabaya. *Jurnal Teknik ITS*, Volume IV, pp. G-6.

Prabowo, A. R., 2017. Investigation on the Structural Damage of Double-Hull Ship Part I-Ship Collision. *2nd International Conference of Structural Integrity 2017*.

Pratiwi, E., 2015. *Estimasi Frekuensi Tubrukan Kapal Selama Proses Pipeline Decommissioning pada Crossing II Alur Pelayaran Barat Surabaya*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Zhang, S., 1999. Internal Mechanics of Ship Collisions. In: *The Mechanics of Ship Collisions*. Lyngby: Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, pp. 44-45.

LAMPIRAN

a. Perhitungan Crossing Collision

Panjang kapal <i>i</i>	(<i>L_i</i>)	=	91,47	meter
Lebar kapal <i>i</i>	(<i>B_i</i>)	=	15,94	meter
Panjang kapal <i>j</i>	(<i>L_j</i>)	=	112,58	meter
Lebar kapal <i>j</i>	(<i>B_j</i>)	=	18,93	meter
Jumlah kapal <i>i</i>	(<i>Q_i</i>)	=	1267	
Jumlah kapal <i>j</i>	(<i>Q_j</i>)	=	1157	
Kecepatan kapal <i>i</i>	(<i>V_i</i>)	=	6,6 knots =	3,395 m/s
Kecepatan kapal <i>j</i>	(<i>V_j</i>)	=	3,3 knots =	1,6977 m/s
Sudut lintasan	(<i>θ</i>)	=	60°	
<i>Sin θ</i>		=	0,866	
<i>Cos θ</i>		=	0,5	

Menentukan nilai dari kecepatan relatif *crossing collision*,

$$V_{ij} = \sqrt{(V_i)^2 + (V_j)^2 - 2 \cdot V_i \cdot V_j \cdot \cos \theta}$$

$$V_{ij} = \sqrt{(3,395)^2 + (1,6977)^2 - 2 \cdot (3,395) \cdot (1,6977) \cdot (0,5)}$$

$$V_{ij} = 5,7157 \text{ m/s}$$

Menghitung nilai dari *collision diameter* (*D_{ij}*),

$$D_{ij} = \frac{L_i \cdot V_j + L_j \cdot V_i}{V_{ij}} \sin \theta + B_j \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_i}{V_{ij}} \right)^2 \right\} + B_i \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_j}{V_{ij}} \right)^2 \right\}$$

$$D_{ij} = \frac{(91,47) \cdot (1,6977) + (112,58) \cdot (3,395)}{(5,7157)} \cdot 0,866 + (18,93) \left\{ 1 - \left(0,866 \cdot \frac{3,395}{5,7157} \right)^2 \right\} + 15,94 \left\{ 1 - \left(0,866 \cdot \frac{1,6977}{5,7157} \right)^2 \right\}$$

$$D_{ij} = 172,2599 \text{ meter}$$

Perhitungan nilai dari *numerical geometry*,

$$N_G^{\text{crossing}} = \sum_{i,j} \frac{Q_i Q_j}{V_i V_j} D_{ij} V_{ij} \frac{1}{\sin \theta} \quad \text{untuk sudut sebesar } 10^\circ < [\theta] < 170^\circ$$

$$N_G^{\text{crossing}} = \frac{1267 \times 1157}{3,395 \times 1,6977} \times 172,2599 \times 5,7157 \times \frac{1}{0,866}$$

$$N_G = 4,78232$$

Perhitungan frekuensi tubrukan kapal dengan nilai *causation factor* (*P_c*) = 0,000108 dengan persamaan,

$$\lambda = N_G \times P_c$$

$$= 4,78232 \times 0,000108$$

$$= 0,000516491$$

- Perhitungan manual = $2,1519 \times 10^{-2}$
- Komputasi IWRAP = $2,30022 \times 10^{-2}$

$$\begin{aligned} \text{Nilai validasi adalah} &= \frac{2,1519 \times 10^{-2}}{2,30022 \times 10^{-2}} \\ &= 93,55\% \end{aligned}$$

b. Perhitungan Head On Collision

Panjang kapal <i>i</i>	(L_i)	=	91,47	meter
Lebar kapal <i>i</i>	(B_i)	=	15,94	meter
Panjang kapal <i>j</i>	(L_j)	=	91,47	meter
Lebar kapal <i>j</i>	(B_j)	=	15,94	meter
Jumlah kapal <i>i</i>	(Q_i)	=	1267	
Jumlah kapal <i>j</i>	(Q_j)	=	1267	
Kecepatan kapal <i>i</i>	(V_i)	=	6,6 knots =	3,395 m/s
Kecepatan kapal <i>j</i>	(V_j)	=	3,3 knots =	1,6977 m/s
Panjang lintasan	(L_w)	=	795,41	meter

Perhitungan kecepatan relatif,

$$V_{ij} = V_i + V_j$$

Dimana,

$$V_{ij} = 3,395 + 1,6977 \text{ m/s}$$

$$V_{ij} = 5,0927 \text{ m/s}$$

Perhitungan lebar kapal rata-rata,

$$B_{ij} = \left(\frac{B_i + B_j}{2} \right)$$

$$B_{ij} = \left(\frac{15,94 + 15,94}{2} \right)$$

$$B_{ij} = 15,94 \text{ m/s}$$

Perhitungan komponen distribusi normal,

$$\text{Mean } i (\mu_i) = 0$$

$$\text{Mean } j (\mu_j) = 0$$

$$\text{Mean } ij (\mu_{ij}) = \mu_i + \mu_j$$

$$\text{Mean } ij (\mu_{ij}) = 0$$

$$\text{Standar Deviasi } i (\sigma_i) = 75$$

$$\text{Standar Deviasi } j (\sigma_j) = 75$$

$$\text{Standar Deviasi } ij (\sigma_{ij}) = \sqrt{(\sigma_i)^2 + (\sigma_j)^2}$$

$$\text{Standar Deviasi } ij (\sigma_{ij}) = \sqrt{(75)^2 + (75)^2}$$

$$\text{Standar Deviasi } ij (\sigma_{ij}) = 106,066$$

Perhitungan nilai *Collision Probability*,

$$Pg = \Phi\left(\frac{B_{ij} - \mu_{ij}}{\sigma_{ij}}\right) - \Phi\left(-\frac{B_{ij} + \mu_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)$$

$$Pg = \Phi\left(\frac{15,94 - 0}{106,066}\right) - \Phi\left(-\frac{15,94 + 0}{106,066}\right)$$

$$P_G = 0,55973 - 0,44027$$

$$P_G = 0,11946$$

Perhitungan nilai *geometric number*,

$$N_G^{head-on} = L_W \sum_{i,j} P_{G\ I,j}^{head-on} \cdot \frac{V_{ij}}{V_i V_j} (Q_i Q_j)$$

$$N_G^{head-on} = 795,41 \times 0,11946 \times \frac{5,0927}{3,395 + 1,6977} \times (1267 \times 1267)$$

$$N_G^{head-on} = 4,33298$$

Perhitungan Frekuensi *head on collision*,

$$\lambda = P_c \times N_G$$

$$\lambda = 0,00005 \times 4,3398$$

$$\lambda = 0,000216649$$

Tabel Hasil validasi perhitungan pada skenario *head on collision*,

Pg Head On	=	0,119459256
Ng Head On	=	4,332980289
λ Manual	=	0,000216649
λ IWRAP	=	0,000210464
Error Check	=	97,15%

c. Perhitungan Overtaking Collision

Panjang kapal *i* (L_i) = 91,47 meter

Lebar kapal *i* (B_i) = 15,94 meter

Panjang kapal *j* (L_j) = 112,58 meter

Lebar kapal *j* (B_j) = 18,93 meter

Jumlah kapal *i* (Q_i) = 1267

Jumlah kapal *j* (Q_j) = 1157

Kecepatan kapal *i* (V_i) = 6,6 knots = 3,395 m/s

Kecepatan kapal *j* (V_j) = 3,3 knots = 1,6977 m/s

Panjang lintasan (L_w) = 795,41 meter

Perhitungan kecepatan relatif,

$$V_{ij} = V_i - V_j$$

Dimana,

$$V_{ij} = 3,395 - 1,6977 \text{ m/s}$$

$$V_{ij} = 1,6977 \text{ m/s}$$

Perhitungan Lebar rata-rata kapal,

$$B_{ij} = \left(\frac{B_i + B_j}{2} \right)$$

$$B_{ij} = \left(\frac{15,94 + 18,93}{2} \right)$$

$$B_{ij} = 17,435 \text{ m/s}$$

Identifikasi parameter perhitungan distribusi normal,

$$\text{Mean } i (\mu_i) = 0$$

$$\text{Mean } j (\mu_j) = 0$$

$$\text{Mean } ij (\mu_{ij}) = 0$$

$$\text{Standar Deviasi } i (\sigma_i) = 75$$

$$\text{Standar Deviasi } j (\sigma_j) = 75$$

$$\text{Standar Deviasi } ij (\sigma_{ij}) = 106,066$$

Perhitungan nilai *collision probability* (P_G),

$$P_g = \Phi \left(\frac{B_{ij} - \mu_{ij}}{\sigma_{ij}} \right) - \Phi \left(-\frac{B_{ij} + \mu_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)$$

$$P_g = \Phi \left(\frac{17,435 - 0}{106,066} \right) - \Phi \left(-\frac{17,435 + 0}{106,066} \right)$$

$$P_G = 0,565284 - 0,434716$$

$$P_G = 0,130567$$

Perhitungan dari *geometric number* pada skenario *overtaking collision*,

$$N_{G \text{ overtaking}} = L_w \sum_{i,j} P_{G \text{ } i,j}^{\text{head-on}} \frac{V_{ij}}{V_i V_j} (Q_i Q_j)$$

$$N_{G \text{ overtaking}} = 795,41 \times 0,130567 \times \frac{1,6977}{3,395 + 1,6977} \times (1267 \times 1157)$$

$$N_{G \text{ overtaking}} = 1,44157$$

Perhitungan Frekuensi *Overtaking Collision*,

$$\lambda = P_c \times N_G$$

$$\lambda = 0,00011 \times 1,44157$$

$$\lambda = 0,000159$$

Tabel Hasil Validasi Perhitungan pada Overtaking Collision

Frekuensi	=	0,000216
Pg Overtaking	=	0,130567
Ng Overtaking	=	1,44157
λ Manual	=	0,000159
λ IWRAP	=	0,000155
<i>Error Check</i>	=	98,056%

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

Perhitungan Konsekuensi Tubrukan Kapal

Tabel *Sample* data kapal dalam analisis konsekuensi tubrukan kapal

Nama kapal	Meratus Kapuas	Sinar Jepara	Satuan
Panjang	119,9	118,6	meter
Lebar	21,8	16,2	meter
Tinggi	7,3	7,8	meter
Sarat	5,3	6,1	meter
Motor Penggerak	2595,036	2534,634	kW
RPM	750	750	rpm
Motor Bantu	1336,294	1361,648	kW
DWT	8180	3630,4	ton
Kecepatan Service	11,5	10,2	knots
LWT	2122	1718	ton
Disp	10302	5348,4	ton

Melakukan identifikasi data perhitungan sebagai berikut :

Nilai $m_{ax} = m_{b1} = 0,07$

Nilai $m_{ay} = m_{b2} = 1,2$

Nilai $ja = jb = 0,21$

Nilai $Ra = \frac{1}{4} \times Lpp\ a = 29,975$

Nilai $Rb = \frac{1}{4} \times Lpp\ b = 29,65$

$X_a, Y_a = (100,90)$

$X_b, Y_b = (20,0)$

$X_c, Y_c = (20,10)$

Sudut $\alpha = 30^\circ$. Dengan nilai $\sin \alpha = 0,5$ dan $\cos \alpha = 0,866$

Sudut $\beta = 60^\circ$. Dengan nilai $\cos \beta = 0,866$ dan $\sin \beta = 0,5$

$v_{ax} = 6 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s}$

$v_{ay} = 2 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s}$

$v_{bx} = 3,3 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s}$

$v_{by} = 1,5 \text{ knots} = 0,771 \text{ m/s}$

$Ma = 4772,986 \text{ ton}$

$Mb = 3792,715 \text{ ton}$

Perhitungan *relative motion of striking ship and struck ship* menggunakan persamaan sebagai berikut beserta dengan hasil perhitungan,

$$D\alpha\xi = \frac{1}{1+max} \cdot \sin^2 \alpha + \frac{1}{1+may} \cdot \cos^2 \alpha + \frac{1}{1+ja} \cdot \frac{[yc \cdot \sin \alpha - (xc-xa) \cdot \cos \alpha]^2}{Ra^2}$$

$$D\alpha\xi = 5,649581$$

$$D\alpha\eta = \frac{1}{1+max} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \frac{1}{1+may} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$+ \frac{1}{1+ja} \cdot \frac{[yc \cdot \sin \alpha - (xc-xa) \cdot \cos \alpha][yc \cdot \cos \alpha + (xc-xa) \cdot \sin \alpha]}{Ra^2}$$

$$D\alpha\eta = 0,398$$

$$Db\xi = \frac{1}{1+mb1} \cdot \sin^2(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+mb2} \cdot \cos^2(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+jb} \cdot \frac{[(yc-yb) \sin \alpha - (xc-xb) \cdot \cos \alpha]^2}{Rb^2}$$

$$Db\xi = 1,2186$$

$$Db\eta = \frac{1}{1+mb1} \cdot \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+mb2} \cdot \sin(\beta - \alpha) \cos(\beta - \alpha)$$

$$+ \frac{1}{1+jb} \cdot \frac{[(yc-yb) \sin \alpha - (xc-xa) \cos \alpha][(yc-yb) \cos \alpha + (xc-xb) \sin \alpha]}{Rb}$$

$$Db\eta = -0,3006$$

$$K\alpha\xi = \frac{1}{1+max} \sin \alpha \cdot \cos \alpha - \frac{1}{1+may} \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$+ \frac{1}{1+ja} \cdot \frac{[yc \cdot \sin \alpha - (xc-xa) \cos \alpha][yc \cdot \cos \alpha + (xc-xa) \sin \alpha]}{Ra^2}$$

$$K\alpha\xi = 1,417$$

$$K\alpha\eta = \frac{1}{1+max} \cdot \cos^2 \alpha + \frac{1}{1+may} \cdot \sin^2 \alpha + \frac{1}{1+ja} \cdot \frac{[yc \cdot \cos \alpha + (xc-xa) \sin \alpha]^2}{Ra^2}$$

$$K\alpha\eta = 0,8032$$

$$Kb\xi = \frac{1}{1+mb1} \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+mb2} \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos(\beta - \alpha)$$

$$+ \frac{1}{1+jb} \cdot \frac{[(yc-yb) \sin \alpha - (xc-xb) \cos \alpha][(yc-yb) \cos \alpha + (xc-xb) \sin \alpha]}{Rb^2}$$

$$Kb\xi = -0,1675$$

$$Kb\eta = \frac{1}{1+mb1} \cdot \cos^2(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+mb2} \cdot \sin(\beta - \alpha) + \frac{1}{1+jb} \cdot \frac{[(yc-yb) \cos \alpha + (xc-xb) \sin \alpha]^2}{Rb^2}$$

$$Kb\eta = 0,8154$$

Dalam proses perhitungan pergerakan relatif kapal, dilakukan perhitungan sebagai berikut,

Nilai dari	Ma	= 4772,986 ton
	Mb	= 3792,715 ton

$$D_{\xi} = \frac{Da\xi}{Ma} + \frac{Db\xi}{Mb}, D_{\eta} = \frac{Da\eta}{Ma} + \frac{Db\eta}{Mb}$$

$$D_{\xi} = \frac{5,65}{4772,986} + \frac{1,2186}{3792,715}, D_{\eta} = \frac{0,398}{4772,986} + \frac{-0,3006}{3792,715}$$

$$D_{\xi} = 13,403 \times 10^{-4} \quad D_{\eta} = 1,585 \times 10^{-4}$$

$$D_{\xi} = \frac{K\xi}{Ma} + \frac{Kb\xi}{Mb}, D_{\eta} = \frac{K\alpha\eta}{Ma} + \frac{Kb\eta}{Mb}$$

$$K_{\xi} = \frac{1,417}{4772,986} + \frac{-0,1675}{3792,715}, K_{\eta} = \frac{0,8032}{4772,986} + \frac{0,8154}{3792,715}$$

$$K_{\xi} = 3,4106 \times 10^{-4} \quad K_{\eta} = 3,832 \times 10^{-4}$$

Perhitungan selanjutnya adalah menghitung kecepatan relatif setelah terjadi tubrukan yaitu dengan persamaan,

$$\xi(0) = \xi a(0) - \xi b(0) = Vax \cdot \sin\alpha + Vay \cdot \cos\alpha + Vb1 \sin(\beta - \alpha) - Vb2 \cos(\beta - \alpha)$$

Data perhitungan yang diperlukan adalah,

$$\begin{aligned} v_{ax} &= 6 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s} \\ v_{ay} &= 2 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s} \\ v_{bx} &= 3,3 \text{ knots} = 3,084 \text{ m/s} \\ v_{by} &= 1,5 \text{ knots} = 0,771 \text{ m/s} \\ \xi(0) &= 3,361 \end{aligned}$$

Perhitungan energi yang terdisipasi dilakukan dengan persamaan yaitu,

$$E_{\xi} = 0,5 \times \frac{1}{D\xi} \times 0,6 \times D\eta \times (\xi)^2 / 1000$$

Hasil perhitungan tersebut didapatkan nilai dari energi yang terdisipasi adalah 44,312 MJ.

Kategori energi yang terdisipasi pada tubrukan kapal dikelompokkan berdasarkan tingkatan berikut yaitu :

- 0 sampai 30 MJ = *minor damage*
- 30 sampai 100 MJ = *moderate damage*
- 100 sampai 200 MJ = *heavy damage*
- <200 MJ = *critical damage*

Berdasarkan perhitungan tersebut, hasil energi yang terdisipasi dalam tubrukan berada pada level *moderate damage* dengan nilai 44,312 MJ.

Data Hasil 3D *Modelling* ANSYS AUTODYN

Tabel Satuan	
Sistem Satuan	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celcius
Sudut	Degrees
Kecepatan rotasi	rad/s
Suhu	Celcius

Tabel Data Statistik	
Bidang	2
Bidang Kerja Aktif	2
Jumlah Nodes	47334
Elemen	134441
Nilai Toleransi	0,047584

Tabel Analisis	
Nama Obyek	<i>Explicit Dynamics</i>
Status	Terselesaikan
Jenis Fisik	Struktur
Jenis Analisis	<i>Explicit Dynamics</i>
Solver	AUTODYN
Suhu Lingkungan	22°C

Material Data	
<i>Material</i>	<i>Structural Steel</i>
<i>Density</i>	7850 kg.m ³
<i>Coefficient of Thermal Expansion</i>	1,2 e-5 C ⁻¹
<i>Specific Heat</i>	434 J/kg.C
<i>Thermal Conductivity</i>	60,5 W/m.C
<i>Resistivity</i>	1,7 e-7 ohm.m
<i>Compressive Yield Strength</i>	2,5 e+8 Pa
<i>Tensile Yield Strength</i>	2,5 e+8 Pa
<i>Tensile Ultimate Strength</i>	4,6 e+8 Pa
<i>Reference Temperature</i>	22°C
Midship Section	
Jenis	SolidWorks

Midship Section	
Satuan Panjang	Meter
Panjang X	12,08 meter
Panjang Y	7,05 meter
Panjang Z	10 meter
Volume	31,515 m ³
Massa	2,4739 x 10 ⁵ kg
Skala	1
Material	<i>Structural Steel</i>
Momen Inersia I _{p1}	3,0664 x 10 ⁶ kg.m ²
Momen Inersia I _{p2}	6,8819 x 10 ⁶ kg.m ²
Momen Inersia I _{p3}	5,9322 x 10 ⁶ kg.m ²
Jumlah Nodes	45076
Elemen	124481

Forepeak Section	
Jenis	SolidWorks
Satuan Panjang	Meter
Panjang X	12,88 meter
Panjang Y	7,45 meter
Panjang Z	12,5 meter
Volume	850,17 m ³
Massa	6,6739x10 ⁻⁶ kg
Skala	1
Material	<i>Structural Steel</i>
Momen Inersia I _{p1}	9,0936x10 ⁷ kg.m ²
Momen Inersia I _{p2}	1,4008x10 ⁸ kg.m ²
Momen Inersia I _{p3}	9,8305x10 ⁷ kg.m ²
Jumlah Nodes	2258
Elemen	9960

Initial Condition	
<i>Input Type</i>	<i>Explicit Dynamics</i>
<i>Define by</i>	<i>Components</i>
<i>X Component</i>	3,4 m/s
<i>Y Component</i>	0 m/s
<i>Z Component</i>	0 m/s

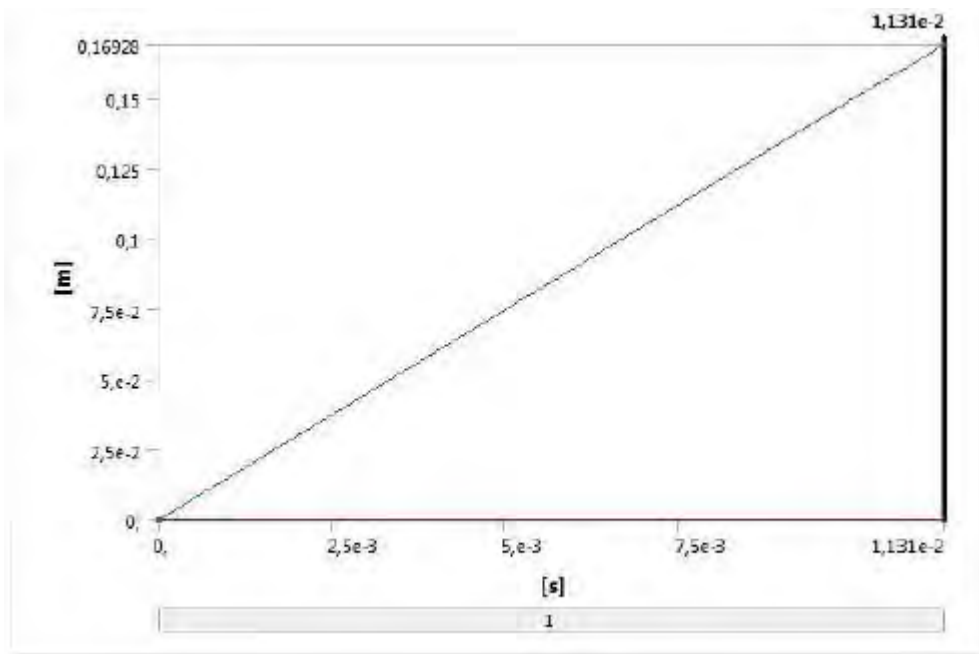
Initial Condition	
<i>Coordinate System</i>	<i>Global Coordinate System</i>
<i>Maximum Number of Cycle</i>	100000
<i>End time</i>	30 s
<i>Maximum Energy Error</i>	0,1
<i>Time Step Safety Factor</i>	0,9
<i>Solve Unit</i>	mm, mg, ms

Result			
Type	Total Deformation	Directional Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
<i>Minimum</i>	2,5743x10 ⁻⁴ m	-7,2658x10 ⁻³ m	70253 Pa
<i>Maximum</i>	1,6928x10 ⁻¹ m	1,6816x10 ⁻¹ m	3,9607x10 ⁹ Pa

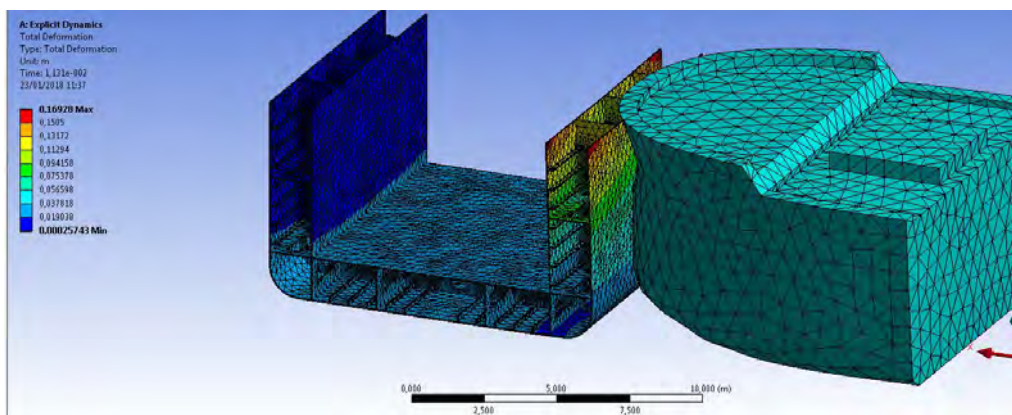
Hasil Analisis *Total Deformation*

<i>Total Deformation</i>		
<i>Time (s)</i>	<i>Minimum (m)</i>	<i>Maximum (m)</i>
$1,1755 \times 10^{-38}$	0	0
$1,131 \times 10^{-2}$	$2,5743 \times 10^{-4}$	$1,6928 \times 10^{-1}$

Grafik *Total Deformation* (m) terhadap waktu (s)



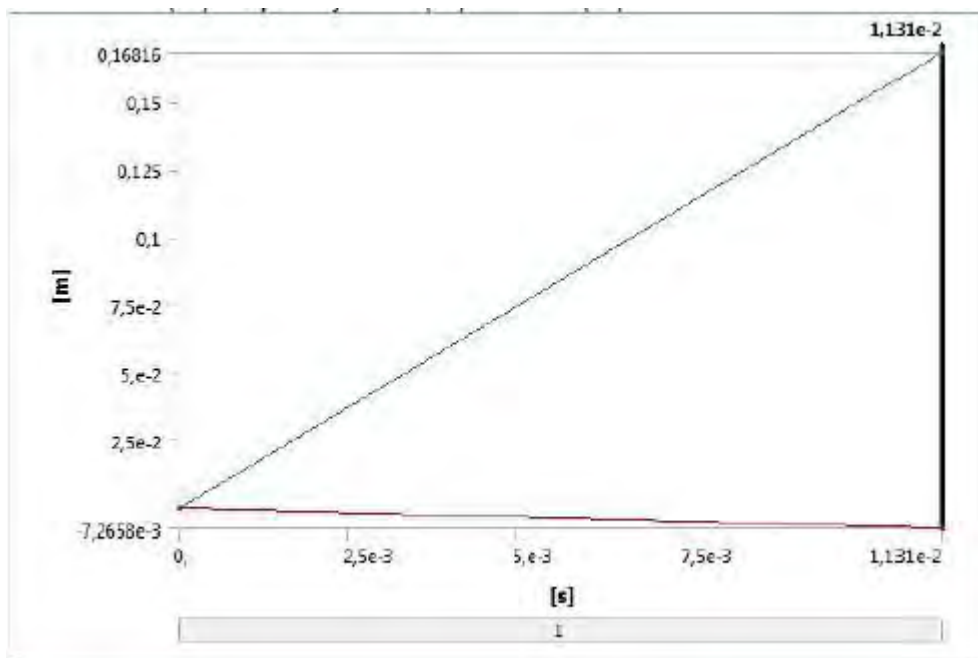
Gambar Hasil Analisis 3D Modelling-*Total Deformation*



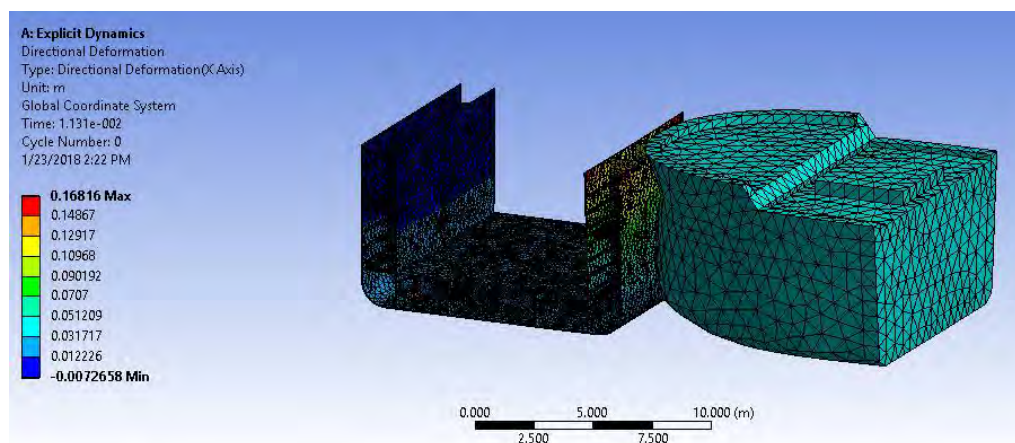
Hasil Analisis *Directional Deformation*

<i>Directional Deformation</i>		
<i>Time (s)</i>	<i>Minimum (m)</i>	<i>Maximum (m)</i>
$1,1755 \times 10^{-38}$	0	0
$1,131 \times 10^{-2}$	$-7,2658 \times 10^{-3}$	$1,6816 \times 10^{-1}$

Grafik Besar *Directional Deformation* (m) terhadap waktu (s)



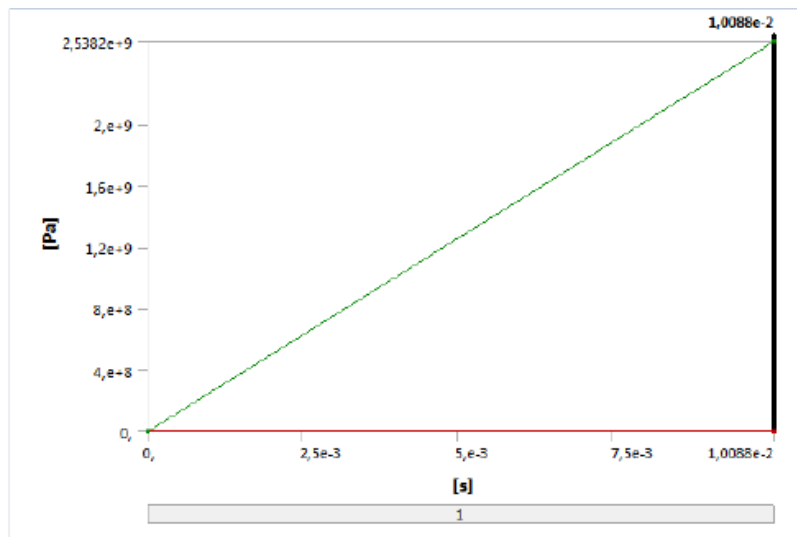
Gambar Hasil Analisis 3D *Modelling-Directional Deformation*



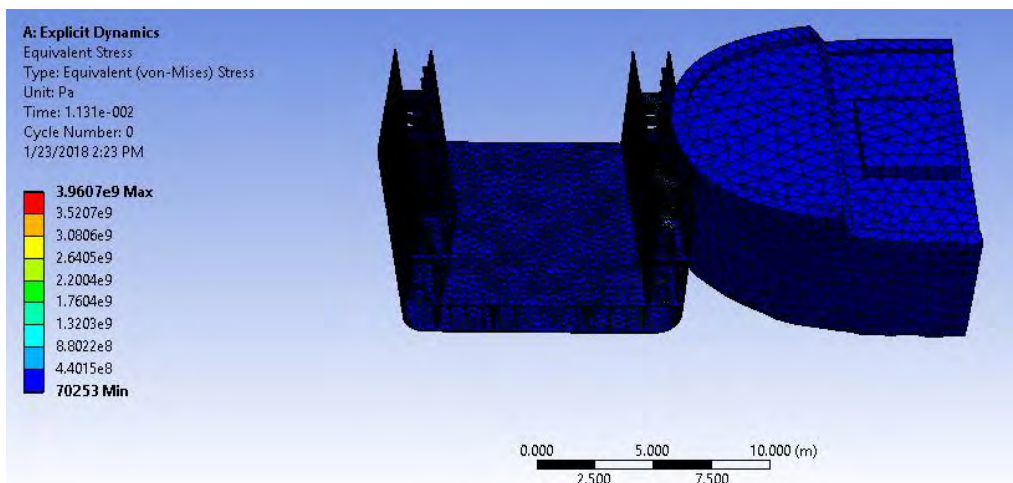
Hasil Analisis *Equivalent Stress*

<i>Equivalent Stress</i>		
<i>Time (s)</i>	<i>Time (s)</i>	<i>Maximum (Pa)</i>
$1,1755 \times 10^{-38}$	0	0
$1,131 \times 10^{-2}$	70253	$3,9607 \times 10^9$

Grafik Besar *Equivalent Stress* (Pa) terhadap waktu (s)



Gambar Hasil Analisis 3D *Modelling-Equivalent Stress*



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Pandhu Hayu Amarta, merupakan putra nomor 2 dari 3 bersaudara. Ayah dari penulis bernama Supandri dan Ibu dari penulis bernama Tulus Rahayu. Lahir pada tanggal 10 Mei 1996, di Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah. Penulis telah menyelesaikan jenjang pendidikan formal dasar di SD Negeri Sampangan 26 Kota Surakarta, jenjang menengah pertama di SMP Negeri 4 Kota Surakarta, jenjang menengah atas di SMA Negeri 3 Surakarta, dan melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Sistem Perkapalan Program Reguler, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya di bidang *Reliability, Availability, Management, and Safety* (RAMS).

Penulis pernah menjalankan *on the job training* di beberapa perusahaan yaitu PT. Daya Radar Utama Unit 1 Jakarta Utara dan PT. Krakatau Port and Service Cilegon, Banten. Selain aktivitas akademik, penulis berpengalaman dan aktif tergabung dalam beberapa aktivitas organisasi dan unit kegiatan mahasiswa. Penulis pernah bergabung dalam Unit Kegiatan Mahasiswa ITS Foreign Language Society dan ITS Debating Society pada tahun 2015, aktif dalam *student volunteer* di ITS International Office, Marine Icon 20015, 2016, dan 2017 HIMASISKAL ITS, serta menjadi koordinator laboratorium RAMS. Selain itu, penulis aktif dalam mengikuti kegiatan pengembangan *softskills* seperti Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Pra Tingkat Dasar dan Tingkat Dasar, Sepuluh Nopember Camp Yayasan Karya Salemba Empat ITS, *Petroleum Integrated Training* UGM, dan beberapa kegiatan lainnya. Penulis juga merupakan penerima beasiswa Yayasan Karya Salemba Empat periode 2015 hingga 2017 dengan donatur PT. Perusahaan Gas Negara (Persero). Penulis dapat dihubungi melalui pandhu.h.amarta@gmail.com.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”