



TUGAS AKHIR - MO.141326

**ANALISA TENGGELAMNYA *MOORING BUOY*
DENGAN METODE *FISHBONE DIAGRAM***

ZENIAR ADZMIZAH

4313100133

Dosen Pembimbing :

Ir. Murdjito, M.Sc., M.Eng

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, PhD.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 60111



TUGAS AKHIR - MO.141326

***ANALYSIS OF SINKING MOORING BUOY USING
FISHBONE DIAGRAM METHOD***

ZENIAR ADZMIZAH

4313100133

Supervisors :

Ir. Murdjito, M.Sc., M.Eng

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, PhD.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty Of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institut of Technology

urabaya 60111

2018

ANALISA TENGGELAMNYA MOORING BUOY DEGAN METODE FISHBONE DIAGRAM

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi
Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ZENIAR ADZMIZAH

Nrp. 4313100133

Disetujui oleh :

1. Ir. Murdjito, M.Sc, Eng.....(Pembimbing 1)

2. Prof. Ir, Daniel M. Rosyid, PhD.....(Pembimbing 2)

3. Yoyok Setyo H., S.T, M.T, PhD.....(Penguji)

4. Dr. Eng. Rudi Walujo P., S.T. M.T.....(Penguji)

5. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.....(Penguji)



ANALISA TENGGELAMNYA MOORING BUOY DENGAN METODE FISHBONE DIAGRAM

Nama : Zeniar Adzmizah
NRP : 4313100133
Departemen : Teknik Kelautan FTK-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Murdjito, M.Sc.,M.Eng.
Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D

ABSTRAK

Pada tugas akhir ini dibahas studi kasus pada *Mooring Buoy* yang tenggelam karena kehilangan daya apung atau *buoyancy*. Sehingga *mooring buoy* tersebut tidak dapat digunakan secara operasional. Untuk menyelesaikan studi kasus tersebut, maka dilakukan analisa tenggelamnya mooring buoy dengan metode *Root Cause Analysis (RCA)* yaitu *Fishbone diagram*. Berdasarkan hasil analisa menggunakan *fishbone diagram*, yang selanjutnya dilakukan analisa dengan *Finite Element Method (FEM)* untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada *buoy* dalam 3 kondisi, yaitu tabrakan kapal, *mooring buoy* ditarik oleh kapal ketika sedang tambat, dan tegangan pada *buoy* di sekitar mur bautnya. Tegangan yang terbesar terjadi pada *buoy* yang ditabrak kapal yang menyebabkan robeknya 1 kompartemen pada *buoy*, dan air laut masuk ke dalam kompartemen sehingga kehilangan *buoyancy* pada 1 kompartemen. Dan perhitungan *buoyancy*, jika hanya 1 kompartemen saja yang kemasukan air, tidak akan menyebabkan *buoy* tenggelam karena *buoyancy* yang tersisa sebesar 2,2813 ton. Berdasarkan perhitungan *buoyancy*, *buoy* akan tenggelam apabila air yang masuk kedalam *buoy* sebesar 3 kompartemen. Disimpulkan tenggelamnya *buoy* bukan merupakan akibat gaya tubrukan kapal, namun akibat faktor material body *buoy*.

Kata Kunci : *mooring buoy*, tenggelam, dan kehilangan *buoyancy*

**ANALYSIS OF SINKING MOORING BUOY USING FISHBONE DIAGRAM
METHOD**

Name : **Zeniar Adzmizah**
Student Number : **4313100133**
Department : **Teknik Kelautan FTK-ITS**
Advisors : **Ir. Murdjito, M.Sc.,M.Eng.**
Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D

ABSTRACT

This thesis was discussing about a problem of Mooring Buoy which was reported missing and found in sinking condition due to its loss of buoyancy. Therefore, that mooring buoy could not be used operationally. So, the sinking of mooring buoy analysis using Root Cause Analysis (RCA), that was Fishbone Diagram, was conducted to overcome this problem. Based on the analysis results using Fishbone Diagram, further analysis is using Finite Element Method (FEM) in three conditions were conducted to know the stress which occurred on the buoy, i.e. boat collision, buoy was pulled by boat while mooring, and also its stress on bolt joint area. The largest stress occurred on boat collision that caused a rupture of one compartment in buoy, so the sea water entered to the compartment and caused loss of buoyancy. Then, buoyancy calculation was conducted, if only the sea water entered a compartment, it would not cause the sinking of the buoy due to its residual buoyancy of 2.2813 tons. But, based on buoyancy calculation, buoy would be sunk if only the sea water entered the buoy of 3 compartments. It concluded that sinking of mooring buoy is not because of boat collision force, but of buoy material.

Keywords : *loss of buoyancy, mooring buoy, sink.*

KATA PENGANTAR

Assalaamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh

Alhamdulillah puji syukur hanya kepada Allah Subhanahu wa ta'ala yang telah memberikan segala rahmat, karunia dan hidayah kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik, lancar dan tepat waktu. Dengan tugas akhir yang berjudul **“Analisa Tenggelamnya Mooring Buoy Dengan Metode Fishbone Diagram”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat dalam menyelesaikan Program Studi Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam tugas akhir ini membahas tentang faktor – faktor yang menyebabkan *mooring buoy* tenggelam dengan menggunakan analisa fishbone diagram, fishbone diagram merupakan metode analisa kualitatif yang dengan analisa tersebut dapat menghasilkan faktor – faktor apa saja yang mungkin menjadi penyebab dari tenggelamnya buoy, dibantu dengan data – data yang ada dan bantuan dari expert.

Dalam pengerjaan dan penyusunan laporan tugas akhir ini, penulis menyadari terdapat banyak kekurangan yang masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan masukan berupa kritik dan saran yang membangun. Penulis berharap penelitian tugas akhir ini dapat bermanfaat dan membawa perkembangan dalam bidang teknologi kelautan serta berguna untuk pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh.

Surabaya, 2018

Zeniar Adzmizah

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak baik secara moral maupun material dan secara langsung maupun tidak langsung. Sehingga pada kesempatan kali ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah memberikan berkah, rezeki, petunjuk, kemudahan, kelancaran sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dan juga telah memberikan hidayah kepada penulis berupa AlQuran yang menjadikan penulis bersemangat dalam menyusun Tugas Akhir ini.
2. Bapak Soedeq Darmanto dan Ibu Evi Mahdaniah selaku orang tua penulis yang senantiasa tanpa henti memberikan bantuan berupa doa, semangat dan pelukan kepada penulis. Kemudian kepada Ridza, Niza dan Irza selaku saudara kandung penulis yang telah meminjamkan laptop untuk pengerjaan tugas akhir serta bantuan berupa doa dan semangat kepada penulis.
3. Bapak Murdjito selaku dosen pembimbing I yang selalu memberikan bimbingan, ilmu, motivasi, dan segala bentuk upaya yang beliau berikan yang membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Kemudian, Profesor Daniel M. Rosyid sebagai dosen pembimbing II yang selalu memberikan ilmu, bimbingan, kesabaran yang luar biasa kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir. Bapak-bapak dosen penguji yang telah memberikan masukan sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
4. Bapak Hasan Ikhwani sebagai dosen wali penulis yang selalu bersedia memberi nasihat, motivasi, kesabaran dan arahan kepada penulis dari awal hingga akhir perkuliahan. Kemudian kepada seluruh jajaran Bapak - Bapak dan Ibu - Ibu Dosen serta Karyawan Departemen Teknik Kelautan ITS yang telah memberikan ilmu, bantuan, dukugan dan fasilitas kepada saya selama menjalani perkuliahan.
5. Angga, Patria, Resy, Mas Ramzi, Mas Akbar dan Kevin yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir, memotivasi penulis

serta menjadi teman bertukar pikiran kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir

6. Pemandu Ekspresi selaku sahabat terbaik saya, terutama Zizi, Novi, Kevin, Bageur, Dian, Yoga, dan lain - lain yang selalu ada dan menjadi pendukung, penyemangat, tempat bersandar, dan motivatori dalam mengerjakan tugas akhir sehingga tugas akhir penulis dapat selesai pada waktunya.
7. Semua teman – teman Valtameri yang selalu memberikan dukungan demi terselesaikannya Tugas Akhir ini.
8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai dengan baik dan lancar. Semoga Allah SWT melimpahkan rahmat-Nya untuk membalas jasa dan kebaikan yang terucap diatas dan kepada kita semua. Aamiin.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMAKASIH	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Studi Kasus	6
2.2.2 <i>Single Point Mooring</i> (SPM)	6
2.2.3 Tipe <i>Single Point Mooring</i> (SPM).....	8
2.2.4 Bagian <i>Single Point Mooring</i>	11
2.2.5 Sistem <i>Mooring</i>	14
2.2.6 <i>Root Cause Analysis</i> (RCA)	15
2.2.7 <i>Fishbone Diagram</i>	19
2.2.7.1 Manfaat <i>Fishbone Diagram</i>	20
2.2.7.2 Langkah Membuat <i>Fishbone Diagram</i>	21
2.2.8 Konsep Pembebanan	25
2.2.9 <i>Tension</i> pada <i>Mooring Buoy</i>	26

2.2.10 Energi Tubrukan (<i>Impact Energy</i>).....	26
2.2.11 Tegangan pada Mur Baut	27
2.2.12 Tegangan Normal	29
2.2.13 Tegangan Geser	29
2.2.14 Tegangan Lentur (<i>Bending Stress</i>)	30
2.2.15 Tegangan <i>Von Mises</i>	31
2.2.16 Finite Element Method	33
2.2.17 <i>Boundary Conditions</i>	37
2.2.18 Analisis <i>Meshing</i> dan <i>Sensitivity</i>	38
2.2.19 Properti Material yang Digunakan pada Struktur <i>Buoy</i>	39
BAB III METODE PENELITIAN	41
3.1 Metodologi Penelitian	41
3.1.1 Diagram Alir Tugas Akhir	41
3.1.2 Diagram Alir <i>Fishbone Diagram</i>	42
3.1.3 Diagram Alir Metode Elemen Hingga	43
3.1.4 Diagram Alir Analisa perhitungan <i>Buoyancy</i>	44
3.2 Prosedur Penelitian	44
3.3 Pengumpulan Data.....	46
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Studi Kasus	49
4.1.1 Hasil Visual Inspeksi Terhadap <i>Mooring Buoy</i>	49
4.1.2 Kesimpulan Hasil Visual Inspeksi terhadap <i>Mooring Buoy</i>	50
4.2 Menganalisa Faktor – Faktor Tenggelam Dengan <i>Fishbone Diagram</i>	51
4.2.1 Menentukan Kepala Ikan atau Pernyataan Masalah.....	51
4.2.2 Mengidentifikasi Faktor – Faktor Penyebab Utama	52
4.2.3 Menemukan Faktor Penyebab Sekunder Berdasarkan Faktor Penyebab Utama	53
4.2.4 Mengkaji Setiap Faktor Pernyataan Sekunder.....	55
4.3 Pemodelan Struktur <i>Mooring Buoy</i> 3D	57
4.4 Analisa Pemodelan <i>Buoy</i> dengan FEM	58
4.4.1 Pembebanan pada Analisa	60

4.4.2	Pemodelan dengan Kondisi saat Kapal Menarik Buoy	63
4.4.3	Pemodelan Ketika <i>Buoy</i> Ditabrak Kapal.....	66
4.4.4	Pemodelan pada Mur Baut	69
4.5	Analisa Perhitungan <i>Buoyancy</i>	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		75
5.1	Kesimpulan.....	75
5.2	Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN		

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Buoy</i>	6
Gambar 2.2 Single Point Mooring	7
Gambar 2.3 Sistem <i>Single Buoy Mooring</i>	7
Gambar 2.4 FPSO yang Tertambat <i>Fixed Tower</i> SPM	8
Gambar 2.5 FPSO yang Tertambat CALM SPM	9
Gambar 2.6 SALM	9
Gambar 2.7 SPAR	10
Gambar 2.8 SAL <i>Mooring</i>	10
Gambar 2.9 Internal Turret Mooring	11
Gambar 2.10 Turret External Mooring	11
Gambar 2.11 Bagian <i>Mooring</i>	12
Gambar 2.12 Komponen Sistem Transfer	13
Gambar 2.13 Menentukan Pernyataan Masalah	22
Gambar 2.14 Mengidentifikasi Kategori-Kategori	23
Gambar 2.15 Menemukan Sebab-Sebab Potensial	24
Gambar 2.16 Tegangan Normal pada Bidang	29
Gambar 2.17 Tegangan Geser pada Suatu Bidang	30
Gambar 2.18 Tegangan Lentur (<i>Bending</i>) pada Suatu Bidang	31
Gambar 2.19 Tegangan <i>Von Mises</i> pada Suatu Bidang Tiga Dimensi	32
Gambar 2.20 Elemen Beam	35
Gambar 2.21 Elemen Shell	36
Gambar 2.22 Elemen Solid Struktur Homogen	36
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir secara umum	41
Gambar 3.2 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir – Fishbone diagram	42
Gambar 3.3 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir – Metode Element Hingga ..	43
Gambar 3.4 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir – Perhitungan Buoyancy ..	44
Gambar 3.5 Dimension of Buoy	47
Gambar 4.1 <i>Buoy</i> Di Lokasi Matak	49
Gambar 4.2 Area <i>Bolt Joint</i> Retak di setiap <i>compartment</i>	50
Gambar 4.3 <i>Compartment</i> #2 Robek Dan Bocor	50

Gambar 4.4 : <i>Compartment atas</i> Rusak dan Robek	50
Gambar 4.5 Kepala Ikan	52
Gambar 4.6: Kepala ikan + Tulang Ikan	53
Gambar 4.7 : Fishbone Diagram dengan faktor penyebab sekunder	54
Gambar 4.8 Pemodelan 3D Mooring Buoy	57
Gambar 4.9 Input Property Material Struktur Mooring <i>Buoy</i> Di Ansys	58
Gambar 4.10 model 3D <i>buoy</i> pada software ANSYS.....	58
Gambar 4.11 Contoh hasil meshing analisis	59
Gambar 4.12 Input gaya pada <i>buoy</i> pada saat ditarik kapal	64
Gambar 4.13 Tegangan Von Mises Pada Struktur <i>Buoy</i> akibat gaya Tarik dari Kapal	64
Gambar 4.14 Grafik meshing sensitivity pada <i>buoy</i> ditarik kapal	66
Gambar 4.15 Input gaya pada <i>buoy</i> pada saat kapal menabrak buoy	67
Gambar 4.16 hasil analisa meshing sensitivity pada buoy ditabrak kapal	67
Gambar 4.17 Grafik Meshing Sensitivity pada <i>buoy</i> yang ditabrak kapal	68
Gambar 4.18 Input boundary conditions pada analisa mur baut.....	69
Gambar 4.19 hasil meshing sensitivity pada daerah mur baut	70
Gambar 4.20 hasil meshing sensitivity pada analisa mur baut	71

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kecepatan Kapal Pada Saat Akan Sandar	27
Tabel 2.2 <i>Typical Properties</i> of LDPE	39
Tabel 2.3 <i>Typical Properties</i> of Steel A36	40
Tabel 3.1 Data Site Condition	46
Tabel 3.2 Data of Ship/barges	46
Tabel 3.3 Chain Selection	46
Tabel 3.4 Dimension Of Buoy	47
Tabel 3.3 <i>Chain</i> of Buoy	47
Tabel 4.1 Visual Inspeksi Pada <i>Buoy</i>	36
Tabel 4.2 Hasil kesimpulan fishbone diagram	55
Tabel 4.3 Output <i>Tension</i> Maksimum <i>Orcaflex In-Between</i> Kondisi <i>Full Load</i> ..	60
Tabel 4.4 Output <i>Tension</i> Maksimum <i>Orcaflex In-Between</i> Kondisi <i>Ballast</i>	61
Tabel 4.5 Output <i>Tension</i> Maksimum <i>Orcaflex In-Line</i> Kondisi <i>Full Load</i>	62
Tabel 4.6 Output <i>Tension</i> Maksimum <i>Orcaflex In-Line</i> Kondisi <i>Ballast</i>	62
Tabel 4.7 <i>Meshing Sensitivity</i> pada Analisis Kapal yang Menarik <i>Buoy</i>	65
Tabel 4.8 Analisa <i>Meshing Sensitivity</i> pada Analisis <i>Buoy</i> Ditabrak Kapal	68
Tabel 4.9 Hasil <i>Meshing Sensitivity</i> pada Analisa Mur Baut	70
Tabel 4.10 Buoyancy of Buoy	72
Tabel 4.11 Perhitungan Buoyancy Apabila 1 Compartment Kemasukan Air	72
Tabel 4. 12 Perhitungan Buoyancy Apabila 2 <i>Compartment</i> Kemasukan Air	73
Tabel 4.13 Perhitungan Buoyancy Apabila 3 <i>compartment</i> Kemasukan Air	73

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I

PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang kaya akan sumber daya alam, tak terkecuali di bidang minyak dan gas alam. Industri minyak dan gas alam dalam beberapa tahun ini mengalami perkembangan yang pesat apalagi didorong dengan kenaikan harga minyak mentah yang terus meningkat. Namun, tingginya harga minyak dan gas alam tersebut tidak sepenuhnya menguntungkan Indonesia karena cadangan minyak dan gas alam di daratan yang terbatas, sehingga mendorong industri minyak dan gas alam untuk berkembang di bidang eksploitasi pengeboran minyak dan gas di area lepas pantai (*offshore*). Dengan berkembangnya kemajuan teknologi maka peralatan yang berkaitan dengan *offshore* juga semakin canggih dan modern. Oleh karena, minyak dan gas alam merupakan sumber daya alam yang berada di bawah permukaan bumi dan apabila berada di laut maka salah satu cara pendistribusian sumber daya alam tersebut dengan menggunakan *tanker*.

Tanker atau kapal membutuhkan sistem penunjang sebagai tempat bersandarnya, salah satunya dengan bantuan *mooring buoy*. *Mooring buoy* merupakan salah satu jenis struktur terapung yang sering digunakan sebagai penambatan kapal di area lepas pantai dan sebagai sarana pendukung *loading-offloading* minyak bumi ke darat dan juga sebaliknya. Sistem *mooring buoy* yaitu *tanker* akan ditambat dengan *mooring* ke *buoy* kemudian *buoy* dijangkar ke dasar laut dengan rantai. Ada dua kelebihan menggunakan *mooring buoy*. Pertama, kapal tidak perlu melepaskan jangkar ke dasar laut sehingga ekosistem laut tetap terjaga. Kedua, kapal dapat merapat dengan jarak yang aman sehingga kemungkinan kapal besar untuk membentur dasar laut mengecil.

Pada tugas akhir ini terdapat studi kasus yang mana *Mooring Buoy* yang biasanya digunakan sebagai tempat bersandarnya *tanker* atau FPSO dilaporkan hilang dan ditemukan tenggelam diduga karena kehilangan daya apung. Akibat dari kejadian itu, *mooring buoy* tersebut tidak dapat

digunakan sebagaimana mestinya, seperti kerugian biaya, material, lingkungan serta menghambat kinerja operasional. Oleh karena itu, agar *mooring buoy* dapat digunakan secara operasional maka dilakukan analisa untuk mengetahui faktor apakah yang menyebabkan tenggelamnya *mooring buoy* tersebut.

Untuk menganalisa permasalahan yang menyebabkan *mooring buoy* tersebut tenggelam, digunakan metode *Root Cause Analysis (RCA) - Fishbone Diagram*. RCA adalah alat yang dirancang untuk membantu mengidentifikasi tidak hanya apa dan bagaimana suatu kejadian terjadi, tetapi juga mengapa kejadian tersebut terjadi (Tambupolon, 2012). Ada beberapa teknik yang bisa digunakan memecahkan masalah dalam RCA yaitu: *5 Why's*, *Fault Tree Analysis (FTA)*, *Fishbone Diagram*, *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*, dll. Dalam tugas akhir ini metode yang digunakan adalah *Fishbone Diagram*. *Fishbone Diagram* sering juga disebut *Cause-and-Effect Diagram* atau *Ishikawa Diagram*, metode ini diperkenalkan oleh Dr. Kaoru Ishikawa, seorang ahli pengendalian kualitas dari Jepang, sebagai satu dari tujuh alat kualitas dasar (*7 basic quality tools*). *Fishbone Diagram* merupakan sebuah teknik grafis yang digunakan untuk mengurutkan dan menghubungkan interaksi antara faktor-faktor yang berpengaruh dalam suatu proses.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji dalam tugas akhir ini adalah:

1. Faktor – faktor apa saja yang menyebabkan *mooring buoy* tenggelam dengan analisa menggunakan metode *Fishbone Diagram*?
2. Hal apa yang menyebabkan *mooring buoy* tenggelam dengan analisa menggunakan *software* pemodelan *finite element method*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai oleh penulis adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui faktor – faktor penyebab *mooring buoy* tenggelam dengan analisa menggunakan metode *Fishbone Diagram*

2. Mengetahui penyebab *mooring buoy* tenggelam dengan menggunakan pemodelan *software finite element method*.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penulisan tugas akhir ini adalah

- 1) Dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk menganalisa masalah suatu kasus dengan menggunakan metode *Fishbone Diagram*
- 2) Dapat memberikan pemahaman dalam menganalisa *buoy* atau benda apung lainnya yang tenggelam
- 3) Dan tugas akhir ini diharapkan dapat dijadikan referensi pada penelitian-penelitian selanjutnya dan juga menjadi media pembelajaran bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

1.5 Batasan Masalah

1. Metode yang digunakan dalam analisa permasalahan tugas akhir adalah *Root Cause Analysis* dengan *Fishbone Diagram*
2. Fishbone diagram digunakan untuk menganalisa permasalahan dengan pendekatan kualitatif
3. Hasil analisa dengan *Fishbone Diagram* didapat dari data hasil inspeksi pada struktur dan tinjauan pustaka terkait
4. Melakukan analisa berupa pemodelan *struktur body buoy* termasuk dengan *frame structure*nya
5. Tidak memodelkan kapal dan rantai yang berhubungan dengan *buoy*
6. Tidak menganalisis karakteristik material secara mendalam
7. Menganalisis yang berhubungan dengan analisa mekanik pada *buoy*

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini terdiri atas lima bab yaitu :

BAB I pendahuluan menjelaskan beberapa hal tentang penelitian dalam tugas akhir, yaitu masalah yang menjadi latar belakang penelitian sehingga penting untuk dilakukan, perumusan

masalah yang menjadi *problem* dan perlu dijawab, tujuan yang digunakan untuk menjawab permasalahan yang diangkat, manfaat apa yang didapat dari dilakukannya penelitian tugas akhir, batasan dari penelitian tugas akhir ini, serta penjelasan dari sistematika laporan yang digunakan dalam tugas akhir.

BAB II tinjauan pustaka dan dasar teori menjelaskan apa saja yang menjadi acuan dasar dari penelitian tugas akhir ini dengan dasar-dasar teori.

BAB III metodologi penelitian menjelaskan urutan analisis yang dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan dan melakukan analisa dalam tugas akhir ini, beserta pembahasan data.

BAB IV analisis hasil dan pembahasan menjelaskan tentang hasil identifikasi permasalahan utama dan alternatif penyelesaian masalah

BAB V kesimpulan dan saran menjelaskan tentang kesimpulan yang telah didapatkan dari hasil analisa pada tugas akhir ini dan saran-saran penulis sebagai pertimbangan dalam keperluan penelitian selanjutnya.

Daftar pustaka yang berisi referensi-referensi yang dipakai selama penelitian.



BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN
DASAR TEORI

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Analisa kegagalan digunakan untuk menganalisa *mechanical failure* suatu struktur yang diakibatkan baik oleh beban statik maupun beban dinamik. Kegagalan pada struktur dapat berupa deformasi-plastis, kelelahan (*fatigue*), *crack*, *fracture*, korosi, aus, cacat material dan lain – lain (Suntoyo, 2000). Dalam industri minyak dan gas, seperti instalasi lepas pantai, sistem perpipaan minyak dan gas, industri petrokimia, dan industri proses lainnya memiliki resiko terbesar mengalami kegagalan yang berakibat pada terlepasnya fluida (Tronskar, 2000 dalam Susatyo, 2016).

Metode yang digunakan untuk melakukan penelitian ini adalah metode *Root Cause Analysis* (RCA). RCA merupakan proses yang digunakan dalam menyelidiki dan mengelompokkan akar - akar masalah kejadian yang mungkin saja berdampak bagi keselamatan, kesehatan, lingkungan, kualitas, keandalan dan produksi (Prasetya, 2011). Referensi Tugas Akhir yang sebelumnya pernah dilakukan adalah membahas risiko kerusakan pada *mooring system* dengan metode *Integrated FTA-FMEA*, tugas akhir tersebut meneliti risiko pada *mooring system* dengan pendekatan RCA, yaitu *Integrated FTA-FMEA*. *Integrated FTA-FMEA* merupakan gabungan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan *Fault Mode and Effect Analysis* (FMEA), dengan metode ini mengidentifikasi risiko, mendeteksi efek dari *failure mode* tersebut, serta mengidentifikasi sumber resiko dan mengkuantifikasi probabilitas kejadian risiko.

Sedangkan pada tugas akhir yang akan saya kerjakan ini, membahas tentang *mooring buoy* yang mengalami kegagalan operasi yaitu tenggelamnya *mooring buoy*. Agar *mooring buoy* dapat bekerja sesuai operasinya maka dilakukan analisa dengan metode *Fishbone Diagram*, Untuk mengetahui faktor utama apakah yang mengakibatkan *mooring buoy* tenggelam.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Studi Kasus

Tugas akhir ini membahas tentang *Mooring Buoy* yang dilaporkan hilang dan kemudian ditemukan tenggelam yang diduga karena kehilangan daya apung, *Buoy* tersebut berhasil diambil dari laut dan akan dilakukan inspeksi, berikut adalah keadaan *buoy* ketika akan dilakukan inspeksi



Gambar 2.1 : Buoy

Setelah dilakukan inspeksi pada *mooring buoy* tersebut, maka menghasilkan kesimpulan bahwa

- 1) *Suspect* awal, *mooring buoy* tenggelam dikarenakan kehilangan daya apung atau *bouyancy*, dan juga terjadi beberapa kerusakan termasuk retak dan bocor pada bagian *buoy* sehingga air laut masuk ke dalam badan *buoy*.
- 2) Penyebab kerusakan secara fisik akan dinyatakan melalui *failure analysis* atau RCA (*Root Cause Analysis*).

2.2.2 *Single Point Mooring* (SPM)

Single Point Mooring adalah struktur terapung yang berlokasi di lepas pantai dan berfungsi sebagai titik tambat dan inter-koneksi untuk kapal *tanker*, FPSO, FSO, FSRU, FLNG, VLCC dan lain – lain

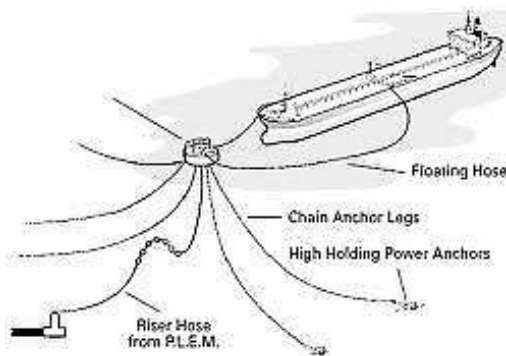
Single Point Mooring merupakan hubungan antara *geostatic* koneksi *manifold* bawah laut dan kapal *tanker weathervaning*. Kelebihan SPM yaitu mampu menjadi sistem tambat untuk kapal dengan ukuran apapun, bahkan kapal pengangkut minyak yang sangat besar sekalipun yang mana tidak ada fasilitas alternatif yang tersedia. Ketika berada di perairan dangkal, SPM digunakan untuk memuat dan membongkar *crude oil* serta

produk olahan dari *offshore* dan *inshore oilfields*, biasanya melalui beberapa bentuk sistem penyimpanan.



Gambar 2.2 : *Single Point Mooring* (Sumber : Wikipedia)

SPM adalah suatu fasilitas yang memiliki dimensi pada bidang horizontal yang kecil saat tanker dengan ukuran yang besar ditambatkan melalui suatu *bow hawser* dan memungkinkan kapal *tanker* tersebut untuk berputar 360° mengelilingi titik penambatannya. Perilaku ini membuat SPM sesuai sebagai sistem tambat untuk kebanyakan lokasi lepas pantai, sehingga saat ini sistem SPM yang paling banyak digunakan untuk daerah lepas pantai. Keuntungan dari sistem ini adalah kapal dapat dirubah posisinya dengan relatif mudah. Sistem ini memiliki prinsip bahwa kapal harus berada searah terhadap arah gelombang. Tali tambat dapat ditambahkan di ujung lain dari kapal, untuk tetap dalam posisi yang benar. Kerugiannya adalah jangkar pada ujung kapal dapat berpindah posisi akibat gerakan kapal, sehingga jangkar harus dipindahkan ke posisi semula. Tetapi, karena adanya alasan ekonomi maka tali tambat dapat diganti dengan *thruster* pada badan kapal (Afriyansah, 2013). Sistem SPM bisa dilihat di gambar berikut ini :



Gambar 2.3 : Sistem *Single Buoy Mooring* (Sumber : Helmidadang Wordpress)

SPM terdiri dari buoy yang secara permanen ditambat ke dasar laut dengan beberapa *mooring lines*. Pelampung (*buoy*) terdiri dari bantalan yang memungkinkan bagian dari itu berputar di sekitar bagian *geostatic* yang ditambatkan. Ketika ditambatkan ke bagian berputar dari pelampung dengan *mooring connection*, kapal dapat bebas *weathervane* di sekitar bagian *geostatic* dari pelampung.

kapal yang ditambatkan dengan SPM akan berputar sendiri di sekitar *dominant environment*, sistem akan meminimalkan beban pada sistem *mooring* tersebut. Kemampuan dari sistem SPM ini juga digunakan selama mendekatnya kapal yang perlu berlabuh. Maka kapal akan mendekati pelampung dengan busur ke dalam lingkungan yang dominan, dengan memaksimalkan kontrol sekaligus meminimalkan kebutuhan untuk bantuan *tug*.

Sistem *mooring* juga dapat dikombinasikan dengan sistem transfer fluida yang menghubungkan *subsea (pipeline)* ke *tanker*. Sistem transfer fluida terdiri dari *submarine hoses* antara *pipeline end manifold (PLEM)* di dasar laut dengan pelampung, dan *hose* antara pelampung dan *tanker*. Dalam pelampung putar menyediakan jalur transfer fluida antara bagian *geostatic* dan bagian berputar dari pelampung.

2.2.3 Tipe Single Point Mooring (SPM)

Ada berbagai tipe SPM yang ada (Barltrop, 1998), diantaranya sebagai berikut :

1. Fixed Tower

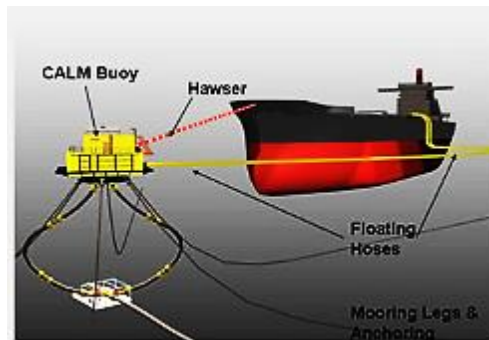


Gambar 2.4 : FPSO yang Tertambat *Fixed Tower* SPM (Sumber : Global CCS Institute)

Pada *fixed tower mooring*, tanker dihubungkan ke *tower* dengan permanen *wishbone* atau permanen *hawser*. Sistem ini dapat digunakan untuk laut dangkal ataupun sedang dengan arus yang cukup kuat. Keuntungan dari sistem ini yaitu dapat akses langsung dari kapal ke *tower*, Transfer fluida yang sangat sederhana, serta Modifikasi pada kapal tidak banyak.

2. *Catenary anchor Leg Mooring (CALM)*

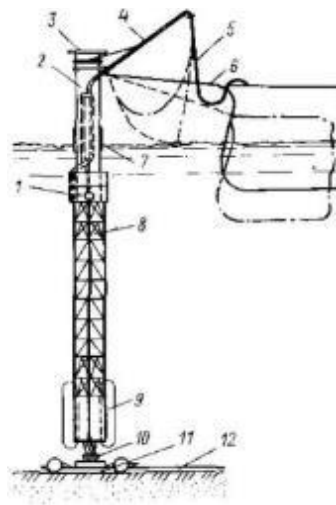
Terdiri atas sebuah pelampung (*buoy*) dengan 4 atau lebih rantai pengikat hingga ke dasar laut.



Gambar 2.5 : FPSO yang Tertambat CALM SPM (Sumber : Asan International LTD.)

3. *Single-Anchor Leg Mooring (SALM)*

Terdiri atas sebuah pelampung dengan sebuah kaki jangkar yang terhubung dengan riser dan rantai – rantai *swivel*.



Gambar 2.6 : SALM (Sumber : Green Stick Energy)

4. *Articulated Loading Platform (ALP)*

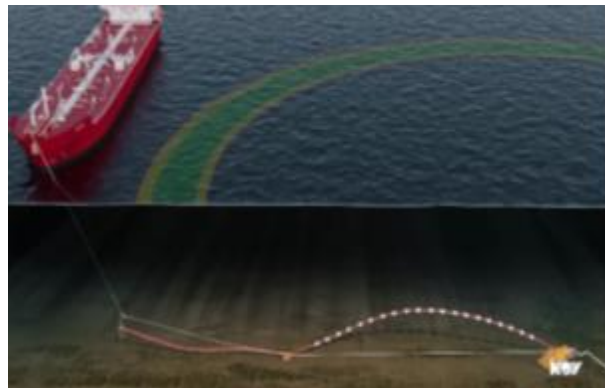
5. *Single Point and Reservoir (SPAR)*



Gambar 2.7 : SPAR Platform (Sumber : Technip)

6. *Single-Anchor Loading (SAL)*

The Single Anchor Loading (SAL) dikembangkan sebagai alternatif biaya rendah untuk sistem SPM yang digunakan dalam situasi di mana SPM tipe CALM tidak dapat digunakan.



Gambar 2.8 SAL Mooring (Sumber : National Oilwell Varco)

7. *Turret Mooring*

Sistem *Turret mooring system* yaitu kapal dihubungkan dengan *turret* sehingga *bearing* memungkinkan kapal untuk berputar. Terdapat 2 jenis *turret mooring* yaitu *internal turret* dan *external turret*.

a. Internal Turret

Internal Turret mempunyai keunggulan yaitu bisa terpasang secara permanen maupun tidak dan dapat diaplikasikan pada lapangan yang mempunyai kondisi lingkungan yang ekstrim

dan sesuai untuk *deepwater*. *Internal turret* bisa mengakomodasi *riser* sampai 100 unit dengan kedalaman laut hingga 10,000 *feet*.



Gambar 2.9 *Internal Turret Mooring* (Sumber : SOFEC)

b. External Turret

External Turret dapat kita diletakkan pada posisi *stern* kapal pada luar lambung kapal, sehingga kapal dapat berputar 360 derajat dan mampu beroperasi pada kondisi cuaca normal atau *extreme*. *Chain leg* ditanam pada dasar laut dengan menggunakan *anchor*. Untuk biaya pembuatannya sedikit lebih murah jika dibandingkan dengan *internal turret* dan modifikasi yang dilakukan pada kapal hanya sedikit.



Gambar 2.10 : *Turret External Mooring* (Sumber : SOFEC)

2.2.4 *Bagian Single Point Mooring*

Kekuatan SPM dalam menahan beban kapal adalah parameter utama menentukan kapasitasnya. Seperti contoh adalah SPM 35.000

DWT. Bisa diartikan bahwa SPM tersebut mampu menahan beban kapal maksimal sebesar 35.000 DWT. Kekuatan ini berasal dari *design* peralatan terutama pada bagian materialnya (Wijanarto, 2013).

Ada empat bagian dalam sistem *Single Point Mooring* (SPM) yaitu tubuh pelampung, *mooring*, sistem transfer dan komponen lainnya. Setiap bagian memiliki fungsi masing – masing.

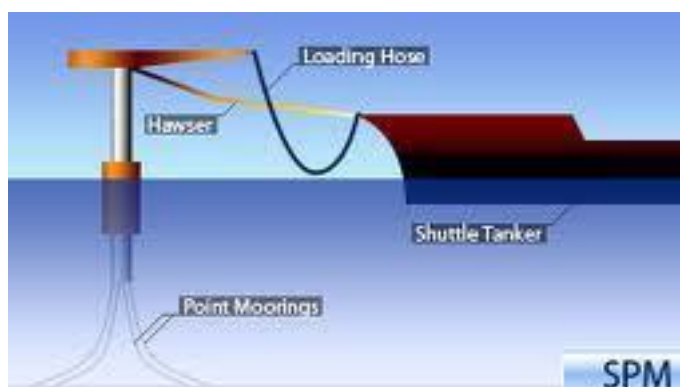
a. Tubuh Pelampung (*buoy*)

Tubuh pelampung didukung oleh kaki statis yang melekat ke dasar laut, dengan bagian yang dapat berputar di atas permukaan air dan terhubung ke kapal *tanker offloading*. Kedua bagian tersebut dihubungkan oleh bantalan rol, yang disebut sebagai “bantalan utama”. Atau bisa juga, tubuh pelampung ditahan oleh beberapa rantai jangkar yang menjalar.

b. *Mooring*

Mooring menambat pelampung (*buoy*) ke dasar laut. Desain pelampung harus disesuaikan dengan kondisi angin, gelombang, arus serta kondisi saat ini dan ukuran *tanker*. Hal ini menentukan susunan *mooring* optimal dan ukuran dari berbagai komponen kaki *mooring*. *Anchoring point* jug tergantung pada kondisi tanah lokal. Berikut ini adalah komponen *mooring*.

- Jangkar (Untuk terhubung *mooring* ke dasar laut)
- *Anchor Chain*
- *Chainstoppers* (untuk menghubungkan rantai ke pelampung)



Gambar 2.11 : Bagian *Mooring* (Sumber : Helmidadang Wordpress)

Sebuah kapal tanker ditambatkan ke sebuah pelampung dengan menggunakan tambang kapal. Susunan tambang kapal biasanya terdiri dari tali nilon yang diikat ke tambat yang ada di dek pelampung. Sistem tambang kapal menggunakan satu atau dua tali tambang tergantung pada ukuran kapal yang akan berlabuh ke pelampung.

c. Sistem transfer

Jantung dari setiap pelampung adalah sistem transfer. Dari lokasi *geostatic*, misalnya ujung pipa manifold (PLEM) yang terletak di dasar laut, sistem ini transfer produk ke *tanker offtake*.



Gambar 2.12 : Komponen Sistem Transfer (Sumber : Helmidadang Wordpress)

Berikut adalah komponen sistem transfer dasar :

1. *Risers* :

Riser adalah *Flexible hose* yang menghubungkan pipa bawah laut ke pelampung. Konfigurasi dari anak tangga ini dapat bervariasi tergantung pada kedalaman air, laut negara, gerakan pelampung, dll.

2. *Floating Hose String* (s) :

Menghubungkan pelampung ke *tanker offloading*. *String hose* dilengkapi dengan kopling yang memisahkan diri untuk mencegah pecahnya *hose* / tambang kapal dan tumpahan minyak.

3. *Swivel*

Swivel adalah hubungan antara *geostatic* atau dasar laut dengan bagian yang berputar dari pelampung. *Swivel*

mempunyai berbagai ukuran tergantung pada ukuran pipa yang terpasang dan *riser*. *Swivel* adalah jalur independen khusus untuk produk atau satu cairan yang akan di ambil dari dasar laut. *Swivel* dilengkapi dengan pengaturan segel ganda untuk meminimalkan kemungkinan kebocoran produk ke lingkungan.

d. **Komponen lainnya**

Komponen lainnya ini terdiri dari beberapa, diantaranya yaitu :

- Sebuah *landing* perahu yang menyediakan akses ke geladak pelampung dari kapal *tanker*.
- *Fendering* untuk melindungi pelampung,
- *Toolkit* untuk penanganan penanganan material yang rusak.
- Navigasi maritim
- Sebuah subsistem listrik untuk memungkinkan operasi katup dan navigasi atau peralatan lainnya.

2.2.5 Sistem Mooring

Single Point Mooring (SPM) memiliki salah satu bagian yang penting, yaitu sistem *mooring*. Sistem *mooring* memiliki beberapa bagian, diantaranya:

a. *Mooring Platform*

Mooring Platform terdiri dari beberapa bagian, diantaranya :

- *Mooring lugs*
- *End joining shackles*
- *Hard wood battens*
- *Mooring bridle*
- *Mooring hawser shackles*
- *Triangular plate*

b. *Mooring Hawser*

Mooring Hawser memiliki beberapa bagian, yaitu :

- *Mooring hawser*
- *Chain support buoy*

2.2.6 *Root Cause Analysis*

Root Cause Analysis (RCA) adalah suatu proses yang dirancang untuk melakukan investigasi dan mengelompokkan akar masalah dari setiap kejadian yang berhubungan keselamatan, kesehatan, lingkungan, mutu, keandalan, kecelakaan, kegagalan dan pengaruh produksi. RCA merupakan proses identifikasi faktor penyebab dengan menggunakan teknik yang dirancang berfokus pada identifikasi dan pemecahan masalah. RCA adalah *tools* yang dirancang untuk membantu mengidentifikasi tidak hanya apa dan bagaimana suatu kejadian terjadi, tetapi juga mengapa kejadian tersebut terjadi, serta digunakan dalam inisiatif *problem solving* dan menemukan akar – akar penyebab masalah.

Terdapat 5 tahap proses dalam RCA yang harus diikuti yaitu :

1. Definisikan masalah
 - Masalah apa yang sedang terjadi pada saat ini?
 - Jelaskan simptom yang spesifik, yang menandakan adanya masalah tersebut!
2. Kumpulkan Data
 - Apakah anda memiliki bukti yang menyatakan bahwa masalah memang benar ada?
 - Sudah berapa lama masalah tersebut ada?
 - *Impact* apa yang dirasakan dengan adanya masalah tersebut?
3. Identifikasi Penyebab yang mungkin
 - Jabarkan urutan kejadian yang mengarah kepada masalah!
 - Pada kondisi seperti apa masalah tersebut terjadi?
 - Adakah masalah-masalah lain yang muncul seiring/mengikuti kemunculan masalah utama?
4. Identifikasi Akar Masalah
 - Mengapa faktor kausal tersebut ada?

- Alasan apa yang benar-benar menjadi dasar kemunculan masalah?
5. Membuat rekomendasi dan implementasinya
- Apa yang bisa dilakukan untuk mencegah masalah muncul kembali
 - Bagaimana solusi yang telah dirumuskan dapat dijalankan
 - Siapa yang akan bertanggungjawab dalam implementasi solusi
 - Adakah resiko yang harus ditanggung ketika solusi diimplementasikan

Beberapa teknik yang bisa digunakan sebagai memecahkan masalah dalam RCA yaitu :

a) Why - Why Analysis

Why Why Analysis adalah suatu metode yang digunakan dalam *root cause analysis* dalam rangka untuk *problem solving* yaitu dengan mencari akar suatu masalah atau penyebab supaya sampai ke akar penyebab masalah.

Istilah lain dari *why why analysis* adalah *5 whys analysis*. Metode ini dikembangkan oleh pendiri *Toyota Motor Corporation* yaitu Sakichi Toyoda yang menginginkan setiap individu dalam organisasinya memiliki skill *problem solving* dan mampu menjadi *problem solver* di area masing-masing.

Metode yang digunakan dengan menggunakan iterasi yaitu pertanyaan “Mengapa” yang diulang beberapa kali sampai menemukan akar masalahnya. Konsep dalam bentuk teknik *why why analysis* ini sangat sederhana, yaitu terdiri dari 5 tahapan berikut ini:

1. Mengidentifikasi masalah
2. Mengajukan pertanyaan
3. Setiap penyebab diidentifikasi dengan mengajukan pertanyaan kembali

4. Mengulang kembali dua sampai tiga kali tahap dengan mengajukan pertanyaan “mengapa” sampai 5 kali
5. Menemukan solusi dan mencegah akar penyebab secara menetap

Kelebihan dari metode *why why nalysis* yaitu sederhana (mudah digunakan dan tidak diperlukan alat tambahan), efektif (cepat menemukan akar permasalahan dan upaya pencegahan), komprehensif (membantu menentukan hubungan antara berbagai penyebab masalah), menarik (sangat alami), dan murah (tidak ada tambahan biaya). Sedangkan kelemahan dari metode ini adalah penyebab masalah hanya berdasarkan opini satu orang, sehingga hanya satu akar permasalahan yang dapat diidentifikasi dari setiap pertanyaan dan hanya orang yang berpengalaman yang dapat melakukannya

b) *Fault Tree Analysis*

FTA adalah metode deduktif yang difokuskan pada suatu kejadian yang tidak dikehendaki dan selanjutnya dicari penyebab – penyebab dari kejadian tersebut. FTA menggunakan suatu diagram yang diawali dengan kejadian yang dikehendaki sebagai *top event* dan selanjutnya ditelusuri kombinasi kejadian yang menyebabkan terjadinya *top event*.

FTA dilakukan dengan pendekatan yang bersifat *top down* yang diawali dengan asumsi kegagalan atau kerugian dari *top event* kemudian merinci sebab – sebab suatu *top event* sampai kepada suatu kegagalan.

c) *Fishbone Diagram*

Metode ini adalah yang digunakan pada tugas akhir ini. Metode ini adalah metode yang paling tua dan paling banyak diketahui dalam menganalisis akar permasalahan. Metode ini

digunakan dengan mengklasifikasikan kemungkinan penyebab.

Dalam metode ini setiap orang dapat terlibat dan memberi saran tambahan ataupun opini yang memungkinkan menjadi penyebab masalah. Oleh karena itu, teknik ini sangat baik dalam mendapatkan pendapat – pendapat setiap individu dan inilah yang menjadi kelebihan metode ini. Sedangkan kelemahan metode ini adalah pada keterbatasan setiap orang dalam menjelaskan atau mengurangi tingkat pertanyaan mengapa. Bahkan, yang paling buruk jika opini – opini tersebut diambil suara terbanyak dalam menentukan akar masalah.

d) *Kepner-Tregoe Analysis*

Komponen utama metode ini meliputi analisis masalah, potensi masalah, situasi dan keputusan. Analisis masalah berisi analisis akar penyebab, sedangkan analisis keputusan berfokus pada bagaimana mengevaluasi kemungkinan penyebab lain berdasarkan fakta sebagai opsi akar penyebab. Metode ini sangat baik dalam hal menginvestigasi permasalahan dan bahkan menemukan akar permasalahan yang lebih spesifik serta memberi alternatif tindakan perbaikan yang terbaik.

e) *Change Analysis*

Dalam menganalisis masalah, metode ini selalu menggunakan perbandingan apa yang seharusnya terjadi dengan apa yang telah terjadi, tetapi tidak berusaha mendapatkan akar penyebab, tindakan perbaikan dan pencegahan masalah.

f) *Tap Root*

Tap Root adalah suatu sistem, perangkat lunak untuk memecahkan masalah dengan menemukan akar penyebab masalah secara pasti dan ketika akar penyebab masalah

tersebut dikoreksi, maka diharapkan tidak terjadi lagi kejadian serupa.

2.2.7 *Fishbone Diagram*

Fishbone Diagram merupakan alat sistematis yang menganalisis persoalan dan faktor – faktor yang menimbulkan persoalan tersebut. *Fishbone Diagram* menampilkan keadaan dengan melihat efek dan sebab – sebab yang berkontribusi pada efek tersebut. Melihat dari definisi tersebut, maka *Fishbone Diagram* kemudian disebut dengan *cause – effect diagram*. Thomas Pyzdek dalam bukunya “The Six Sigma Handbook” (2002) mengemukakan bahwa *cause – effect diagram* adalah alat yang digunakan untuk mengatur dan menunjukkan secara grafik semua pengetahuan yang dimiliki sebuah kelompok sehubungan masalah tertentu.

Cause – effect diagram berkaitan dengan pengendalian proses statistikal, di mana dapat mengidentifikasi penyebab suatu proses *out of control*. Artinya, metode ini dipergunakan untuk menunjukkan faktor – faktor penyebab (sebab) dan karakteristik kualitas (akibat) yang disebabkan oleh faktor – faktor penyebab itu. Diagram sebab akibat ini sering juga disebut sebagai Diagram Tulang Ikan (*Fishbone Diagram*) karena memang berbentuk mirip dengan tulang ikan dan kepalanya menghadap ke kanan atau diagram Ishikawa yang pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Kaoru Ishikawa dari Universitas Tokyo pada Tahun 1953.

Diagram ini digunakan untuk mengategorikan banyaknya potensi penyebab masalah atau isu-isu untuk mengidentifikasi akar penyebab. Penyebab digolongkan ke dalam beberapa faktor yang diyakini sebagai sumber penyebab utama dari masalah. Penyebab utama ini biasanya sebanyak 5 faktor utama. Penyebab turunannya kemudian disusun berdasarkan hirarki kepentingannya atau menurut detilnya, sehingga mampu mengungkap dan menggambarkan hubungan sebab akibat yang terjadi antar golongan penyebab itu. Dengan demikian, diagram ini akan sangat bermanfaat untuk menelusuri akar permasalahan, mengidentifikasi

daerah dimana dapat timbul masalah serius serta berguna untuk dipakai dalam membandingkan kepentingan relatif berbagai penyebab masalah tersebut.

Manfaat *Fishbone Diagram* ini dapat digunakan untuk menemukan akar penyebab masalah secara *user friendly*, *tools* yang *user friendly* disukai orang-orang di industri manufaktur di mana proses di sana terkenal memiliki banyak ragam variabel yang berpotensi menyebabkan munculnya permasalahan (Purba, 2008, para. 1–6).

Fungsi dari *Fishbone Diagram* adalah untuk mengidentifikasi dan mengorganisasi penyebab-penyebab yang mungkin timbul dari suatu efek spesifik dan kemudian memisahkan akar penyebabnya. Sering dijumpai orang mengatakan “penyebab yang mungkin” dan dalam kebanyakan kasus harus menguji apakah penyebab untuk hipotesa adalah nyata, dan apakah memperbesar atau menguranginya akan memberikan hasil yang diinginkan.

2.2.7.1 Manfaat *Fishbone Diagram*

Dengan adanya *Fishbone Diagram* ini sebenarnya memberi banyak manfaat khususnya bagi dunia bisnis. Selain memecahkan masalah kualitas yang menjadi perhatian penting perusahaan. Masalah–masalah klasik lainnya juga terselesaikan. Masalah–masalah klasik yang ada di industri manufaktur khususnya antara lain adalah:

- a) keterlambatan proses produksi
- b) tingkat *defect* (cacat) produk yang tinggi
- c) mesin produksi yang sering mengalami *trouble*
- d) *output* lini produksi yang tidak stabil yang berakibat kacaunya *plan* produksi
- e) produktivitas yang tidak mencapai target
- f) *complain* pelanggan yang terus berulang

Diagram *fishbone* pertama digunakan sebagai alat manajemen kualitas dengan 5 (lima) kategori yakni : *Manpower, Machine, Method,*

Material, dan *Enviromental*. Adapun kebutuhan-kebutuhan yang mendasari penggunaan diagram *fishbone* ini adalah sebagai berikut:

- Membantu mengidentifikasi akar penyebab masalah.
- Membantu untuk mendapatkan ide-ide (*gathering ideas*) untuk solusi.
- Membantu untuk pencarian fakta lebih lanjut tentang masalah.
- Alat untuk mengumpulkan ide atau input-input kelompok, merupakan metode dasar dari “*brainstorming* terstruktur”.
- Dengan mengeelompokkan penyebab-penyebab yang mungkin, maka dapat memikirkan banyak kemungkinan daripada hanya menfokuskan pada beberapa area tipikal.
- Membantu mengidentifikasi beberapa penyebab yang menjadi “tersangka utama”. (Pande, 2002).
- Mengidentifikasi tindakan (bagaimana) untuk menciptakan hasil yang diinginkan

Penerapan *Fishbone Diagram* ini digunakan untuk menemukan akar “penyebab” terjadinya masalah khususnya di industri manufaktur dimana prosesnya terkenal dengan banyaknya ragam variabel yang berpotensi menyebabkan munculnya permasalahan. Apabila “masalah” dan “penyebab” sudah diketahui secara pasti, maka tindakan dan langkah perbaikan akan lebih mudah dilakukan. Dengan diagram ini, semuanya menjadi lebih jelas dan memungkinkan kita untuk dapat melihat semua kemungkinan “penyebab” dan mencari “akar” permasalahan sebenarnya.

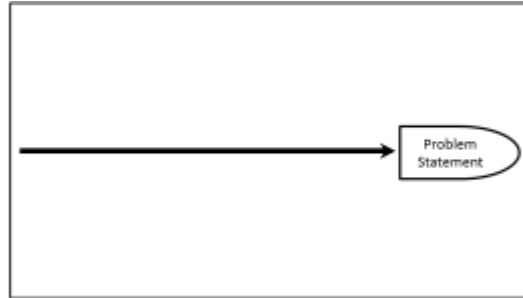
2.2.7.2 Langkah Membuat *Fishbone Diagram*

Berikut adalah langkah – langkah dalam pembuatan *fishbone diagram* :

1. Menentukan Pernyataan Masalah

- Menentukan sebuah pernyataan masalah (*problem statement*). Pernyataan masalah ini diinterpretasikan sebagai “*effect*”, atau secara visual dalam *fishbone* seperti “kepala ikan”.

- Gambarkan diagram dengan pernyataan masalah ditempatkan pada sisi kanan (membentuk kepala ikan) dan buat panah horizontal panjang menuju ke arah kepala ikan



Gambar 2.13 : Menentukan Pernyataan Masalah, *Fishbone Diagram* (sumber : eriskusnadi.wordpress.com)

2. Mengidentifikasi Faktor - faktor Penyebab Utama

- Dari garis horisontal utama, buat garis diagonal yang menjadi “cabang”. Setiap cabang mewakili “sebab utama” dari masalah yang ditulis. Sebab ini diinterpretasikan sebagai “cause”, atau secara visual dalam *fishbone* seperti “tulang ikan”.
- Faktor penyebab utama mengorganisasikan sebab sedemikian rupa sehingga masuk akal dengan situasi. Kategori-kategori ini dirumuskan dalam prinsip 4M+1E atau dikategorikan dalam 5 kategori, yakni *Manpower*, *Machine*, *Method*, *Material*, dan *Environmental*.

- **Manpower (Tenaga Kerja).**

Segala hal permasalahan yang terkait dengan aspek sumber daya manusia atau tenaga kerja, seperti: lemahnya pengetahuan, kurang ketrampilan, pengalaman, kelelahan, kekuatan fisik, lambatnya kecepatan kerja, banyak tekanan kerja, stress, ketidakpedulian dll.

- **Machine (Mesin, Peralatan, Infrastruktur).**

Segala masalah yang terkait dengan aspek peralatan, mesin maupun *physical tools* lainnya. Misalnya : perawatan mesin-mesin, fasilitas pendukung mesin,

ketidaklengkapan mesin/peralatan, pengkalibrasian mesin/*tools* yang tidak standar, daya tahan mesin yang lemah, kesulitan dalam penggunaan mesin, mesin tidak *useroperability*, dst.

- **Methods (Metode dan Prosedur Kerja).**

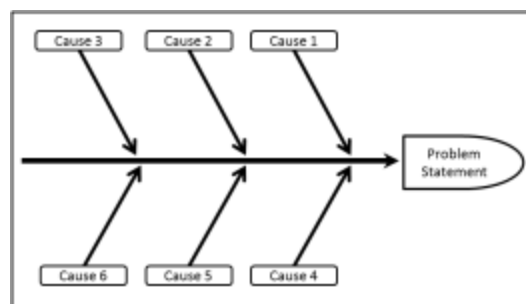
Segala hal masalah terkait dengan metode dan prosedur kerja. Misalnya prosedur kerja tidak ada, prosedur kerja tidak jelas, metode sulit dipahami, metode tidak standar, metode tidak cocok, metode yang bertentangan dengan metode lainnya dll.

- **Materials (Material Bahan Baku Utama, Bahan Baku Penolong).**

Berkaitan dengan ketersediaan bahan baku utama atau bahan baku penolong yang terkait dengan akar masalah, dengan melihat aspek: kualitas bahan baku tidak sesuai standar, bahan baku tidak lengkap, kuantitas bahan baku tidak seragam, ukuran dan spesifikasi tidak standar dst.

- **Environment (Lingkungan)**

- Kategori di atas hanya sebagai saran, bisa menggunakan kategori lain sesuai yang kebutuhan.

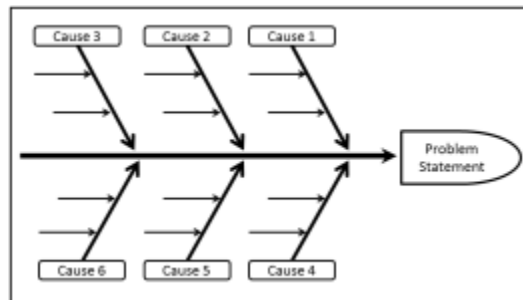


Gambar 2.14 : Mengidentifikasi Kategori-Kategori, *Fishbone Diagram* (sumber : eriskusnadi.wordpress.com)

3. Menemukan sebab – sebab potensial

- Setiap kategori mempunyai sebab-sebab yang perlu diuraikan

- Saat sebab-sebab dikemukakan, tentukan bersama-sama di mana sebab tersebut harus ditempatkan dalam *fishbone diagram*, yaitu tentukan di bawah kategori yang mana gagasan tersebut harus ditempatkan, misal: “Mengapa bahaya potensial? Penyebab: Karyawan tidak mengikuti prosedur!” Karena penyebabnya karyawan (manusia), maka diletakkan di bawah “Man”.
- Sebab-sebab ditulis dengan garis horisontal sehingga banyak “tulang” kecil keluar dari garis diagonal.
- Pertanyakan kembali “Mengapa sebab itu muncul?” sehingga “tulang” lebih kecil (sub-sebab) keluar dari garis horisontal tadi, misal: “Mengapa karyawan disebut tidak mengikuti prosedur? Jawab: karena tidak memakai APD”
- Satu sebab bisa ditulis di beberapa tempat jika sebab tersebut berhubungan dengan beberapa kategori.



Gambar 2.15 : Menemukan sebab-sebab potensial, *Fishbone Diagram* (sumber : eriskusnadi.wordpress.com)

4. Mengkaji dan menyepakati sebab – sebab yang paling mungkin
 - Setelah setiap kategori diisi carilah sebab yang paling mungkin di antara semua sebab-sebab dan sub-subnya.
 - Jika ada sebab-sebab yang muncul pada lebih dari satu kategori, kemungkinan merupakan petunjuk sebab yang paling mungkin.

- Kaji kembali sebab-sebab yang telah didaftarkan (sebab yang tampaknya paling memungkinkan) dan tanyakan , “Mengapa ini sebabnya?”
- Pertanyaan “Mengapa?” akan membantu kita sampai pada sebab pokok dari permasalahan teridentifikasi.
- Tanyakan “Mengapa ?” sampai saat pertanyaan itu tidak bisa dijawab lagi. Kalau sudah sampai ke situ sebab pokok telah teridentifikasi.
- Lingkarilah sebab yang tampaknya paling mungkin pada *Fishbone Diagram*

2.2.8 Konsep Pembebanan

Dalam menentukan kemampuan struktur lepas pantai, struktur akan dipengaruhi beban yang terjadi pada bangunan tersebut. Menurut Soedjono, J.J. (1999) terdapat 4 beban yang harus dipertimbangkan dalam perancangan bangunan lepas pantai.

a. Beban mati (*Dead Load*)

Beban mati adalah semua beban yang berasal dari berat struktur, termasuk segala unsur tambahan tetap yang merupakan kesatuan dengan struktur tersebut Misalkan: berat struktur, berat peralatan, dan berat permesinan yang digunakan ketika struktur tidak beroperasi.

b. Beban hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah adalah beban yang terjadi selama struktur melakukan fungsinya dan tidak berubah dari mode operasi satu ke mode operasi lainnya atau semua beban tidak tetap, kecuali beban angin, beban gempa dan pengaruh khusus lainnya. Meskipun dapat berpindah-pindah, beban hidup masih dapat diperhitungkan berdasarkan perhitungan sistematis. Contoh beban hidup adalah beban pengoperasian mesin dan peralatan yang digunakan selama operasi struktur, termasuk didalamnya operasi *crane*.

c. Beban Kecelakaan (*Accidental Load*)

Beban kecelakaan merupakan beban yang tidak terduga sebelumnya pada bangunan lepas pantai. Beban kecelakaan biasanya terjadi karena putusannya tali tambat (rantai jangkar), putusannya tali control, tabrakan dengan kapal dan lain-lain

d. Beban Lingkungan (*Environmental Load*)

Beban lingkungan adalah beban yang terjadi karena adanya pengaruh lingkungan dimana struktur dioperasikan.

2.2.9 Tension pada Mooring Buoy

Analisa *tension* pada pengerjaan tugas akhir ini menggunakan *software* Orcaflex untuk mendapatkan maksimum *tension* pada *mooring lines* akibat pembebanan angin, gelombang, dan arus. Arah pembebanan yang dilakukan yaitu pada 180⁰ untuk kondisi *full load* dan *ballast*. Seluruh simulasi dilakukan selama 10800 s. Kriteria yang digunakan dalam analisa *tension* merupakan kriteria dalam code API RP 2SK. Pada API RP 2 SK dijelaskan bahwa *safety factor* yang harus dihasilkan harus lebih dari 1.67. Sehingga, tegangan maksimum yang diijinkan berdasarkan API RP 2SK adalah minimum breaking load (MBL) dibagi dengan *safety factor*.

2.2.10 Energi Tubrukan (*Impact Energy*)

Dalam HSE *Offshore Technology Report*, 2001 direkomendasikan bahwa gaya *impact* dirumuskan sebagai berikut :

$$F = P_o \dots\dots\dots (2.1)$$

$$F = \sqrt{c \cdot a \cdot m} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

F = gaya *impact* (MN)

P_o = minimum *crushing strength* bagian yang terkena tumbukan dari *vessel*

c = kekakuan akibat tumbukan pada *vessel*(MN/m)

a = koefisien massa tambah

(sideway impact =1,4 ; stern/ bow impact = 1,1)

$m = displacement\ vessel\ (Kg)$

$V = kecepatan\ merapat\ relatif\ (m/s)$

Total energi kinetik yang terjadi akibat tubruka kapal dengan menggunakan persamaan :

$$E = \frac{1}{2} a m V^2 \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

$E = energi\ kinetik\ (N)$

$m = massa\ benda/kapal\ (Kg)$

$a = koefisien\ massa\ tambah\ benda/kapal$

(1,4 untuk tubrukan samping ; 1,1 untuk tubrukan depan atau belakang)

$V = kecepatan\ kapal$

Untuk kecepatan kapal ditentukan oleh tabel dibawah ini :

Tabel 2.1 Kecepatan Kapal Pada Saat Akan Sandar

Ukuran kapal (DWT)	Kecepatan kapal	
	Dermaga (m/s)	Laut Terbuka (m/s)
0 – 500	0,25	0,30
500 – 100	0,15	0,20
10.000 – 30.000	0,15	0,15
Lebih dari 30.000	0,12	0,15

(sumber : bambang triatmodjo, 2009)

2.2.11 Tegangan Pada Mur Baut

Tegangan pada mur baut disebabkan karena tegangan internal (*internal stress*) dan tegangan karena beban eksternal.

1) Tegangan Internal

Tegangan yang dikarenakan penambahan gaya pada saat pengencangan mur baut. Tegangan internal meliputi tegangan tarik pada pengencangan mur baut

$$P_i = 284.d \dots\dots\dots (2.4)$$

(digunakan untuk sambungan pada penggunaan zat cair)

$$P_i = 142.d \dots\dots\dots (2.5)$$

(digunakan untuk sambungan pada penggunaan not zat cair)

Keterangan

- P_i = tahanan awal baut (kg)
- d = diameter nominal (mm)

Sehingga tegangan tariknya :

$$f_t = \frac{P_i}{A} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$A = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_p}{2} + \frac{d_c}{2} \right)^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan

- A = luas bidang tarik
- d_p = diameter pitch (mm)
- d_c = diameter minor

2) Tegangan eksternal

Pengaruh dari beban eksternal akan menyebabkan timbulnya

- Tegangan tarik
- Tegangan geser
- Kombinasi keduanya

a) Tegangan Tarik

$$P = \frac{\pi}{4} d_c^2 \cdot f^t \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan:

- P = beban maksimum
- d_c = diameter minor

b) Tegangan Geser

$$P = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot f_s \dots\dots\dots (2.9)$$

c) Tegangan Kombinasi

$$f_{s(\max)} = \sqrt{f_s^2 + \left(\frac{f_t}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$f_{t(\max)} = \frac{f_t}{2} + \sqrt{f_s^2 + \left(\frac{f_t}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (2.11)$$

2.2.12 Tegangan Normal

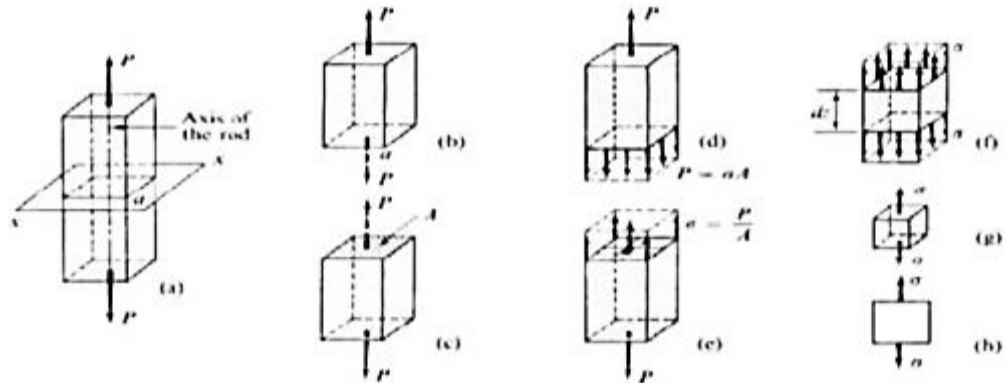
Tegangan normal merupakan tegangan yang bekerja tegak lurus terhadap penampang suatu bidang dan ditimbulkan oleh gaya aksial dan momen lentur yang bekerja pada bidang tersebut. Persamaan tegangan normal adalah sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan :

F = Gaya yang bekerja terhadap suatu bidang (N)

A = Luas penampang suatu bidang (m²)



Gambar 2.16 Tegangan Normal pada Bidang
(slideplayer.info/slide/2852179/)

Pada suatu bidang yang menahan gaya aksial, tegangan yang bekerja pada bidang tersebut hanyalah tegangan normal saja sementara tegangan geser tidak akan terjadi.

2.2.13 Tegangan Geser (*shear force*)

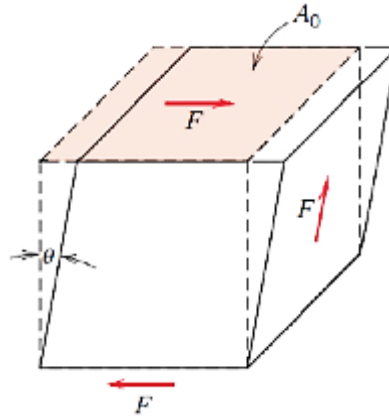
Gambar 2.11 merupakan penjabaran gaya yang bekerja pada tegangan geser. Persamaan tegangan geser adalah sebagai berikut :

$$\tau = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan :

F = Gaya yang bekerja terhadap suatu bidang (N)

A = Luas penampang suatu bidang (m²)



Gambar 2.17 Tegangan geser pada suatu bidang
(metallurgist.wordpress.com)

2.2.14 Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

Tegangan lentur (*bending*) yang padat dilihat pada Gambar 2.18, merupakan momen bidang luar yang diimbangi oleh momen dalam yang menghasilkan resultan gaya. Berikut merupakan persamaan dari tegangan lentur (*bending stress*) :

$$M = \int_A f \cdot dA \cdot y = \int_A \left(-\frac{y}{c} f_{max} \right) dA \cdot y = -\frac{f_{max}}{c} \int_A y^2 dA \dots\dots (2.14)$$

Dimana,

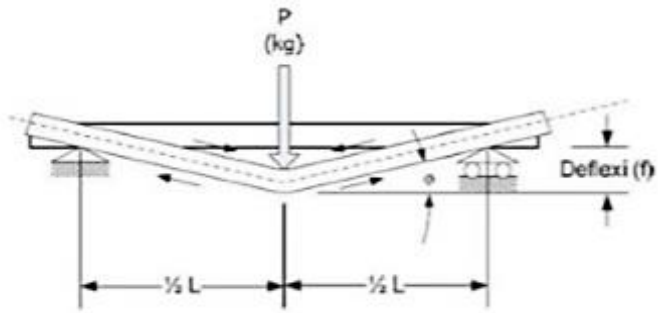
$$\int_A y^2 dA = I \dots\dots\dots (2.15)$$

Merupakan besaran penampang yang disebut momen inersia terhadap titik berat penampang. Jadi persamaannya menjadi :

$$M = -\frac{f_{max}}{c} I \text{ atau } f_{max} = -\frac{M c}{I} \dots\dots\dots (2.16)$$

Berikut persamaan tegangan lentur (*bending*) pada sembarang titik yang berjarak y dari garis netral :

$$f = -\frac{M y}{I} \dots\dots\dots(2.17)$$



Gambar 2.18 Tegangan Lentur (*Bending*) pada Suatu Bidang
(sanggapramana.wordpress.com)

2.2.15 Tegangan Von Mises

Tegangan yang terjadi dalam sebuah struktur tidak boleh melebihi tegangan yang diijinkan, termasuk pelat kapal dan pelat bilah agar tidak kehilangan stabilitasnya (tidak mengalami buckling). Sebuah struktur kapal juga harus memiliki daya untuk menahan beban – beban operasional tambahan yang terjadi dengan aman, yaitu tegangan yang terjadi dalam struktur. Persamaan berikut ini dapat dipakai untuk menghitung tegangan tersebut :

$$\sigma(x, y) = \frac{M_x Y}{I} \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan :

M_x = momen bending (ton.m)

Y = jarak normal bidang (m)

I = momen inersia bidang (m^2)

Jarak Y harus ditentukan karena merupakan jarak titik berat bagian yang dihitung tegangannya terhadap sumbu netral (garis mendatar yang melalui titik berat penampang), dan menghitung momen inersia penampang $I(x)$. Pada tiap-tiap sumbu dalam bidang tiga dimensi dapat diketahui tegangan utama ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) yang dihitung dari komponen tegangan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (2.19)$$

Keterangan :

σ_o = Tegangan utama yang bekerja pada sumbu (Pa)

σ_x = Tegangan arah sumbu x (Pa)

σ_y = Tegangan arah sumbu y (Pa)

σ_z = Tegangan arah sumbu z (Pa)

σ_{xy} = Tegangan arah sumbu xy (Pa)

σ_{xz} = Tegangan arah sumbu xz (Pa)

σ_{yz} = Tegangan arah sumbu yz (Pa)

Gabungan tegangan-tegangan utama pada suatu element merupakan suatu cara untuk mengetahui nilai tegangan maksimum yang terjadi pada *node* tersebut. Salah satu cara mendapatkan tegangan gabungan adalah dengan menggunakan formula tegangan Von Mises:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \dots\dots\dots (2.20)$$

Keterangan :

σ_{eq} = Tegangan ekuivalen (von mises stress) (Pa)

σ_x = Tegangan normal sumbu x (Pa)

σ_y = Tegangan normal sumbu y (Pa)

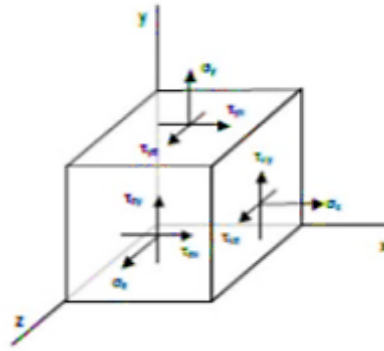
σ_z = Tegangan normal sumbu z (Pa)

τ_{xy} = Tegangan geser bidang xy (Pa)

τ_{yz} = Tegangan geser bidang yz (Pa)

τ_{zx} = Tegangan geser bidang zx (Pa)

Gambar 2.19 merupakan penjabaran gaya yang bekerja pada tegangan *vonmises*. Penjabaran gaya tersebut dijelaskan menurut sumbu x, sumbu, y dan sumbu z pada suatu bidang 3 dimensi.



Gambar 2.19 Tegangan *Von Mises* pada Suatu Bidang Tiga Dimensi
(Yani, 2015)

2.2.16 Finite Element Method

Metode Elemen Hingga adalah metode numeris untuk penyelesaian masalah teknik dan fisika matematis (Logan, 2007). Dasar dari metode elemen hingga adalah membagi benda kerja menjadi elemen-elemen kecil yang jumlahnya berhingga sehingga dapat menghitung reaksi akibat beban (*load*) pada kondisi batas (*boundary condition*) yang diberikan. Dari elemen – elemen tersebut dapat disusun persamaan-persamaan matrik yang dapat diselesaikan secara numerik dan hasilnya menjadi jawaban dari kondisi beban yang diberikan pada benda kerja tersebut. Dari penyelesaian matematis dengan menghitung inverse matrik akan diperoleh persamaan dalam bentuk matrik untuk satu elemen dan bentuk matrik tal yang merupakan penggabungan (*assemblage*) matrik elemen.

Terdapat dua pendekatan dalam metode elemen hingga, yang pertama adalah pendekatan metode gaya atau fleksibilitas yang menggunakan kekuatan internal sebagai masalah yang tidak diketahui. Pendekatan kedua metode *displacement* atau *stiffness* yang mengasumsikan perpindahan dari *node* sebagai masalah yang tidak diketahui. Kedua pendekatan tersebut menghasilkan berbagai hal yang tidak diketahui dalam analisis dan matriks yang berbeda.

Metode elemen hingga melibatkan pemodelan struktur dengan menggunakan *small interconnected elements* yang disebut *finite element*. Setiap *interconnected elements* dihubungkan, secara langsung maupun tidak langsung, ke setiap elemen lainnya melalui antarmuka/*interfaces*

umum, diantaranya *nodes*, *boundary lines*, dan *surfaces*. Dengan menggunakan sifat tegangan/regangan yang diketahui dari material yang digunakan pada struktur, maka dapat diketahui perilaku dari *node* tertentu dalam suatu elemen. Hal yang harus diperhatikan dalam metode elemen hingga (Logan, 2007), antara lain:

a) Model geometri dan kondisi batas

Untuk menghasilkan hasil yang akurat pada metode elemen hingga, dibutuhkan material, geometri, dan beban yang terdistribusi sesuai dengan keadaan sebenarnya. Diharapkan metode ini mampu menghasilkan nilai yang sama dengan keadaan yang terjadi di lapangan.

b) Material

Dalam software metode elemen hingga yang akan digunakan dalam analisa sangat penting untuk memasukkan jenis material yang digunakan, tetapi hal ini disesuaikan dengan jenis material yang terdapat dalam software itu sendiri. Dalam melakukan analisa biasanya untuk mendeskripsikan suatu karakteristik dari suatu material cukup dengan memasukkan nilai modulus elastisitas dan juga rasio poisson. Hal tersebut sangat penting karena dalam software metode elemen hingga yang digunakan jika tidak dilakukan maka hasil yang keluar tidak sesuai dengan harapan.

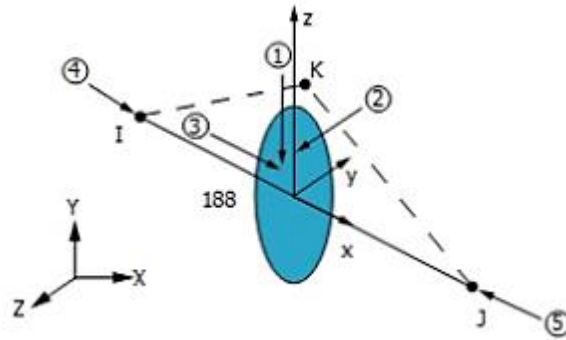
c) Elemen

Pemilihan jenis elemen berkaitan dengan idealisasi yang ingin dilakukan terhadap struktur yang dimodelkan. Jenis elemen yang dapat 20 digunakan dalam analisis tegangan dengan bantuan software ANSYS 16.0, diantaranya:

- 1 – dimensi : beam

Elemen 1-dimensi yaitu *beam* dan *bar* ditujukan untuk elemen yang mampu menahan beban aksial, momen lentur, dan torsi. Perbedaan yang menonjol pada elemen *bar* dan *beam* adalah pada elemen *beam* properties dari dimensi batang tidak harus seragam, misalnya dapat berupa

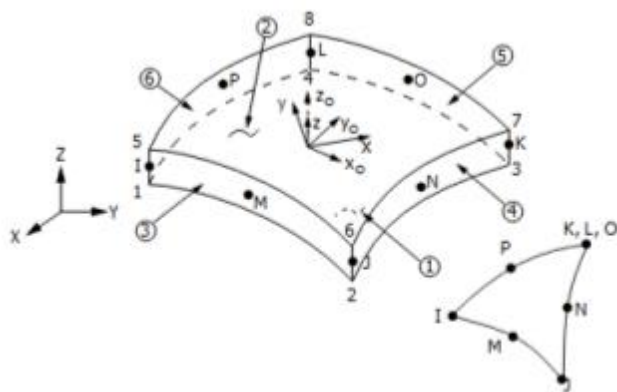
kerucut atau taper. Elemen *beam* digunakan untuk mewakili struktur yang relative panjang dan tipis. Pada elemen ini diasumsikan tekanan langsung pada arah non-aksial menjadi nol, dan mengabaikan deformasi pada arah non-aksial. Bentuk elemen *beam* ditunjukkan pada Gambar



Gambar 2.20 : Elemen Beam

- 2 – dimensi : shell

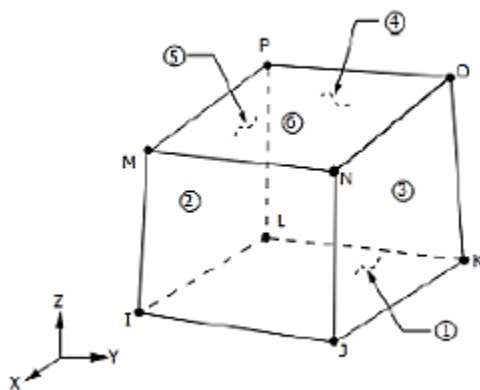
Elemen *shell* digunakan untuk memodelkan struktur tipis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Elemen 2-dimensi atau *shell*, memiliki dua geometri standar, yaitu segi-empat dan segitiga. Dalam elemen *shell*, tipe elemen segi-empat dengan jumlah titik integrasi yang cukup dalam elemen dan ketebalannya, dianggap efisien saat mensimulasikan tabrakan. Unsur-unsur *shell* memisahkan deformasi pada permukaan dan deformasi ke arah normal, sehingga memungkinkan simulasi struktur tipis yang sederhana dan efisien. Tidak ada aturan tegas yang menunjukkan kapan elemen *shell* sebaiknya digunakan. Unsur-unsur *shell* biasanya dibuat dengan memasang permukaan yang mewakili posisi dan bentuk struktur, dan menghubungkannya dengan ketebalan dan sifat *shell*. Unsur-unsur *shell* menahan beban eksternal dengan *membrane*, *bending*, dan *transverse shear stiffness*.



Gambar 2.21 : Elemen Shell

- 3 – dimensi : solid

Elemen *solid* ditujukan pada pemodelan struktur ber dinding tebal. Seiring meningkatnya ketebalan *laminat*, tekanan di luar bidang menjadi lebih signifikan, sehingga elemen *solid* lebih baik dalam memperkirakan efek ini. Terdapat tiga standar geometri dalam elemen *solid*, yaitu *tetrahedron*, *wedge*, dan *brick*. Ketiga geometri tersebut memiliki 4, 6, dan 8 sudut dengan tiga permukaan yang bertemu disetiap sudutnya. Kelemahan dari tipe elemen ini adalah material biasanya menjadi terlalu kaku saat membengkok pada elemen tipis. Gambar salah satu jenis elemen *solid* yaitu elemen *solid* pada struktur homogeny ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.22 : Elemen Solid Struktur Homogen

Pilihan yang ada berkait dengan jenis elemen (1-dimensi, 2-dimensi, atau 3-dimensi) dan berlanjut dengan tingkat kesulitan dari jenis elemen yang ditunjukkan oleh jumlah titik (*nodes*) dalam elemen beserta jumlah derajat kebebasan (*degree of freedom* atau DOF) dari masing-masing titik (*nodes*).

d) Meshing

Meshing dibutuhkan untuk mengetahui ukuran yang optimum atau konsistensi – keakuratan hasil dari jumlah elemen yang digunakan. Penentuan jumlah elemen sesuai dengan ukuran elemen yang penentuan dan penyebarannya berkenaan dengan konsentrasi dari deformasi, regangan, serta tegangan yang akan terjadi pada struktur yang dimodelkan yang disebabkan oleh bentuk geometri dari struktur serta penyebaran beban dan syarat batasnya. *Meshing* yang dilakukan dalam pemodelan biasanya tergantung pada elemen yang dipilih dan juga tingkat kedetailan dari analisa. Perubahan ukuran *meshing* dilakukan dengan metode iterasi hingga hasilnya menjadi konvergen pada ukuran tertentu atau tidak adanya perubahan yang signifikan dari hasil sebelumnya.

e) beban

Serangkaian beban yang terjadi pada model yang akan dianalisa sangat berpengaruh pada hasil yang dikeluarkan oleh software, maka dalam memasukkan nilai beban harus sesuai dengan kondisi yang ada.

2.2.17 Boundary Condition

Boundary condition atau kondisi batas sangatlah penting dalam proses analisis suatu struktur. *Boundary condition* sendiri dapat terbagi menjadi 3 bagian utama, yaitu *inertial*, *loads*, dan *supports*. *Boundary condition* tipe *inertial* diantaranya yaitu percepatan, *standard earth gravity*, dan kecepatan rotasi. Kemudian *Boundary condition* tipe *loads* diantaranya

yaitu tekanan (*pressure*), gaya, momen, dan lain-lain. Sedangkan *boundary condition* tipe *support* diantaranya adalah *fixed supports*, *displacement*, dan lain-lain. *Boundary condition* sendiri dapat kita aplikasikan sesuai dengan analisis yang akan kita lakukan. Seperti contohnya pada sebuah geometri struktur, *boundary condition* dapat diterapkan pada struktur sebagai *body*, *face*, *edge*, maupun titik sesuai dengan kondisi analisis yang ingin kita lakukan.

2.2.18 Analisa *Meshing* dan *Sensitivity*

Proses pembagian sebuah benda ke dalam beberapa bagian kecil untuk dianalisa disebut dengan *meshing*. *Meshing* adalah bagian dari analisis *Finite Element Method* (FEM) yang merupakan prosedur numeris yang biasanya dipakai untuk menyelesaikan masalah dalam bidang rekayasa teknik, seperti dalam halnya kasus ini dipakai untuk menganalisa tegangan atau *stress* pada suatu struktur yang rumit. Sedangkan analisis *sensitivity* digunakan untuk mengetahui apakah tegangan yang dihasilkan pada pemodelan sudah mendekati nilai kebenaran. Analisis *sensitivity* dilakukan dengan memvariasikan kerapatan *meshing* yang dibandingkan dengan nilai tegangan *equivalent* (*equivalent stress*) atau yang dapat disebut juga dengan *Von-Misses Stress* setelah benda tersebut menerima *force*.

Pembuatan *mesh* sangat memperhatikan pada ukuran dan jenis *mesh* yang digunakan, semakin kecil ukuran *mesh* yang digunakan pada model, maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti, tetapi membutuhkan daya komputasi dan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan *mesh* yang memiliki ukuran yang lebih besar. Oleh karena itu, besar ukuran *mesh* harus diatur sedemikian rupa sehingga diperoleh hasil yang teliti. *Meshing* dilakukan dalam beberapa variasi jumlah elemen hingga didapatkan nilai *sensitivity* yang konstan. Apabila nilai sudah konstan, maka dapat dikatakan bahwa nilai *Von-Misses Stress* yang dihasilkan adalah nilai *stress* yang sebenarnya dalam struktur tersebut. Setiap bentuk struktur yang berbeda akan memiliki kerapatan dan jumlah elemen yang berbeda pula.

Hasil dari *meshing sensitivity* disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mengetahui tingkat kekonstanan *stress* yang dihasilkan dengan jumlah *meshing* yang berbeda. Grafik merupakan visualisasi dari nilai yang tertera pada tabel dengan, sumbu x merupakan tipe *meshing* berdasarkan jumlah element yang berbeda, sedangkan sumbu y merupakan besarnya *stress* yang dihasilkan pada keseluruhan struktur yang dimodelkan dalam analisis sehingga dapat dilihat bentuk kekonstannya.

2.2.19 Properti Material yang Digunakan pada Struktur Buoy

Mooring buoy terdiri dari 4 body compartment yang menggunakan bahan *Low Density Polyethylene* (LDPE) dan struktur rangka buoy menggunakan material baja A36. Berikut adalah properti material dari bahan LDPE dan baja A36.

Tabel 2.2 *Typical Properties of LDPE* (Sumber : International Association of Plastic Distribution)

<i>Typical Properties Of Low Density Polyethylene (LDPE)</i>		
test	Property	LDPE
PHYSICAL		
D792	Density (lb/in ³) (g/cm ³)	0.033 0.92
D570	Water Absorption, 24 hrs (%)	<0.01
MECHANICAL		
D638	Tensile Strength (psi)	1.800-2.200
D638	Tensile Modulus (psi)	-
D638	Tensile Elongation at Yield (%)	600
D790	Flexural Strength (psi)	-
D790	Flexural Modulus (psi)	-
D695	Compressive Strength (psi)	-
D695	Compressive Modulus (psi)	-
D785	Hardness, Shore D	D41-D50
D256	IZOD Notched Impact (ft-lb/in)	No Break
THERMAL		
D696	Coefficient of Linear Thermal Expansion (x 10 ⁻⁴ in./in./°F)	3
D648	Heat Deflection Temp (°F / °C) at 66 psi	120 / 48
	at 264 psi	105 / 36
D3418	Approx. Melting Temperature (°F / °C)	230 / 110
-	Max Operating Temp (°F / °C)	160 / 71
C177	Thermal Conductivity (BTU-in/ft ² -hr-°F)	-
	(x 10 ⁻⁴ cal/cm-sec-°C)	-
UL94	Flammability Rating	n.r.

Tabel 2.3 *Typical Properties of Steel A36* (Sumber : MatWeb)

Physical Properties	Metric	English
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³
Mechanical Properties		
Tensile Strength, Ultimate	400 - 550 MPa	58000 - 79800 psi
Tensile Strength, Yield	250 MPa	36300 psi
Elongation at Break	20.0 %	20.0 %
	23.0 %	23.0 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi
Compressive Yield Strength	152 MPa	22000 psi
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi
Poissons Ratio	0.260	0.260
Shear Modulus	79.3 GPa	11500 ksi
Component Elements Properties		
Carbon, C	0.260 %	0.260 %
Copper, Cu	0.20 %	0.20 %
Iron, Fe	99.0 %	99.0 %
Manganese, Mn	0.75 %	0.75 %
Phosphorous, P	<= 0.040 %	<= 0.040 %
Sulfur, S	<= 0.050 %	<= 0.050 %



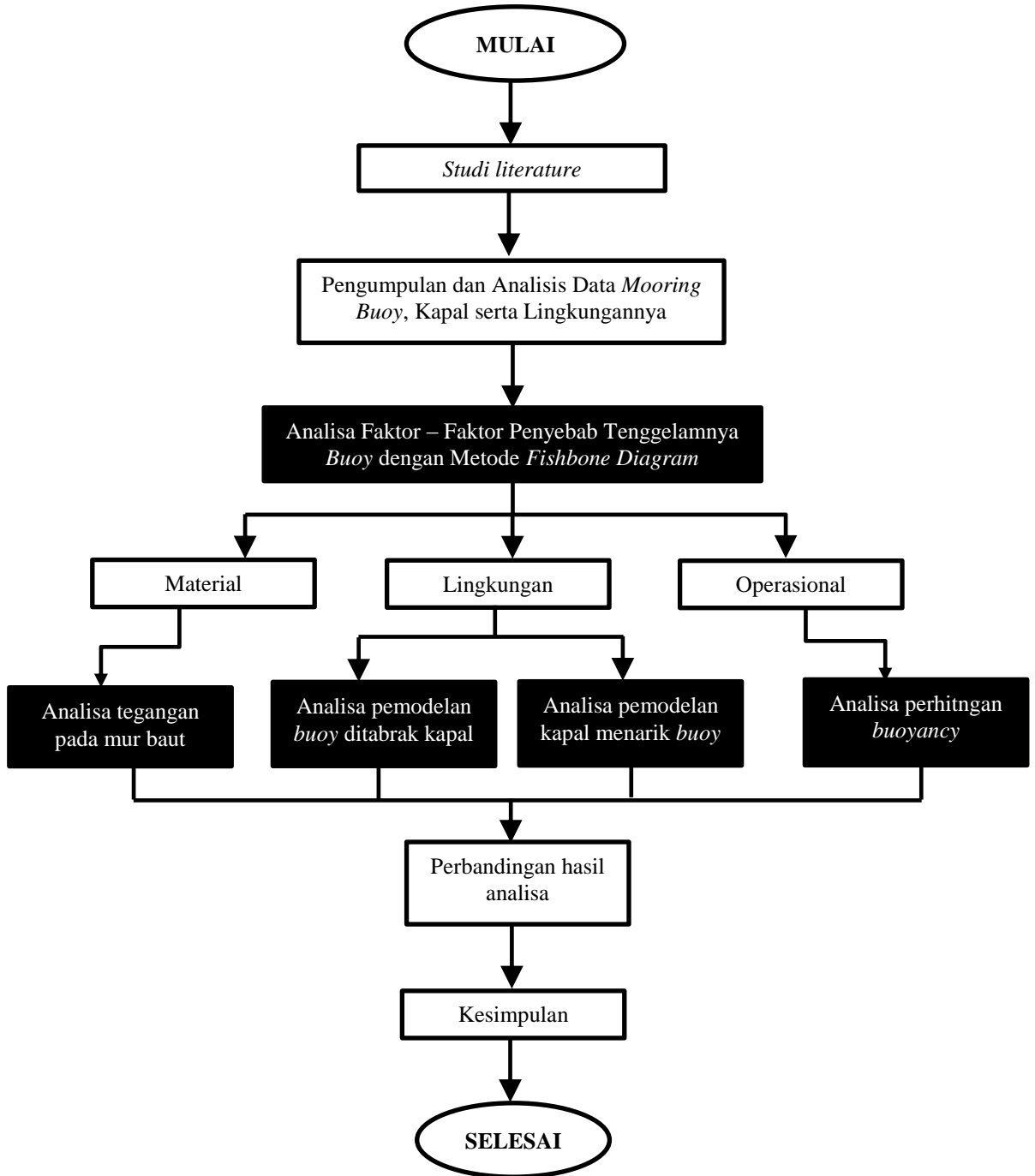
BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metodologi Penelitian

3.1.1 Diagram Alir Tugas Akhir

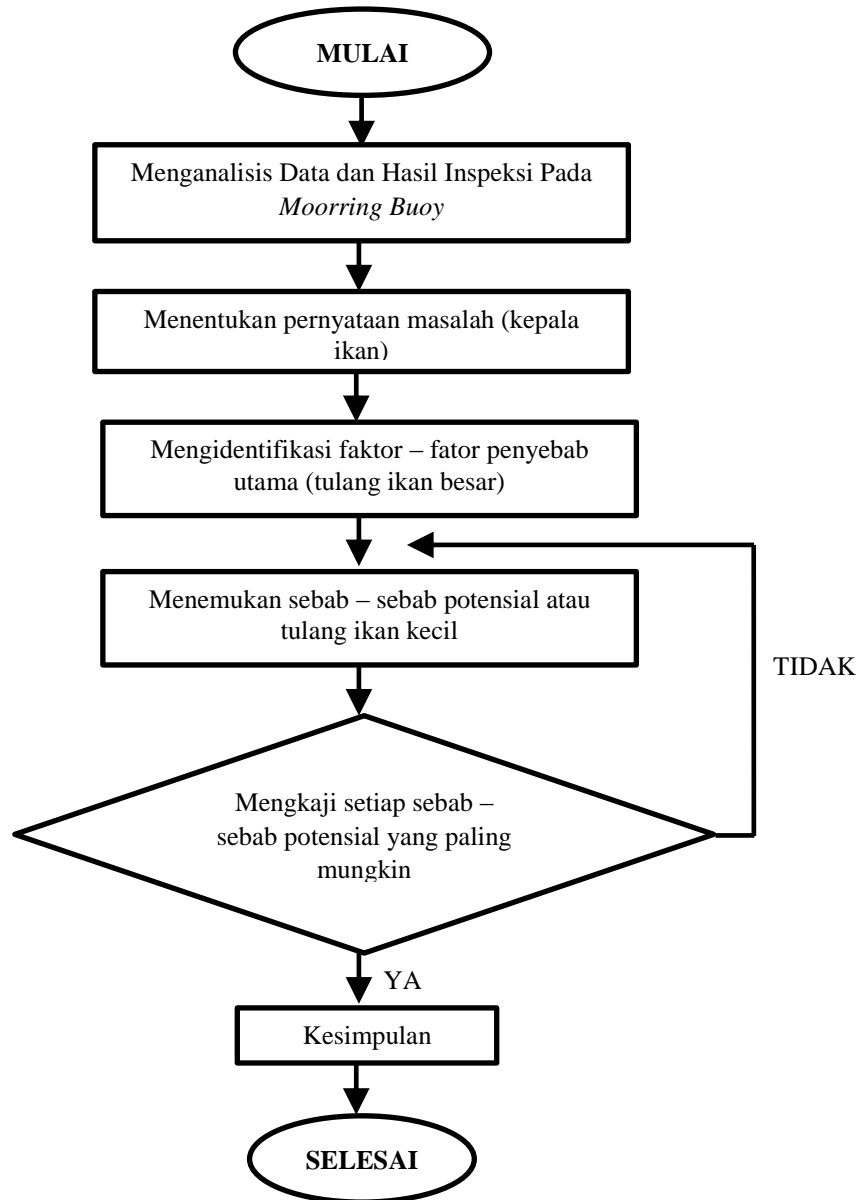
Penjelasan mengenai tugas akhir dengan diagram alir secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.1:



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir secara umum

3.1.2 Diagram Alir *Fishbone Diagram*

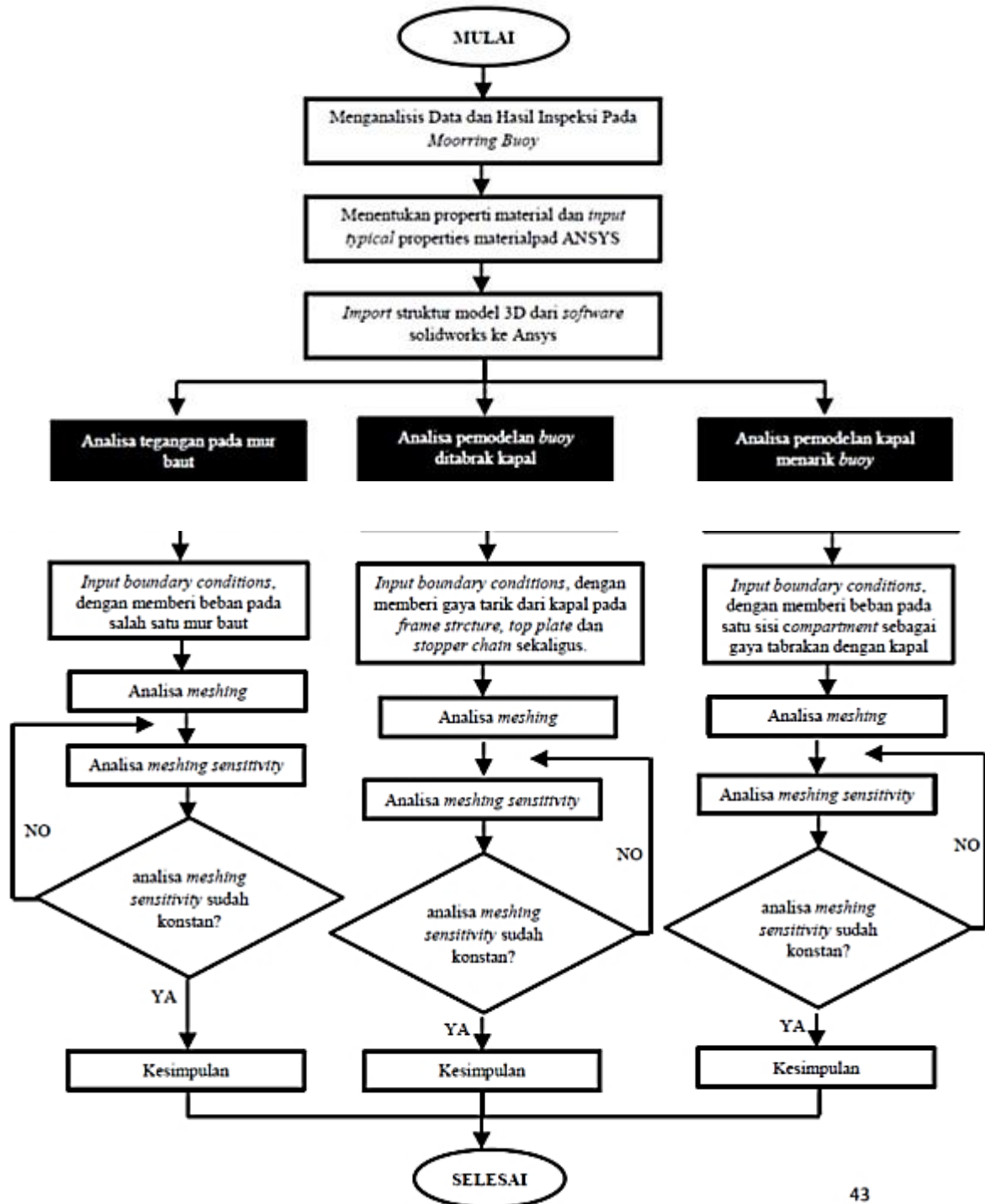
Berikut adalah penjelasan tentang metode pengerjaan tugas akhir menggunakan metode *Fishbone Diagram*, dapat dilihat pada gambar 3.2 :



Gambar 3.2 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir – *Fishbone Diagram*

3.1.3 Diagram Alir Analisa Metode Elemen Hingga

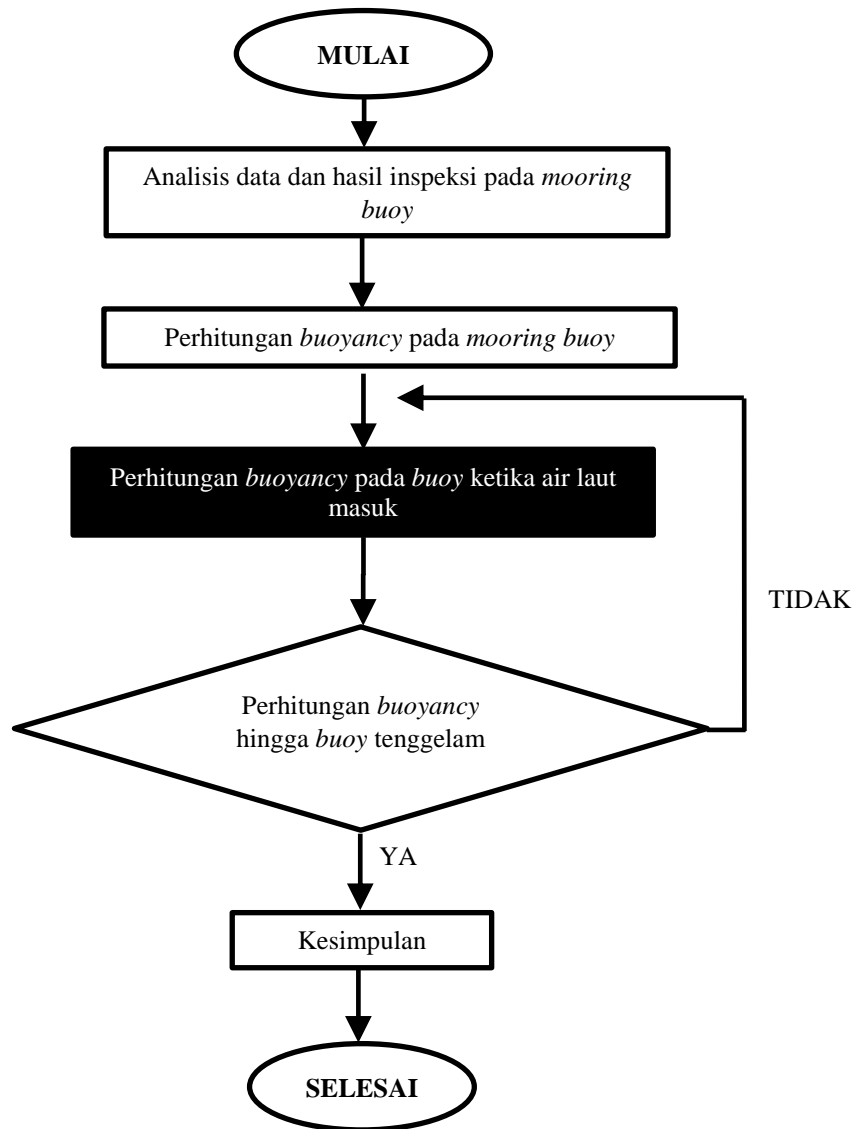
Berikut adalah penjelasan tentang metode pengerjaan tugas akhir menggunakan *software finite element method*, dapat dilihat pada gambar 3.3 :



Gambar 3.3 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir – Metode *Element Hingga*

3.1.4 Diagram Alir Analisa Perhitungan *Buoyancy*

Berikut adalah penjelasan tentang metode pengerjaan tugas akhir dengan analisa perhitungan *buoyancy*, dapat dilihat pada gambar 3.4 :



Gambar 3.4 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir – Perhitungan *Buoyancy*

3.2. Prosedur Penelitian

Berdasarkan diagram alir penelitian diatas, dapun prosedur penelitian dan langkah-langkah penelitian dalam mencapai tujuan Tugas Akhir ini dijelaskan sebagai berikut:

1. Mulai

Langkah awal yang dilakukan adalah merumuskan masalah yang akan dibahas dengan batasan permasalahannya.

2. *Studi Literature*

Pada tahapan ini dilakukan pengumpulan buku, *paper*, maupun jurnal untuk dipelajari. Literatur dijadikan sebagai acuan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini. Literatur mengacu pada penelitian terdahulu yang pernah membahas hal serupa.

3. Pengumpulan dan Analisis Data

Mengumpulkan semua data yang berkaitan dalam pengerjaan tugas akhir, seperti data tentang *mooring buoy*, data kapal, data lingkungan, data chain, dan data lain – lain yang berhubungan dengan pengerjaan tugas akhir, serta menganalisis data - data tersebut.

4. Analisis Faktor Penyebab Tenggelamnya *Mooring Buoy* dengan *Fishbone Diagram*

Pembuatan *Fishbone Diagram* menggunakan *software* coreldraw. Dalam menganalisis dengan *Fishbone Diagram*, langkah pertama yang dilakukan adalah menganalisis data *mooring buoy* dan hasil inspeksi terhadap *mooring buoy*. kemudian menentukan pernyataan masalah (kepala ikan), mengidentifikasi faktor – faktor penyebab utama dan penyebab sekunder (sirip – sirip ikan). Lalu, mengkaji setiap sebab – sebab potensial yang mungkin menjadi faktor penyebab tenggelamnya *buoy*, dan dari hasil dari *Fishbone Diagram* dapat dilanjutkan ke analisa dengan metode elemen hingga.

5. Pemodelan Desain 3D Struktur *Mooring Buoy*

Membuat model desain 3D pada *mooring buoy* berdasarkan data – data yang telah ada dengan menggunakan *software* Solidwork.

6. Analisa Pemodelan FEM pada *Mooring Buoy*

Melakukan pemodelan pada *software* ANSYS 16.0, hal -

hal yang akan dianalisa pada pemodelan ini adalah terkait aspek material dan lingkungan. Adapun langkah – langkah pengerjaannya yaitu menentukan properti material yang digunakan pada struktur. *Buoy* terdiri dari 2 material yaitu LDPE untuk *body buoy* dan *Steel A36* untuk *frame structure* dan mur baut. Kemudian, Mengimport struktur 3D ke *software ANSYS*. Input analisa *Boundary Condition* dan analisa *Meshing* dan *sensitivity*.

7. Menghitung *Bouyancy* pada *Mooring Buoy*

Berdasarkan hasil inspeksi, telah jelas bahwa ada 1 compartemen yang robek dan pasti air laut dapat masuk, sehingga dengan perhitungan *buoyancy* ini sebagai syarat apakah jika 1 *compartemen full* terisi air akan menyebabkan *mooring buoy* tenggelam atau tidak. Maka perlu dilakukan perhitungan *buoyancy* untuk memastikan terkait *buoyancy* yang dimiliki oleh *buoy*. Pada perhitungan analisa ini memegang konsep hukum archimedes, syarat benda tenggelam yaitu ketika berat struktur lebih dari gaya keatas struktur

3.3.Pengumpulan Data

Dalam subbab ini akan ditunjukkan beberapa data yang digunakan untuk analisa dalam tugas akhir ini. **Tabel 3.1** adalah tabel data lingkungan yang berada di sekitar *buoy*.

Tabel 3.1 : Data Site Condition

<i>Data Site Condition</i>		
<i>Water Depth (h)</i>	94	M
<i>Wind Speed</i>	28	m/s
<i>Current Speed</i>	0,9	m/s
<i>Wave Height (H)</i>	10,2	m
<i>Wave Period (Tw)</i>	10,1	sec
<i>SeaBed Material</i>	Sand	
<i>Tidal Range</i>	1,4	m

Kemudian pada **tabel 3.2** merupakan tabel data kapal yang tambat pada *buoy*. Dan **tabel 3.4** adalah data chain/tali tambat yang menjadi *mooring* antara kapal dengan *buoy*

Tabel 3.2 : Data of Ship/barges

Capacity	800	DWT
Over All Length (Loa)	60	m
Between Perpend (Lbp)	55	m
Beam (B)	10	m
Draft (D)	5,6	m
Freeboard (F)	1,7	m

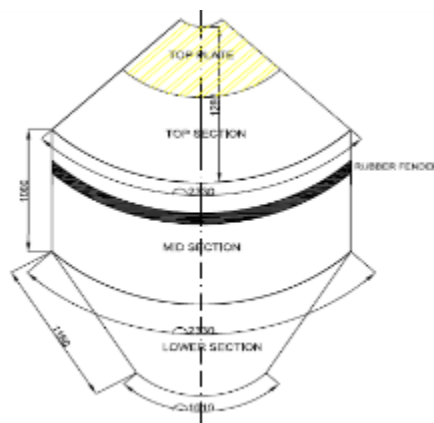
Tabel 3.3 : Chain Selection

Type Of Chain	Grade U2 – Stud	
Chain Diameter	38	mm
Chain weight/m	31,6	Kg
Chain in sea water weight	27,492	kg/m
Break test Load	81,2	KN
Total Length of Chain	133,64	m

Tabel 3.4 merupakan tabel dimensi buoy, yang mana menjadi data untuk membuat pemodelan pada buoy dan pada **gambar 3.5** merupakan gambar dimensi buoy sedangkan **tabel 3.5** adalah tabel chain buoy

Tabel 3.4 Dimension Of Buoy

Dimension of Buoy		
Buoy Diamter (d)	3000	Mm
Buoy Height (h)	1800	Mm
Wall Thickness (t)	18	Mm
Foam Density	32	kg/m ³
Weight of Body Buoy	2450	kg
Total Bouyancy	11018,8	Kg
Net Bouyancy of Buoy	8,57	Ton



Gambar 3.5 : Dimension of Buoy

Tabel 3.5 : Chain of Buoy

<i>Chain of buoy</i>		
<i>Chain Diameter</i>	38	Mm
<i>Chain weight/m</i>	31,6	Kg
<i>Water Depth</i>	80	m
<i>Chain Length</i>	165	m
<i>Chain Weight</i>	4,54	Tons
<i>Reserve Bouyancy</i>	4,03	tons
	47	<i>Percent</i>
<i>Freeboard</i>	0,66	M



BAB I

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Studi Kasus

Tugas akhir ini membahas tentang *Mooring Buoy* yang dilaporkan hilang dan ditemukan tenggelam karena kehilangan daya apung pada 16 Desember 2016. *Buoy* yang tenggelam tersebut berhasil diambil dari laut dan dikirim ke lokasi “Matak” untuk dilakukan visual inspeksi.

4.1.1 Hasil Visual Inspeksi terhadap *Mooring Buoy*

Tujuan visual inspeksi terhadap *mooring buoy* adalah untuk melaporkan kondisi *buoy* beserta semua aksesoris yang menempel pada *buoy* dan untuk menentukan dugaan awal yang menyebabkan *buoy* tenggelam. Metode inspeksi yang digunakan adalah *Close Visual Inspection* (CVI) dengan berbagai macam posisi dan sudut dilakukan pengambilan gambar dan tanpa dilakukan pembongkaran Berikut adalah beberapa hasil visual inspeksi yang perlu dipertimbangkan dalam pengerjaan tugas akhir.



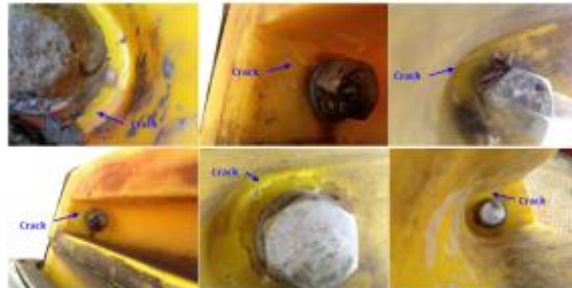
Gambar 4.1 : Buoy Di Lokasi Matak

Tabel 4.1 : Visual Inspeksi Pada Buoy

No.	Komponen	Visual Inspeksi
1	Compartment #1	Terdapat <i>crack</i> pada 7/8 area <i>bolt joint connection</i>
2	Compartment #2	Compartment Robek dan Bocor. Terdapat <i>crack</i> pada 7/8 area <i>bolt joint connection</i>
3	Compartment #3	Terdapat <i>crack</i> pada 2/8 area <i>bolt joint connection</i>
4	Compartment #4	Compartment atas rusak dan sobek. Terdapat <i>crack</i> pada 4/8 area <i>bolt joint connection</i>

Pada gambar 4.1 adalah *buoy* yang telah ditemukan setelah tenggelam dan diangkat ke darat untuk dilakukan inspeksi, kemudian dijelaskan lebih

rinci kondisi tiap compartment pada tabel 4.1. Gambar 4.2 adalah hasil inspeksi pada area bolt joint di *compartment #2* yang menunjukkan kondisi *crack* di area tersebut, selain itu di semua *compartment* juga terjadi crack yang kurang lebih sama.



Gambar 4.2 : Area *Bolt Joint* Retak di setiap *Compartment*

Pada gambar 4.3 merupakan hasil inspeksi pada *compartment #2* yang badannya robek dan bocor, kondisi ini bisa menyebabkan air laut masuk ke *compartment*. Gambar 4.3 menjelaskan hasil inspeksi padamana *compartment #4* dengan kondisi rusak dan robek pada bagian top hull.



Gambar 4.3 : *Compartment #2* Robek Dan Bocor



Gambar 4.4 : *Compartment atas* Rusak dan Robek

4.1.2 Kesimpulan Hasil Visual Inspeksi terhadap Mooring Buoy

Kesimpulan dari hasil visual inspeksi yang dilakukan oleh Indra H. Paranoan sebagai *inspector* adalah berikut ini:

- 1) Tenggelamnya *mooring buoy* dikarenakan kehilangan daya apung atau *buoyancy*, juga terjadi karena kerusakan berupa retak dan bocor pada *buoy* di setiap *compartment* sehingga menjadi jalur masuk air laut ke dalam *buoy*.
- 2) Penyebab kerusakan secara fisik akan dinyatakan melalui *failure analysis* atau RCA (*Root Cause Analysis*).

4.2 Menganalisa Faktor – Faktor Tenggelam Dengan Fishbone Diagram

4.2.1 Menentukan Kepala Ikan atau Pernyataan Masalah

Mooring Buoy mengalami kegagalan dan tidak bisa digunakan sesuai operasinya. Maka dilakukan visual inspeksi untuk mengetahui bagaimana kondisi *mooring buoy* secara visual, maka ditarik kesimpulan dari hasil visual inspeksi yaitu *Mooring Buoy* Tenggelam yang terjadi karena *Mooring buoy* kehilangan *buoyacy*, hal ini disebabkan karena badan *buoy* yang robek kemudian air laut masuk kedalam *buoy*

Fishbone diagram merupakan diagram sebab-akibat, yang mana diagram sebab digambarkan dengan tulang-tulang ikan dan diagram akibat digambarkan dengan kepala ikan. Langkah pertama dalam pembuatan *fishbone diagram* adalah menentukan pernyataan masalah yang digambarkan dengan “kepala ikan”. Jika ditarik kesimpulan dari hasil visual inspeksi, bahwa tenggelamnya *buoy* disebabkan karena permasalahan dengan *buoyancy*. Sehingga dalam tugas akhir ini, yang dijadikan sebagai kepala ikan yaitu “*Buoy* Tenggelam karena *Buoyancy* yang tidak Mencukupi”. Kemudian dibuat sebagai pernyataan masalah atau kepala ikan.

Dalam pembuatan *fishbone diagram*, digambarkan seperti sebuah kepala ikan yang bertuliskan pernyataan masalah, kemudian disertai dengan dengan garis horizontal yang panjang. Dapat dilihat seperti gambar 4.5 :



Gambar 4.5 : Kepala Ikan

4.2.2 Mengidentifikasi Faktor – Faktor Penyebab Utama

Fishbone diagram juga disebut sebagai *cause-effect diagram* atau diagram sebab akibat, diagram akibat digambarkan dengan kepala ikan, sedangkan diagram sebab digambarkan dengan tulang ikan.

Setelah menentukan pernyataan masalah atau “kepala ikan”, langkah selanjutnya adalah membuat tulang-tulang ikan yang merupakan diagram sebab. Yaitu dengan menentukan kategori-kategori atau faktor-faktor penyebab utama yang mempengaruhi masalah pada kepala ikan. Faktor-faktor tersebut akan menjadi cabang utama pada *fishbone diagram*, setiap cabang mewakili “sebab utama” dari masalah yang ditulis.

Menurut Grant (1993) dalam industri manufaktur, pembuatan diagram sebab akibat ini dapat menggunakan konsep “4M+1E”, yaitu: *Man Power*, *Material*, *Machine*, *Method* dan *Environment*.

a. Man Power

Man Power adalah segala aspek yang berhubungan dengan sumber daya manusia (SDM) atau tenaga kerja yang mengoperasikan *mooring buoy*.

b. Material

Material adalah aspek yang berkaitan dengan kondisi struktur bangunan, misalkan tali tambat yang mengalami moderate korosi, *compartment* yang bocor, *sinker pad eye* yang mengalami korosi dan bengkok, *crack* pada *compartment* dan lain-lain.

c. Machine

Machine adalah aspek yang berkaitan dengan kondisi mesin dari *buoy*, hal-hal yang menjadi penunjang agar *buoy* bisa selalu beroperasi dengan baik yaitu *buoyancy*.

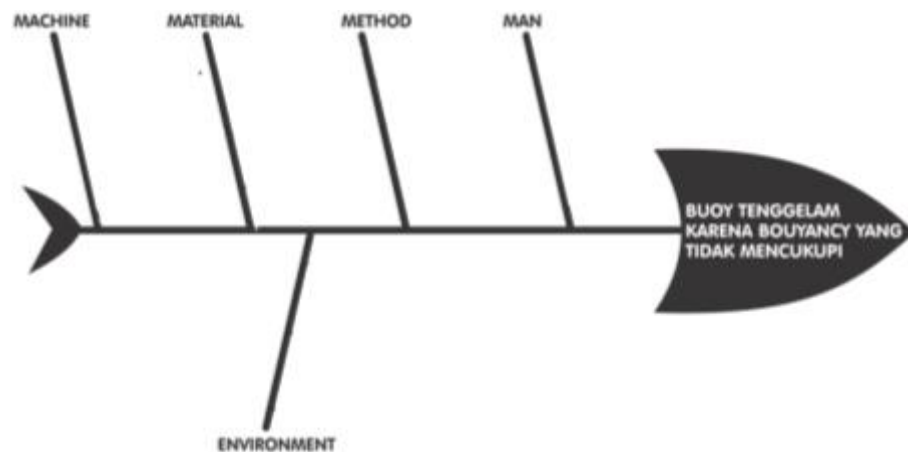
d. Method

Method adalah aspek yang berkaitan dengan proses, prosedur dan metode kerja, misalkan perhitungan *engineer* yang salah sehingga umur *buoy* masih muda namun telah mengalami kegagalan, sistem operasional yang kurang baik, penjadwalan inspeksi *mooring buoy*, dan lain-lain.

e. Enviroment

Enviroment merupakan aspek yang berkaitan dengan lingkungan sekitar *mooring buoy*, seperti pengaruh temperatur, gelombang, angin dan aktivitas lingkungan di sekitar *mooring buoy*, dan segala hal yang terjadi di sekitar *buoy* yang tidak bisa dikendalikan.

Pada tugas akhir ini, menggunakan metode *fishbone diagram* dengan kategori 4M+1E (*Man Power, Material, Machine, Method* dan *Environment*). Pada langkah sebelumnya telah digambarkan kepala ikan beserta garis horizontal yang panjang. Kemudian, penulisan faktor penyebab utama digambarkan dengan garis diagonal yang menyatakan faktor utamanya, yang dapat dilihat pada gambar 4.6



Gambar 4.6: Kepala ikan + Tulang Ikan

4.2.3 Menemukan Faktor Penyebab Sekunder berdasarkan Faktor Penyebab Utama

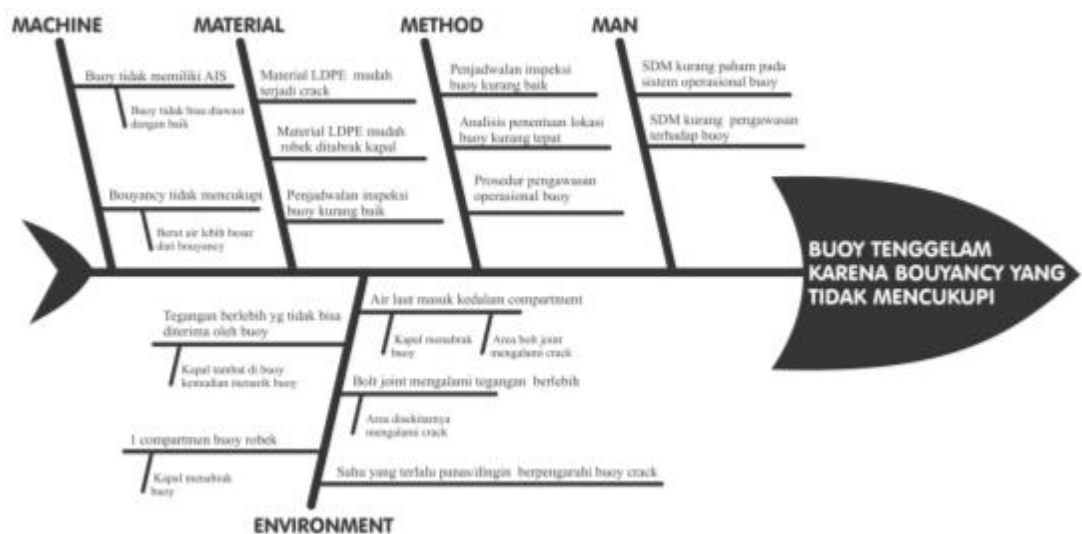
Dalam pembuatan diagram akibat pada *Fishbone Diagram*, diagram akibat dibagi menjadi 2 hal yaitu faktor-faktor utama dan faktor-faktor

penyebab sekunder yang apabila digambarkan faktor-faktor penyebab utama merupakan tulang-tulang ikan besar atau cabang utama, sedangkan faktor penyebab sekunder merupakan tulang-tulang ikan kecil atau sub cabang.

Maka setelah menentukan faktor-faktor penyebab utama, langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi sebanyak mungkin faktor-faktor penyebab sekunder yang ditulis sebagai sub cabang utama. Setiap faktor penyebab utama mempunyai faktor penyebab sekunder yang perlu diuraikan.

Saat faktor penyebab sekunder dikemukakan, tentukan dimana faktor penyebab sekunder tersebut harus ditempatkan dalam *Fishbone Diagram* dan tentukan di bawah kategori yang mana gagasan tersebut harus ditempatkan, misal: “1 compartment buoy robek? Penyebab: kapal menabrak buoy”. Hal tersebut penyebabnya adalah suatu hal yang tidak bisa dikontrol maka diletakkan pada kategori “*Environment*”.

Faktor penyebab sekunder digambarkan dengan garis horizontal, sehingga banyak tulang-tulang kecil keluar dari garis diagonal. Pernyataan sekunder dinyatakan berdasarkan data *buoy*, dan data hasil inspeksi terhadap *mooring buoy*. Berikut adalah gambar *Fishbone Diagram* beserta faktor penyebab sekunder.



Gambar 4.7 : *Fishbone Diagram* dengan Faktor Penyebab Sekunder

4.2.4 Mengkaji setiap Faktor Pernyataan Sekunder

Kemudian langkah selanjutnya adalah mengkaji dan menyepakati setiap faktor pernyataan sekunder. Dijelaskan dengan **tabel 4.2** berupa penjelasan terkait setiap faktor pernyataan sekunder.

Tabel 4.2 Hasil Kesimpulan *Fishbone Diagram*

<i>Possible Root Cause</i>	<i>Root Cause ?</i>	Keterangan
	<i>Yes atau No</i>	
<i>Man</i>		
Kurangnya Pemahaman SDM terhadap Sistem Operasional <i>Buoy</i>	<i>NO</i>	tidak ada data dan keterangan lebih lanjut terkait pernyataan ini
SDM Kurang Melakukan Pengawasan terhadap <i>Buoy</i>	<i>NO</i>	
<i>Method</i>		
Penjadwalan Inspeksi terhadap <i>Buoy</i> Kurang Baik	<i>NO</i>	tidak ada data dan keterangan lebih lanjut terkait pernyataan ini
Analisis Penentuan Lokasi <i>Buoy</i> Kurang Tepat	<i>NO</i>	
Prosedur Pengawasan Operasional terhadap <i>Buoy</i>	<i>NO</i>	
<i>Material</i>		
Material LDPE yang Tidak Sesuai, sehingga Mudah Terjadi <i>Crack</i>	<i>YES</i>	<i>crack</i> pada <i>buoy</i> terjadi hampir di setiap area mur baut, menunjukkan terjadi <i>stress</i> berlebih pada <i>buoy</i> . Hal ini terjadi karena material kurang sesuai
Material LDPE yang Tidak Sesuai, sehingga Ketika Ditabrak Kapal Mudah Robek	<i>YES</i>	
<i>Machine</i>		
<i>Buoy</i> Tidak Memiliki AIS, sehingga <i>Buoy</i> Tidak Bisa Diawasi dengan Baik	<i>YES</i>	Buoy tidak memiliki AIS.
<i>Buoyancy</i> Tidak Mencukupi karena Berat Air Lebih Besar daripada <i>Buoyancy</i>	<i>YES</i>	Berdasarkan hukum archimedes, syarat benda tenggelam adalah apabila berat struktur lebih besar dari gaya keatas. Terjadi robek besar pada 1 <i>compartment</i> , namun apabila hanya 1 <i>compartment</i> yang kehilangan <i>buoyancy</i> , seharusnya <i>buoy</i> masih terapung.
<i>Environment</i>		
Suhu Yang Terlalu Panas/Dingin Mempengaruhi <i>Buoy Crack</i>	<i>NO</i>	hal ini bisa jadi pengaruh terhadap <i>buoy</i> , namun tidak bisa dianalisa pada pemodelan metode elemen hingga
<i>Buoy</i> ditabrak kapal, 1 <i>compartment Buoy</i> Robek	<i>YES</i>	Berdasarkan hasil inspeksi, ada 1 <i>compartment buoy</i> yang robek yang diduga diakibatkan karena <i>buoy</i> ditabrak dengan kapal.

Tabel 4.2 Hasil Kesimpulan *Fishbone Diagram* (Lanjutan)

Kapal Menabrak <i>Buoy</i> sehingga Air Laut Masuk ke dalam <i>Compartment</i>	YES	ada 1 <i>compartment buoy</i> yang robek yang diduga diakibatkan karena <i>buoy</i> ditabrak dengan kapal, robeknya <i>compartment</i> tersebut menjadi jalur masuk air laut ke dalam <i>compartment</i>
<i>Bolt Joint</i> Mengalami Tegangan yang Berlebih sehingga Area di Sekitarnya Mengalami <i>Crack</i>	YES	berdasarkan hasil inspeksi, bahwa hampir disetiap sekitar mur baut terdapat <i>crack</i> pada <i>buoy</i> yang menjadi bukti bahwa <i>buoy</i> mengalami <i>stress</i> berlebih. sehingga bisa jadi <i>crack</i> pada <i>buoy</i> ini menjadi jalur masuk air laut ke dalam <i>buoy</i>
Area <i>Bolt Joint</i> Mengalami <i>Crack</i> sehingga Air Laut Masuk ke Dalam <i>Compartment</i>	YES	
Ketika Kapal Tambat di <i>Buoy</i> , Dia Menarik <i>Buoy</i> dengan Tegangan Berlebih yang Tidak Bisa Diterima oleh <i>Buoy</i>	YES	ketika kapal tambat di <i>buoy</i> , ada kemungkinan <i>buoy</i> mengalami <i>stress</i> akibat tarikan dari kapal, sehingga perlu dilakukan analisa lebih lanjut dengan pemodelan metode elemen hingga untuk mengetahui apakah akan terjadi deformasi pada badan <i>buoy</i> apabila <i>buoy</i> menarik kapal

Berdasarkan hasil kesimpulan analisa dengan metode *Fishbone Diagram* yang mana data *Mooring Buoy* dan data hasil inspeksi dijadikan acuan untuk menentukan kesimpulan dari analisa ini. Maka didapatkan bahwa beberapa faktor yang bisa menjadi penyebab tenggelamnya *mooring buoy* yaitu :

1. *Material* LDPE Tidak Sesuai
2. *Buoy* tidak Memiliki AIS
3. *Buoyancy* yang Tidak Mencukupi
4. Kapal Menabrak *Buoy*
5. Area *Bolt Joint* Terjadi *Crack*
6. Ketika Tambat, Kapal Menarik *Buoy*

Berdasarkan kesimpulan analisa dengan *Fishbone Diagram*, ada beberapa aspek yang bisa dilakukan analisa lebih lanjut agar bisa diketahui diantara aspek-aspek tersebut yang mana yang menjadi penyebab utama dari tenggelamnya *mooring buoy*. Faktor No 1 tidak dilakukan analisa lebih lanjut karena tugas akhir ini tidak menganalisa terkait hal-hal yang berkaitan pada *material* melainkan lebih fokus pada mekanik struktur. Faktor No. 2 tidak perlu dilakukan analisa lebih lanjut karena sudah jelas bahwa memang *buoy* tidak memiliki AIS.

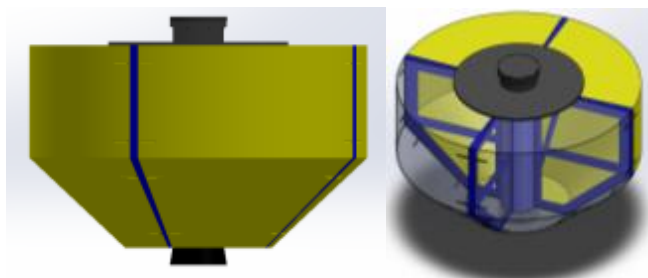
Faktor No. 3 merupakan analisa tentang perhitungan *buoyancy* yang nanti akan dianalisa dengan perhitungan *buoyancy* berdasarkan hukum archimedes. Faktor No. 4, 5 dan 6 akan dianalisa menggunakan metode elemen hingga dan dengan bantuan *software* ANSYS 16.0 pada Ansys Workbench.

4.3. Pemodelan Struktur *Mooring Buoy* 3D`

Selanjutnya akan dianalisa dengan metode elemen hingga yang menggunakan *software* ANSYS. Dan hal yang pertama dilakukan adalah dengan memodelkan struktur *buoy* 3D dengan bantuan *software* solidwork diharapkan desain ukuran dan dimensi struktur tersebut bisa mewakili keadaan sesungguhnya. Pemodelan struktur 3D *mooring buoy* diperlukan sebagai bahan input analisa *Finite Element Method* (FEM) yang bertujuan untuk mengetahui analisa tegangan lokal. Berikut adalah spesifikasi dimensi dari *North Belut Mooring Buoy* KMB-PE-011215 :

<i>Body Buoy Material</i>	:	LDPE (<i>Low Density Polyethylene</i>)
<i>Frame Buoy Material</i>	:	Steel A36
<i>Buoy diameter</i> (d)	:	3000 mm
<i>Buoy height</i> (h)	:	1800 mm
<i>Wall thickness</i> (t)	:	18 mm
<i>Module body</i>	:	4

Pemodelan 3D *mooring buoy* ditunjukkan pada gambar 4.10 yang kemudian model struktur 3D tersebut akan diimport ke *software* pemodelan metode elemen hingga.



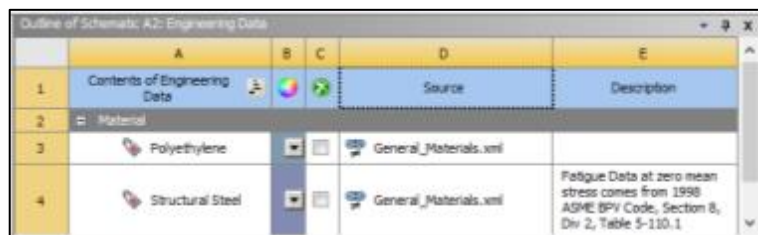
Gambar 4.8 Pemodelan 3D *Mooring Buoy*

4.4 Analisa Pemodelan *Buoy* dengan Metode FEM

Pemodelan dan analisis struktur dengan metode *finite element* dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS 16.0. Hal yang di analisa dengan metode ini meliputi 3 aspek yaitu dimodelkan ketika ditabrak oleh kapal, ditarik dengan kapal, dan tegangan pada mur baut.

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pengerjaan yaitu sebagai berikut.

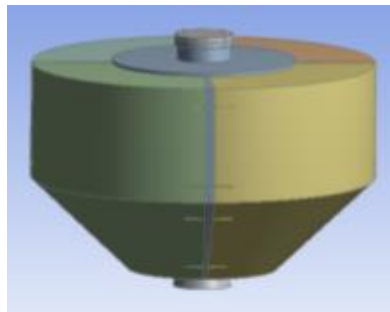
- 1) Menentukan properti *material* yang digunakan pada struktur dan mengimport *typical properties material* ke ANSYS.



Gambar 4.9 Input Properti Material Struktur *Mooring Buoy* di Ansys

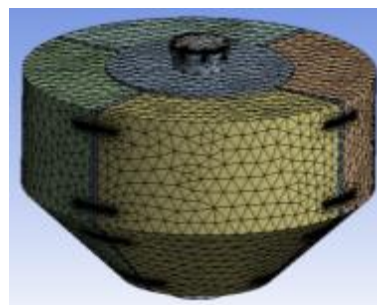
Penentuan properti *material* perlu diperhatikan karena jenis material yang berbeda akan memberikan hasil yang berbeda pula pada hasil analisis. *Mooring buoy* yang terdiri dari *frame structure* dengan material Baja A36 dan 4 *body compartment* dengan material *Low Density Polyethylene* (LDPE)

- 2) mengimport desain struktur 3D yang sudah dimodelkan dengan *software* Solidwork ke *software* ANSYS disesuaikan dengan koordinat xyz nya.



Gambar 4.10 Model 3D *Buoy* pada *Software* ANSYS

- 3) Analisa *boundary condition* pada struktur yang dimodelkan. *Boundary conditions* dapat kita aplikasikan sesuai dengan analisis yang akan kita lakukan. Karena pada analisa FEM ada 3 hal yang perlu dianalisis maka *input boundary condition* yang diberikan pada setiap analisis berbeda-beda.
- 4) Analisa *meshing*, merupakan proses pembagian sebuah benda ke dalam beberapa bagian kecil untuk dianalisa. *Meshing* merupakan prosedur numeris yang biasanya dipakai untuk menyelesaikan masalah dalam bidang rekayasa teknik, seperti dalam halnya kasus ini dipakai untuk menganalisa tegangan atau *stress* pada suatu struktur yang rumit.
- 5) Analisa *sensitivity*, digunakan untuk mengetahui apakah tegangan yang dihasilkan pada pemodelan sudah mendekati nilai kebenaran. Analisis ini dilakukan dengan memvariasikan kerapatan *meshing* yang dibandingkan dengan nilai tegangan *equivalent (equivalent stress)* atau yang dapat disebut juga dengan *Von-Misses Stress* setelah benda tersebut menerima *force* atau *boundary conditions* yang lain. *Meshing* dilakukan dalam beberapa variasi jumlah elemen hingga didapatkan nilai *sensitivity* yang konstan. Gambar 4.9 merupakan salah satu contoh bentuk *meshing* pada struktur yang dimodelkan. Bentuk bagian-bagian kecil yang terbentuk menyesuaikan dengan keadaan bentuk struktur yang dianalisis.



Gambar 4.11 Contoh Hasil *Meshing* Analisis

Hasil dari *meshing sensitivity* disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mengetahui tingkat kekonstanan atau kestabilan *stress* yang dihasilkan dengan jumlah *meshing* yang berbeda.

4.4.1 Pembebanan pada Analisa FEM

a) Tension kapal pada Buoy

Analisa *tension* pada pengerjaan tugas akhir ini menggunakan *software* Orcaflex yang akan didapatkan maksimum *tension* pada *mooring lines* akibat pembebanan angin, gelombang, dan arus. Arah pembebanan yang dilakukan yaitu pada 180⁰ untuk kondisi *full load* dan *ballast*. Seluruh simulasi dilakukan selama 10800 s. Kriteria yang digunakan dalam analisa *tension* merupakan kriteria dalam code API RP 2SK. Pada API RP 2 SK dijelaskan bahwa *safety factor* yang harus dihasilkan harus lebih dari 1.67. Sehingga, tegangan maksimum yang diijinkan berdasarkan API RP 2SK adalah minimum breaking load (MBL) dibagi dengan *safety factor*. Berikut merupakan tabel hasil analisis yang dilakukan pada *software* Orcaflex

Tabel. 4.3. Output *Tension* Maksimum Orcaflex In-Between Kondisi *Full Load*

Name		End Tension (kN)	End Tension (Ton)	BL (Ton)	MBL (Ton)	SF
Hawser 1	Tanker	390.03	39.76	146	146	3.67
	Buoy	389.95	39.75	146	146	3.67
Hawser 2	Tanker	390.03	39.76	146	146	3.67
	Buoy	389.95	39.75	146	146	3.67
Mooring Chain	Buoy	1600.94	163.19	704.995	643.69	3.94
	Link Plate	1523.61	155.31	704.995	643.69	4.14
Anchor Chain 1	Link Plate	79.48	8.10	892.25	824.27	101.73
	Anchor	83.35	8.50	892.25	824.27	97.01
Anchor Chain 2	Link Plate	432.44	44.08	892.25	824.27	18.70
	Anchor	427.76	43.60	892.25	824.27	18.90
Anchor Chain 3	Link Plate	432.82	44.12	892.25	824.27	18.68
	Anchor	428.21	43.65	892.25	824.27	18.88

Tabel. 4.3. Output *Tension* Maksimum *Orcaflex In-Between* Kondisi *Full Load* (Lanjutan)

Sinker Chain	Link Plate	1985.05	202.35	892.25	824.27	4.07
	Sinker	1986.43	202.49	892.25	824.27	4.07

Berdasarkan Tabel 4.3. diketahui *tension* terbesar terjadi antara *mooring* dan struktur *buoy* pada konfigurasi *In-between* dengan kondisi *full load*. Besarnya maksimum *tension* yang dihasilkan antara *mooring* dengan struktur *buoy* sebesar 163.19 tons yang menghasilkan *safety factor* sebesar 3.94. Sedangkan *tension* yang terjadi antara *hawser* dengan struktur *buoy* sebesar 39.75 ton yang menghasilkan *safety factor* 3.67. Dengan *safety factor* sebesar itu, maka *mooring* tersebut memenuhi kriteria API RP 2 SK

Tabel. 4.4. Output *Tension* Maksimum *Orcaflex In-Between* Kondisi *Ballast*

Name		End Tension (kN)	End Tension (Ton)	BL (Ton)	MBL (Ton)	SF
Hawser 1	Tanker	639.13	65.15	146	146	2.24
	Buoy	639.03	65.14	146	146	2.24
Hawser 2	Tanker	639.13	65.15	146	146	2.24
	Buoy	639.03	65.14	146	146	2.24
Mooring Chain	Buoy	1971.72	200.99	705	643.69	3.20
	Link Plate	1891.07	192.77	705	643.69	3.34
Anchor Chain 1	Link Plate	135.86	13.85	892.25	824.27	59.52
	Anchor	142.07	14.48	892.25	824.27	56.92
Anchor Chain 2	Link Plate	538.53	54.90	892.25	824.27	15.02
	Anchor	532.42	54.27	892.25	824.27	15.19
Anchor Chain 3	Link Plate	538.91	54.93	892.25	824.27	15.00
	Anchor	532.81	54.31	892.25	824.27	15.18
Sinker Chain	Link Plate	2269.53	231.35	892.25	824.27	3.56
	Sinker	2270.88	231.49	892.25	824.27	3.56
Anchor Chain 2	Link Plate	538.53	54.90	892.25	824.27	15.02
	Anchor	532.42	54.27	892.25	824.27	15.19

Berdasarkan tabel 4.4. diketahui *tension* terbesar terjadi antara *mooring* dan struktur *buoy* dengan maksimum *tension* sebesar 200,99 tons yang menghasilkan *safety factor* sebesar 3.20. Sedangkan *tension* yang terjadi antara *hawser* dengan struktur *buoy* sebesar 65.14 ton yang menghasilkan *safety factor* 2.24.

Tabel. 4.5. Output *Tension* Maksimum *Orcaflex In-Line*
Kondisi *Full Load*

Name		End Tension (kN)	End Tension (Ton)	BL (Ton)	MBL (Ton)	SF
Hawser 1	Tanker	389.54	39.71	146	146	3.68
	Buoy	389.46	39.70	146	146	3.68
Hawser 2	Tanker	389.54	39.71	146	146	3.68
	Buoy	389.46	39.70	146	146	3.68
Mooring Chain	Buoy	1599.78	163.08	705.00	643.69	3.95
	Link Plate	1523.69	155.32	705.00	643.69	4.14
Anchor Chain 1	Link Plate	825.53	84.15	892.25	824.27	9.80
	Anchor	822.18	83.81	892.25	824.27	9.83
Anchor Chain 2	Link Plate	175.73	17.91	892.25	824.27	46.01
	Anchor	167.73	17.10	892.25	824.27	48.21
Anchor Chain 3	Link Plate	175.74	17.91	892.25	824.27	46.01
	Anchor	167.87	17.11	892.25	824.27	48.17
Sinker Chain	Link Plate	1854.79	189.07	892.25	824.27	4.36
	Sinker	1856.24	189.22	892.25	824.27	4.36

Berdasarkan Tabel 4.5. diketahui *tension* terbesar terjadi antara *mooring* dan struktur *buoy* dengan maksimum *tension* sebesar 163.08 tons yang menghasilkan *safety factor* sebesar 3.95. Sedangkan *tension* yang terjadi antara *hawser* dengan struktur *buoy* sebesar 39.70 ton yang menghasilkan *safety factor* 3.68. nilai tersebut didapat dari konfigurasi *In-line* pada kondisi *full load*

Tabel. 4.6. Output *Tension* Maksimum *Orcaflex In-Line* Kondisi
Ballast

Name		End Tension (kN)	End Tension (Ton)	BL (Ton)	MBL (Ton)	SF
Hawser 1	Tanker	641.39	65.38	146	146	2.23
	Buoy	641.29	65.37	146	146	2.23
Hawser 2	Tanker	641.39	65.38	146	146	2.23
	Buoy	641.29	65.37	146	146	2.23
Mooring Chain	Buoy	1974.18	201.24	705.00	643.69	3.20
	Link Plate	1893.64	193.03	705.00	643.69	3.33

Tabel. 4.6. Output *Tension* Maksimum *Orcaflex In-Line* Kondisi*Ballast*

Anchor Chain 1	Link Plate	1036.66	105.67	892.25	824.27	7.80
	Anchor	1033.60	105.36	892.25	824.27	7.82
Anchor Chain 2	Link Plate	192.64	19.64	892.25	824.27	41.98
	Anchor	183.38	18.69	892.25	824.27	44.09
Anchor Chain 3	Link Plate	192.63	19.64	892.25	824.27	41.98
	Anchor	183.38	18.69	892.25	824.27	44.10
Sinker Chain	Link Plate	2101.80	214.25	892.25	824.27	3.85
	Sinker	2103.24	214.40	892.25	824.27	3.84

Berdasarkan tabel 4.6. diketahui *tension* terbesar terjadi antara *mooring* dan struktur *buoy* dengan maksimum *tension* sebesar 201.24 tons yang menghasilkan *safety factor* sebesar 3.20. Sedangkan *tension* yang terjadi antara hawser dengan struktur *buoy* sebesar 65.37 ton yang menghasilkan *safety factor* 2.23. Dengan *safety factor* sebesar itu, maka *mooring* tersebut memenuhi kriteria API RP 2 SK

b) Gaya Tubrukan Kapal

dalam perhitungan gaya tubrukan kapal menggunakan rumus :

$$E = \frac{1}{2} a m V^2$$

Diketahui : a = koefisien tubrukan kapal = 1,1

m = massa kapal = 800.000 kg

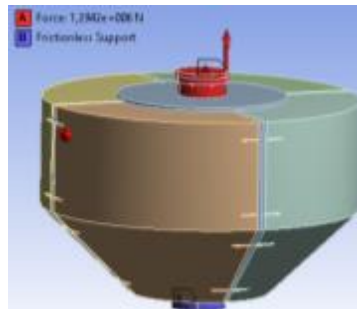
v = kecepatan kapal pada laut terbuka= 0,2

maka gaya tubrukan kapal adalah 177,53 KN

4.4.2 Pemodelan dengan Kondisi saat Kapal Menarik *Buoy*

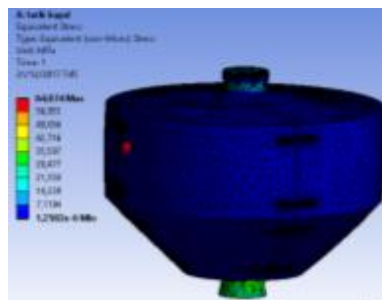
Pada penyelesaian tugas akhir ini, dibutuhkan analisis menggunakan *software finite element method* (FEM) yaitu dengan *software ANSYS*. Dalam penyelesaian kasus ini ada 3 hal yang akan dianalisis untuk mengetahui diantara hal – hal tersebut yang mana yang paling menyebabkan terjadinya *buoy* tenggelam. Salah satunya adalah menganalisa kekuatan *buoy* pada kondisi saat kapal tertambat dengan *buoy*, kemudian kapal tersebut disimulasikan menarik *buoy*, dan *buoy* ditahan oleh rantai yang ada dibawahnya.

Maka langkah pengerjaan pemodelan ini yaitu seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya yaitu memasukkan properti *material*, lalu mengimport *model* desain 3D *buoy* dari *solidwork* ke ANSYS. Kemudian, input *boundary condition*, pada kasus ini dimodelkan *frame structure* hingga *top plate* dan *stopper chain* ditarik oleh gaya tarik kapal sebesar 1292,2 KN. Dapat dilihat pada gambar dibawah ini, wilayah A (*frame structure, top plate* dan *stopper chain*) merupakan titik letak arah pembebanan, dengan gaya sebesar 1292,2 KN sebagai gaya Tarik (*tension*) kapal terhadap *buoy*. Sedangkan wilayah B merupakan merupakan tumpuan *pinned support*, karena bagian bawah dari *buoy* ditahan oleh rantai atau *chain*. Pada analisis ini, diberi gaya hanya pada satu titik yaitu pada titik A saja dan dilakukan *meshing sensitivity* ke beberapa ukuran *meshing* untuk mengetahui ukuran nilai konstan tanpa mengubah letak titik pembebanan.



Gambar 4. 12 Input Gaya pada *Buoy* pada saat Ditarik Kapal

Kemudian dilakukan analisis *meshing* dari pemodelan ketika *Buoy* ditarik kapal.



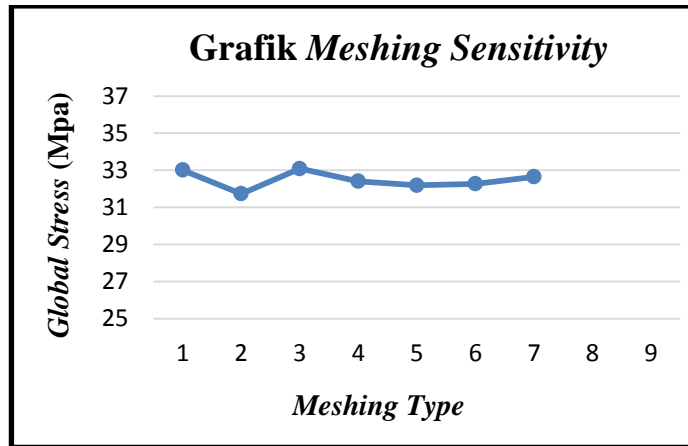
Gambar 4.13 Tegangan Von Mises pada Struktur *Buoy* akibat Gaya Tarik dari Kapal

Hasil analisisnya, terdapat tegangan sebesar 33,012 MPa yang mana tidak terjadi tegangan yang cukup besar terhadap struktur *buoy*. Oleh karena gaya Tarik dilakukan pada *buoy* daerah *frame structure*, *top plate* dan *stopper chain* dengan material baja A36 yang memiliki 250 MPa *yield strength*, sehingga jika gaya tarik kapal hanya memberikan tegangan sebesar 33,012 MPa maka tidak akan banyak mempengaruhi keadaan dari struktur *buoy* dan *buoy* dinyatakan aman dari keadaan ketika kapal menarik *buoy*. Selain itu, berdasarkan hasil inspeksi juga menunjukkan tidak terjadi deformasi pada *compartment buoy* akibat dari gaya tarik kapal terhadap *buoy*. Tabel 4.7 merupakan hasil *meshing sensitivity* pada analisis gaya tarik kapal terhadap *buoy*.

Tabel 4.7 *Meshing Sensitivity* pada Analisis Kapal yang Menarik *Buoy*

<i>Buoy Ditarik Kapal saat Tambat</i>		
<i>Meshing Type</i>	<i>Global Stress (Mpa)</i>	<i>Jumlah Element</i>
1	33,012	177909
2	31,737	179584
3	33,092	181440
4	32,404	183935
5	32,194	185097
6	32,271	190211
7	32,65	194868

Dapat dilihat pada hasil analisis *sensitivity* bahwa meski dilakukan *meshing* dengan berbagai ukuran, *global stress* yang dialami struktur apabila diberi gaya tarik kapal cenderung konstan. Pada tabel 4.7 nilai *stress* pada *buoy* sudah mulai konstan yang dimulai pada *meshing type* 4 dengan jumlah *meshing* sebanyak 183935 dan nilai *stress* 32,404 Mpa yang dapat dilihat pada gambar grafik dibawah ini. Sehingga, digunakan *meshing* antara *meshing type* 4 dan *type* 7 yaitu *type* 6 dengan jumlah *element* sebanyak 190211 dan nilai *stress* sebesar 32,271 Mpa Hal ini membuktikan bahwa dengan perubahan ukuran *meshing* tidak berpengaruh kepada besarnya tegangan pada *buoy* dan nilai 32,371 Mpa yang merupakan tegangan pada *buoy* apabila ditarik oleh kapal.



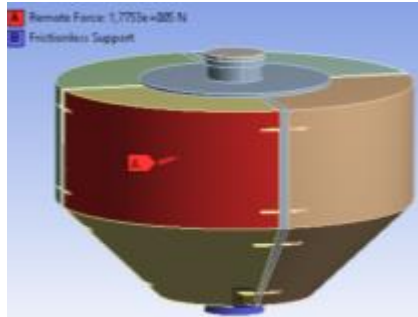
Gambar 4.14 Grafik *Meshing Sensitivity* pada *Buoy* Ditarik Kapal

4.4.3 Pemodelan ketika *Buoy* Ditabrak Kapal

Pada analisis ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan lokal pada *body compartment buoy*, hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mensimulasi kejadian dan mengetahui stress yang terjadi pada *buoy* akibat dari *buoy* ditabrak dengan kapal saat beroperasi.

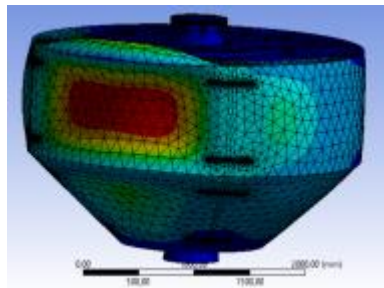
Langkah pengerjaan pada pemodelan ini yaitu seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya yaitu memasukkan properti *material*, lalu mengimport *model* desain 3D *buoy* dari *solidwork* ke ANSYS. Kemudian, *input boundary condition*, pada kasus ini dimodelkan *buoy* diberi gaya tabrakan kapal ke satu sisi *compartment buoy* karena berdasarkan hasil inspeksi *buoy* robek ke satu sisi *compartment*, diberi gaya sebesar 177,53 KN sebagai gaya tabrakan kapal terhadap *buoy*. Gaya diperoleh dari perhitungan energi tubrukan kapal.

Seperti pada gambar 4.14, wilayah A (1 sisi *compartment*) merupakan titik letak arah pembebanan, dengan gaya sebesar 177,53 KN sebagai gaya tabrakan kapal terhadap *buoy*. Wilayah B merupakan tumpuan *pinned support*, karena bagian bawah dari *buoy* ditahan oleh rantai atau *chain*. Pada analisis ini, diberi gaya tabrakan kapal hanya pada satu titik yaitu pada titik A saja, dan dilakukan *meshing sensitivity* ke beberapa ukuran *meshing* untuk mengetahui ukuran nilai konstan tanpa mengubah letak titik pembebanan.



Gambar 4.15 *Input* Gaya pada *Buoy* pada saat Kapal Menabrak *Buoy*

Kemudian dilakukan analisis *meshing* dari pemodelan ketika *buoy* ditabrak oleh kapal.



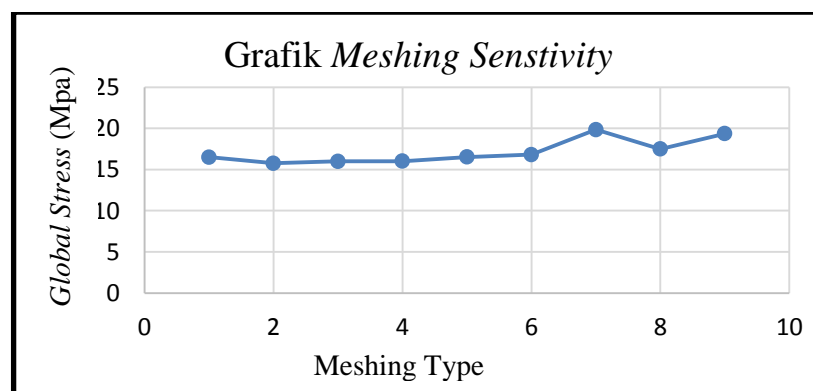
Gambar 4.16 Hasil Analisa *Meshing Sensitivity* pada *Buoy* Ditabrak Kapal

Hasil analisa *meshing* terjadi deformasi terhadap *body compartment* yang dapat dilihat pada gambar 4.14 yaitu sebesar 16, 53 Mpa. Hal ini terjadi karena struktur yang ditabrak berbahan LDPE dengan *yield strength* sebesar 10 MPa, karena *stress* yang terjadi 16,53 Mpa yang mana lebih besar daripada *yield strength* struktur maka *buoy* akan mengalami deformasi struktur. Dapat dilihat juga pada data hasil inspeksi terhadap struktur *buoy* yang menunjukkan 1 sisi *compartment buoy* robek, maka bisa dikaitkan bahwa badan *buoy* robek dikarenakan gaya tabrakan kapal kepada *buoy*. Table 4.4 merupakan hasil *meshing sensitivity* pada analisis tabrakan kapal dengan *buoy*.

Tabel 4.8 Hasil Analisa Meshing Sensitivity pada Analisis *Buoy* Ditabrak Kapal

<i>Buoy</i> Ditarik Kapal Saat Tambat		
<i>Meshing Type</i>	<i>Global Stress</i> (Mpa)	Jumlah <i>Element</i>
1	16,505	180413
2	15,764	183138
3	16	185945
4	16,025	187177
5	16,53	191983
6	16,817	200716
7	19,84	211226
8	17,492	231174
9	19,37	259798

Dapat dilihat pada hasil analisis *sensitivity* bahwa meski dilakukan *meshing* dengan berbagai ukuran, *global stress* yang dialami struktur apabila diberi gaya tabrakan kapal cenderung konstan. Pada tabel 4.4 nilai *stress* pada *buoy* sudah mulai konstan yang dimulai pada *meshing type* 2 dengan jumlah *meshing* sebanyak 183138 dan nilai *stress* 15,764 Mpa yang dapat dilihat pada gambar grafik dibawah ini. Sehingga, digunakan *meshing* antara *meshing type* 2 dan *type* 6 adalah *type* 5 dengan jumlah *element* sebanyak 191983 dan nilai *stress* sebesar 16,53 Mpa. Hal ini membuktikan bahwa dengan perubahan ukuran *meshing* tidak berpengaruh kepada besarnya tegangan pada *buoy* dan nilai 16,53 Mpa yang merupakan tegangan pada *buoy* apabila ditabrak oleh kapal.

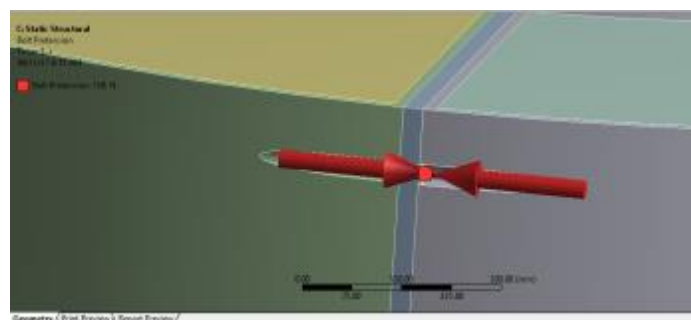


Gambar 4.17 Grafik *Meshing Sensitivity* pada *Buoy* yang Ditabrak Kapal

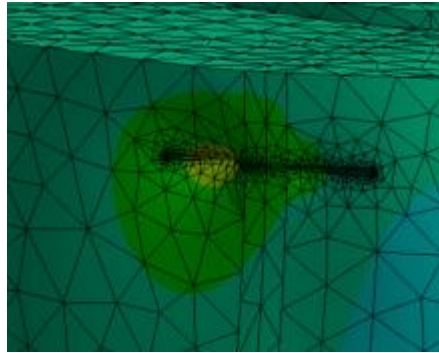
4.4.4 Pemodelan pada Mur Baut

Struktur badan *buoy* menggunakan material berupa *Low Density Polyethylene* (LDPE) yang memiliki *yield strength* sebesar 10 MPa. *Buoy* dengan struktur *frame* dan dilengkapi dengan 4 *body compartment*. Setiap struktur *frame* diapit oleh 2 *body compartment*, yang disatukan oleh mur baut. Namun, berdasarkan hasil inspeksi terhadap *buoy* pasca tenggelam, ada keretakan (*crack*) disekitar area mur baut tersebut. Maka hal itu menjadi pertimbangan, apakah dengan kondisi banyak *crack* itu merupakan salah satu penyebab tenggelamnya *buoy*. Maka dalam menyelesaikan masalah ini, dilakukan analisa menggunakan pemodelan *Finite Element Method* (FEM) dengan bantuan *software* Ansys.

Langkah pengerjaan pada pemodelan ini yaitu seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya yaitu memasukkan properti *material*, lalu mengimport model desain 3D *buoy* dari *solidwork* ke ANSYS. Kemudian input *boundary condition*, wilayah B merupakan titik letak arah pembebanan, dengan gaya sebesar 150 N sebagai gaya yang diberikan kepada mur baut untuk mengecek tegangan yg terjadi pada area mur baut. Pada analisis ini diberi gaya hanya pada satu titik yaitu pada titik B saja, dan dilakukan *meshing sensitivity* ke beberapa ukuran *meshing* untuk mengetahui ukuran nilai konstan tanpa mengubah letak titik pembebanan.



Gambar 4.18 *Input Boundary Conditions* pada Analisa Mur Baut



Gambar 4.19 Hasil *Meshing Sensitivity* pada Daerah Mur Baut

Kemudian dilakukan analisis *meshing* dari pemodelan tegangan mur baut *buoy*. Hasil analisisnya, terdapat tegangan sebesar $1,2326 \times 10^{-2}$ MPa yang mana tidak terjadi tegangan yang cukup besar terhadap struktur *buoy*. Karena mur baut pada *buoy* material baja A36 yang memiliki 250 MPa *yield strength*, sehingga jika gaya tarik kapal hanya memberikan tegangan sebesar $1,2326 \times 10^{-2}$ MPa maka tidak akan banyak mempengaruhi keadaan dari struktur dan *buoy* dinyatakan aman. Tetapi pada data hasil inspeksi terdapat *crack* di hampir setiap area mur baut, kondisi aman yang terjadi pada struktur maksudnya adalah tegangan pada mur baut tidak mengakibatkan deformasi pada struktur, karena juga *crack* yang terjadi sangat tipis dan perlahan-lahan air bisa masuk lewat *crack* tersebut.

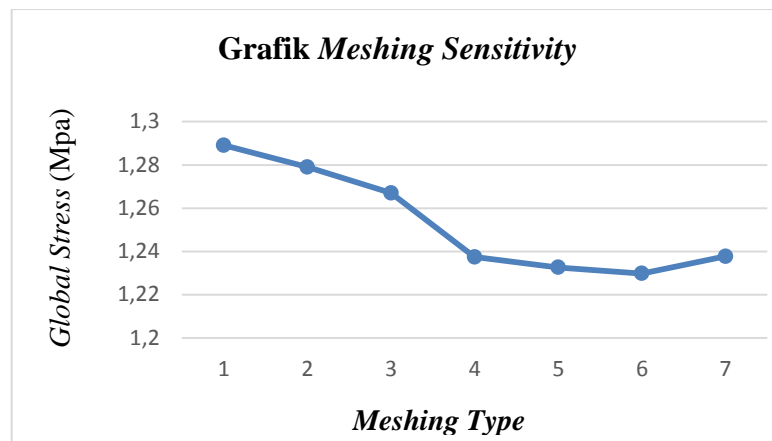
Table 4.9 merupakan hasil *meshing sensitivity* pada analisis daerah mur baut.

Table 4.9 Hasil *Meshing Sensitivity* pada Analisa Mur Baut

Mur Baut		
<i>Meshing Type</i>	<i>Global Stress (Mpa)</i> $\times 10^{-2}$	<i>Jumlah Element</i>
1	1,2891	180604
2	1,279	181771
3	1,267	184138
4	1,2374	185945
5	1,2326	187177
6	1,2298	190125
7	1,2377	191983

Dapat dilihat pada hasil analisis *sensitivity* bahwa meski dilakukan *meshing* dengan berbagai ukuran, *global stress* yang dialami struktur

apabila diberi tegangan cenderung konstan. Pada tabel 4.9 nilai *stress* pada *buoy* sudah mulai konstan yang dimulai pada *meshing type* 4 dengan jumlah *meshing* sebanyak 185945 dan nilai *stress* $1,2374 \times 10^{-2}$ Mpa yang dapat dilihat pada gambar grafik dibawah ini. Sehingga, digunakan *meshing* antara *meshing type* 4 dan *type* 7 yaitu *type* 5 dengan jumlah *element* sebanyak 187177 dan nilai *stress* sebesar $1,2326 \times 10^{-2}$ Mpa Hal ini membuktikan bahwa dengan perubahan ukuran *meshing* tidak berpengaruh kepada besarnya tegangan pada *buoy* dan nilai $1,2326 \times 10^{-2}$ Mpa yang merupakan tegangan pada *buoy* pada mur bautnya.



Gambar 4.20 Hasil *Meshing Sensitivity* pada Analisa Mur Baut

4.5 Analisa Perhitungan *Buoyancy*

Daya apung (*buoyancy*) adalah daya tekan ke atas dari fluida/cairan terhadap suatu benda yg sebagian atau seluruhnya dicelupkan di dalam fluida/ciran. Hal ini terjadi karena adanya reaksi dari fluida/cairan terhadap massa/berat benda yg tercelup ke dalam fluida. Daya apung sendiri merupakan kemampuan suatu benda yg berada pada fluida untuk mengapung dengan massanya.

Dengan acuan dari Hukum Archimedes salah satu syarat suatu benda dikatakan tenggelam apabila berat benda lebih besar daripada daya apungnya. Karena dalam kasus ini *buoy* ditemukan dalam keadaan tenggelam dengan 1 *compartment* yang robek dan beberapa area *bolt joint*

yang *crack*, maka perlu dilakukan perhitungan terhadap *buoyancy* dari *buoy*.

Tabel 4.10 *Buoyancy of Buoy*

<i>Buoyancy of Buoy</i>		
<i>Total Buoyancy</i>	11018,8	Kg
<i>Weight of Body Buoy</i>	2450	Kg
<i>Weight of Chain</i>	4540	Kg
<i>Reserve Buoyancy</i>	4028.8	kg

Berdasarkan data *buoy*, dalam keadaan normal *buoy* memiliki *buoyancy* sebesar 4028,8 kg atau 4,0288 ton. Kondisi ini merupakan perhitungan awal yang mana belum terjadi tabrakan kapal, robek pada *buoy*, *crack* di area *bolt joint* dan lain-lain.

Kemudian berdasarkan hasil inspeksi dan hasil analisis dari ANSYS terbukti bahwa ada tabrakan dari kapal yang menyebabkan robeknya 1 *compartment buoy* sehingga air laut masuk ke dalam *buoy*. Maka dilakukan perhitungan dimana *buoy* dimodelkan 1 *compartment* robek sehingga air laut masuk ke dalam 1 *compartment*.

Tabel 4.11 Perhitungan *Buoyancy* apabila 1 *Compartment* Kemasukan Air

W air laut yg masuk ke 1 <i>compartment</i>	=	1747,5	Kg
Fa – W	<	0	
4028.8 – 1747.5	<	0	
<u>Fa / <i>Buoyancy</i> tersisa</u>	=	2281.3	kg

apabila 1 *compartment* kemasukan air karena *buoy* yang robek, *buoyancy* yang tersisa sebesar 2,2813 ton. Dengan *buoyancy* tersisa yang dimiliki oleh *buoy*, maka *buoy* masih memiliki kemampuan untuk tetap terapung. Hal ini dapat ditarik kesimpulan bahwa ketika 1 *compartment* robek dan air laut masuk kedalam 1 *compartment* tersebut, tidak menyebabkan *buoy* tenggelam dan bukanlah hal utama yang menyebabkan *buoy* tenggelam.

Kemudian selanjutnya akan dilakukan perhitungan *buoyancy* dengan dimodelkan air laut yang masuk ke dalam *buoy* sebanyak 2 *compartment*. Hal ini terjadi karena selain karena tabrakan kapal, juga karena *crack* disekitar area *bolt joint*.

Tabel 4.12 Perhitungan *Buoyancy* apabila 2 *Compartment* Kemasukan Air

W air laut yg masuk ke 2 <i>compartment</i>	=	3495	Kg
Fa – W	<	0	
4028,8 – 3495	<	0	
Fa / <i>Buoyancy</i> tersisa	=	533,8	kg

Dapat dilihat pada tabel 4.8, *buoy* masih memiliki sisa *buoyancy* sebesar 533,8 kg apabila ada 2 *compartment* yang kemasukan air. Dengan *buoyancy* tersisa yang dimiliki oleh *buoy*, maka *buoy* masih memiliki kemampuan untuk tetap terapung. Hal ini dapat ditarik kesimpulan bahwa ada kemungkinan *buoy* akan tenggelam apabila berat air yang masuk ke dalam sebanyak 3 *compartment*, karena data hasil inspeksi menyatakan bahwa hampir disetiap area *bolt joint* mengalami *crack* yang bisa menjadi jalur air masuk ke dalam setiap *compartment*. Maka untuk memastikan hal tersebut, dilakukan perhitungan *buoyancy* dengan dimodelkan air laut yang masuk kedalam *buoy* sebanyak 3 *compartment*.

Tabel 4.13 Perhitungan *Buoyancy* apabila 3 *Compartment* Kemasukan Air

W air laut yg masuk ke 2 <i>compartment</i>	=	5242,5	Kg
Fa – W	<	0	
4028,8 – 5242,5	<	0	
Fa / <i>Buoyancy</i> tersisa	=	-1213,7	kg

Hasil perhitungan *buoyancy* apabila 3 *compartment* yang kemasukan air adalah *buoy* tidak memiliki *buoyancy* tersisa dan *buoy* pasti akan tenggelam, sedangkan dari hasil inspeksi hanya 1 *compartment* yang robek karena tabrakan kapal. Hal ini dikarenakan ada *compartment* lain yang robek atau *crack* sehingga menyebabkan air laut masuk ke dalam *compartment* yang lain.

Dan tabrakan kapal bukanlah faktor utama yang menyebabkan *buoy* tenggelam, tapi memang material yang digunakan untuk *buoy* kurang tepat, kurang kuat, material aus, proses fabrikasi material yg kurang baik atau hal – hal lain yang terjadi pada material.

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan beberapa analisa yang saya lakukan untuk menyelesaikan tugas akhir saya ini, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada analisa fishbone menghasilkan 6 faktor yang bisa menjadi penyebab mooring buoy tenggelam, dan ada 4 faktor yang bisa dilakukan analisa lebih lanjut yaitu :
 - a) *Buoyancy* yang tidak mencukupi
 - b) Kapal menabrak *buoy*
 - c) Area *bolt joint* terjadi *crack*
 - d) Ketika tambat, kapal menarik *buoy*
2. Dari hasil pemodelan *Finite Element Method* (FEM) didapatkan deformasi terbesar adalah ketika *buoy* ditabrak oleh kapal, yang menyebabkan air laut masuk ke dalam 1 *compartment*. *Buoy* akan tenggelam jika minimal 3 *compartment* kemasukan air laut. Permasalahan tenggelamnya *buoy* tidak diakibatkan karena tabrakan kapal. Akibat tabrakan kapal, *buoy* masih memiliki *bouyancy* sisa yang cukup. Permasalahan tenggelamnya *buoy* terjadi karena material yang digunakan *buoy* kurang sesuai. Sehingga timbul crack disekitar area mur baut yang menyebabkan air laut masuk ke lebih dari 3 *compartment* dan *buoy* kehilangan daya apung

5.2 SARAN

Berikut adalah saran yang bisa digunakan untuk penelitian selanjutnya dan untuk perusahaan yang memiliki *buoy* tersebut

- 1) analisa menggunakan *fishbone* dilakukan dengan dibobotkan kepada setiap pernyataan
- 2) Melakukan percobaan praktikum pada material
- 3) Struktur *frame buoy* masih bagus, sehingga perlu dilakukan penggantian material *body* dengan material yang lebih sesuai

(halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

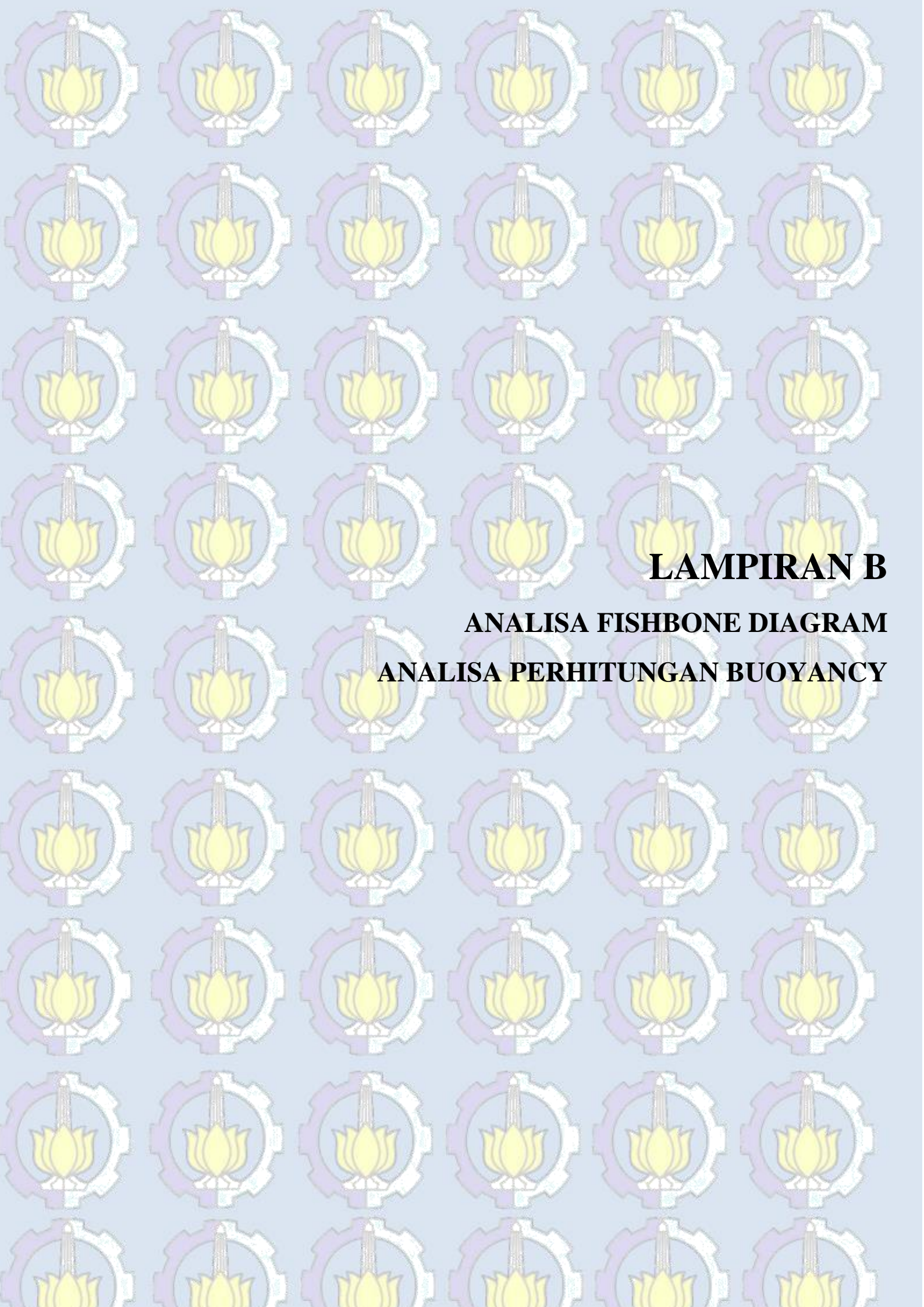
DAFTAR PUSTAKA

- AISC ASD 13th ED. 2016. "*Specification for structural Steel Buildings*" Chicago : American Institute Of Steel Construction
- API RP 2A (21st Edition), 2005. "*Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Load and Resistance Factor Design*". USA : American Petroleum Institute
- AWS D1.1, 2015. "*Structural Welding Code – Steel 23rd edition*", USA : American Welding Society
- UBS, 1997. "*uniform building code*"
- API RP 2SK. 1996. "*Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*", Washington, DC.
- American Institute of Steel Construction. 1989. "*Manual of Steel Construction – Allowable Stress Design 9th Edition*"
- Logan, D.L. 1986. "*A First Course in the Finite Element Methode*", PWS Kent Publishing.
- Madenci, Erdogan. 2006. "*The Finite Element Method And Applications in Engineering in Using ANSYS*", New York: Spinger Science, LLC.
- Popov, E. P., 1993, "*Mekanika Teknik*", Jakarta : Erlangga
- Murdjito, 2003. "*Konsep Perancangan Struktur Offshore*". Surabaya: ITS.
- Popov, E.P. 1984. "*Mechanics of Materials*". New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Rosyid, Daniel M. 2007. "*Pengantar Rekayasa Keandalan*". Surabaya: Airlangga University Press.
- Agatya, Resy, 2017. "*Analisa Struktur Mooring Buoy Akibat gaya yang ditimbulkan oleh rantai tambat*", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya

- Kusumawardhani, H.T.. 2011. ”*Analisa Resiko Pada Mooring Line SPM (Single Point Mooring) Akibat Beban Kelelahan*”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya.
- Sumiwi, A. D., 2009, “*Respon Dinamis Akibat Benturan Kapal Pada Anjungan Jacket*”, Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan; ITS, Surabaya.
- Fauziah, N. 2009. “*Aplikasi Fishbone Analysis Dalam Meningkatkan Kualitas Produksi Teh Pada PT Rumpun Sari Kemuning, Kabupaten Karanganyar*”, Tugas Akhir, Jurusan Sosial Ekonomi Pertanian, UNS, Surakarta
- Khodijah, S.L. 2015. “*Analisis Faktor-Faktor Penyebab Kerusakan Produk Pada Proses Cetak Produk*”, Tugas Akhir, Jurusan Ekonomi, UNDIP, Semarang
- Susatyo, Bayu. 2016, “*Analisa Risiko Kerusakan Pada Mooring System SPM 035 Pertamina TBBM Tuban,*” Jurnal Tugas Akhir, Teknik Kelautan, ITS, Surabaya
- Afriansyah, Rezha, 2013. “*perancangan Buoy Mooring System Untuk Loading – Unloading Aframax Tanker di Terminal Kilang Minyak Balongan*”, Jurnal Tugas Akhir, Teknik Kelautan, ITS, Surabaya
- Hendra E.S. 2011. “*Analisa Modifikasi Struktur Boatlanding Pada Fixed Offshore Platform Akibat Tubrukan Crewboat*”. Jurnal Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya
- Paranoan, I. H. 2016. “*As recieved visual inspection report of north belut mooring buoy,*” Jakarta : Medco E&P Natuna Ltd.
- Oktorisa, R. 2007. *Aplikasi Fishbone Analysis dalam Meningkatkan Kualitas Susu Murni pada Peternak Sapi Perah di KUD Getasan Kabupaten Semarang.* Universitas Sebelas Maret. Surakarta



LAMPIRAN A
DATA MOORING BUOY
DIMENSI BUOY
DATA HASIL INSPEKSI MOORING BUOY

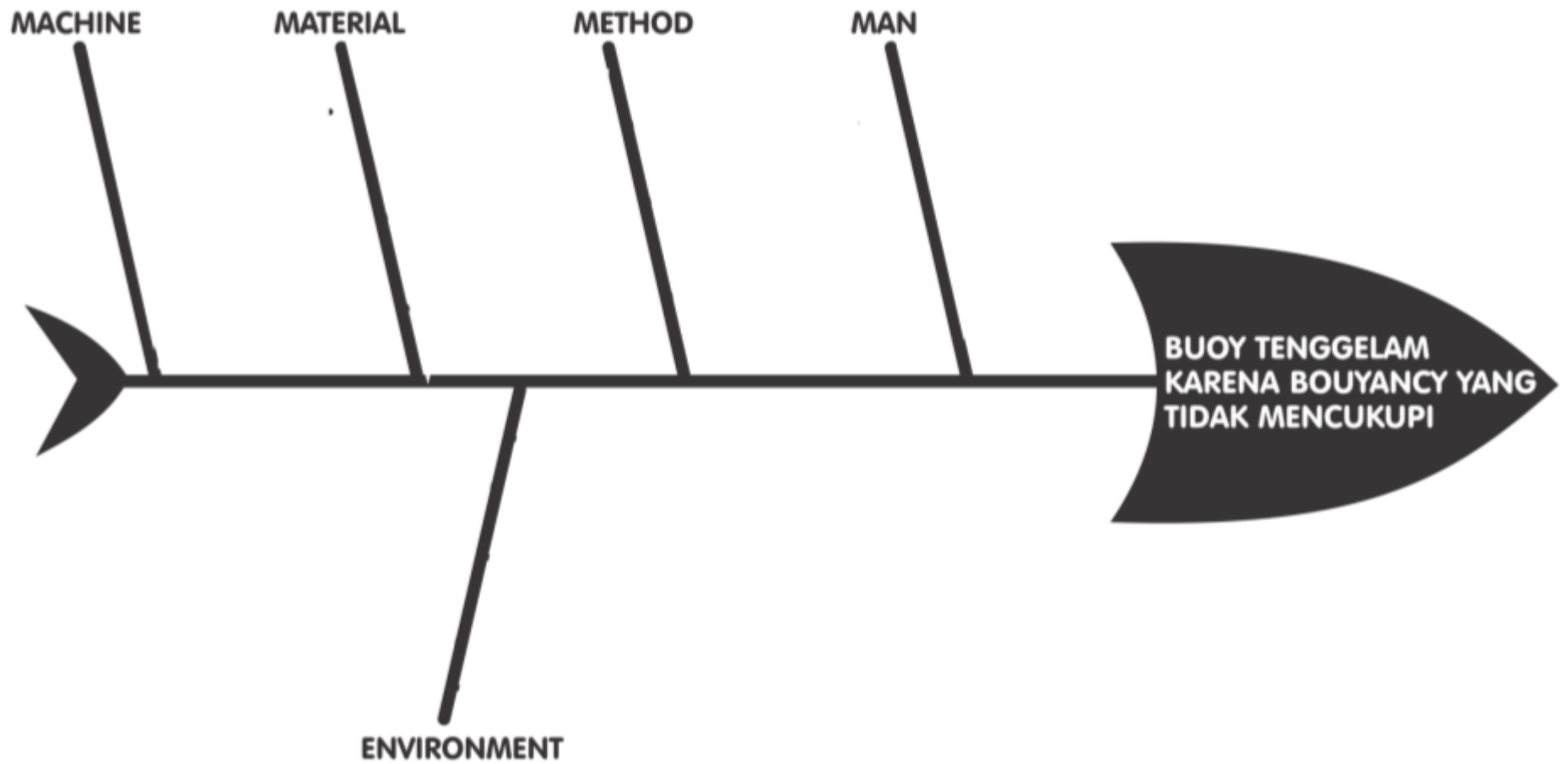


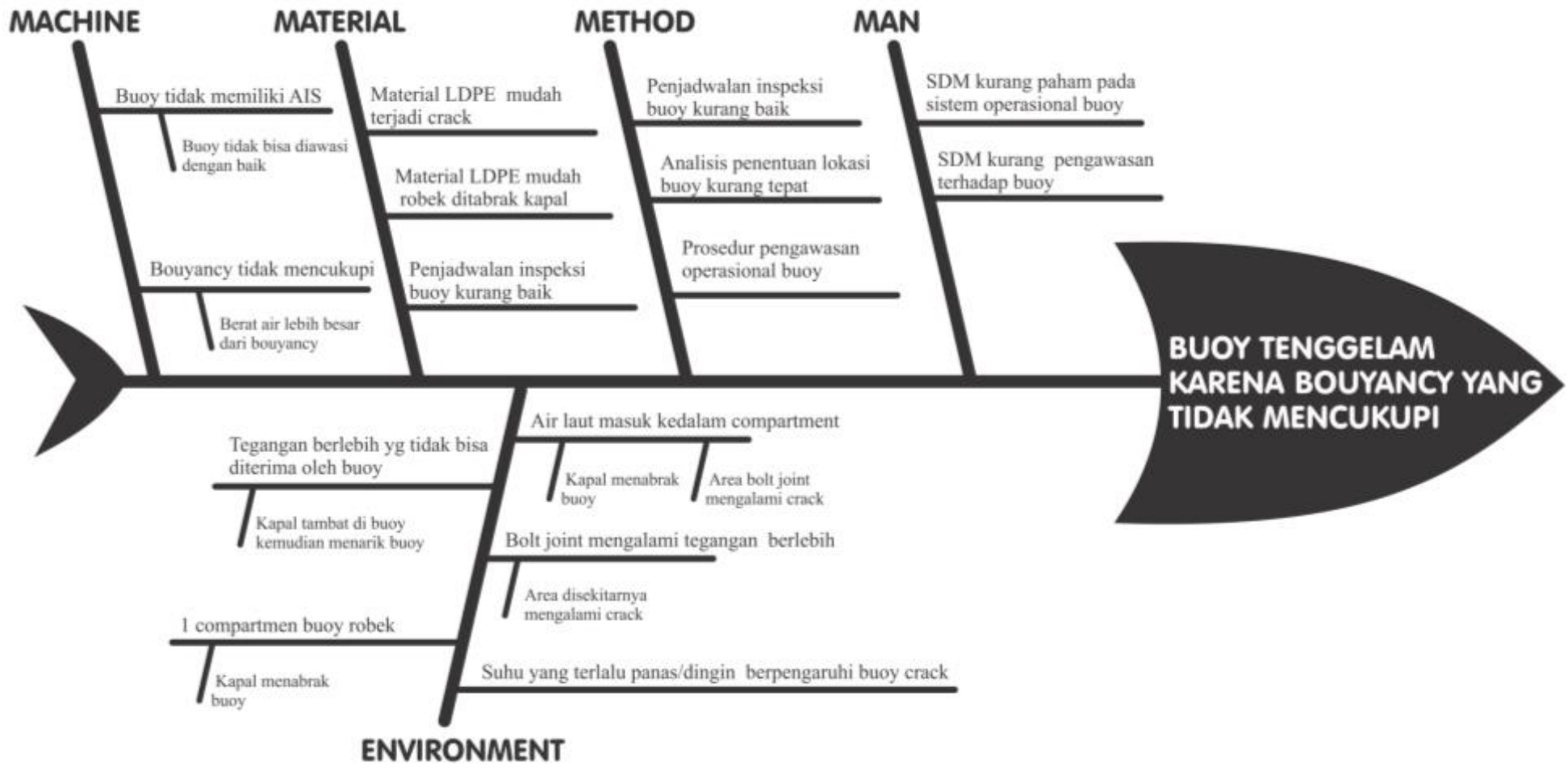
LAMPIRAN B

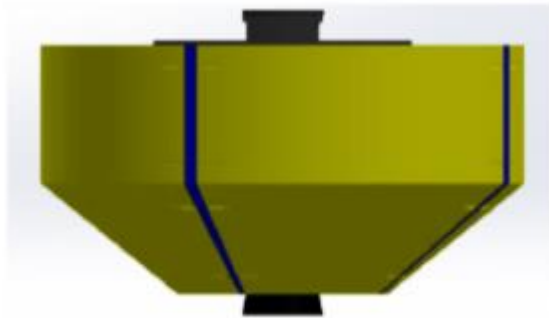
ANALISA FISHBONE DIAGRAM

ANALISA PERHITUNGAN BUOYANCY



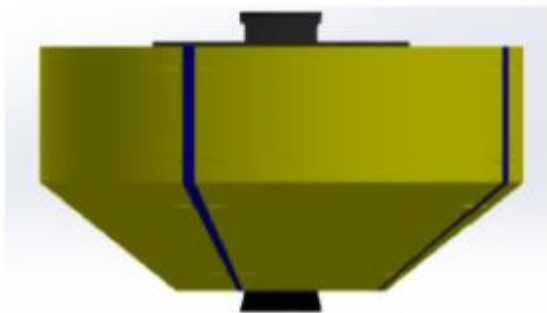






data buoy		
buoy diameter	=	3 m
buoy height	=	1,8 m
foam density	=	32 kg/m ³
sea water density	=	1025 kg/m ³
total bouyancy	=	11018,8 kg
weight of body buoy	=	2450 kg
weight of chain	=	4540 kg
reserve bouyancy	=	4028,8 kg
bouyancy terpakai	=	6990 kg

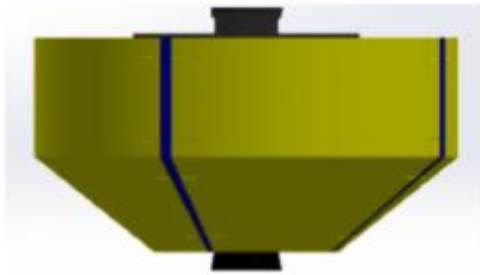
kondisi 1 (awal)



reserve bouyancy	=	4028,8	kg
Fa	=	$\rho \times \text{vol}$	
4028,8	=	1025 x vol	
vol	=	3,930536585	m ³
3,930536585	=	$\pi \times r \times r \times t$	
3,930536585	=	$22/7 \times 1.5 \times 1.5 \times t$	
t1	=	0,555833457	m
t2	=	1,244166543	m

t1= t tidak tercelup
t2= t tercelup air

kondisi 2 (buoy ditabrak kapal, badan buoy robek, air masuk)
air masuk ke 1 comp



$$\begin{aligned}
 w \text{ air yg masuk} &= 1747,5 && \text{(Cuma 1 comp)} \\
 fa - w &< 0 \\
 4028.8 - 1747.5 &< 0 \\
 \mathbf{fa} &= \mathbf{2281,3} && \text{kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Fa &= \rho \times \text{vol} \\
 2281,3 &= 1025 \times \text{vol} \\
 \text{vol} &= 2,225658537 && \text{m}^3 \\
 2,225658537 &= \pi \times r \times r \times t \\
 2,225658537 &= 22/7 \times 1.5 \times 1.5 \times t \\
 t1 &= 0,314739591 && \text{m} && t1= t \text{ tidak tercelup} \\
 t2 &= 0,241093865 && \text{m} && t2= t \text{ tercelup air}
 \end{aligned}$$

kondisi 3 = air masuk ke dalam 2 comp



$$\begin{aligned}
 w \text{ air yg masuk} &= 3495 && \text{(2 comp)} \\
 fa - w &< 0 \\
 4028.8 - 3495 &< 0 \\
 \mathbf{fa} &= \mathbf{533,8} && \text{kg} && \text{bouyancy tersisa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Fa &= \rho \times \text{vol} \\
 533,8 &= 1025 \times \text{vol} \\
 \text{vol} &= 0,520780488 && \text{m}^3 \\
 0,520780488 &= \pi \times r \times r \times t \\
 0,520780488 &= 22/7 \times 1.5 \times 1.5 \times t \\
 t1 &= 0,073645726 && \text{m} && t1= t \text{ tidak tercelup} \\
 t2 &= 0,241093865 && \text{m} && t2= t \text{ tercelup air}
 \end{aligned}$$

kondisi 4 = air masuk ke dalam 3 comp



$$w \text{ air yg masuk} = 5242,5 \quad (2 \text{ comp})$$

$$f_a - w < 0$$

$$4028.8 - 5242.5 < 0$$

$$f_a = -1213,7 \quad \text{kg} \quad \text{bouyancy tersisa}$$

$$F_a = \rho \times \text{vol}$$

$$-1213,7 = 1025 \times \text{vol}$$

$$\text{vol} = -1,184097561 \quad \text{m}^3$$

$$-1,184097561 = \pi \times r \times r \times t$$

$$-1,184097561 = 22/7 \times 1.5 \times 1.5 \times t$$

$$t_1 = -0,16744814 \quad \text{m}$$

t1= t tidak tercelup

$$t_2 = 0,16744814 \quad \text{m}$$

t2= t tercelup air