

**TUGAS AKHIR - M0184804**

**ANALISIS RISIKO PIPA BAWAH LAUT DENGAN METODE  
*FISHBONE DIAGRAM DAN FUZZY FAILURE MODE AND  
EFFECT ANALYSIS (FMEA)***

**FAZA IZZATI**

NRP 04311840000043

Dosen Pembimbing

**Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.**

NIP 19610702 198803 1 003

**Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D.**

NIP 19830806 200604 2 001

**Program Studi S-1 Teknik Kelautan**

Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - MO184804

**ANALISIS RISIKO PIPA BAWAH LAUT DENGAN METODE  
*FISHBONE DIAGRAM DAN FUZZY FAILURE MODE AND  
EFFECT ANALYSIS (FMEA)***

FAZA IZZATI

NRP 04311840000043

Dosen Pembimbing

**Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.**

NIP 19610702 198803 1 003

**Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D.**

NIP 19830806 200604 2 001

**Program Studi S-1 Teknik Kelautan**

Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



**FINAL PROJECT - MO184804**

**RISK ANALYSIS OF SUBSEA PIPELINES USING THE  
FISHBONE DIAGRAM AND FUZZY FAILURE MODE  
AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) METHOD**

**FAZA IZZATI**

NRP 04311840000043

Dosen Pembimbing

**Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.**

NIP 19610702 198803 1 003

**Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D.**

NIP 19830806 200604 2 001

**Undergraduate Study Program of Ocean Engineering**

Department of Ocean Engineering

Faculty of Marine Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

## **LEMBAR PENGESAHAN**

### **ANALISIS RISIKO PIPA BAWAH LAUT DENGAN METODE FISHBONE DIAGRAM DAN FUZZY FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)**

#### **TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik di  
Program Studi Teknik Kelautan  
Departemen Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **FAZA IZZATI**

NRP. 04311840000043

Disetujui oleh Tim Pengaji Proposal Tugas Akhir:

- 
1. Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D ..... *Daniel M. Rosyid* ..... (Pembimbing I)
2. Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D ..... *Silvianita* ..... (Pembimbing II)
3. Rudi Waluyo Prastianto, S.T., M.T., Dr.Eng ..... *Rudi Waluyo Prastianto* ..... (Pengaji I)
4. Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M. Eng. ..... *Kriyo Sambodho* ..... (Pengaji II)
5. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. ..... *Yeyes Mulyadi* ..... (Pengaji III)

**SURABAYA**

**JULI, 2022**

## APPROVAL SHEET

### RISK ANALYSIS OF SUBSEA PIPELINES USING THE FISHBONE DIAGRAM AND FUZZY FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) METHOD

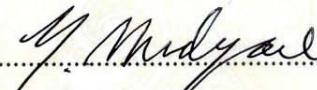
#### FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree in Ocean Engineering at  
Undergraduate Study Program of Ocean Engineering  
Department of Ocean Engineering  
Faculty of Marine Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: FAZA IZZATI

NRP. 04311840000043

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D .....  (Advisor I)
2. Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D .....  (Advisor II)
3. Rudi Waluyo Prastianto, S.T., M.T., Dr.Eng .....  (Examiner I)
4. Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M. Eng .....  (Examiner II)
5. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc .....  (Examiner III)

SURABAYA

JULY, 2022

## **PERNYATAAN ORISINALITAS**

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Faza Izzati / 04311840000043

Departemen : Teknik Kelautan

Dosen pembimbing / NIP : Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. / 196107021988031003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Risiko Pipa Bawah Laut dengan Metode *Fishbone Diagram* dan *Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

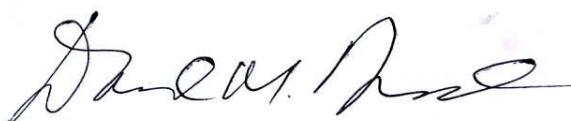
Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing

Mahasiswa,



(Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.)

(Faza Izzati)

NIP. 196107021988031003

NRP. 04311840000043

## **STATEMENT OF ORIGINALITY**

The undersigned below:

Name of student / NRP : Faza Izzati / 04311840000043  
Department : Ocean Engineering  
Advisor / NIP : Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. / 196107021988031003

Hereby declare that the Final Project with the title of “Risk Analysis of Subsea Pipelines Using the Fishbone Diagram and Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Method” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, July 2022

Acknowledged

Advisor

Student,



(Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.)

(Faza Izzati)

NIP. 196107021988031003

NRP. 04311840000043

# **ANALISIS RISIKO PIPA BAWAH LAUT DENGAN METODE *FISHBONE DIAGRAM DAN FUZZY FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)***

**Nama ./ NRP** : **Faza Izzati / 04311840000043**  
**Departemen** : **Teknik Kelautan FTK - ITS**  
**Dosen Pembimbing** : **Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.**  
**Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D.**

## **ABSTRAK**

Pipa bawah laut merupakan salah satu sarana transportasi minyak mentah, gas alam, dan fluida yang paling sering digunakan. Namun karena media yang dilewati pipa cukup beragam dalam masa operasinya, pipa bawah laut tidak dapat terhindar dari berbagai potensi bahaya dan risiko. Beberapa faktor yang dapat menimbulkan risiko pada pipa berasal dari efek eksternal, penurunan atau penarikan jangkar kapal, kapal kandas, dan kapal tenggelam. Manajemen risiko merupakan suatu hal yang cukup krusial dalam usaha menjaga keselamatan pipa. Kegagalan pada pipa dapat dihindari dengan melakukan analisis risiko. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat risiko yang terjadi pada pipa serta mempersiapkan saran pengendalian risiko. *Pipeline* yang dianalisis merupakan pipa bawah laut yang berlokasi di Lapangan Terang Sirasun Batur (TSB). Diagram *Fishbone* dipilih untuk mengidentifikasi risiko pipa tersebut. Penilaian risiko dilakukan menggunakan dua metode yaitu *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) tradisional dan fuzzy FMEA. Dalam analisis fuzzy FMEA diterapkan dua macam dasar aturan *output* fuzzy yang berbeda. Dari hasil perhitungan dengan FMEA tradisional didapatkan bahwa RPN tertinggi sebesar 144 terdapat pada mode kegagalan gangguan dari luar. Sedangkan dengan fuzzy FMEA, RPN tertinggi sebesar 9 dan 6 terletak pada mode kegagalan bencana alam. Matriks risiko disusun untuk menentukan posisi zona kegagalan. Ditemukan bahwa terdapat 10 mode kegagalan yang terletak pada zona ALARP dan 3 lainnya termasuk dalam kategori risiko yang dapat diterima.

Kata kunci : analisis risiko, *failure mode and effect analysis*, *fuzzy FMEA*, pipa bawah laut.

# **RISK ANALYSIS OF SUBSEA PIPELINES USING THE FISHBONE DIAGRAM AND FUZZY FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)**

**Name./ NRP** : **Faza Izzati / 04311840000043**  
**Department** : **Ocean Engineering**  
**Advisor** : **Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.**  
**Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D.**

## **ABSTRACT**

Subsea pipelines are one of the most frequently used means of transportation of crude oil, natural gas, and fluids. However, because the media passed by the pipeline is quite diverse in its operating life, the pipeline cannot be avoided from various potential dangers and risks. Some of the factors that can pose a risk to the pipeline come from external effects, the decrease or withdrawal of the ship's anchor, the ship ran aground, and the ship sank. Risk management is quite crucial in an effort to maintain pipeline safety. Failures in the pipeline can be avoided by conducting a risk analysis. This study aims to determine the level of risk that occurs in the pipeline and prepare risk control advice. The pipeline analyzed is an subsea pipeline located in the Terang Sirasun Batur Field (TSB). The Fishbone diagram was selected to identify factors and causes of subsea pipeline damage. Risk assessment is carried out using two methods, namely Traditional Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Fuzzy FMEA. In the Fuzzy FMEA analysis, two different fuzzy output rules are applied. From the results of calculations with traditional FMEA, it was found that the highest RPN of 144 was found in the failure mode of outside interference. Meanwhile, with fuzzy FMEA, the highest RPN of 9 and 6 lies in the failure mode of natural disasters. A risk matrix is compiled to determine the position of the failure zone. It was found that 10 failure modes lie in the ALARP zone and the other 3 are considered as acceptable risk.

Keyword : failure mode and effect analysis, fuzzy FMEA, risk analysis, subsea pipeline.

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala karunia dan limpahan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**ANALISIS RISIKO PIPA BAWAH LAUT DENGAN METODE FISHBONE DIAGRAM DAN FUZZY FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)**”.

Penyusunan tugas akhir ini dilakukan sebagai syarat untuk menyelesaikan studi sarjana (S-1) Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Tugas akhir ini membahas mengenai risiko pipa bawah laut yang terletak di Lapangan Terang Sirasun Batur. Metode yang dipilih dalam analisis risiko ini adalah metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) Tradisional dan Fuzzy FMEA.

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa kekurangan tidak dapat dihindari dan kesempurnaan hanyalah milik Allah SWT. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari para pembaca. Semoga dengan penelitian ini, tugas akhir saya dapat bermanfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa yang mengambil topik mengenai risiko, manajemen, dan pipa bawah laut.

Wabilahi taufiq wal hidayah.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2022



Faza Izzati

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
APPROVAL SHEET.....	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	v
STATEMENT OF ORIGINALITY .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang.....	1
1.2    Rumusan Masalah.....	2
1.3    Tujuan .....	3
1.4    Manfaat .....	3
1.5    Batasan Masalah .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1    Tinjauan Pustaka.....	5
2.2    Dasar Teori .....	6
2.2.1    Pipa Bawah Laut.....	6
2.2.2    Risiko.....	7
2.2.3    Manajemen Integritas .....	7
2.2.4    Manajemen Risiko.....	8
2.2.5    Identifikasi Bahaya .....	9
2.2.6 <i>Fishbone Diagram</i> .....	11
2.2.7    Penilaian Risiko.....	12
2.2.8    Teori Fuzzy.....	13
2.2.9 <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> .....	14
BAB III METODOLOGI .....	21
3.1    Diagram Alir Penelitian.....	21
3.2    Prosedur Penelitian .....	23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1    Pengumpulan Data.....	25

4.2	Identifikasi Risiko .....	26
4.2.1	Risiko pada Pipa .....	26
4.3	Diagram <i>Fishbone</i> .....	29
4.4	Hasil Identifikasi Risiko .....	32
4.5	Analisis FMEA Tradisional .....	35
4.5.1	Perhitungan Risiko .....	35
4.5.2	Kuisisioner FMEA Tradisional .....	37
4.5.3	Perhitungan <i>Index</i> .....	40
4.5.4	Perhitungan <i>Risk Priority Number</i> .....	43
4.6	Analisis Fuzzy FMEA .....	44
4.6.1	<i>Running Matlab</i> 1 .....	45
4.6.2	<i>Running Matlab</i> 2 .....	49
4.6.3	Perbedaan Hasil FMEA tradisional dan Fuzzy FMEA .....	52
4.7	Perencanaan Tindakan Pengendalian Risiko .....	53
4.7.1	Matriks Risiko .....	53
4.7.2	Saran Pengendalian Risiko .....	54
	BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	57
5.1	Kesimpulan .....	57
5.2	Saran .....	57
	DAFTAR PUSTAKA.....	59
	LAMPIRAN .....	61
	UCAPAN TERIMA KASIH .....	71
	BIODATA PENULIS.....	73

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Peta Lokasi Lapangan Terang Sirasun Batur .....	2
<b>Gambar 2.1</b> Sistem Manajemen Integritas (DNV-RP-F116, 2015).....	7
<b>Gambar 2.2</b> Proses Manajemen Risiko (IEC, 2019).....	9
<b>Gambar 2.3</b> Elemen utama dalam diagram sebab-akibat (Rausand & Haugen, 2020).....	11
<b>Gambar 2.4</b> <i>Risk analysis, evaluation, assessment, and management</i> (Rausand & Haugen, 2020).....	12
<b>Gambar 2.5</b> Contoh matriks risiko (DNV-RP-F107, 2017).....	13
<b>Gambar 2.6</b> Contoh hubungan antara istilah dan peringkat (Zimmermann, 2001) .....	14
<b>Gambar 2.7</b> Perbedaan antara FMEA tradisional dengan fuzzy FMEA (Tay & Lim, 2006) .	18
<b>Gambar 2.8</b> Model fuzzy FMEA (Kumar <i>et al.</i> , 2018).....	19
<b>Gambar 2.9</b> Fungsi keanggotaan segitiga fuzzy (Kumar <i>et al.</i> , 2018).....	19
<b>Gambar 2.10</b> Dasar aturan fuzzy (Kumar <i>et al.</i> , 2018).....	20
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir pengerjaan tugas akhir .....	21
<b>Gambar 3.2</b> Diagram alir FMEA tradisional dan fuzzy FMEA.....	22
<b>Gambar 4.1</b> Lokasi <i>production flowlines</i> pada lapangan TSB.....	26
<b>Gambar 4.2</b> Kerusakan <i>coating</i> pipa (Singh, 2014).....	27
<b>Gambar 4.3</b> Tanah longsor bawah laut .....	27
<b>Gambar 4.4</b> Fenomena <i>free span</i> (El-Reedy, 2020).....	28
<b>Gambar 4.5</b> <i>Remotely operated vehicle</i> .....	29
<b>Gambar 4.6</b> Diagram <i>fishbone</i> .....	30
<b>Gambar 4.7</b> Struktur fuzzy <i>inference system</i> .....	45
<b>Gambar 4.8</b> <i>Input</i> variabel <i>occurrence</i> .....	46
<b>Gambar 4.9</b> <i>Output</i> variabel F-RPN .....	46
<b>Gambar 4.10</b> Dasar aturan fuzzy 1.....	47
<b>Gambar 4.11</b> <i>Output</i> F-RPN <i>running</i> 1.....	48
<b>Gambar 4.12</b> Dasar aturan fuzzy 2.....	50
<b>Gambar 4.13</b> <i>Output</i> F-RPN <i>running</i> 2.....	50
<b>Gambar 4.14</b> Matriks risiko .....	53

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Possible external hazards (DNV-RP-F107, 2017) .....	9
<b>Tabel 2.2</b> Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk <i>occurrence</i> (O).....	16
<b>Tabel 2.3</b> Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk <i>severity</i> (S).....	17
<b>Tabel 2.4</b> Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk <i>detection</i> (D).....	17
<b>Tabel 4.1</b> Data material pipa.....	25
<b>Tabel 4.2</b> Data <i>metocean</i> .....	25
<b>Tabel 4.3</b> Faktor penyebab kerusakan pipa bawah laut .....	32
<b>Tabel 4.4</b> Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk <i>occurrence</i> (O).....	35
<b>Tabel 4.5</b> Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk <i>severity</i> (S).....	36
<b>Tabel 4.6</b> Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk <i>detection</i> (D).....	36
<b>Tabel 4.7</b> Biodata responden kuisioner.....	37
<b>Tabel 4.8</b> Hasil kuisioner responden 1 .....	37
<b>Tabel 4.9</b> Hasil kuisioner responden 2.....	38
<b>Tabel 4.10</b> Hasil kuisioner responden 3 .....	39
<b>Tabel 4.11</b> Hasil kuisioner responden 4.....	39
<b>Tabel 4.12</b> Hasil kuisioner responden 5 .....	40
<b>Tabel 4.13</b> Hasil perhitungan <i>index</i> .....	41
<b>Tabel 4.14</b> Panduan angka <i>index</i> (Al-Hammad, 2003).....	42
<b>Tabel 4.15</b> Hasil penggolongan rating .....	43
<b>Tabel 4.16</b> Hasil perhitungan RPN FMEA .....	44
<b>Tabel 4.17</b> Konversi dari bilangan fuzzy .....	45
<b>Tabel 4.18</b> Hasil fuzzy RPN 1 .....	49
<b>Tabel 4.19</b> Hasil fuzzy RPN 2 .....	51
<b>Tabel 4.20</b> Perbedaan hasil FMEA tradisional dan fuzzy FMEA .....	52
<b>Tabel 4.21</b> Penentuan zona matriks risiko .....	53

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan sehari-hari, manusia memakai sumber energi untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Diantara banyaknya sumber energi yang tersedia di alam ini, minyak dan gas bumi merupakan sumber energi yang banyak digunakan. Penggunaan migas masih memegang peranan penting dalam kehidupan sehari-hari seiring dengan perencanaan dan pengembangan energi terbarukan yang kerap dilakukan. Menurut Direktorat Ekonomi Kedeputian Kajian dan Advokasi Komisi Pengawas Persaingan Usaha (2019) kegiatan industri migas secara umum terdiri dari lima kegiatan pokok yang dapat dibagi menjadi dua, yaitu: kegiatan hulu (*upstream*) dan kegiatan hilir (*downstream*). Kegiatan usaha hulu migas meliputi kegiatan eksplorasi, pengembangan lapangan migas, dan produksi/eksploitasi. Sedangkan kegiatan usaha hilir terdiri dari kegiatan pengolahan, transportasi, dan pemasaran.

*Pipeline* merupakan media tertutup yang dirancang agar dapat tahan terhadap bahaya dari internal dan eksternal pipa sesuai *code* yang dipakai. Media yang dilewati pipa pun cukup beragam mengikuti kontur permukaan bumi, entah itu di permukaan atau dasar laut. Kelebihan penggunaan *pipeline* sebagai sarana transportasi dan distribusi sumber daya yaitu dapat menyalurkan dengan lebih cepat dan efisien sesuai karakter fluida dan jarak tertentu. Oleh karena itu, *pipeline* banyak digunakan untuk pengembangan kegiatan eksplorasi dan eksplorasi minyak dan gas di lepas pantai. Termasuk untuk distribusi hidrokarbon dari ladang atau sumur menuju ke stasiun penerima dan stasiun produksi (Pradana, 2016).

Seiring dengan berkembangnya kegiatan eksplorasi, telah banyak proyek eksplorasi yang melibatkan pipa bawah laut. Hal ini mengakibatkan peningkatan jumlah pipa bawah laut yang dipasang di berbagai belahan dunia, tak terkecuali di Indonesia. Panjang pipa yang dipasang pada dasar laut umumnya bukan dalam jarak yang pendek. Contohnya pada *East Java Gas Pipeline* (EJGP) milik PT Pertamina Gas yang merupakan pipa gas lepas pantai terpanjang di Indonesia. Pipa ini ditugaskan sejak tahun 1993 untuk mengangkut gas penerima dari *Central Processing Plant* di Pulau Pagerungan, Kepulauan Kangean melalui Selat Madura dan darat melalui Porong Sidoarjo ke Surabaya (Erfando *et al.*, 2019).

Penilaian risiko sangat penting untuk dilakukan dalam menilai kemungkinan kejadian yang dapat mengganggu keamanan, keselamatan, keandalan jalur perpipaan, dan lingkungannya yang berada pada jalur pipa untuk melindungi aset perusahaan serta memudahkan perusahaan melakukan manajemen risiko (Pradana, 2016). Penilaian risiko pada pipa penyulur gas *onshore* area Gresik dari Legundo – Cerme menggunakan metode *indexing model* telah dilakukan oleh Jamil (2016). Hasil penelitian ini menunjukkan jalur pipa gas berada pada skor terendah, kelas risiko *very low chance*.

Pipa bawah laut yang dijadikan objek penelitian ini merupakan *infield production flowlines* dengan diameter 20 inchi berlokasi di Lapangan Terang Sirasun Batur (TSB). Pada Gambar 1.1 terlihat lapangan TSB yang terletak di lepas pantai kurang lebih 100 km sebelah utara Bali dan 250 km sebelah timur Surabaya di Laut Bali Utara, Indonesia. Lapangan gas ini mulai beroperasi pada tahun 2012 dan merupakan bagian dari kompleks yang terdiri dari lapangan gas Terang, Sirasun dan Batur.



**Gambar 1.1** Peta Lokasi Lapangan Terang Sirasun Batur

Dalam menganalisis risiko, identifikasi risiko merupakan tahapan yang tidak kalah penting dari penilaian risiko. Terdapat beberapa macam metode untuk mengidentifikasi risiko dari suatu peristiwa tertentu, seperti *Hazard Identification*, *Job Safety Analysis*, dan *Hazard and Operability* (HAZOP). Salah satu metode identifikasi risiko yang dapat dipaparkan dalam bentuk gambar/visual adalah *fishbone diagaram*. Dengan menggunakan diagram sebab dan akibat ini, penyebab kegagalan dapat disusun berdasarkan tingkat kepentingannya.

Berbagai macam metode penilaian risiko telah banyak digunakan, diantaranya yaitu *Fault Tree Analysis* (FTA), *Event Tree Analysis* (ETA), dan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). FMEA merupakan metode *risk assessment* yang lebih fokus pada kegagalan dan menggunakan skala-skala tertentu dalam melakukan penilaian risiko. Terdapat beberapa jenis FMEA diantaranya yaitu tradisional, probabilistik, dan fuzzy FMEA. Walaupun metode FMEA tradisional kerap digunakan karena dianggap akurat, Kumru dan Kumru (2013) telah menemukan beberapa kelemahan.

Pendekatan FMEA berbasis fuzzy pun dikembangkan untuk mengatasi kelemahan tersebut. Analisis risiko yang biasa dilakukan hanya menjelaskan ketidakpastian secara statistik. Maka, untuk menjelaskan ketidakjelasan yang tidak bisa dijelaskan secara statistik diperlukan logika fuzzy. Tugas Akhir ini akan menganalisis risiko yang terjadi pada pipa bawah laut dengan menggunakan dua metode yaitu *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) tradisional dan fuzzy FMEA. Dengan adanya analisis risiko terhadap pipa bawah laut ini diharapkan dapat berguna untuk berbagai pihak.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Apa saja faktor penyebab dan dampak dari kerusakan yang dapat terjadi pada pipa bawah laut di Lapangan Terang Sirasun Batur?
2. Bagaimana hasil analisis risiko menggunakan FMEA tradisional?
3. Bagaimana hasil analisis risiko menggunakan fuzzy FMEA?

### **1.3 Tujuan**

Dari permasalahan di atas, tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui faktor penyebab dan dampak dari kerusakan yang dapat terjadi pada pipa bawah laut di Lapangan Terang Sirasun Batur.
2. Analisis risiko untuk mendapatkan *Risk Priority Number* (RPN) dan peringkat prioritas risiko.
3. Mendapatkan *Fuzzy Risk Priority Number* (F-RPN) untuk perencanaan tindakan pengendalian risiko.

### **1.4 Manfaat**

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain:

1. Dapat mengetahui penyebab dan dampak dari kerusakan yang dapat terjadi pada pipa objek penelitian.
2. Dapat mengidentifikasi risiko pipa objek penelitian serta memperoleh *Risk Priority Number* (RPN) dan Fuzzy RPN dengan dua dasar aturan keputusan yang berbeda.
3. Diharapkan data-data dan solusi yang didapat memberikan banyak manfaat dan menjadi referensi tentang studi risiko pada proyek pipa bawah laut kedepannya.

### **1.5 Batasan Masalah**

Pembatasan masalah ini digunakan agar penelitian dapat terfokus dan tertata guna menghindari pembahasan yang melebar, maka permasalahan tersebut akan dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Pipa yang dianalisis merupakan dua buah *infield production flowlines* berdiameter 20 inchi dari *Manifold Riser Base* ke *Terang Manifold*.
2. Risiko yang diteliti hanya kemungkinan risiko kegagalan selama masa operasi pipa.
3. Data yang digunakan merupakan data hasil survei dan wawancara dengan responden para ahli dalam perusahaan terkait.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Sejak tahun 1987 pencarian minyak dan gas di wilayah lepas pantai telah dilakukan secara insentif seiring dengan permintaan manusia akan produk minyak bumi terus meningkat. Selama praktik operasi pipa yang sudah berjalan selama satu setengah abad, industri minyak bumi telah membuktikan bahwa pipa merupakan sarana paling ekonomis untuk minyak mentah, gas alam, dan produk lainnya (Guo *et al.*, 2005). Namun, tidak dapat dihindarkan bahwa pengangkutan produk melalui pipa merupakan risiko karena ada kemungkinan pipa gagal, mengeluarkan isinya, dan menyebabkan kerusakan (Muhlbauer, 2004).

Menurut Marcello (2019) manajemen risiko sendiri didefinisikan sebagai suatu proses mengidentifikasi, mengukur risiko serta membentuk strategi untuk mencegah atau memitigasi dampak dan kerugian yang tidak diinginkan. IEC 31010 (2019) menekankan bahwa manajemen risiko harus berlabuh di manajemen tingkat atas organisasi dan juga bahwa manajemen risiko perlu diintegrasikan erat dengan operasi normal dan manajemen organisasi.

Penilaian risiko pada pipa berdiameter 12 inch penyalur gas *onshore* area Gresik dari Legundo – Cerme menggunakan metode *indexing model* telah dilakukan oleh Jamil (2016). Penulis menentukan pembagian kelas lokasi terlebih dahulu untuk menentukan besarnya nilai faktor desain pada perhitungan dan analisis. Parameter yang digunakan adalah kerusakan pihak ketiga, korosi, desain, dan kesalahan operasional. Perhitungan indeks dilakukan dengan menilai setiap segmen *pipeline*. Setelah dilakukan berbagai perhitungan dengan metode yang dikembangkan Muhlbauer ini, didapatkan bahwa *risk score* relative yang diperoleh adalah 9,87. Karena jalur pipa gas yang diteliti berada pada kelas risiko *very low chance*, maka mitigasi risiko hanya dilakukan pada kesalahan pihak ketiga.

Barends *et al.*, (2012) melakukan analisis risiko validasi analitik dengan modifikasi probabilistik FMEA. Metode FMEA tradisional memiliki kekurangan di mana frekuensi terjadinya mode kegagalan tidak terdeteksi masih diperkirakan secara prioritas risiko. Maka, penulis memutuskan untuk modifikasi FMEA menjadi metode probabilistik FMEA. Metode ini dianggap tidak memakan waktu yang lebih lama daripada FMEA tradisional.

Penelitian yang menerapkan metode probabilistik FMEA juga telah dilakukan oleh Filihan (2016). Penelitian tersebut bertujuan untuk menganalisis risiko kerusakan *offshore pipeline* pada salah satu pipa yang menyalurkan gas dari pulau Sumatera menuju Jawa. Dari hasil perhitungan RPN didapatkan lima risiko yaitu *general metal loss, mechanical overstress, impact, fatigue, and over-pressurisation*. Namun belum ada perhitungan lebih lanjut untuk dapat mengurangi kegagalan pada mode kegagalan.

Maradika (2019) menggunakan pendekatan fuzzy FMEA untuk menilai risiko yang terjadi pada pipa penyalur produksi minyak dari anjungan yang terbentang dari Kepulauan Seribu sampai utara Indramayu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi operasi terdapat 14 risiko kegagalan yang berpotensi untuk terjadinya kegagalan pipa. Perhitungan RPN juga dilakukan dan mode kegagalan *buckling* serta kejatuhan jangkar mendapatkan RPN yang sama yaitu 150.

Penggunaan metode Diagram *Fishbone* untuk mengidentifikasi faktor penyebab dari kerusakan pipa bawah laut telah dilakukan oleh Inzaghi (2020). Ditemukan 24 penyebab-penyebab kegagalan yang dikelompokkan menjadi 16 mode kegagalan serta dikelompokkan

menjadi 4 kategori utama. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan *Safety Case Document* sebagai bentuk manajemen risiko kerusakan pada *offshore pipelines*. Metode fuzzy FMEA digunakan untuk mendapatkan Fuzzy Risk Priority Number.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Pipa Bawah Laut

Hidrokarbon seperti gas, minyak, air, dan pasir yang berasal dari sumur dipisahkan menjadi dua aliran di *platform* (minyak dan gas), dan kemudian dikirimkan ke fasilitas darat. Menurut El-Reedy (2020) dalam bukunya, pipa bawah laut dapat ditempatkan dalam dua kategori:

#### 1. *Flowlines*

- a. Dari kepala sumur atau *manifold* ke *platform*;
- b. Membawa tiga fase minyak, gas, dan air;
- c. Panjang pendek hingga 16 km;
- d. Diameter kecil, mulai dari 6 sampai 12 in.

#### 2. *Trunk pipeline*

- a. Dari *platform* ke darat;
- b. Membawa satu fase minyak atau gas;
- c. Panjangnya panjang, hingga ratusan kilometer;
- d. Diameter besar yang digunakan, hingga 48 inci;
- e. *Rigid lines* diletakkan dengan *S-laying*.

Tipe pipa bawah laut menurut Mouselli (1981) terbagi menjadi dua macam lagi, yaitu:

#### 1. *Gathering Lines (Interfield Lines)*

*Interfield lines* menghubungkan dari suatu *platform (multiwell)* ke *platform* lain dan biasanya berdiameter kecil, sedang, dan dapat berdiameter besar juga. Pipa dapat berisi minyak, gas, kondensat, atau *two-phase flow*. Kisaran tekanan operasi biasanya antara 1.000 – 1.400 psi.

#### 2. *Loading (Unloading) Lines*

Pipa bawah laut tipe ini biasanya menghubungkan anjungan produksi dan *loading facility* atau *subsea manifold*. Pipa ini biasanya pendek, berkisar antara 1 samapi 3 mil panjang, dan hanya membawa cairan. *Loading line* dapat berdiameter kecil ataupun besar serta dapat digunakan dengan fasilitas pemuatan permanen untuk *reservoirs* kecil dan di daerah terpencil.

Sejak pipa lepas pantai pertama kali dipasang di perairan dangkal pada awal 1950-an, kesulitan teknis operasi dan mempertahankan jalur di lingkungan bawah laut telah menantang industri. Sifat dinamis dari operasi pipa di lepas pantai sering membuat gambaran risiko lebih kompleks daripada operasi darat. Aspek lain dari operasi pipa lepas pantai adalah semakin tinggi biaya yang terkait dengan sebagian besar kegiatan instalasi, operasi, dan pemeliharaan.

Ketika pipa ditempatkan di lingkungan di mana manusia tidak dapat hidup dan bekerja tanpa bantuan hidup khusus sistem, jelas tantangan akan bertambah. Inspeksi, pemeliharaan, perbaikan, dan modifikasi memerlukan kapal, peralatan khusus, dan personel dengan keterampilan khusus. Operasi semacam itu biasanya lebih terbatas cuaca dan melanjutkan dengan kecepatan lebih lambat daripada operasi darat serupa, sekali lagi menambah biaya (Muhlbauer, 2004).

## 2.2.2 Risiko

Menurut Muhlbauer (2004) risiko adalah probabilitas suatu peristiwa yang dapat menyebabkan kerugian serta besarnya kerugian itu sendiri. Risiko meningkat ketika peluang kejadian meningkat atau kerugian yang ditimbulkan meningkat. Risiko umumnya diekspresikan dengan kuantitas yang terukur seperti kemungkinan terjadinya kegagalan, cedera, dan kerugian secara material. Dalam persamaan matematis 2.1, risiko dijabarkan sebagai berikut:

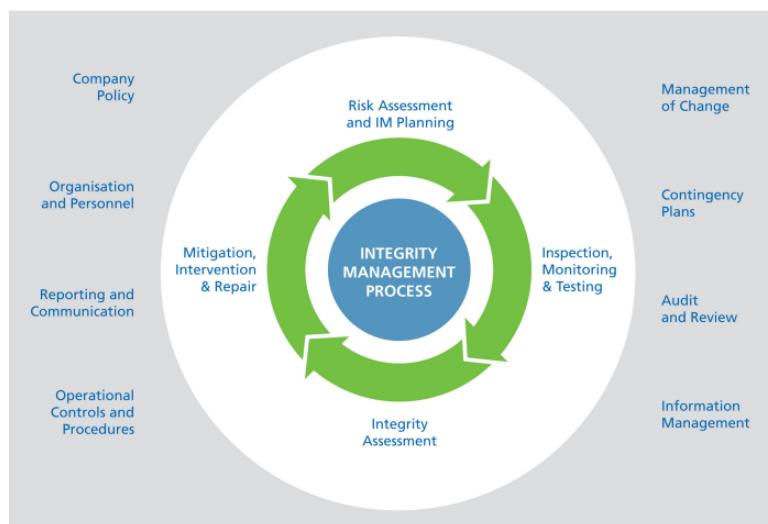
$$Risk = (\text{event likelihood}) \times (\text{event consequence}) \quad (2.1)$$

*Likelihood* (peluang kegagalan) merupakan kemungkinan terjadinya suatu kegagalan pada suatu komponen yang dinyatakan dalam periode waktu dan dihitung berdasarkan mekanisme kerusakan. *Consequence* (konsekuensi kegagalan) adalah akibat (negatif) dari suatu kejadian yang dapat ditimbulkan oleh kegagalan pada suatu komponen, seperti kecelakaan atau kematian personil, kerusakan peralatan atau fasilitas, kerugian dari sisi ekonomi, dan pencemaran lingkungan di sekitarnya.

Risiko dapat dijabarkan menjadi *high risk*, *medium risk*, dan *low risk*. Dikatakan *high risk* apabila *probability* dan *consequence* semakin sering bertemu. Sedangkan *low risk* apabila peluang kegagalan dan konsekuensi kegagalan semakin jarang bertemu. Secara anatomi, risiko terdiri dari dua faktor utama yaitu sumber terjadinya risiko dan penyebab dari suatu risiko.

## 2.2.3 Manajemen Integritas

Fungsi sistem perpipaan bawah laut adalah untuk mengangkut cairan secara efisien dan aman. Berdasarkan DNV-RP-F116 (2015), integritas sistem perpipaan dapat menjadi bagian dari lingkup manajemen integritas. Ini adalah kemampuan sistem pipa bawah laut untuk beroperasi dengan aman dan menahan beban yang dikenakan selama siklus hidup pipa. Konsep manajemen integritas (IM) didasarkan pada kontrol dan penghapusan risiko dengan menilai kemungkinan kegagalan. Jika sistem kehilangan kemampuan ini, kegagalan telah terjadi. Lingkup sistem manajemen integritas dapat dilihat pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Sistem Manajemen Integritas (DNV-RP-F116, 2015)

Beberapa elemen yang dapat menetapkan, menerapkan, dan memelihara sistem manajemen integritas (IMS) yaitu:

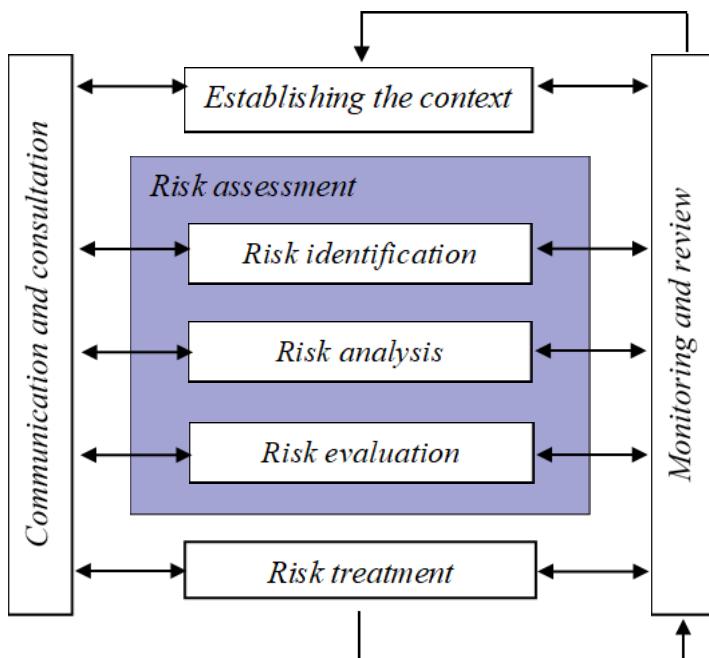
- Kebijakan perusahaan
- Organisasi dan personel
- Pelaporan dan komunikasi
- Pengendalian dan prosedur operasi
- Manajemen perubahan
- Rencana darurat
- Audit dan tinjauan
- Manajemen informasi.

Proses manajemen integritas dimulai pada tahap pembentukan integritas dan dilakukan secara terus menerus dan berulang-ulang sepanjang tahap pemeliharaan integritas. Langkah-langkah dari sistem manajemen integritas adalah sebagai berikut:

1. Penilaian risiko dan perencanaan manajemen integritas yang mencakup identifikasi ancaman, penilaian risiko, perencanaan jangka panjang dan jangka pendek (tahunan).
2. Perencanaan terperinci dan kinerja inspeksi (eksternal dan internal), aktivitas pemantauan dan pengujian.
3. Perencanaan terperinci dan kinerja penilaian integritas berdasarkan hasil inspeksi, pemantauan, dan informasi historis lain yang relevan.
4. Perencanaan terperinci dan kinerja kegiatan mitigasi, intervensi, dan perbaikan yang diperlukan.

#### **2.2.4 Manajemen Risiko**

Manajemen risiko adalah proses manajemen yang berkesinambungan dengan tujuan untuk mengidentifikasi, menganalisis dan menilai potensi bahaya dalam suatu sistem atau berhubungan dengan aktivitas, dan untuk mengidentifikasi serta menerapkan langkah-langkah pengendalian risiko untuk menghilangkan atau mengurangi potensi bahaya terhadap manusia, lingkungan, atau aset lainnya (Rausand & Haugen, 2020). Berdasarkan IEC 31010 (2019), proses manajemen risiko harus menjadi bagian integral dari manajemen, tertanam dalam budaya dan praktik, dan disesuaikan dengan proses bisnis dari organisasi. Penjelasan dari proses manajemen risiko ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Proses Manajemen Risiko (IEC, 2019)

### 2.2.5 Identifikasi Bahaya

Identifikasi bahaya adalah tahap yang sangat penting dalam penilaian risiko, harus dilakukan dengan mempertimbangkan semua kejadian yang dapat menimbulkan kerugian. Mouselli (1981) mengatakan bahwa pengklifikasian kategori bahaya yang mungkin terjadi pada pipa bawah laut, baik disebabkan oleh kondisi alam di sekitar lingkungan maupun yang terjadi akibat aktivitas manusia, digolongkan menjadi tiga kategori yaitu:

1. Bahaya yang terjadi selama periode konstruksi.
2. Bahaya yang terjadi setelah jalur pipa terpasang di dasar laut.
3. Bahaya yang terjadi baik dari proses instalasi maupun operasi.

DNV-RP-F107 (2017) menyediakan tabel mengenai beberapa contoh bahaya yang dapat membahayakan pipa bawah laut, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Possible external hazards (DNV-RP-F107, 2017)

<b>Operation/activity</b>	<b>Hazard</b>	<b>Possible consequence to pipeline</b>
<i>Installation of pipeline</i>	<i>Dropped and dragged anchor/anchor chain from pipe lay vessel</i> <i>Vessel collision during laying leading to dropped object, etc.</i>	<i>Impact damage</i>
	<i>Loss of tension, drop of pipe end, etc.</i>	<i>Damage to pipe/umbilical being laid or other pipe/umbilicals already installed</i>

<b>Operation/activity</b>	<b>Hazard</b>	<b>Possible consequence to pipeline</b>
	<i>Damage during trenching, gravel dumping, installation of protection cover, etc.</i>	<i>Impact damage</i>

**Tabel 2.1 Possible external hazards (DNV-RP-F107, 2017) (lanjutan)**

<b>Operation/activity</b>	<b>Hazard</b>	<b>Possible consequence to pipeline</b>
	<i>Damage during crossing construction.</i>	<i>Impact damage</i>
<i>Installation of risers, modules, etc. (i.e. heavy lifts)</i>	<i>Dropped objects</i>	<i>Impact damage</i>
	<i>Dragged anchor chain</i>	<i>Pull-over and abrasion damage</i>
<i>Anchor handling (Rig and lay vessel operations)</i>	<i>Dragged anchor, breakage of anchor chain, etc.</i>	<i>Impact damage</i>
	<i>Dragged anchor</i>	<i>Hooking (and impact) damage</i>
	<i>Dragged anchor chain</i>	<i>Pull-over and abrasion damage</i>
<i>Lifting activities (Rig or Platform operations)</i>	<i>Drop of objects into the sea</i>	<i>Impact damage</i>
<i>Subsea operations (simultaneous operations)</i>	<i>ROV Impact</i>	<i>Impact damage</i>
	<i>Manoeuvring failure during equipment installation/removal</i>	<i>Impact damage</i>
		<i>Pull-over and abrasion damage</i>
<i>Trawling activities</i>	<i>Trawl board impact, pull-over or hooking</i>	<i>Impact and pull-over damage</i>
<i>Tanker, supply vessel, and commercial ship traffic</i>	<i>Collision (either powered or drifting)</i>	<i>Impact damage</i>
	<i>Emergency anchoring</i>	<i>Impact and/or hooking damage</i>
	<i>Sunken ship (e.g. after collision with platform or other ships)</i>	<i>Impact damage</i>

Terdapat beberapa metode identifikasi bahaya menurut Rausand dan Haugen (2020):

- *Preliminary hazard analysis* (PHA). Metode yang cukup sederhana dan biasa digunakan untuk mengidentifikasi bahaya dalam tahap desain objek studi. Hasilnya sering diperbarui karena analisis risiko yang lebih menyeluruh dilakukan. PHA yang disederhanakan seringkali disebut *Hazard Identification* (HAZID).
- *Job Safety Analysis* (JSA). Metode sederhana yang hampir sama dengan PHA. Bertujuan untuk menganalisis operasi dan prosedur kerja. JSA paling sering digunakan sebelum operasi kerja dilakukan, untuk mempersiapkan dan meningkatkan kesadaran keselamatan mereka yang terlibat.
- *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). FMEA tradisional mengidentifikasi dan menjelaskan kemungkinan mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan efek kegagalan. FMEA dapat diikuti dengan analisis kekritisan yang mendefinisikan signifikansi dari setiap kegagalan mode (*Failure Mode and Effect Critical Analysis*).

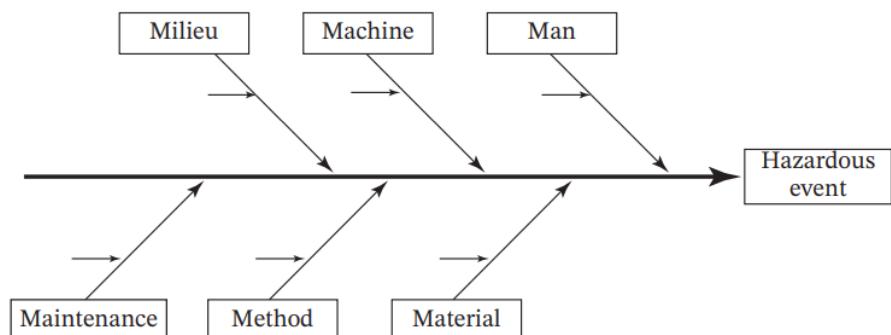
- *Hazard and Operability* (HAZOP). Metode ini didasarkan pada kerja sama tim dan brainstorming yang terstruktur berdasarkan kata-kata panduan. Metode ini telah digunakan dengan sangat sukses dan saat ini merupakan metode standar untuk penilaian risiko dalam desain pabrik proses.
- *Structured what-if technique* (SWIFT). Teknik yang dilakukan oleh sekelompok ahli dalam sesi brainstorming di mana serangkaian pertanyaan bagaimana-jika ditanyakan – dan dijawab. Pekerjaan ini disusun menggunakan *checklist* khusus.

### 2.2.6 Fishbone Diagram

Diagram sebab dan akibat (*causes and effect*) yang biasa disebut *Fishbone* atau Ishikawa dapat digunakan untuk mengidentifikasi, mengurutkan, dan menjelaskan penyebab dari suatu peristiwa tertentu. Dinamai diagram *fishbone* karena seorang Profesor Jepang bernama Kaoru Ishikawa pertama mengembangkan diagram ini pada tahun 1943. Setiap kemungkinan penyebab atau alasan ketidak sempurnaan adalah sumber variasi. Penyebab (*causes*) biasanya dikelompokkan menjadi kategori *major* untuk mengidentifikasi sumber variasi ini. Penyebab dapat ditelusuri kembali ke akar penyebab dengan proses bertanya (Singh, 2014). Penyebab disusun menurut tingkat kepentingan atau detailnya, sehingga menghasilkan struktur pohon yang menyerupai kerangka ikan dengan kategori penyebab utama digambar sebagai tulang yang menempel pada tulang belakang ikan.

Elemen utama dalam diagram *fishbone* dapat terlihat pada Gambar 2.3. Menurut Rausand dan Haugen (2020), analisis diagram sebab dan akibat biasanya dilakukan dalam empat langkah:

1. Merencanakan dan mempersiapkan
2. Membangun diagram sebab dan akibat
3. Analisis diagram secara kualitatif
4. Laporkan analisisnya.



**Gambar 2.3** Elemen utama dalam diagram sebab-akibat  
(Rausand & Haugen, 2020)

Berikut enam kategori yang digunakan dalam menganalisis sistem teknis:

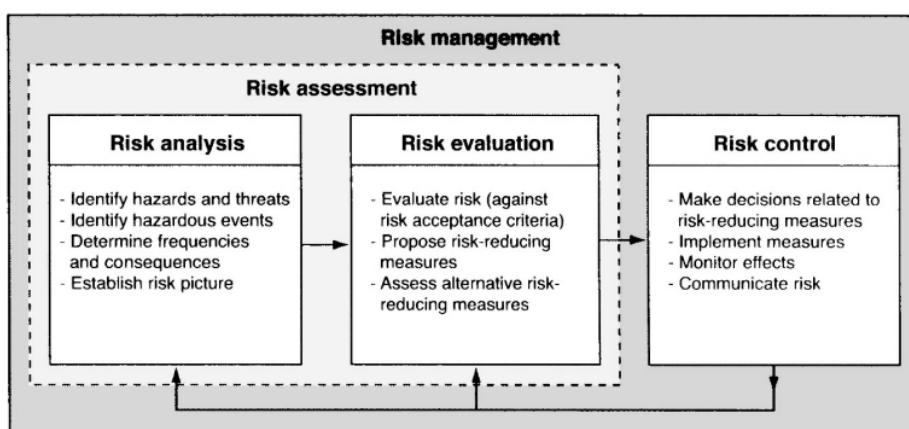
1. *Man*, berkaitan dengan kesalahan operator, kekurangan pengetahuan, dan kekurangan keterampilan.
2. *Methods*, dapat mencakup kurangnya prosedur, prosedur tidak memadai, dan praktik yang tidak sesuai dengan prosedur.
3. *Materials*

4. *Machinery*, seperti peralatan teknis, komputer.
5. *Milieu*, mencakup lingkungan internal/eksternal, lokasi, waktu, dan budaya keselamatan.
6. *Maintenance*.

### 2.2.7 Penilaian Risiko

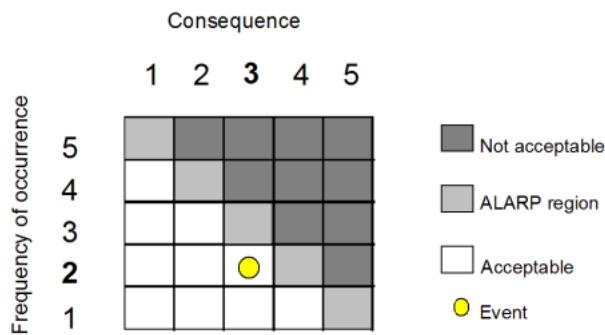
*Risk assessment* adalah suatu proses pengukuran untuk menentukan seberapa besar risiko yang terjadi pada suatu sistem. Untuk mendapatkan kualitas dan konsep manajemen yang baik dari suatu proses maka dibutuhkan suatu ukuran atau nilai (Muhlbauer, 2004). Penilaian risiko adalah keseluruhan proses dari identifikasi risiko, analisis risiko, dan evaluasi risiko. Penggambaran lebih jelas dapat terlihat pada Gambar 2.4. Terdapat lima langkah dalam melakukan penilaian risiko menurut Rausand dan Haugen (2020):

1. Identifikasi bahaya.
2. Tentukan siapa yang akan berdampak dan bagaimana.
3. Evaluasi risiko dan tentukan tindakan pencegahan.
4. Rekam penemuan dan implementasikan mereka.
5. Ulangi penilaian risiko secara berkala dan lakukan pembaharuan jika diperlukan.



**Gambar 2.4** *Risk analysis, evaluation, assessment, and management*  
(Rausand & Haugen, 2020)

Menurut DNV-RP-F107 (2017), risiko yang telah ditemukan dievaluasi dengan memplot frekuensi dan konsekuensi yang ditetapkan dalam matriks risiko. Metode matriks risiko dapat secara efektif membandingkan risiko dari setiap peristiwa yang berbeda. Terdapat tiga macam zona/wilayah; *acceptable*, ALARP (*as low as reasonably practicable*), dan *not acceptable*. Zona ALARP mengidentifikasi area di mana risikonya dapat diterima, namun pengurangan risiko lebih lanjut harus dilakukan dengan evaluasi biaya-manfaat. Contoh matriks risiko dapat terlihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Contoh matriks risiko  
(DNV-RP-F107, 2017)

## 2.2.8 Teori Fuzzy

Umumnya, manusia selalu beurusan dengan masalah yang berkaitan dengan sistem yang dibangun sebagai model dari objek buatan manusia. Saat membangun sebuah model, tiga karakteristik utama selalu dimaksimalkan; kompleksitas, keandalan, dan ketidakpastian. Ketika ketidakpastian dipertimbangkan sehubungan dengan karakteristik lain dari model sistem, ketidakpastian cenderung mengurangi kompleksitas dan meningkatkan keandalan yang dihasilkan. Poin penting dalam evolusi konsep modern ketidakpastian terdapat pada publikasi makalah oleh Lofti A. Zadeh. Zadeh memperkenalkan teori dimana objek-set fuzzy adalah set dengan batas-batas yang tidak tepat.

Kemampuan fuzzy sets untuk mempresentasikan transisi dari keanggotan ke non anggota dapat digunakan secara luas. Ini tidak hanya representasi bermakna dan kuat dari ketidakpastian pengukuran, tetapi juga representasi bermakna dari konsep ketidakjelasan yang diungkapkan dalam bahasa alami. Konsep dasar set fuzzy, sebuah konsep yang sederhana dan pada dasarnya membentuk generalisasi dari set klasikal (*crisp*) (Klir & Yuan, 1995).

Logika kabur adalah perluasan dari logika multinilai teori himpunan di mana nilai kebenarannya adalah variabel linguistik. Dalam menghadapi kompleksitas yang luar biasa, wajar untuk mengeksplorasi penggunaan apa yang mungkin disebut variabel linguistik, yaitu variabel yang nilainya bukan angka tetapi kata-kata atau kalimat dalam bahasa alami atau buatan. Tujuan dari sistem kontrol logika fuzzy adalah untuk mengontrol proses yang kompleks melalui pengalaman manusia (Zimmermann, 2001).

### 2.2.8.1 Penerapan Teori Fuzzy

Jumlah disiplin ilmu di mana himpunan fuzzy diterapkan terus meningkat. Sejauh ini bidang-bidang utama adalah: ilmu aktuaria, administrasi dan manajemen bisnis, kimia, ilmu bumi, ekologi dan ilmu lingkungan, ekonomi, teknik (sipil, industri, mekanik, nuklir), ergonomi, teknologi informasi, kedokteran, ilmu sosial, telekomunikasi, manajemen lalu lintas (Zimmermann, 2001).

Contoh aplikasi fuzzy antara lain:

- Aplikasi fuzzy dalam bidang teknik seperti mendeteksi kesalahan otomatis pada *gearbox* helikopter yang menggunakan metode analisis data dinamik fuzzy.
- Pemrograman linear (LP) fuzzy dalam logistik. Sebuah model fuzzy dibuat untuk penentuan jadwal waktu untuk kapal kontainer, yang dapat diselesaikan dengan *branch and bound*, dan model untuk penjadwalan kontainer pada kapal kontainer, yang pada akhirnya menghasilkan sebuah LP.

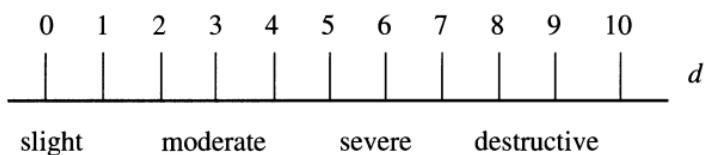
- Aplikasi klasik dari himpunan fuzzy dalam bidang pemasaran, seperti pemilihan media dan penambangan data. Segmentasi nasabah bank dilakukan berdasarkan data dinamis yang mewakili perilaku temporal nasabah dan dengan menerapkan algoritma fuzzy *clustering* dinamis.

### 2.2.8.2 Studi Kasus Fuzzy

Teknik rekayasa gempa merupakan disiplin yang cukup penting di daerah di mana risiko terjadinya gempa cukup tinggi. Sering kali, keselamatan dan keandalan struktur sejumlah struktur yang ada perlu dievaluasi baik sebagai bagian dari program inspeksi berkala. Pada saat itu, hanya ada beberapa insinyur berpengalaman yang dapat mempraktikkannya, sehingga metode sistematis untuk penilaian kerusakan struktural telah dikembangkan. SPERIL adalah sistem penilaian kerusakan berbasis komputer yang dirancang untuk konstruksi tahan gempa. Informasi yang berguna untuk penilaian kerusakan terutama berasal dari dua sumber berikut:

- Inspeksi visual di berbagai bagian struktur
- Analisis catatan akselerometer selama gempa

Interpretasi data ini sangat dipengaruhi oleh jenis struktur tertentu yang diteliti. Mengungkapkan pengetahuan tentang penilaian kerusakan secara tepat dianggap tidak mungkin, maka dari itu aturan produksi dalam SPERIL 1 adalah tidak jelas (fuzzy). Prosedur dua tahap digunakan untuk sampai pada himpunan fuzzy yang mewakili tingkat kerusakan. Pertama, kerusakan dinilai pada skala 10 poin, dan kemudian peringkat diubah menjadi satu set istilah variabel linguistik "kerusakan." Hubungan antara istilah dan peringkat asli dapat terlihat pada Gambar 2.6 sebagai berikut:



**Gambar 2.6** Contoh hubungan antara istilah dan peringkat  
(Zimmermann, 2001)

Untuk mendapatkan jawaban yang benar dengan menggunakan pengetahuan tersebut, diperlukan mekanisme inferensi rasional untuk memproses aturan yang diekspresikan dengan himpunan bagian fuzzy bersama dengan ketidakpastian secara efektif. Aturan-aturan itu dirasa tidak serta merta dapat diekspresikan sebagai aturan yang tegas (*crisp*). Oleh karena itu aturan inferensi fuzzy diperkenalkan untuk sampai pada penilaian kerusakan fuzzy bersama dengan probabilitas atas dan bawah (Zimmermann, 2001).

### 2.2.9 Failure Mode and Effect Analysis

*Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) adalah salah satu teknik sistematis pertama untuk analisis kegagalan sistem teknis. Tekniknya dikembangkan oleh analisis keandalan dan dikeluarkan pada awal tahun 1949 untuk mengidentifikasi masalah dalam sistem militer. FMEA tradisional mengidentifikasi dan menjelaskan kemungkinan mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan efek kegagalan. Berikut merupakan beberapa tujuan dari FMEA:

1. Identifikasi bagaimana masing-masing komponen sistem dapat gagal (yaitu, apa mode kegagalannya?)
2. Tentukan penyebab dari mode kegagalan tersebut.

3. Identifikasi efek yang dapat ditimbulkan oleh setiap mode kegagalan pada sistem lainnya.
4. Jelaskan bagaimana mode kegagalan dapat dideteksi.
5. Tentukan seberapa sering setiap mode kegagalan akan terjadi.
6. Tentukan seberapa serius berbagai mode kegagalan.
7. Menilai risiko yang terkait dengan setiap mode kegagalan.
8. Mengidentifikasi tindakan/fitur pengurangan risiko yang mungkin relevan.

Analisis dilakukan dengan meninjau sebanyak mungkin komponen, rakitan, dan subsistem untuk mengidentifikasi mode kegagalan, penyebab, dan efek dari kegagalan tersebut. Untuk setiap komponen, mode kegagalan dan efek yang dihasilkan pada sistem lainnya dimasukkan ke dalam lembar kerja FMEA tertentu (Rausand & Haugen, 2020). FMEA dapat diterapkan selama desain, pembuatan, atau pengoperasian sistem fisik untuk meningkatkan desain, pemilihan antara alternatif desain atau rencanakan program pemeliharaan. Tahapan dalam pembuatan FMEA dipaparkan oleh McDermott (2008) sebagai berikut:

1. Meninjau proses atau produk.
2. Melakukan *brainstorm* membahas moda kegagalan potensial.
3. Membuat daftar kegagalan potensial dari setiap moda kegagalan.
4. Menentukan peringkat *severity* untuk masing-masing kegagalan yang terjadi.
5. Menentukan peringkat *occurrence* (kejadian) untuk masing-masing moda kegagalan.
6. Menentukan peringkat *detection* untuk masing-masing kegagalan dan/atau moda kegagalan.
7. Menghitung *Risk Priority Number* (RPN) untuk masing-masing kegagalan yang terjadi.
8. Prioritaskan moda kegagalan untuk ditindak lebih lanjut.
9. Melakukan tindakan untuk mengeliminasi atau mengurangi moda kegagalan yang berisiko tinggi.
10. Menghitung hasil RPN setelah moda kegagalan dikurangi atau dieliminasi.

Dalam IEC 31010 (2019) terdapat penjelasan mengenai hasil akhir yang diharapkan dari FMEA, diantaranya yaitu:

- Lembar kerja dengan mode kegagalan, efek, penyebab dan kontrol yang ada
- Tindakan yang direkomendasikan, misalnya untuk analisis lebih lanjut, perubahan desain atau fitur yang akan tergabung dalam rencana pengujian.

Berikut merupakan beberapa kelebihan dari penerapan metode FMEA:

- Dapat diterapkan secara luas baik pada mode manusia maupun mode teknis sistem, perangkat keras, perangkat lunak, dan prosedur.
- Mengidentifikasi mode kegagalan, penyebab dan efeknya pada sistem, dan menyajikannya dalam format yang mudah dibaca.

- Memberikan masukan untuk program pemeliharaan dan pemantauan dengan menyoroti fitur-fitur utama untuk dipantau.

### 2.2.9.1 FMEA Tradisional

FMEA tradisional menggunakan *Risk Priority Number* (RPN) untuk mengevaluasi tingkat risiko suatu komponen atau proses. RPN diperoleh dengan menemukan perkalian tiga faktor, yaitu probabilitas/terjadinya kegagalan (O), tingkat keparahan kegagalan (S) dan probabilitas tidak terdeteksinya kegagalan (D). Menurut McDermott (2008), penjelasan dari ketiga faktor tersebut adalah:

- *Occurrence*/Kejadian (O): skala peringkat FMEA yang mendefinisikan frekuensi mode kegagalan terjadi. Probabilitas kejadian menentukan bahwa kesalahan potensial terjadi dengan frekuensi apa.
- *Severity*/Keparahan (S): skala peringkat FMEA yang mendefinisikan keseriusan dan tingkat keparahan dari efek dari kegagalan apabila terjadi. Semakin tinggi skor *severity*, maka akan semakin parah efek yang ditimbulkan.
- *Detection*/Deteksi (D): skala peringkat FMEA yang menentukan kemungkinan mendeteksi kegagalan atau efek dari kegagalan sebelum terjadi. Tingginya skor *detection* menunjukkan semakin sering penyebab kegagalan terjadi.

Menggunakan data dan pengetahuan tentang proses atau produk, setiap potensi kegagalan mode dan efek dinilai di masing-masing dari tiga faktor ini pada skala mulai dari 1 sampai 10, rendah ke tinggi. Berdasarkan Barends *et al.*, (2012), definisi untuk setiap skor ditunjukkan seperti pada Tabel 2.2, 2.3, dan 2.4. Dengan mengalikan peringkat untuk tiga faktor, nomor prioritas risiko (RPN) akan ditentukan untuk setiap potensi mode dan efek kegagalan. RPN (yang akan berkisar dari 1 hingga 1.000 untuk setiap mode kegagalan) digunakan untuk menentukan peringkat kebutuhan tindakan korektif untuk menghilangkan atau mengurangi potensi mode kegagalan. Untuk setiap mode kegagalan *Risk Priority Number* (RPN) dapat dihitung dengan:

$$RPN = Occurrence (O) \times Severity (S) \times Detection (D) \quad (2.2)$$

**Tabel 2.2** Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk *occurrence* (O)

<i>Definition of occurrence of failure mode</i>	(O)
<i>Negligible</i>	1
<i>Very low</i>	2
<i>Low</i>	3
<i>Occasionally</i>	4
<i>Now and then</i>	5
<i>Regularly</i>	6
<i>Very regularly</i>	7
<i>Often</i>	8
<i>Very Often</i>	9
<i>Extremely often</i>	10

**Tabel 2.3** Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk *severity* (S)

<i>Definition of severity of failure mode</i>	<i>Consequence of failure mode with this severity</i>	(S)
<i>None</i>	<i>Unnoticed; no relevant effect</i>	1
<i>Almost none</i>	<i>Failure not noticed; little effect</i>	2
<i>Extremely low</i>	<i>Extra effort to produce, no delay</i>	3
<i>Very low</i>	<i>Short delay in process</i>	4
<i>Low</i>	<i>Moderate delay in process</i>	5
<i>Moderate</i>	<i>Long delay in process due to carrying out repairs</i>	6
<i>High</i>	<i>Rejection of produced products</i>	7
<i>Very high</i>	<i>Customer end up with faulty report/product</i>	8
<i>Extremely high</i>	<i>Fail does no longer meet legal rules</i>	9
<i>Dangerously high</i>	<i>People can get severely wounded</i>	10

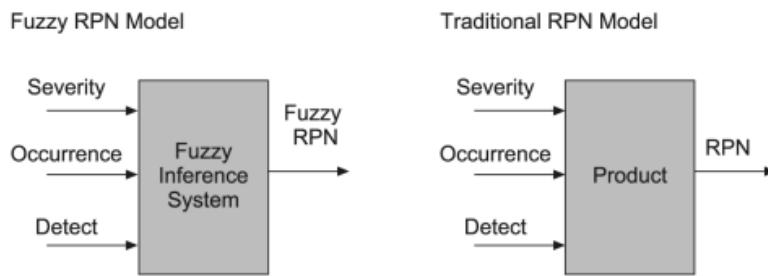
**Tabel 2.4** Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk *detection* (D)

<i>Definition of detection of failure mode</i>	(D)
<i>Certainly</i>	1
<i>Very likely</i>	2
<i>Likely</i>	3
<i>More than average</i>	4
<i>Average</i>	5
<i>Low</i>	6
<i>Very low</i>	7
<i>Unlikely</i>	8
<i>Very unlikely</i>	9
<i>Excluded</i>	10

Pendekatan FMEA tradisional masih sering digunakan karena dianggap akurat dan mudah digunakan. Namun, Kumru dan Kumru (2013) telah menemukan kelemahan diantaranya yaitu:

1. Asumsi bahwa elemen RPN berbobot sama mengarah pada penyederhanaan yang berlebihan. Ini mengabaikan kepentingan relatif antara O, S dan D. Ketiga faktor diasumsikan memiliki sama pentingnya.
2. Berbagai set O, S dan D dapat menghasilkan RPN yang identik; namun, implikasi risikonya mungkin sangat berbeda. Misalnya, pertimbangkan dua peristiwa yang berbeda yang memiliki rating 3, 5, 2 dan 2, 3, 5 untuk masing-masing O, S dan D. Kedua peristiwa ini akan memiliki RPN yang sama ( $RPN_1 = 3 \times 5 \times 2 = 30$  dan  $RPN_2 = 2 \times 3 \times 5 = 30$ ). Namun, implikasi risiko dari dua peristiwa ini belum tentu sama.

Hal ini dapat menyebabkan pemborosan waktu dan sumber daya. Untuk mengatasi kelemahan di atas dan memulihkan keefektifan metodologi FMEA tradisional, pendekatan FMEA berbasis fuzzy dikembangkan. Gambar 2.7 menunjukkan perbedaan antara metode FMEA tradisional dan fuzzy FMEA.



**Gambar 2.7** Perbedaan antara FMEA tradisional dengan fuzzy FMEA  
(Tay & Lim, 2006)

### 2.2.9.2 Fuzzy FMEA

Sejumlah investigasi telah dilakukan untuk meningkatkan metodologi FMEA menggunakan teknik kecerdasan buatan. Terdapat beberapa penelitian yang telah diterbitkan di bidang teknis di mana FMEA digunakan bersama dengan logika fuzzy. Fuzzy sets pertama kali diusulkan oleh Lukasiewicz pada tahun 1920-an. Representasi matematis dari istilah fuzzy seperti tinggi, panas, dan tua dipelajari. Ilmuwan bernama Lotfi A. Zadeh memperluas pengembangan teori kemungkinan ke dalam sistem formal logika matematika untuk mewakili istilah fuzzy, yang disebut logika fuzzy (Mohammadi & Tavakolan , 2013).

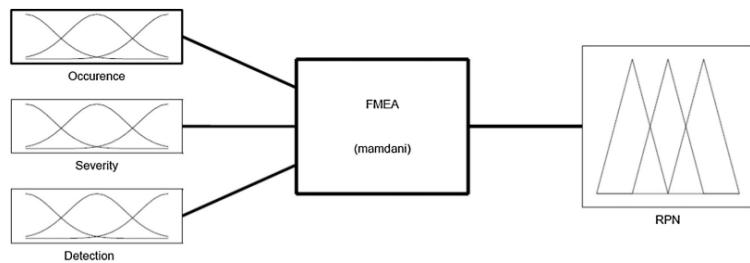
Logika fuzzy adalah teknik yang tepat yang digunakan untuk memperkirakan respon *output* dari data *input* yang diberikan. Menurut Kusumadewi (2002) terdapat berbagai alasan mengapa sistem logika fuzzy sering kali digunakan, antara lainnya yaitu:

1. Konsep logika fuzzy sangat mudah dimengerti. Dasar-dasar matematika juga tidak rumit dalam Sistem *Interface Fuzzy*.
2. Fleksibel dan dapat mentolerir data jika terdapat ketidaksesuaian dalam dataset.
3. Mampu memodelkan fungsi non-linier yang kompleks dalam jangka waktu yang singkat.
4. Dapat membangun pengalaman para spesialis dengan tanpa memerlukan pelatihan tambahan.
5. Teknik ini akan bekerja berdasarkan bahasa alami yang sederhana.

Dalam fuzzy FMEA, parameter indeks risiko seperti *Severity* (S), *Occurrence* (O) dan *Detection* (D) difuzzifikasi dengan fungsi keanggotaan yang sesuai. Ini adalah pendekatan berbasis pengetahuan dan dapat dibuat dengan kemahiran dan pengetahuan dalam bentuk aturan fuzzy *IF-THEN*. Kesimpulan fuzzy tersebut kemudian dilakukan de-fuzzifikasi untuk mendapatkan RPN (Balaraju *et al.*, 2019). Tahapan Fuzzy FMEA dapat terbagi menjadi tiga tahap, diantaranya yaitu:

#### A. *Fuzzification* (Fuzzifikasi)

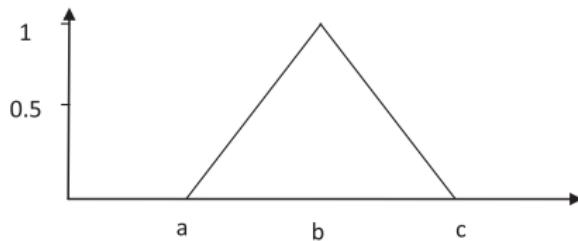
Toolbox logika fuzzy dari program perangkat lunak Matlab dapat digunakan dalam menghitung RPN. Sebuah model didirikan untuk teknik FMEA memiliki 3 *input* dan 1 variabel *output*. Contoh model fuzzy FMEA ditunjukkan pada Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Model fuzzy FMEA (Kumar *et al.*, 2018)

Proses yang digunakan untuk mengubah parameter *input* menjadi jumlah derajat keanggotaan, yang menyatakan parameter *input* dalam bentuk istilah linguistik kualitatif (Balaraju *et al.*, 2019). Berdasarkan Kumru dan Kumru (2013) variabel linguistik adalah variabel *input* atau *output* dari sistem yang nilainya adalah kata atau kalimat dari bahasa alami, bukan nilai numerik.

Dalam langkah fuzzifikasi dan defuzzifikasi dari sistem logika fuzzy (FLS), digunakan suatu macam fungsi keanggotaan yang berfungsi untuk mengukur istilah linguistik. Beberapa macam bentuk fungsi keanggotaan yaitu: segitiga, trapesium, singletion, dan gaussian. Fungsi keanggotaan segitiga (*triangular membership functions*) merupakan fungsi yang paling sering digunakan dan mudah dibuat. Gambaran fungsi ini ditunjukkan seperti pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Fungsi keanggotaan segitiga fuzzy  
(Kumar *et al.*, 2018)

Menurut Kumar *et al.*, (2018) fungsi keanggotaan segitiga turut digunakan untuk mewakili variabel *input* sebanyak lima tingkat dari *almost none*, *low*, *medium*, *high*, dan *very high*. Sedangkan untuk *output* direpresentasikan sebanyak sepuluh tingkat dimulai dari *none*, *very-low*, *low*, *high-low*, *low-medium*, *high-medium*, *low-high*, *high*, hingga *very high*.

Bilangan asli diterjemahkan ke susunan fuzzy melalui fungsi keanggotaan segitiga (TFN). Persamaan 2.3 menjelaskan perhitungan fungsi tersebut:

$$TFN = \mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.3)$$

## B. Evaluasi Aturan Fuzzy

Dalam Fuzzy Logic System (FLS), basis aturan dibangun untuk mengontrol variabel *output*. Aturan fuzzy adalah aturan *IF-THEN* sederhana dengan kondisi dan kesimpulan.

Menurut Zimmermann (2001) tingkat prioritas skenario tertentu diputuskan berdasarkan basis aturan fuzzy yang dikembangkan. Terdapat dua jenis utama model fuzzy berbasis aturan:

1. Model Ebrahim H. Mamdani (metode *min-max*) yang diterima secara luas karena memungkinkan untuk menggambarkan keahlian dengan cara yang lebih intuitif dan manusiawi. Ide utama dari kontroler Mamdani adalah untuk menggambarkan status proses melalui variabel linguistik dan menggunakan variabel ini sebagai input untuk mengontrol aturan. Mamdani mendasarkannya pada ide L.A. Zadeh.
2. Model Takagi-Sugeno yang merupakan modifikasi dari model Mamdani. Idenya adalah menulis aturan yang memiliki antecedent fuzz dan konsekuensi tegas yang merupakan fungsi dari variabel *input*. Model Sugeno dianggap sebagai pengontrol linier yang valid di sekitar titik operasi yang didefinisikan secara tidak jelas (fuzzy).

Kejadian, keparahan, dan tidak terdeteksinya kegagalan dapat diidentifikasi dengan bantuan pendapat ahli dan dengan menggunakan database dari 125 aturan keputusan. Sebanyak 125 aturan berasal dari lima istilah linguistik untuk tiga macam faktor (O, S, D);  $5 \times 5 \times 5 = 125$  (Kumar *et al.*, 2018). Gambar 2.10 merupakan contoh dasar aturan fuzzy.

Sl No.	Occurrence	Severity	(Not) detection	Fuzzy output
1	Almost none	Almost none	Almost none	None
2	Almost none	Almost none	Low	None
3	Almost none	Almost none	Medium	Very Low
4	Almost none	Almost none	High	Very Low
5	Almost none	Almost none	Very high	Low
6	Almost none	Low	Almost none	None
7	Almost none	Low	Low	Very Low
8	Almost none	Low	Medium	Very Low
9	Almost none	Low	High	Low
10	Almost none	Low	Very high	High Low

**Gambar 2.10** Dasar aturan fuzzy (Kumar *et al.*, 2018)

### C. Defuzzification

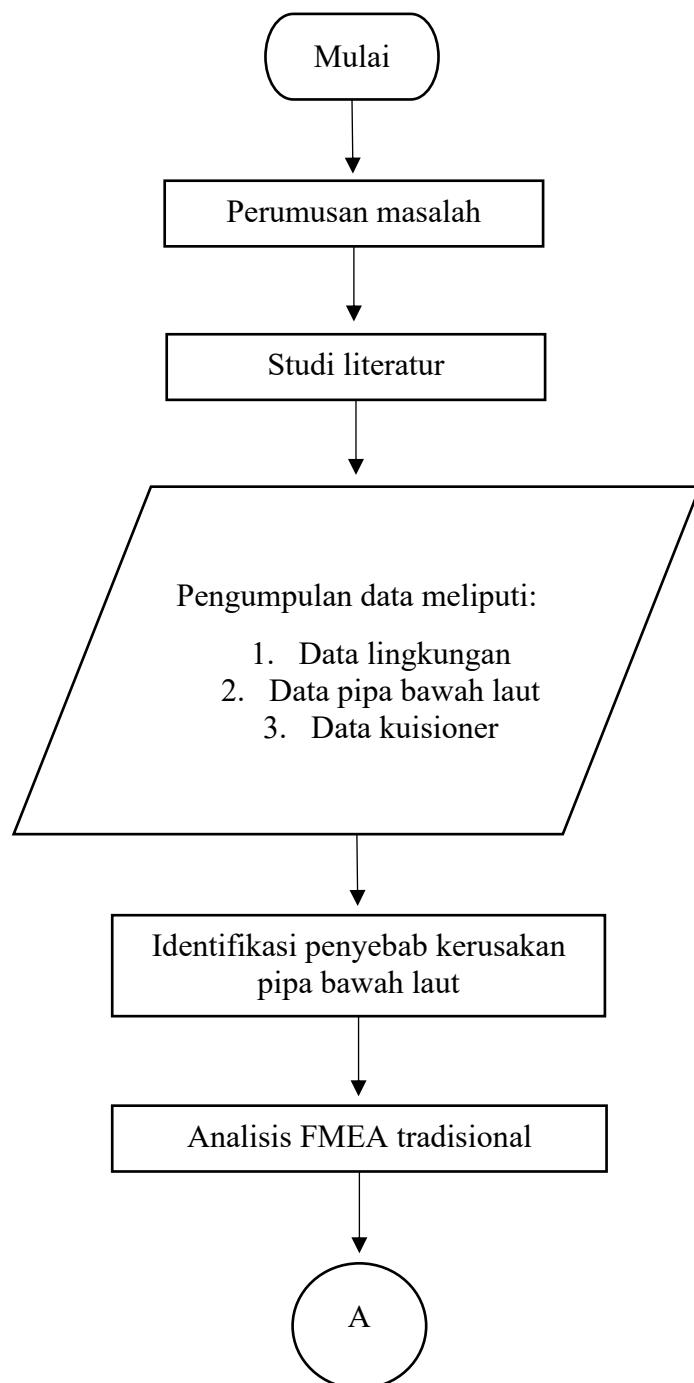
Dikarenakan proses teknis memerlukan tindakan control yang tegas, maka diperlukan prosedur yang menghasilkan nilai tegas dari satu atau lebih *output* set fuzzy (Zimmermann, 2001). Defuzzifikasi adalah tahap untuk mencari *output* berupa F-RPN dari *input* yang telah dimasukkan. Pada tahap ini data *output* dirubah menjadi non-fuzzy. Terdapat beberapa macam algoritma untuk menerapkan tahap defuzzifikasi, seperti *Center of Gravity*, *Center of Gravity for Singletons*, *Center of Area*, *Left Most Maximum*, dan *Right Most Maximum* (Kumru & Kumru, 2013).

## BAB III

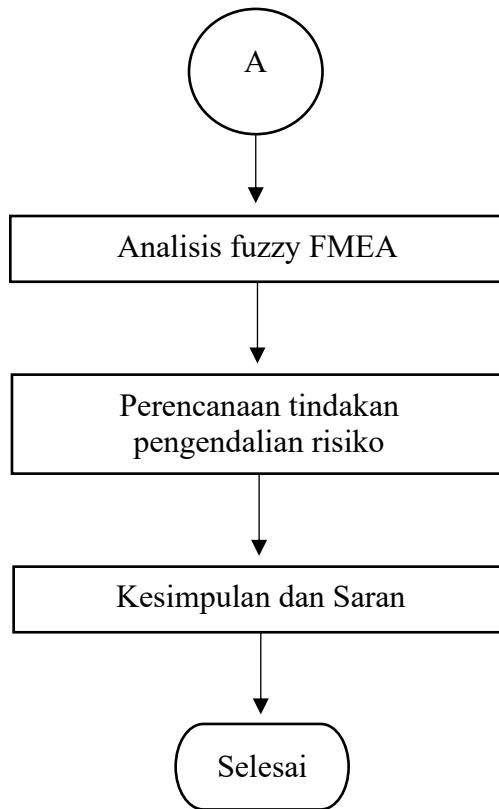
## METODOLOGI

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penjelasan mengenai metodologi yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini dapat disajikan melalui Gambar 3.1 sebagai berikut:

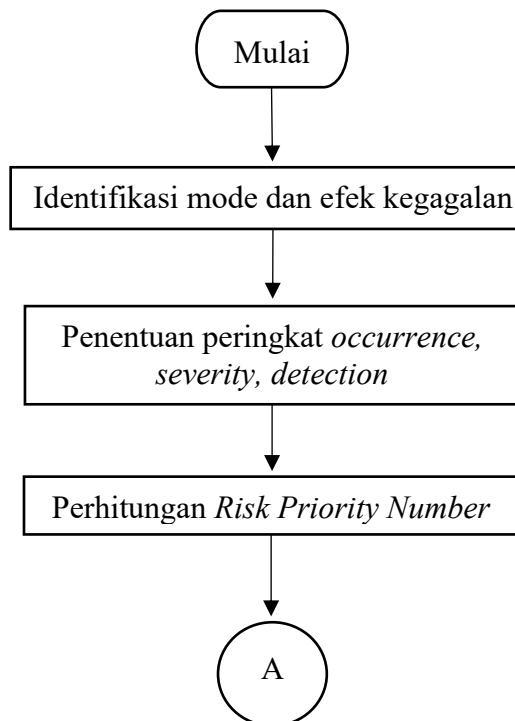


**Gambar 3.1** Diagram alir pengerjaan tugas akhir

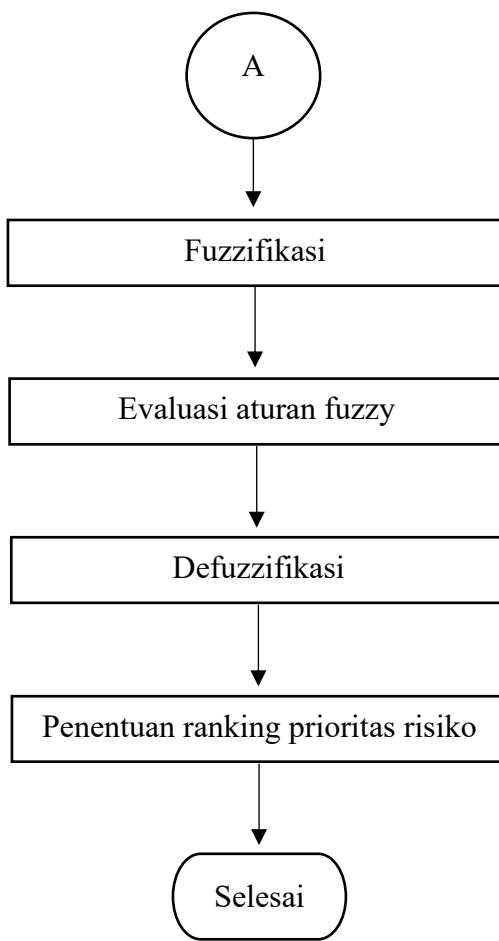


**Gambar 3.1** Diagram alir pengerjaan tugas akhir (lanjutan)

Dalam penelitian ini diterapkan dua macam metode analisis risiko yaitu FMEA tradisional dan fuzzy FMEA. Gambar 3.2 menunjukkan diagram alir tahapan pelaksanaan kedua jenis metode tersebut.



**Gambar 3.2** Diagram alir FMEA tradisional dan fuzzy FMEA



**Gambar 3.2** Diagram alir FMEA tradisional dan fuzzy FMEA (lanjutan)

### 3.2 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah kerja penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Perumusan Masalah

Tahap awal ini dilakukan untuk mencari rumusan masalah apa saja yang ingin dibahas dari identifikasi masalah yang telah ditentukan dan menentukan tujuan penelitian ini. Rumusan masalah akan membantu penelitian ini supaya menjadi terukur.

#### 2. Studi Literatur

Studi dan pengumpulan literatur bertujuan untuk mendapatkan berbagai informasi yang diperlukan dalam pelaksanaan penelitian. Literatur yang dipelajari dapat berupa tugas akhir, jurnal, buku, serta *codes* yang berkaitan dengan rumusan masalah tugas akhir ini. Adapun studi literatur yang dapat berguna, antara lain:

- a. Studi mengenai pipa bawah laut.
- b. Studi mengenai analisis dan manajemen risiko.
- c. Studi mengenai metode *Fishbone Diagram*.
- d. Studi menyeluruh mengenai *Failure and Mode and Effect Analysis*.

### **3. Pengumpulan Data**

Tahapan ini mencakup pengumpulan data yang berhubungan dan berguna untuk membantu penelitian. Data-data yang diperlukan antara lain:

- a. Data lingkungan berupa kedalaman laut, tipe tanah, dan lain-lain.
- b. Data pipa bawah laut (spesifikasi dan material).
- c. Data penilaian risiko dari hasil pembagian kuisioner.

### **4. Identifikasi Penyebab Kerusakan Pipa**

Pada tahap identifikasi risiko, diagram *fishbone* akan dibuat untuk memudahkan visualisasi. Pada diagram ini terdapat tiga macam cabang atau tulang (besar, medium, kecil) dengan kerusakan pipa bawah laut sebagai peristiwa utamanya.

### **5. Analisis *Failure and Mode and Effect Analysis* (FMEA) Tradisional**

Penentuan skor risiko akan dilakukan dengan metode FMEA yaitu pembagian kuisioner berbentuk tabel kepada beberapa ahli di bidang terkait. Tahapan ini dimulai dengan menentukan peringkat untuk *severity*, *occurrence*, *detection*, dan diakhiri dengan ditemukannya *Risk Priority Number* (RPN).

### **6. Analisis Fuzzy FMEA**

Setelah ditemukan RPN FMEA tradisional, penelitian dapat dilanjutkan dengan metode fuzzy FMEA untuk mendapatkan Fuzzy *Risk Priority Number* (F-RPN). Untuk melakukan *running* guna mendapatkan FRPN, diperlukan bantuan perangkat lunak Matlab. Tahapan terbagi menjadi tiga, yaitu fuzzifikasi, evaluasi aturan fuzzy, dan defuzzifikasi.

### **7. Perencanaan Tindakan Pengendalian Risiko**

Pembuatan matriks risiko diperlukan untuk mempertimbangkan risiko mana yang memerlukan perhatian lebih. Perlu direncanakan pengendalian risiko pada risiko yang tergolong kritis supaya ancaman terhadap pipa selama masa operasinya dapat dikurangi.

### **8. Kesimpulan dan Saran**

Pada tahap akhir penelitian ini perlu dilakukan penyusunan hasil dan kesimpulan dari penelitian. Setelah membuat kesimpulan maka dapat disusun saran-saran berdasarkan hasil analisis untuk dijadikan referensi pada penelitian selanjutnya.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pengumpulan Data

Studi kasus yang diambil pada Tugas Akhir ini terletak di Lapangan Terang Sirasun Batur (TSB). Objek penelitian ini adalah dua *infield production flowlines* dengan diameter 20 inchi yang mengalirkan gas dari *Manifold Riser Base* ke *Terang Manifold*. Panjang *flowlines* 1 adalah sepanjang 5115 m, sedangkan *flowlines* 2 sepanjang 5163 m. Lokasi dari objek pipa dapat terlihat dalam lingkaran berwarna merah pada Gambar 4.1. Data terkait material pipa 20 inchi disajikan dalam Tabel 4.1.

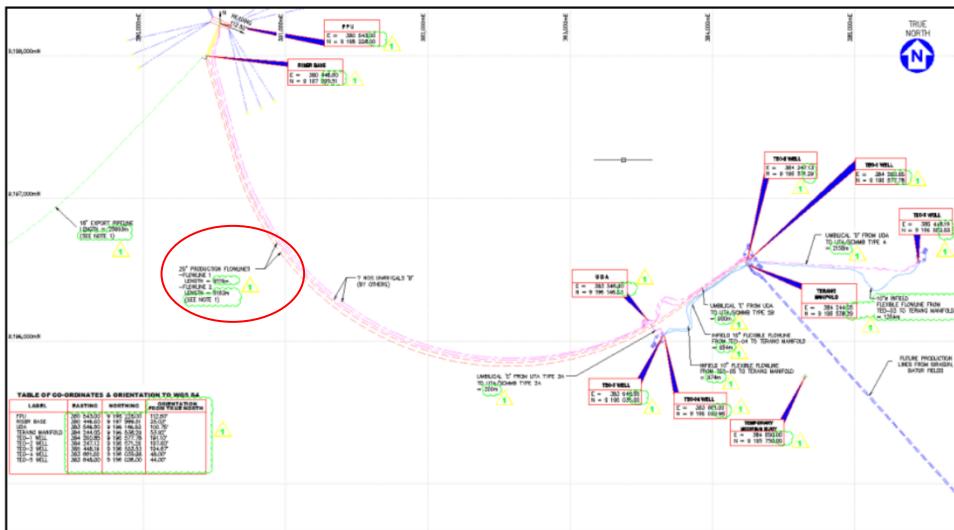
**Tabel 4.1** Data material pipa

<i>Properties</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<i>Density</i>	Kg/m <sup>3</sup>	7850
<i>SMYS - API X-65</i>	Mpa	448
<i>Outer Diameter (OD)</i>	mm	508
<i>Wall Thickness</i>	mm	15.9
<i>Corrosion / erosion allowance</i>	mm	2.75
<i>Corrosion Coating Density</i>	Kg/m <sup>3</sup>	1300
<i>Corrosion Coating Thickness</i>	mm	6
<i>Concrete Density</i>	Kg/m <sup>3</sup>	3043
<i>Marine growth thickness</i>	mm	12
<i>Marine growth density</i>	Kg/m <sup>3</sup>	1234
<i>Field Joint Density</i>	Kg/m <sup>3</sup>	160
<i>Concrete Coating Cutback</i>	mm	350
<i>Gas Density</i>	Kg/m <sup>3</sup>	60

Kedalaman air minimum dan maksimum di sepanjang rute pipa ini adalah 92 m dan 95 m. Berikut merupakan Tabel 4.2 yang menyajikan data *metocean* pipa.

**Tabel 4.2** Data *metocean*

<i>Description</i>	<i>H<sub>s</sub> (m)</i>	<i>T<sub>p</sub> (sec)</i>	<i>Direction of Wave</i>	<i>Bottom Current</i>	<i>Wave Spreading</i>
1 year return period	3.1	8.1	<i>Perpendicular to the pipeline</i>	0.7	30
10 years return period	4.4	10.1		0.8	30
100 years return period	6.0	12.4		0.9	30



**Gambar 4.1** Lokasi *production flowlines* pada lapangan TSB

## 4.2 Identifikasi Risiko

Dalam masa operasi pipa gas, tentu tidak pernah telpas dari berbagai risiko yang dapat terjadi. Maka dari itu perlu dilakukan penanganan risiko supaya risiko dapat diminimalisir dan tidak membawa dampak yang buruk terhadap perusahaan. Penilitian dimulai dengan melakukan identifikasi risiko yang berpotensi terjadi pada dua buah *production flowlines* berukuran 20 inchi.

#### 4.2.1 Risiko pada Pipa

Hal pertama yang dapat dilakukan yaitu mendata dan mempelajari risiko yang mungkin terjadi. Setelah pendataan dan perangkuman dilakukan, identifikasi risiko dilakukan dengan melakukan diskusi dan wawancara langsung dengan para *engineer* yang terlibat langsung dalam proyek ini. Wawancara ini dilakukan untuk mendapatkan daftar mode kegagalan, penyebab, serta dampak yang terjadi. Selain dilakukan diskusi, risiko yang berpotensi terjadi juga didapatkan dari laporan inspeksi perusahaan dan beberapa jurnal referensi yang telah ada.

#### 4.2.1.1 Korosi

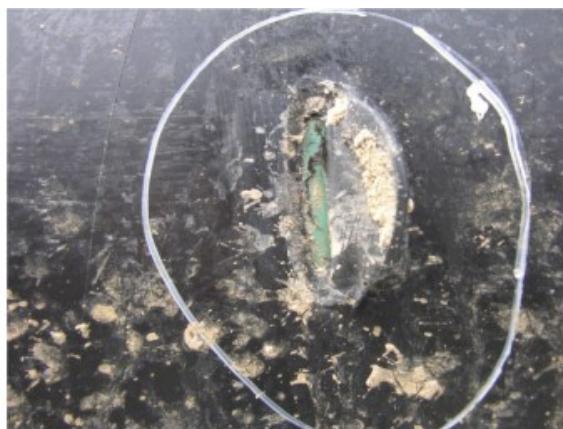
Potensi kegagalan pipa yang disebabkan oleh korosi merupakan salah satu bahaya yang paling umum untuk terjadi. Korosi menjadi perhatian karena kehilangan ketebalan dinding pipa dapat berarti pengurangan integritas struktural pipa. Beberapa faktor lain yang mempengaruhi terjadi korosi adalah suhu, tekanan, kecepatan, padatan dan cairan yang terperangkap.

a. Korosi Internal

Korosi pada internal pipa dapat disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya disebabkan oleh zat kimia, di mana ada zat yang bersifat asam sehingga timbul kemungkinan korosif. Penyebab lainnya adalah *Sulphate Reducing Bacteria*, bakteri yang berasal dari aktivitas gunung berapi dan gas alam. Bakteri ini memakan karbon namun melepaskan senyawa kimia gas Hidrogen Sulfida ( $H_2S$ ). Batas maksimum kandungan  $CO_2$  dan  $H_2S$  yang terdapat pada pipa bergantung pada sumur. Apabila kandungannya melampaui kemampuan material pipa maka hal ini dapat menimbulkan bahaya. Dampak lain yang dapat terjadi yaitu pipa menjadi bolong dan penipisan ketebal dinding pipa.

## b. Korosi Eksternal

Korosi eksternal pada pipa dapat berupa korosi yang diinduksi secara mikrobiologis atau dari aksi galvanik, atau reaksi elektrokimia, di mana pipa baja menjadi anoda dalam sel elektrokimia. Ini adalah bahaya yang bergantung pada waktu, dan terjadi setelah beberapa waktu dalam pelayanan. Proteksi katodik dapat diaplikasikan untuk melindungi ketidak sempurnaan *coating*. Proteksi katodik adalah penerapan arus listrik pada logam untuk mengimbangi gaya gerak listrik alami korosi (Singh, 2014). Kegagalan ini dapat menyebabkan pipa mengalami kebocoran dan kerusakan *coating* yang tampak pada Gambar 4.2.

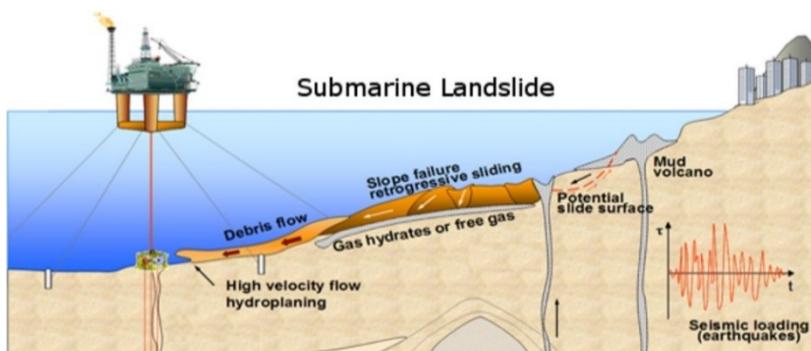


Gambar 4.2 Kerusakan *coating* pipa (Singh, 2014)

### 4.2.1.2 Kesalahan Konstruksi

Pipa bawah laut telah melewati berbagai tahap sebelum menjalankan masa operasinya, salah satunya adalah tahap konstruksi. Pada masa perancangan pipa, konstruksi pipa dibuat berdasarkan rancangan yang diberikan dan mengikuti standar (*codes*) serta ketentuan yang ada. Namun pada masa operasi pipa, dapat muncul suatu masalah terkait *improper design*, yaitu sebuah permasalahan yang ada karena bawaan dari material pipa itu sendiri. Penyebab kegagalan biasanya dikarenakan kualitas las yang buruk dan teknik pemasangan pipa yang tidak tepat. Dampak buruknya yaitu pipa mengalami keretakan.

### 4.2.1.3 Bencana Alam



Gambar 4.3 Tanah longsor bawah laut

Beberapa contoh ancaman terhadap pipa bawah laut yang tidak dapat diprediksi atau dikendalikan adalah tanah longsor bawah laut, banjir, dan tsunami. Ancaman-ancaman ini berkaitan dengan pengaruh cuaca dan kekuatan luar. Efek dari kegagalan ini adalah pipa mengalami keretakan dan penyok. Gambar 4.3 merupakan contoh bencana alam yaitu tanah longsor bawah laut yang dapat terjadi di lingkungan sekitar pipa.

#### 4.2.1.4 Dasar Laut yang Tidak Rata

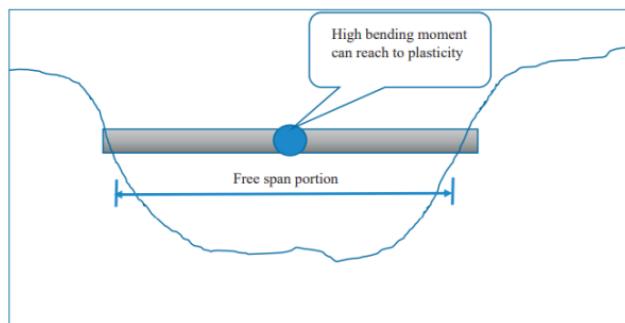
##### a. *Scouring*

*Scouring* merupakan fenomena alam yang disebabkan oleh gerusan aliran air laut. Peristiwa ini banyak terjadi pada material tanah *silt* atau *sand*, tetapi juga dapat terjadi pada keadaan berbatu atau berkarang dengan kondisi tertentu. Sehingga *scouring* dapat diartikan pergerakan dari tanah dasar (*sea bed*) perairan yang disebabkan oleh arus dan gelombang yang prosesnya sama seperti erosi yang secara alami dan dapat juga disebabkan oleh elemen struktur yang dekat dengan dasar laut. Fenomena *scouring* akan menyebabkan penurunan kapasitas tahanan pondasi yaitu tahanan pasif tanah terhadap gaya lateral dan momen (Mousselli, 1981).

##### b. *Free-Span*

Salah satu masalah utama pada pipa adalah *free span* karena menghasilkan banyak tekanan pada pipa. Gambar 4.4 merupakan gambaran fenomena bentangan bebas. *Free span* disebabkan oleh hal-hal berikut:

- Dasar laut yang tidak rata pada rute yang dipilih;
- Tempat pembuangan batu;
- Gelombang pasir;
- *Scour* (gerusan);
- Batu.



**Gambar 4.4** Fenomena *free span* (El-Reedy, 2020)

Bentangan bebas dapat mengalami getaran *in-line* atau *cross-flow*, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan *fatigue*. Analisis *free span* akan menghasilkan panjang *free span* yang diijinkan agar tegangan yang terjadi pada *free span* tidak melebihi tegangan *yield* material pipa. Jika panjang bentang aktual melebihi panjang yang diizinkan, koreksi perlu dilakukan untuk mengurangi rentang bebas guna menghindari kerusakan pipa. Dengan demikian pipa harus dipantau secara berkala untuk memastikan bahwa tidak ada *free span* yang berada di luar panjang yang dapat diterima. Ketika *free span* teridentifikasi, maka perlu segera diperbaiki untuk menghindari kerusakan kelelahan pada pipa (El-Reedy, 2020).

#### 4.2.1.5 Kesalahan saat *Maintenance*

*Maintenance* atau pemeliharaan merupakan tindakan yang dilakukan untuk menjaga keutuhan integritas pipa dalam masa operasinya. Perawatan yang tidak tepat adalah jenis kesalahan yang dapat terjadi pada beberapa tingkat dalam operasi. Kurangnya perhatian manajemen terhadap pemeliharaan, prosedur pemeliharaan yang salah, dan kesalahan yang dibuat selama kegiatan pemeliharaan adalah semua kesalahan yang secara langsung atau tidak langsung dapat menyebabkan kegagalan pipa (Singh, 2014). Salah satu alat yang digunakan saat pemeliharaan adalah *Remotely Operated Vehicle* (ROV) yang tampak pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5 Remotely operated vehicle**

#### **4.2.1.6 Kesalahan Manusia**

Peristiwa yang akan selalu dihindari selama masa operasi pipa adalah kecelakaan atau kerusakan pipa. Dalam sebagian besar peristiwa tersebut, yang memberikan dampak secara langsung maupun tidak langsung adalah kesalahan manusia. Potensi kesalahan manusia mungkin merupakan aspek yang paling sulit untuk diukur. Profesional keselamatan menekankan bahwa identifikasi perilaku manusia yang salah mungkin menjadi kunci dalam pencegahan kecelakaan menyangkut pipa. Faktor-faktor yang mendasari perilaku dan sikap menyeberang ke bidang psikologi, sosiologi, dan biologi (Muhlbauer, 2004).

#### **4.2.1.7 Kerusakan Pihak Ketiga**

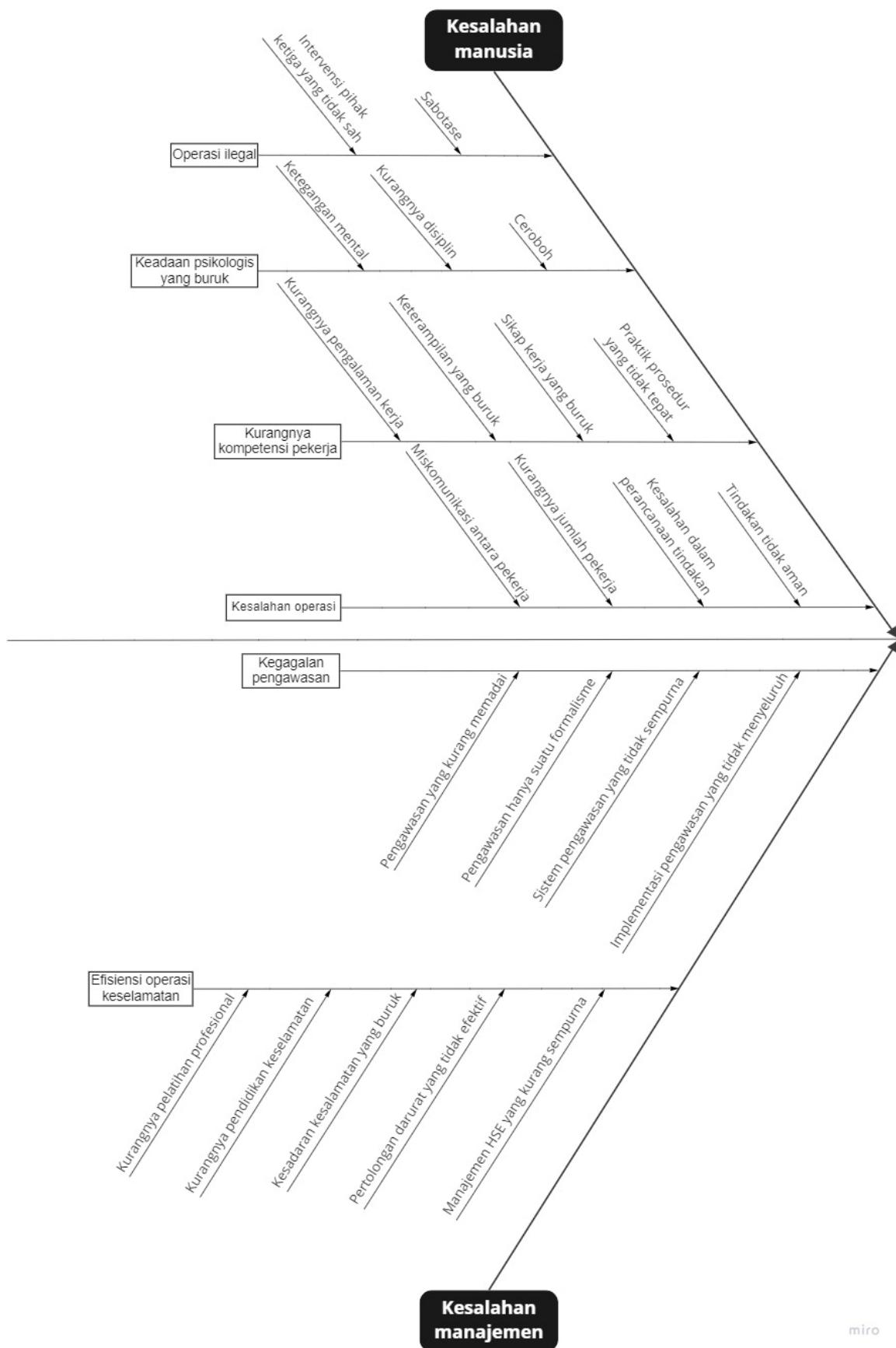
Kerusakan pihak ketiga adalah kerusakan yang terjadi pada pipa sistem oleh orang atau aktivitas yang tidak sama sekali bertanggung jawab untuk pemeliharaan atau pengoperasian sistem pipa. Ini bisa jadi karena vandalisme atau kasus orang melakukan beberapa pekerjaan di dekat pipa yang tidak terkait ke pipa dan secara tidak sengaja merusaknya. Sabotase dapat membawa risiko tidak terduga yang menyebabkan kegagalan. Penilaian risiko harus menetapkan tingkat kemungkinan ancaman dan rencana harus dibuat untuk mengatasi kegagalan apabila konsekuensi tinggi dan menjadi situasi darurat. Pencegahan adalah langkah terbaik untuk mengendalikan ancaman kerusakan pihak ketiga terhadap pipa (Singh, 2014).

#### **4.2.1.8 Kesalahan Manajemen**

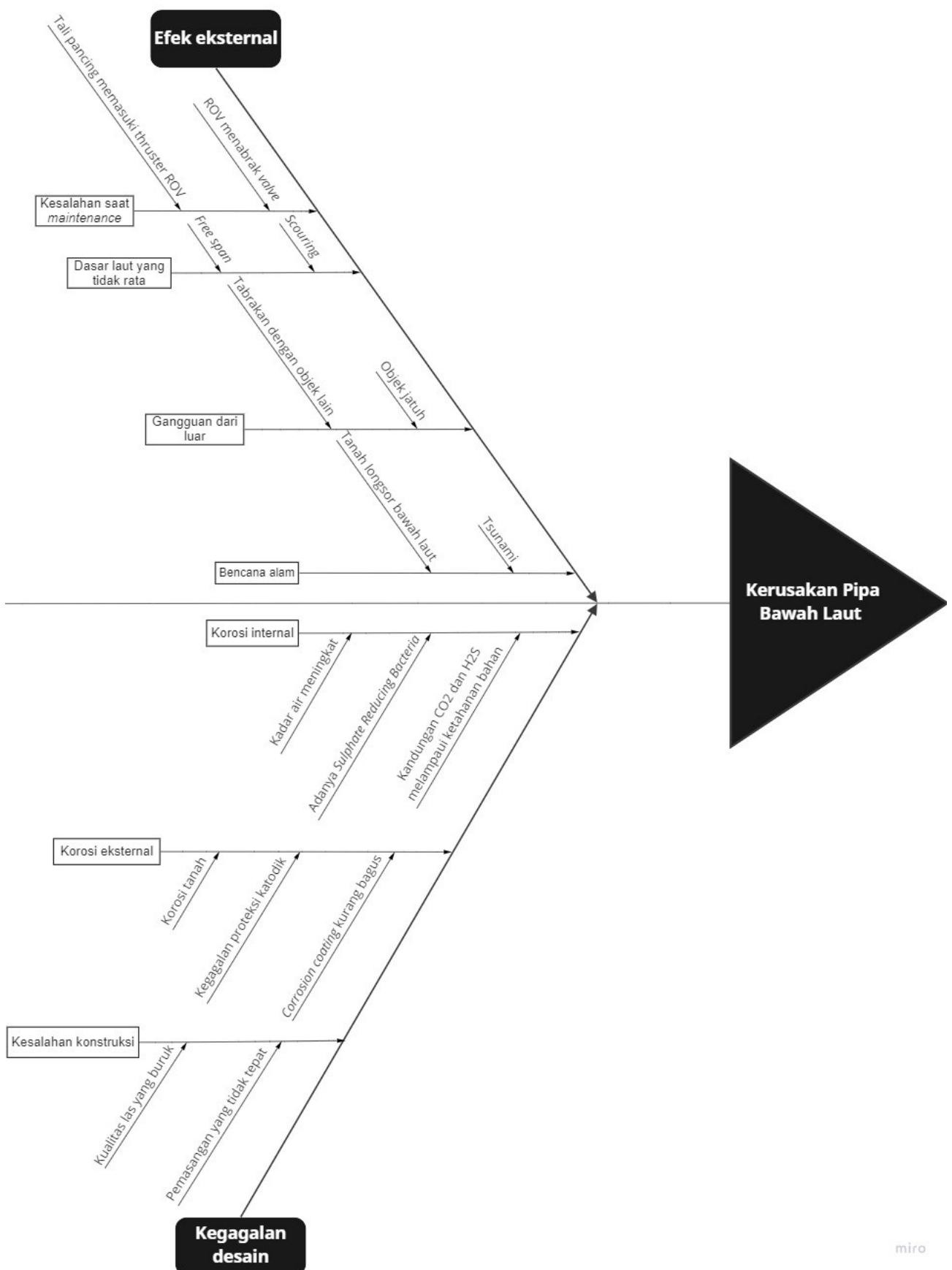
Dalam kelompok kegagalan kesalahan manajemen, terdapat mode kegagalan efisiensi operasi keselamatan dan kegagalan pengawasan. Penyebabnya berkaitan dengan sistem pengawasan, manajemen *Health, Safety, and Environmental* (HSE), pendidikan keselamatan, pertolongan darurat, dan pelatihan profesional. Apabila dua mode kegagalan itu terjadi, dapat memberikan efek kegagalan seperti hasil pekerjaan kurang baik, terjadi kesalahan dalam pengerjaan dan kecelakaan pada pekerja.

### **4.3 Diagram Fishbone**

Lain halnya dengan pipa yang letaknya di daratan, pipa bawah laut melewati media yang cukup beragam karena mengikuti kontur permukaan bumi. Apabila terjadi kecelakaan, dampaknya akan menyebar ke jangkauan yang luas dan membawa risiko yang besar. Oleh karena itu, identifikasi risiko dilakukan dengan bantuan diagram *fishbone*. Penyebab kerusakan pipa bawah laut dibuat berdasarkan tinjauan literatur, sumber data terbuka, dan pendapat para ahli. Gambar diagram *fishbone* mewakili penyebab kerusakan keseluruhan seperti yang dijelaskan pada Tabel 4.3. Kerusakan pipa bawah laut dipilih sebagai hasil akhir dari analisis diagram tersebut. Penjabaran risiko dalam bentuk diagram *fishbone* disajikan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Diagram *fishbone*



**Gambar 4.6** Diagram *fishbone* (lanjutan)

#### 4.4 Hasil Identifikasi Risiko

Diskusi dengan para responden perlu dilakukan untuk pembuatan tabel FMEA tradisional yang berisikan kelompok kegagalan, mode kegagalan, dan efek kegagalan. Tabel 4.3 menyajikan uraian hasil identifikasi penyebab kerusakan pipa bawah laut.

**Tabel 4.3** Faktor penyebab kerusakan pipa bawah laut

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Penyebab Kegagalan	Efek Kegagalan
1	Kegagalan desain	Korosi internal	Kadar air meningkat	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pipa menjadi bolong</li> <li>- Penipisan ketebalan dinding pipa</li> </ul>
			Adanya <i>Sulphate Reducing Bacteria</i>	
			Kandungan CO <sub>2</sub> dan H <sub>2</sub> S melampaui ketahanan bahan	
		Korosi eksternal	<i>Corrosion coating</i> kurang bagus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pipa mengalami korosi</li> <li>- Pipa mengalami kebocoran</li> </ul>
			Kegagalan proteksi katodik	
			Korosi tanah	
		Kesalahan konstruksi	Kualitas las yang buruk	Pipa mengalami keretakan
			Pemasangan yang tidak tepat	
2	Efek eksternal	Bencana alam	Tanah longsor bawah laut	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keretakan pipa</li> <li>- Pipa penyok</li> </ul>
			Tsunami	
		Gangguan dari luar	Objek jatuh	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pipa berpotensi patah</li> <li>- Pipa penyok</li> </ul>
			Tabrakan dengan objek lain	

**Tabel 4.3** Faktor penyebab kerusakan pipa bawah laut (lanjutan)

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Penyebab Kegagalan	Efek Kegagalan
2	Efek eksternal	Dasar laut yang tidak rata	<i>Free span</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pipa mengalami defleksi atau vibrasi</li> <li>- Pipa mengalami <i>buckling/bending</i></li> </ul>
			<i>Scouring</i>	
		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	ROV menabrak <i>valve</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pipa terbentur ROV</li> </ul>
			Tali pancing memasuki <i>thruster</i> ROV	
3	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	Sabotase	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kerusakan pada <i>coating</i> pipa</li> <li>- Pipa penyok</li> </ul>
			Intervensi pihak ketiga yang tidak sah	
		Keadaan psikologis yang buruk	Ceroboh	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produktivitas pekerjaan kurang</li> <li>- Eksekusi pekerjaan tidak efektif</li> </ul>
			Ketegangan mental	
			Kurangnya disiplin	
		Kurangnya kompetensi pekerja	Keterampilan yang buruk	Hasil pekerjaan kurang baik
			Kurangnya pengalaman kerja	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menghambat kinerja sistem</li> </ul>
			Sikap kerja yang buruk	

**Tabel 4.3** Faktor penyebab kerusakan pipa bawah laut (lanjutan)

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Penyebab Kegagalan	Efek Kegagalan
3	Kesalahan manusia	Kurangnya kompetensi pekerja	Praktik prosedur yang tidak tepat	Terjadi kesalahan dalam penggerjaan
		Kesalahan operasi	Miskomunikasi antara pekerja	Menghambat kinerja sistem
			Kurangnya jumlah pekerja	Terjadi umpang tindih <i>job desk</i> antar pekerja
			Kesalahan dalam perancanaan tindakan	Pekerjaan tertunda
			Tindakan tidak aman	Kerusakan pada <i>coating</i> pipa
4	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	Sistem pengawasan yang tidak sempurna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hasil pekerjaan kurang baik</li> <li>- Terjadi kesalahan dalam penggerjaan</li> </ul>
			Pengawasan yang kurang memadai	
			Implementasi pengawasan yang tidak menyeluruh	
			Pengawasan hanya suatu formalisme	

**Tabel 4.3** Faktor penyebab kerusakan pipa bawah laut (lanjutan)

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Penyebab Kegagalan	Efek Kegagalan
4	Kesalahan manajemen	Efisiensi operasi keselamatan	Pertolongan darurat yang tidak efektif Manajemen HSE yang kurang sempurna Kurangnya pendidikan keselamatan Kurangnya pelatihan profesional Kesadaran keselamatan yang buruk	- Kecelakaan pada pekerja - Ketidakmampuan mengambil tindakan saat keadaan darurat

#### 4.5 Analisis FMEA Tradisional

FMEA Tradisional merupakan salah satu teknik sistematis untuk mengidentifikasi dan menjelaskan kemungkinan mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan efek kegagalan. Setelah diagram *fishbone* dibuat, dilakukan penyebaran kuisioner FMEA guna mendapatkan peringkat untuk masing-masing kategori; *occurrence*, *detection*, dan *severity* dengan skor 1 hingga 10. Panduan untuk kategori ranking bersumber dari Barends *et al.*, (2012).

##### 4.5.1 Perhitungan Risiko

Risiko pada masa operasi pipa bawah laut dapat dihitung melalui penyebaran kuisioner FMEA terhadap tiga kategori sebagai berikut:

1. *Occurrence*: Skala peringkat FMEA yang mendefinisikan frekuensi mode kegagalan terjadi. Probabilitas kejadian menentukan bahwa kesalahan potensial terjadi dengan frekuensi apa. Berikut merupakan Tabel 4.4 yang menjelaskan definisi untuk setiap skor.

**Tabel 4.4** Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk *occurrence* (O)

<i>Definition of occurrence of failure mode</i>	(O)
<i>Negligible</i>	1
<i>Very low</i>	2

**Tabel 4.4** Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk *occurrence* (O) (lanjutan)

<i>Definition of occurrence of failure mode</i>	(O)
<i>Low</i>	3
<i>Occasionally</i>	4
<i>Now and then</i>	5
<i>Regularly</i>	6
<i>Very regularly</i>	7
<i>Often</i>	8
<i>Very Often</i>	9
<i>Extremely often</i>	10

2. *Severity*: Skala peringkat FMEA yang mendefinisikan keseriusan dan tingkat keparahan dari efek dari kegagalan apabila terjadi. Semakin tinggi skor *severity*, maka akan semakin parah efek yang ditimbulkan. Penjelasan definisi dari setiap skor terlihat pada Tabel 4.5 sebagai berikut:

**Tabel 4.5** Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk *severity* (S)

<i>Definition of severity of failure mode</i>	<i>Consequence of failure mode with this severity</i>	(S)
<i>None</i>	<i>Unnoticed; no relevant effect</i>	1
<i>Almost none</i>	<i>Failure not noticed; little effect</i>	2
<i>Extremely low</i>	<i>Extra effort to produce, no delay</i>	3
<i>Very low</i>	<i>Short delay in process</i>	4
<i>Low</i>	<i>Moderate delay in process</i>	5
<i>Moderate</i>	<i>Long delay in process due to carrying out repairs</i>	6
<i>High</i>	<i>Rejection of produced products</i>	7
<i>Very high</i>	<i>Customer end up with faulty report/product</i>	8
<i>Extremely high</i>	<i>Fail does no longer meet legal rules</i>	9
<i>Dangerously high</i>	<i>People can get severely wounded</i>	10

3. *Detection*: Skala peringkat FMEA yang menentukan kemungkinan mendeteksi kegagalan atau efek dari kegagalan sebelum terjadi. Tingginya skor *detection* menunjukkan semakin sering penyebab kegagalan terjadi. Penjelasan kriteria untuk setiap skor dijabarkan pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk *detection* (D)

<i>Definition of detection of failure mode</i>	(D)
<i>Certainly</i>	1
<i>Very likely</i>	2
<i>Likely</i>	3

**Tabel 4.6** Definisi dan kategori ranking mode kegagalan untuk *occurrence* (O) (lanjutan)

<b>Definition of detection of failure mode</b>	<b>(D)</b>
<i>More than average</i>	4
<i>Average</i>	5
<i>Low</i>	6
<i>Very low</i>	7
<i>Unlikely</i>	8
<i>Very unlikely</i>	9
<i>Excluded</i>	10

#### 4.5.2 Kuisioner FMEA Tradisional

Pemberian skor risiko dilakukan oleh lima orang responden yang merupakan *expert* dan sudah berpengalaman di bidangnya. Tabel 4.7 merupakan biodata para ahli yang terlibat.

**Tabel 4.7** Biodata responden kuisioner

No.	Nama	Posisi/Jabatan	Lama Bekerja
1	Agus Teguh Lesmana	<i>Senior Project Engineer</i>	16 tahun
2	Sudjarwoko	<i>Subsea Maintenance Engineer</i>	15 tahun
3	Anjas Herwasto	<i>Project SHE Specialist &amp; Coordinator</i>	14 tahun
4	Cecep Hendriana	<i>Senior Marine and Subsea Engineer</i>	12 tahun
5	Tanti S. Rasyid	<i>Senior Process Engineer/Process Safety</i>	11 tahun

*Risk Priority Number* (RPN) adalah suatu sistem matematis yang menerjemahkan sekumpulan dari efek dengan tingkat keparahan (*severity*) yang serius, sehingga dapat menciptakan suatu kegagalan yang berkaitan dengan efek – efek tersebut (*occurrence*), dan mempunyai kemampuan untuk mendeteksi kegagalan – kegagalan (*detection*) tersebut sebelum sampai ke konsumen. RPN didapatkan dari hasil perkalian dari tiga skor kategoris yang sudah dijelaskan sebelumnya. Tabel 4.8 hingga 4.12 merupakan hasil kuisioner skor RPN yang telah diisi oleh lima orang *expert*.

**Tabel 4.8** Hasil kuisioner responden 1

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Kategori Ranking		
			Occurrence	Detection	Severity
1	Kegagalan desain	Korosi internal	2	8	4
2		Korosi eksternal	1	8	2
3		Kesalahan konstruksi	2	8	6
4	Efek eksternal	Bencana alam	3	8	7
5		Gangguan dari luar	2	8	5

**Tabel 4.8** Hasil kuisioner responden 1 (lanjutan)

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Kategori Ranking		
			Occurrence	Detection	Severity
6	Efek eksternal	Dasar laut yang tidak rata	2	5	3
7		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	2	7	3
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	1	5	5
9		Keadaan psikologis yang buruk	3	4	4
10		Kurangnya kompetensi pekerja	2	2	4
11		Kesalahan operasi	3	2	3
12	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	3	5	4
13		Efisiensi operasi keselamatan	2	6	6

**Tabel 4.IV9** Hasil kuisioner responden 2

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Kategori Ranking		
			Occurrence	Detection	Severity
1	Kegagalan desain	Korosi internal	3	2	7
2		Korosi eksternal	2	8	6
3		Kesalahan konstruksi	3	7	6
4	Efek eksternal	Bencana alam	1	9	8
5		Gangguan dari luar	2	8	5
6		Dasar laut yang tidak rata	4	8	6
7		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	2	7	6
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	1	9	7
9		Keadaan psikologis yang buruk	3	3	6
10		Kurangnya kompetensi pekerja	3	1	6
11		Kesalahan operasi	2	2	7
12	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	2	1	6
13		Efisiensi operasi keselamatan	2	2	6

**Tabel 4.10** Hasil kuisioner responden 3

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Kategori Ranking		
			Occurrence	Detection	Severity
1	Kegagalan desain	Korosi internal	2	2	6
2		Korosi eksternal	3	8	5
3		Kesalahan konstruksi	3	7	7
4	Efek eksternal	Bencana alam	2	10	7
5		Gangguan dari luar	2	9	8
6		Dasar laut yang tidak rata	2	8	8
7		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	3	6	5
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	1	9	5
9		Keadaan psikologis yang buruk	5	1	4
10		Kurangnya kompetensi pekerja	4	2	4
11		Kesalahan operasi	4	2	4
12	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	3	2	4
13		Efisiensi operasi keselamatan	2	2	4

**Tabel 4.11** Hasil kuisioner responden 4

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Kategori Ranking		
			Occurrence	Detection	Severity
1	Kegagalan desain	Korosi internal	2	7	4
2		Korosi eksternal	2	4	6
3		Kesalahan konstruksi	3	3	7
4	Efek eksternal	Bencana alam	2	7	4
5		Gangguan dari luar	3	8	4
6		Dasar laut yang tidak rata	4	3	6
7		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	2	3	4
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	1	9	2
9		Keadaan psikologis yang buruk	2	3	2
10		Kurangnya kompetensi pekerja	2	8	5

**Tabel 4.11** Hasil kuisioner responden 4 (lanjutan)

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Kategori Ranking		
			Occurrence	Detection	Severity
11	Kesalahan manusia	Kesalahan operasi	3	2	6
12	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	3	2	6
13		Efisiensi operasi keselamatan	3	3	6

**Tabel 4.12** Hasil kuisioner responden 5

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Kategori Ranking		
			Occurrence	Detection	Severity
1	Kegagalan desain	Korosi internal	2	6	5
2		Korosi eksternal	2	7	4
3		Kesalahan konstruksi	3	7	4
4	Efek eksternal	Bencana alam	2	7	8
5		Gangguan dari luar	2	8	5
6		Dasar laut yang tidak rata	4	6	5
7		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	3	6	4
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	2	5	4
9		Keadaan psikologis yang buruk	3	4	4
10		Kurangnya kompetensi pekerja	2	2	4
11		Kesalahan operasi	2	3	3
12	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	3	4	4
13		Efisiensi operasi keselamatan	2	3	5

Seluruh hasil pengisian kuisioner oleh lima orang responden dapat dikelompokkan menjadi tabel untuk mempermudah tahapan selanjutnya yaitu menghitung indeks O, S, D dari setiap mode kegagalan. Hasil pengelompokan kuisioner FMEA tradisional dapat dilihat pada Lampiran A.

#### 4.5.3 Perhitungan Index

Langkah yang perlu dilakukan sebelum menghitung RPN adalah menentukan rating *occurrence*, *severity*, dan *detection index* terlebih dahulu karena setiap mode kegagalan memiliki kemungkinan yang berbeda. Berdasarkan Long *et al.*, (2008) rumus yang digunakan untuk menghitung *occurrence* (O.I), *detection* (D.I), dan *severity index* (S.I) adalah sebagai berikut:

$$O.I = \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i n_i}{10N} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$D.I = \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i n_i}{10N} \times 100\% \quad (4.2)$$

$$S.I = \frac{\sum_{i=1}^{10} a_i n_i}{10N} \times 100\% \quad (4.3)$$

Dimana:

$a_i$  = konstanta yang menyatakan bobot yang ditetapkan untuk setiap respons (berkisar dari 1-10)

$n_i$  = frekuensi setiap respon

$N$  = total jumlah responden

Sebagai contoh, berikut merupakan perhitungan *occurrence index* untuk mode kegagalan bencana alam. Pada mode kegagalan ini diketahui bahwa dua responden memilih ranking 1, dua responden memilih ranking 2, dan satu responden memilih ranking 3. Maka, indeks *occurrence* dapat dihitung seperti berikut:

$$\begin{aligned} O.I &= \frac{((1x2) + (2x2) + (3x1))}{10x5} \times 100\% \\ &= \frac{9}{50} \times 100\% \\ &= 0.18 \times 100 = 18 \end{aligned}$$

Perhitungan dilakukan terhadap seluruh mode kegagalan, sehingga didapatkan hasil perhitungan *index* O, S, D seperti pada Tabel 4.13 berikut ini:

**Tabel 4.13** Hasil perhitungan *index*

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Index		
			O	D	S
1	Kegagalan desain	Korosi internal	22	50	54
2		Korosi eksternal	16	74	38
3		Kesalahan konstruksi	24	70	54
4	Efek eksternal	Bencana alam	18	78	74
5		Gangguan dari luar	22	80	54
6		Dasar laut yang tidak rata	26	62	46
7		Kesalahan saat maintenance	26	62	42

**Tabel 4.13** Hasil perhitungan *index* (lanjutan)

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Index		
			O	D	S
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	16	66	52
9	Kesalahan manusia	Keadaan psikologis yang buruk	32	38	46
10		Kurangnya kompetensi pekerja	24	22	42
11		Kesalahan operasi	24	26	40
12	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	30	36	44
13		Efisiensi operasi keselamatan	22	40	54

Setelah ditemukannya *index* O, S, D untuk seluruh mode kegagalan, maka dapat dilanjutkan dengan mencocokkan angka yang didapatkan dengan golongan rating. Panduan angka indeks untuk penentuan rating dapat mengacu pada Tabel 4.14 yang berasal dari Al-Hammad (2003):

**Tabel 4.14** Panduan angka *index* (Al-Hammad, 2003)

Angka Index	
Rating	Index
1	0 - 10
2	11 - 20
3	21 - 30
4	31 - 40
5	41 - 50
6	51 - 60
7	61 - 70
8	71 - 80
9	81 - 90
10	91 - 100

Contoh penggolongan rating dapat dilihat pada mode kegagalan no. 4 yaitu bencana alam. Mode kegagalan ini memiliki *detection index* 78. Dikarenakan 78 termasuk dalam angka *index* diantara 71 - 80, maka mode kegagalan bencana alam digolongkan ke dalam rating 8. Hasil dari penggolongan rating terhadap seluruh mode kegagalan dapat terlihat pada Tabel 4.15.

**Tabel 4.15** Hasil penggolongan rating

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Index			Rating		
			O	D	S	O	D	S
1	Kegagalan desain	Korosi internal	22	50	54	3	5	6
2		Korosi eksternal	16	74	38	2	8	4
3		Kesalahan konstruksi	24	70	54	3	7	6
4	Efek eksternal	Bencana alam	18	78	74	2	8	8
5		Gangguan dari luar	22	80	54	3	8	6
6		Dasar laut yang tidak rata	26	62	46	3	7	5
7		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	26	62	42	3	7	5
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	16	66	52	2	7	6
9		Keadaan psikologis yang buruk	32	38	46	4	4	5
10		Kurangnya kompetensi pekerja	24	22	42	3	3	5
11		Kesalahan operasi	24	26	40	3	3	4
12	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	30	36	44	3	4	5
13	Kesalahan manajemen	Efisiensi operasi keselamatan	22	40	54	3	4	6

#### 4.5.4 Perhitungan *Risk Priority Number*

Setelah didapatkan rating untuk seluruh mode kegagalan maka dapat dilanjutkan dengan perhitungan *Risk Priority Number* (RPN). RPN merupakan hasil pemeringkatan tiga sumber data (*Occurrence*, *Severity*, dan *Detection*) dan memberikan arahan untuk menentukan peringkat potensi kerusakan, serta mengidentifikasi tindakan yang direkomendasikan untuk mengurangi keparahan atau kejadian. Rumus yang digunakan untuk menghitung RPN didapatkan dari Barends *et al.*, (2012) adalah sebagai berikut:

$$RPN = Occurrence (O) \times Severity (S) \times Detection (D) \quad (4.4)$$

Sebagai contoh, berikut merupakan perhitungan RPN untuk mode kegagalan no. 4 yaitu bencana alam:

$$RPN = 2 \times 8 \times 8 = 128$$

Tabel 4.16 merupakan hasil perhitungan RPN untuk seluruh mode kegagalan menggunakan metode FMEA tradisional. Diketahui dari hasil perhitungan bahwa peringkat RPN tertinggi ditempati oleh mode kegagalan gangguan dari luar dengan RPN sebesar 144. Sedangkan mode kegagalan kesalahan operasi memiliki RPN terendah yaitu sebesar 36.

**Tabel 4.16** Hasil perhitungan RPN FMEA

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Rating			RPN	Ranking
			O	D	S		
1	Kegagalan desain	Korosi internal	3	5	6	90	5
2		Korosi eksternal	2	8	4	64	9
3		Kesalahan konstruksi	3	7	6	126	3
4	Efek eksternal	Bencana alam	2	8	8	128	2
5		Gangguan dari luar	3	8	6	144	1
6		Dasar laut yang tidak rata	3	7	5	105	4
7		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	3	7	5	105	4
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	2	7	6	84	6
9		Keadaan psikologis yang buruk	4	4	5	80	7
10		Kurangnya kompetensi pekerja	3	3	5	45	11
11		Kesalahan operasi	3	3	4	36	12
12	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	3	4	5	60	10
13		Efisiensi operasi keselamatan	3	4	6	72	8

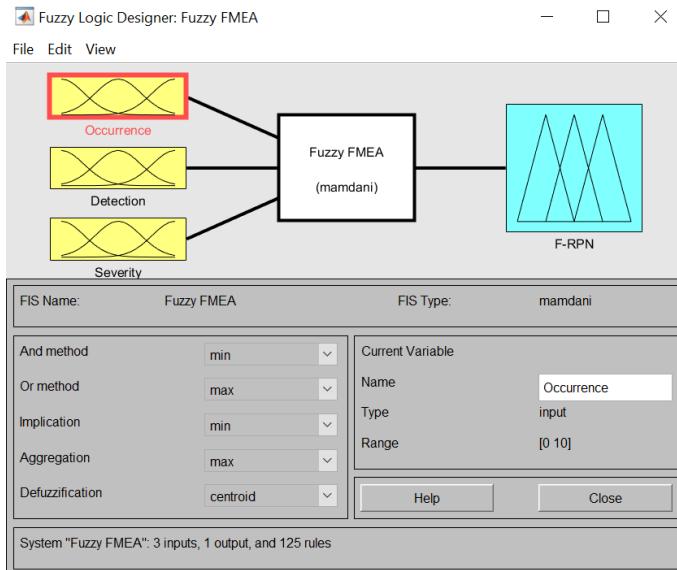
#### 4.6 Analisis Fuzzy FMEA

*Toolbox* logika fuzzy dari program perangkat lunak Matlab dapat digunakan untuk menghitung Fuzzy Risk Priority Number (F-RPN). Sebuah model didirikan untuk teknik FMEA yang memiliki 3 *input* (*Occurrence*, *Severity*, *Detection*) dan 1 variabel *output* (F-RPN). RPN dihitung dengan menggabungkan 3 faktor *input* terkait.

#### 4.6.1 Running Matlab 1

##### A. Fuzzification

Pada software Matlab terdapat suatu *command* bernama *Fuzzy Logic Designer* yang berguna untuk melakukan tahapan pertama yaitu *Fuzzification*. Gambar 4.7 adalah tampilan struktur fuzzy *reference system* setelah menambahkan 3 variabel *input* dan mengubah nama variabel *output* menjadi Fuzzy Risk Priority Number (F-RPN).



**Gambar 4.7** Struktur fuzzy *inference system*

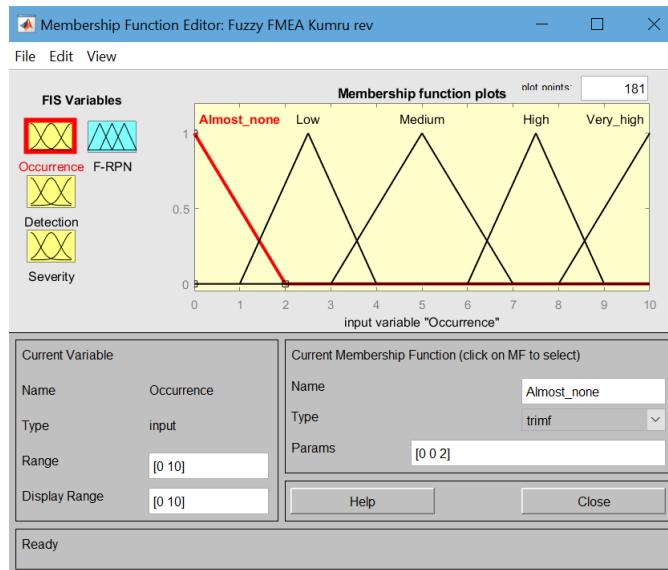
Langkah selanjutnya adalah membuat fungsi keanggotaan dari setiap variabel *input*. Variabel *input* terbagi menjadi lima tingkatan yaitu *almost none*, *low*, *medium*, *high*, dan *very high*. Range diisi 0-10 karena disesuaikan dengan penentuan awal skala ranking. Untuk menentukan parameter dapat digunakan *triangular membership function* (trimf) sebagai tipe fungsi keanggotaan. Tabel 4.17 merupakan konversi dari bilangan fuzzy. Contoh tampilan saat melakukan *input* variabel *occurrence* dapat dilihat pada Gambar 4.8.

**Tabel 4.17** Konversi dari bilangan fuzzy

Variabel linguistik		Bilangan fuzzy <i>triangular</i>		
		a	b	c
Input	<i>Occurrence, Severity, Detection</i>	<i>Almost none</i>	0	0
		<i>Low</i>	1	2.5
		<i>Medium</i>	3	5
		<i>High</i>	6	7.5
		<i>Very high</i>	8	10
Output	F-RPN	<i>None</i>	0	2
		<i>Very low</i>	1	3
		<i>Low</i>	2	4
		<i>High low</i>	3	5
		<i>Low medium</i>	4	6
		<i>Medium</i>	5	7

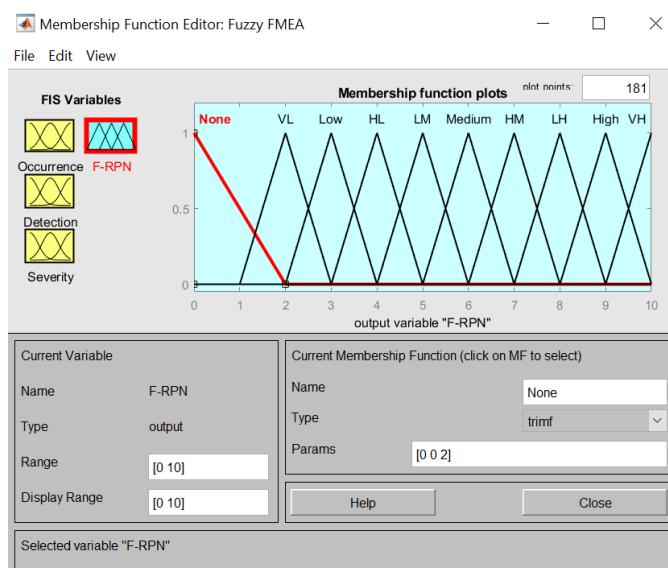
**Tabel 4.17** Konversi dari bilangan fuzzy (lanjutan)

Variabel linguistik		Bilangan fuzzy triangular		
		a	b	c
Output	F-RPN	<i>High medium</i>	6	7
		<i>Low high</i>	7	8
		<i>High</i>	8	9
		<i>Very high</i>	9	10



**Gambar 4.8** Input variabel occurrence

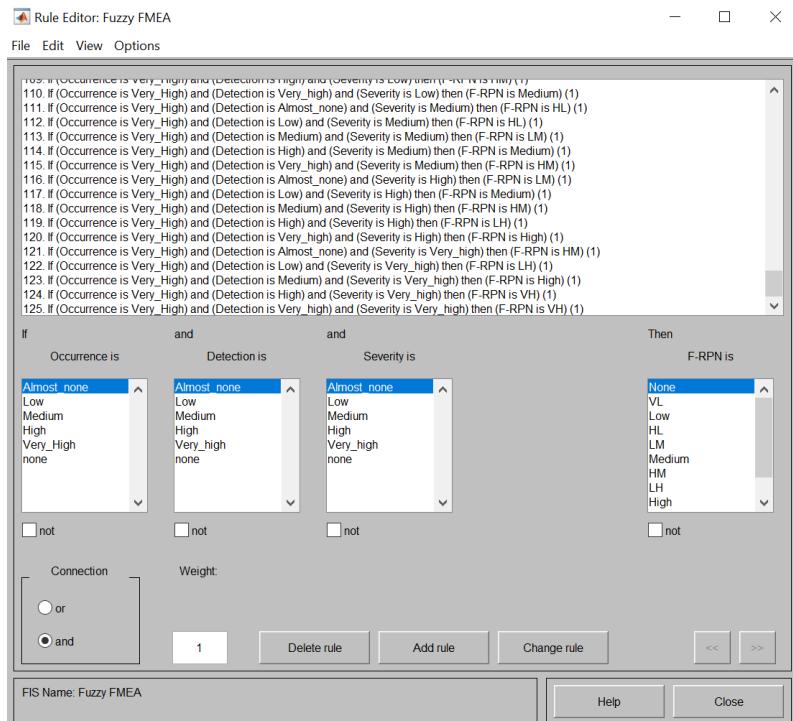
Sedangkan pendefinisian variabel *output* berupa F-RPN (Fuzzy-RPN) digunakan fungsi keanggotaan segitiga yang terbagi menjadi 10 tingkat. Tingkatan terbagi dari *none*, *very low*, *low*, *high low*, *low medium*, *medium*, *high medium*, *low high*, *high*, hingga *very high*. Dapat dilihat pada Gambar 4.9 untuk mengetahui tampilan saat menambahkan variabel *output* beserta *membership functions*-nya.



**Gambar 4.9** Output variabel F-RPN

## B. Dasar Aturan Fuzzy

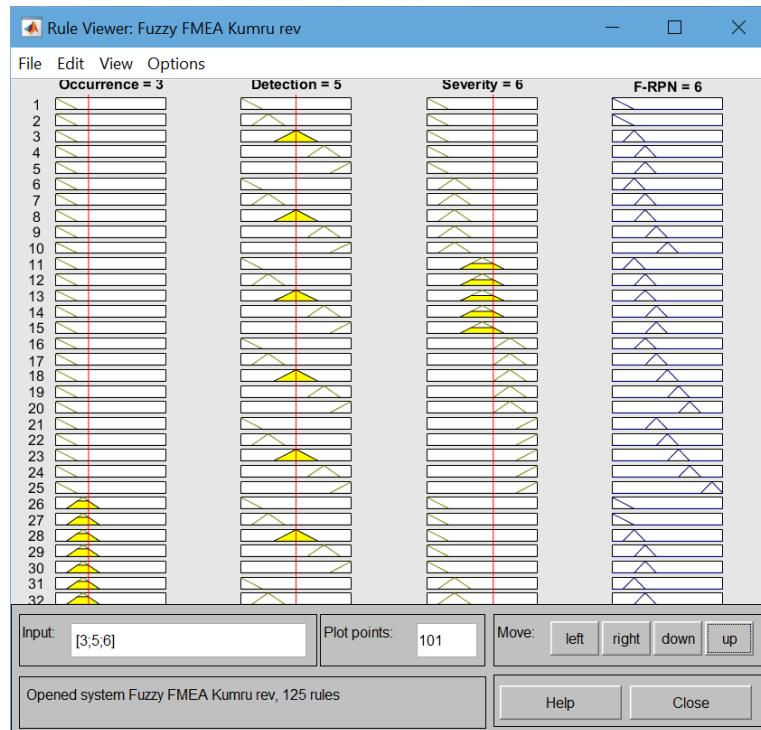
*Input fuzzy* yang dihasilkan dievaluasi menggunakan aturan fuzzy (aturan *IF-THEN*) dengan “*AND*” sebagai konektor. Sebuah fungsi bernama *rule editor* berguna untuk menambahkan aturan dalam bentuk linguistik dan mengubah daftar aturan, yang mencirikan pelaksanaan kerangka kerja. Pada *running Matlab* 1, database 125 aturan keputusan yang digunakan bersumber pada Kumru dan Kumru (2013). Daftar aturan keputusan dapat dilihat pada bagian Lampiran B. Gambar 4.10 menunjukkan tampilan saat mendefinisikan aturan tersebut.



Gambar 4.10 Dasar aturan fuzzy 1

## C. Defuzzification

Defuzzifikasi digunakan untuk mencari *output* berupa F-RPN dari *input* yang telah dimasukkan. Terdapat unit logika berbasis Matlab bernama *rule viewer* yang berfungsi untuk menampilkan gambar respon dalam sistem antarmuka fuzzy. *Input edit window* dapat diisi dengan angka-angka yang berasal dari hasil penggolongan rating dengan metode FMEA tradisional sebelumnya. Sedangkan *output window* menjelaskan hasil yang diperoleh. Gambar 4.11 menunjukkan salah satu contoh hasil defuzzifikasi di mana mode kegagalan korosi internal memiliki F-RPN sebesar 6.



**Gambar 4.11 Output F-RPN running 1**

#### 4.6.1.1 Perhitungan *Fuzzy Risk Priority Number* 1

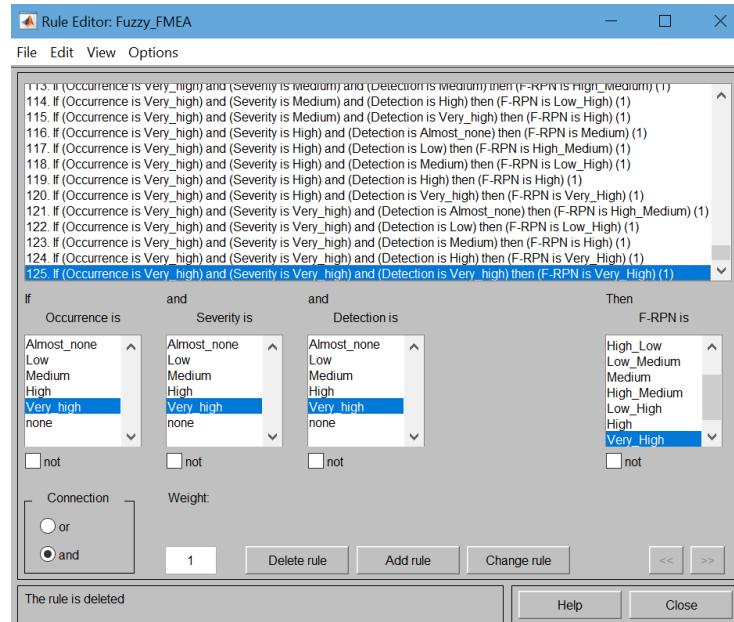
Setelah tahap defuzzifikasi, dapat diperoleh *Fuzzy Risk Priority Number* (F-RPN) untuk masing-masing 13 mode kegagalan. F-RPN tersebut juga diurutkan rankingnya dari yang tertinggi hingga terendah. F-RPN tertinggi sebesar 9 jatuh pada mode kegagalan bencana alam. Lalu, mode kegagalan korosi eksternal, kesalahan konstruksi, gangguan dari luar, dasar laut yang tidak rata, kesalahan saat *maintenance*, operasi ilegal, keadaan psikologis yang buruk menempati peringkat kedua dengan F-RPN yang sama yaitu sebesar 7. Peringkat ketiga jatuh pada mode kegagalan korosi internal, kegagalan pengawasan, dan efisiensi operasi keselamatan dengan F-RPN sebesar 6. Sehingga, mode kegagalan kurangnya kompetensi pekerja dan kesalahan operasi merupakan peringkat terendah dengan F-RPN sebesar 5. Berikut merupakan Tabel 4.18 yang menjabarkan hasil perhitungan fuzzy RPN *running* 1.

**Tabel 4.18 Hasil fuzzy RPN 1**

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Rating			F-RPN	Ranking
			O	D	S		
1	Kegagalan desain	Korosi internal	3	5	6	6	3
2		Korosi eksternal	2	8	4	7	2
3		Kesalahan konstruksi	3	7	6	7	2
4	Efek eksternal	Bencana alam	2	8	8	9	1
5		Gangguan dari luar	3	8	6	7	2
6		Dasar laut yang tidak rata	3	7	5	7	2
7		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	3	7	5	7	2
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	2	7	6	7	2
9		Keadaan psikologis yang buruk	4	4	5	7	2
10		Kurangnya kompetensi pekerja	3	3	5	5	4
11		Kesalahan operasi	3	3	4	5	4
12	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan	3	4	5	6	3
13		Efisiensi operasi keselamatan	3	4	6	6	3

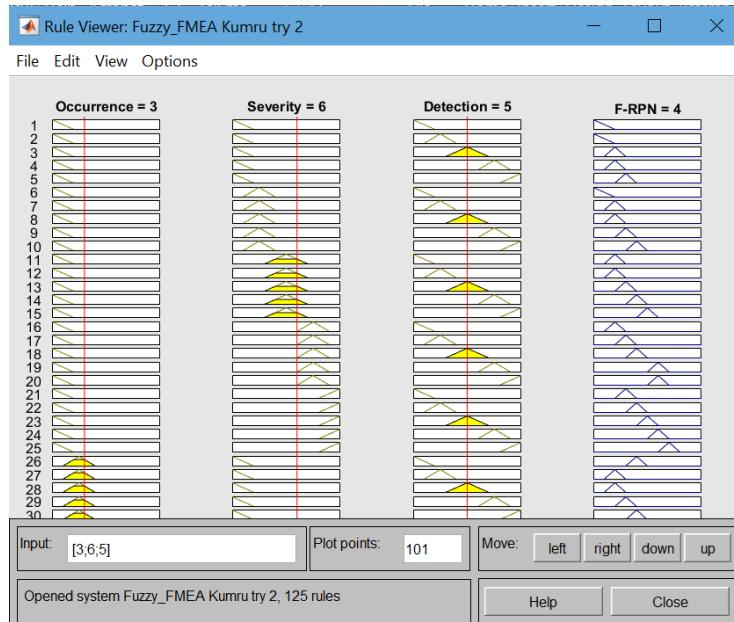
#### 4.6.2 *Running Matlab 2*

Perbedaan antara *running Matlab 1* dan *2* terletak pada dasar aturan fuzzy yang dijadikan acuan. Pada *running Matlab 2*, database 125 aturan keputusan yang diaplikasikan mengacu pada Kumar *et al.*, (2018). Pada bagian Lampiran C dapat dilihat daftar aturan keputusan tersebut. Gambar 4.12 menunjukkan tampilan *rule editor running 2*.



**Gambar 4.12 Dasar aturan fuzzy 2**

Perbedaan pada dasar aturan keputusan yang dijadikan acuan akan berdampak pada *output* yaitu Fuzzy RPN. Dibawah ini merupakan hasil F-RPN untuk mode kegagalan korosi internal. Dengan memasukkan angka [3;6;5] yang sama pada bagian *input window* seperti *running Matlab* sebelumnya, akan menghasilkan F-RPN yang berbeda. Gambar 4.13 menunjukkan F-RPN yang ditemukan untuk mode kegagalan korosi internal adalah sebesar 4.



**Gambar 4.13 Output F-RPN running 2**

#### 4.6.2.1 Perhitungan Fuzzy Risk Priority Number 2

Setelah memasukkan rating O, D, S pada *input window*, fuzzy RPN harus dicari untuk seluruh mode kegagalan supaya ranking prioritasnya dapat dibuat. Ditemukan bahwa dengan menerapkan dasar aturan yang berbeda, pada *running Matlab* kedua, hasil F-RPN tertinggi yaitu

6 diduduki oleh mode kegagalan bencana alam. Peringkat kedua dengan F-RPN sebesar 5 ditempati oleh mode kegagalan korosi eksternal, kesalahan konstruksi, gangguan dari luar, dasar laut yang tidak rata, kesalahan saat *maintenance*, operasi ilegal, dan keadaan psikologis yang buruk. Selanjutnya, mode kegagalan korosi internal, kegagalan pengawasan, dan efisiensi operasi keselamatan menempati peringkat ketiga dengan F-RPN sebesar 4. Sehingga, F-RPN terendah sebesar 3 adalah mode kegagalan kurangnya kompetensi pekerja dan kesalahan operasi. Berikut merupakan Tabel 4.19 yang merupakan hasil perhitungan fuzzy RPN *running* 2.

**Tabel 4.19** Hasil fuzzy RPN 2

No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Rating			F-RPN	Ranking
			O	D	S		
1	Kegagalan desain	Korosi internal	3	5	6	4	3
2		Korosi eksternal	2	8	4	5	2
3		Kesalahan konstruksi	3	7	6	5	3
4	Efek eksternal	Bencana alam	2	8	8	6	1
5		Gangguan dari luar	3	8	6	5	2
6		Dasar laut yang tidak rata	3	7	5	5	2
7		Kesalahan saat <i>maintenance</i>	3	7	5	5	2
8	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	2	7	6	5	2
9		Keadaan psikologis yang buruk	4	4	5	5	2
10		Kurangnya kompetensi pekerja	3	3	5	3	4
11		Kesalahan operasi	3	3	4	3	4
12		Kegagalan pengawasan	3	4	5	4	3
13	Kesalahan manajemen	Efisiensi operasi keselamatan	3	4	6	4	3

#### 4.6.3 Perbedaan Hasil FMEA tradisional dan Fuzzy FMEA

Perhitungan *Risk Priority Number* telah dilakukan sebanyak tiga kali, satu dengan metode FMEA tradisional, dan dua lainnya dengan metode fuzzy FMEA. Perbedaan hasil metode terletak pada mode kegagalan yang menempati peringkat RPN dan F-RPN tertinggi. Dari tiga macam hasil perhitungan RPN, ditemukan bahwa peringkat RPN terendah terdapat pada mode kegagalan kurangnya kompetensi pekerja dan kesalahan operasi. Hasil FMEA tradisional menunjukkan peringkat RPN tertinggi ditempati oleh mode kegagalan gangguan dari luar dengan RPN sebesar 144. Sedangkan, hasil analisis fuzzy FMEA 1 dan 2 menunjukkan hasil yang berbeda, yaitu mode kegagalan bencana alam sama-sama menduduki peringkat tertinggi dengan F-RPN sebesar 9 dan 6. Perbandingan hasil dapat dilihat pada Tabel 4.20.

**Tabel 4.20** Perbedaan hasil FMEA tradisional dan fuzzy FMEA

No.	Mode Kegagalan	Metode					
		FMEA Tradisional		Fuzzy FMEA 1		Fuzzy FMEA 2	
		RPN	Ranking	F-RPN 1	Ranking	F-RPN 2	Ranking
1	Korosi internal	90	5	6	3	4	3
2	Korosi eksternal	64	9	7	2	5	2
3	Kesalahan konstruksi	126	3	7	2	5	3
4	Bencana alam	128	2	9	1	6	1
5	Gangguan dari luar	144	1	7	2	5	2
6	Dasar laut yang tidak rata	105	4	7	2	5	2
7	Kesalahan saat <i>maintenance</i>	105	4	7	2	5	2
8	Operasi ilegal	84	6	7	2	5	2
9	Keadaan psikologis yang buruk	80	7	7	2	5	2
10	Kurangnya kompetensi pekerja	45	11	5	4	3	4
11	Kesalahan operasi	36	12	5	4	3	4
12	Kegagalan pengawasan	60	10	6	3	4	3
13	Efisiensi operasi keselamatan	72	8	6	3	4	3

## 4.7 Perencanaan Tindakan Pengendalian Risiko

### 4.7.1 Matriks Risiko

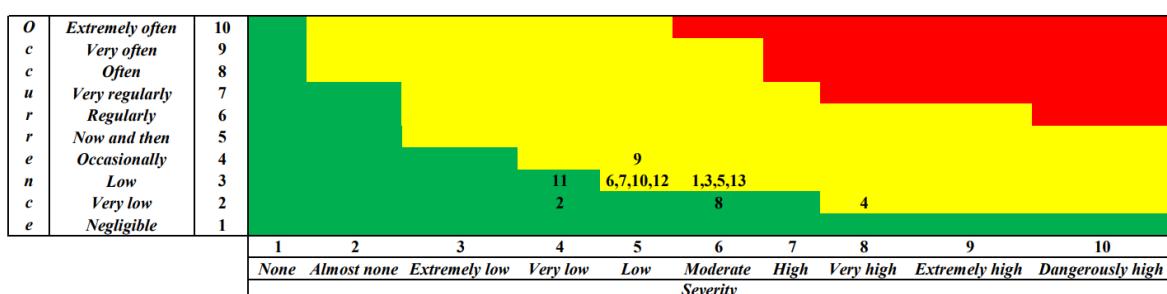
Tahapan setelah mendapatkan Fuzzy RPN yaitu adalah merencanakan tindakan pengendalian risiko yang diharapkan dapat membantu keberlangsungan pipa bawah laut pada masa operasinya. Sebelum itu, matriks risiko perlu disusun untuk mengetahui mode kegagalan memasuki zona yang mana. Penyusunan matriks risiko dilakukan dengan cara mengalikan rating O dan S mode kegagalan dan ditempatkan ke dalam matriks berukuran 10x10. Sesuai dengan aturan DNV-RP-F-107 (2017), terdapat tiga macam zona berdasarkan warnanya yaitu hijau kategori *acceptable*, kuning kategori ALARP (*as low as reasonably practicable*) *region*, dan merah kategori *not acceptable*. Letak mode kegagalan dalam suatu zona dapat menentukan risiko termasuk dapat diterima atau perlu dipertimbangkan.

- Zona Hijau (*Low Risk*): 1-14
- Zona Kuning (*Moderate Risk/ALARP*): 15-55
- Zona Merah (*High Risk*): 55-100

Tabel 4.21 menunjukkan hasil penentuan letak zona setiap mode kegagalan dalam matriks risiko. Hasil pembuatan matriks risiko ditunjukkan pada Gambar 4.14. Dapat terlihat bahwa dari 13 mode kegagalan, sepuluh risiko tergolong zona kuning ALARP, dan tiga risiko lainnya termasuk ke dalam kategori dapat diterima (*acceptable*) zona hijau.

**Tabel 4.21** Penentuan zona matriks risiko

No.	Mode Kegagalan	O	S	O x S	Zona
6	Dasar laut yang tidak rata	3	5	15	ALARP
7	Kesalahan saat <i>maintenance</i>	3	5	15	
10	Kurangnya kompetensi pekerja	3	5	15	
12	Kegagalan pengawasan	3	5	15	
4	Bencana alam	2	8	16	
1	Korosi internal	3	6	18	
3	Kesalahan konstruksi	3	6	18	
5	Gangguan dari luar	3	6	18	
13	Efisiensi operasi keselamatan	3	6	18	
9	Keadaan psikologis yang buruk	4	5	20	
2	Korosi eksternal	2	4	8	Acceptable
8	Operasi ilegal	2	6	12	
11	Kesalahan operasi	3	4	12	



**Gambar 4.14** Matriks risiko

#### 4.7.2 Saran Pengendalian Risiko

Perencanaan tindakan mitigasi seharusnya diterapkan pada mode kegagalan yang menempati zona merah dalam matriks risiko. Namun, karena dalam penelitian ini tidak ditemukan risiko pada zona merah, maka tindakan pengendalian risiko dapat direncanakan untuk mode kegagalan yang termasuk kategori *as low as reasonably practicable* (ALARP) yaitu zona kuning. Berikut merupakan tindakan pengendalian risiko yang disarankan.

##### 1. Dasar laut yang tidak rata

Akibat dasar laut yang tidak rata, pipa bawah laut seringkali mengalami fenomena *scouring*. Untuk mengurangi risiko terjadinya *scouring*, dapat dilakukan inspeksi pipa secara berkala setiap dua tahun. *Scouring* juga dapat menyebabkan risiko jangka panjang yaitu *free span*. Untuk mengurangi panjang *free span*, dapat dilakukan rektifikasi pipa.

Terdapat beberapa macam metode rektifikasi pipa, antara lain yaitu *concrete mattress*, *rock damping*, *sand bag*, dan *grout bag*. Pemasangan *grout bag* dianggap cukup efektif jika ditinjau dari sisi ekonomis dan ketahanan. *Grout bag* dapat berumur hingga puluhan tahun. Tas berisi semen diletakkan di tengah bentangan bebas, lalu dari atas kapal akan menyuntik aliran semen cair ke tas tersebut. Setelah beberapa jam, semen akan membeku dan memberi dukungan pada pipa.

##### 2. Kesalahan saat *maintenance*

Salah satu alat yang digunakan pada saat kegiatan inspeksi untuk pemeliharaan pipa bawah laut adalah *Remotely Operated Vehicle* (ROV). Untuk menghindari terjadinya kesalahan saat pengoperasian ROV perlu dilakukan beberapa hal seperti:

- Mengadakan *Toolbox Meetings*, suatu forum untuk berbagi informasi, pelatihan informal, dan perencanaan pra kerja.
- Selalu menggunakan *Personal Protective Equipment* (PPE) dengan benar dan sesuai.
- Monitor parameter operasi; kondisi laut dan cuaca.
- Selalu menunggu persetujuan dari anjungan untuk peluncuran dan pemulihan ROV.
- Mengontrol akses ke area peluncuran dan pemulihan.
- Seluruh personel memahami rencana skema *Launch and Recovery System* (LARS) ROV.
- Mengikuti prosedur peluncuran dan pemulihan ROV.
- Memastikan pilot ROV tidak terganggu saat mengoperasikan alat.
- Menyiapkan kit *oil spill* apabila terjadi tumpahan atau kebocoran hidraulik.

##### 3. Kurangnya kompetensi pekerja

Dalam pelaksanaan suatu aktivitas selama masa operasi pipa, kompetensi pekerja merupakan salah satu hal yang krusial. Tindakan yang dapat diambil yaitu

memastikan seluruh pihak yang terlibat telah memahami *job desk* masing-masing dengan benar. Saran lain yang dapat diterapkan adalah dengan memberikan penilaian atau tes, serta menyiapkan pelatihan untuk menambah kompetensi pekerja.

#### 4. Kegagalan pengawasan

Tugas dari seorang supervisor adalah mengawasi seluruh aktivitas terkait pekerjaan yang dikerjakan oleh pekerja atau personel. Untuk mengurangi kesalahan manajemen berupa kegagalan pengawasan seperti terjadinya kesalahan penggunaan suatu alat/*equipment*, perusahaan dapat menambah jumlah supervisor. Koordinasi antar pekerja perlu ditingkatkan untuk menjaga performa agar tidak turun dan menghindari terjadinya miskomunikasi.

#### 5. Korosi internal

Saran untuk mengendalikan korosi pada internal pipa lain yaitu pemberian *corrosion inhibitor* (CI). Senyawa organik yang biasa digunakan di lapangan untuk menyeimbangkan pH dalam air adalah imidazoline ( $C_3H_6N_2$ ). CI diberikan dengan cara *di-inject* dari *Floating Production Unit* (FPU) menggunakan *umbilical*. Selain itu, saran untuk mengendalikan pertumbuhan dan membunuh *Sulphate Reducing Bacteria* (SRB) adalah dengan memberikan perawatan kimia biosida.

#### 6. Gangguan dari luar

*Dropped object* dan *collision* merupakan gangguan yang dapat terjadi selama masa operasi pipa. Saran untuk mengurangi risiko mode kegagalan ini adalah membuat peta daerah terbatas terlarang dan disiarkan melalui berita pelayaran Indonesia. Dengan adanya peta tersebut, akses seluruh kapal yang hendak melewati daerah fasilitas bawah laut akan ditutup.

#### 7. Efisiensi operasi keselamatan

Berikut adalah saran yang dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi operasi keselamatan:

- Menerapkan *Emergency Response Plan* jika terjadi kebakaran, ledakan, tabrakan, *grounding*, *flooding*, *critical system failure*, *man overboard*, aktivitas kriminal, ancaman bom dengan benar.
- Pekerja memahami prosedur meninggalkan kapal, evakuasi medis, rencana darurat jika ada cedera, penyakit menular, dan kematian.
- Mengadakan pelatihan keselamatan dan simulasi keadaan darurat.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah dilakukan pengolahan dan analisis data, bagian ini akan membahas hasil dari penelitian. Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik untuk menjawab rumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Telah didapatkan 4 kelompok kegagalan yang berpotensial untuk terjadi pada pipa bawah laut di lapangan Terang Sirasun Batur, diantaranya yaitu kesalahan manusia, kesalahan manajemen, efek eksternal, dan kegagalan desain. Selain itu, juga ditemukan sebanyak 38 penyebab kegagalan dan 27 dampak kegagalan pipa bawah laut yang dapat dikelompokkan menjadi 13 mode kegagalan. Tabel 4.3 merupakan penjelasan secara lebih rinci terkait kelompok kegagalan, mode kegagalan, penyebab serta dampak dari kegagalan tersebut.
2. Dari hasil analisis risiko FMEA tradisional didapatkan *Risk Priority Number* (RPN) sebesar 90, 64, 126, 128, 144, 105, 105, 84, 80, 45, 36, 60, dan 72. Peringkat tertinggi ditempati oleh mode kegagalan gangguan dari luar dan peringkat terendah jatuh pada mode kegagalan kesalahan operasi.
3. Analisis fuzzy FMEA dilakukan dengan *running software* Matlab sebanyak dua kali dengan hasil sebagai berikut:
  - Dari hasil *running* Matlab 1 ditemukan fuzzy RPN seluruh mode kegagalan secara berurutan yaitu sebesar 6, 7, 7, 9, 7, 7, 7, 7, 7, 5, 5, 6, dan 6.
  - *Running* Matlab 2 menghasilkan fuzzy RPN secara berurutan yaitu sebesar 4, 5, 5, 6, 5, 5, 5, 5, 5, 3, 3, 4, dan 4.

Mode kegagalan bencana alam menempati peringkat F-RPN tertinggi dan peringkat terendah jatuh pada mode kegagalan kurangnya kompetensi pekerja dan kesalahan operasi.

#### **5.2 Saran**

Berikut merupakan beberapa saran yang dapat disampaikan atas penyelesaian tugas akhir berjudul Analisis Risiko Pipa Bawah Laut dengan Metode *Fishbone Diagram* dan *Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) ini:

1. Dasar aturan untuk *output* fuzzy dapat disusun saat berdiskusi dengan para responden kuisioner.
2. Dasar aturan untuk *output* fuzzy dapat mengacu pada penelitian terbaru.
3. Penelitian selanjutnya dapat dilanjutkan ke tahap menghitung biaya hingga manajemen risiko.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Hammad, I. (2003). Pattern of Foreign Construction Labourers in Saudi Arabia. *Journal of Engineering Sciences*.
- Balaraju, J., Raj, M. G., & Murthy, S. C. (2019). Fuzzy-FMEA Risk Evaluation Approach for LHD Machine – A Case Study. *Journal of Sustainable Mining*, 257-268.
- Barends, D., Oldenhof, M., Vredenbregt, M., & Nauta, M. (2012). Risk Analysis Of Analytical Validations By Probabilistic Modification Of FMEA. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* , 64, 82-86.
- Det Norske Veritas. (2015). *DNV-RP-F116 Integrity Management of Submarine Pipeline System*. Oslo: Det Norske Veritas.
- Det Norske Veritas. (2017). *DNV-RP-F107 Risk Assessment of Pipeline Protection*. Oslo: Det Norske Veritas.
- El-Reedy, M. (2020). *Offshore Structures Design, Construction, and Maintenance* (2nd ed.). Oxford: Gulf Professional Publishing.
- IEC. (2019). *IEC 31010 Risk Management-Risk Assessment Techniques* (2nd ed.). Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC).
- Inzaghi, M. (2020). *Pengembangan Safety Case Document untuk Manajemen Risiko pada Offshore Pipeline*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
- Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. New Jersey: Prentice Hall PTR .
- Kumar, A. M., Rajakarunakaran, S., Pitchipoo, P., & Vimalesan, R. (2018). Fuzzy Based Risk Prioritisation in an Auto LPG Dispensing Station. *Safety Science*, 231-247.
- Kumru, M., & Kumru, Y. P. (2013). Fuzzy FMEA Application to Improve Purchasing Process in a Public Hospital. *Applied Soft Computing*, 721-733.
- Kurniawan, I., & Vanany, I. (2013). *Analisis Risiko Kerusakan Peralatan dengan Metode Probabilistik FMEA pada Industri Minyak dan Gas* . Surabaya: Jurusan Teknik Industri FTI ITS.
- Kusumadewi, S. (2002). *Analisis dan Desain Sistem Fuzzy menggunakan Tool Box Matlab*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Long, L.-H., Lee, Y., & Lee, J. (2008). Delay and Cost Overruns in Vietnam Large Construction Projects: A Comparison with Other Selected Countries. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 367-377.
- Maradika, F. (2019). *Penerapan Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis dalam Analisa Risiko Operasi Offshore Pipeline*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
- Marcello, F. (2019). *Manajemen Risiko pada Pipa Bawah Laut di Penajam - Balikpapan dengan Metode Bowtie Analysis*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.

- Marvin, R. (2005). *Risk Assessment Theory, Methods, and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Mohammadi, A., & Tavakolan , M. (2013). Construction Project Risk Assessment Using Combined Fuzzy and FMEA. *Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)*, (pp. 232-237).
- Mousselli, A. (1981). *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. Oklahoma: PennWell Publishing Company.
- Muhlbauer, W. (2004). *Pipeline Risk Management Manual: Ideas, Techniques, and Resources*. Burlington: Gulf Professional Publishing.
- Pradana, M. A. (2016). *Penilaian Risiko Pipa Gas Bawah Laut Akibat Survei Seismik (Perbandingan Metode Matematis dan Permodelan Geoteknik)*. Surabaya: Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK ITS.
- Rausand, M., & Haugen, S. (2020). *Risk Assessment Theory, Methods, and Applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Singh, R. (2014). *Pipeline Integrity Handbook, Risk Management, and Evaluation*. (First ed.). Oxford: Gulf Professional Publishing.
- Tay, K. M., & Lim, C. P. (2006). Fuzzy FMEA with a Guided Rules Reduction System for Prioritization of Failures. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 1047-1066.
- Zimmermann, H.-J. (2001). *Fuzzy Set Theory and Its Applications* . New York: Springer.

**LAMPIRAN A**  
**PENGELOMPOKKAN KUISIONER FMEA**

			Hasil Pengelompokan FMEA Tradisional																													
No.	Kelompok Kegagalan	Mode Kegagalan	Kategori Ranking																													
			Occurrence										Detection										Severity									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Kegagalan desain	Korosi internal		4	1									2				1	1	1					1	2	1	1				
		Korosi eksternal	2	3														3	2					1	1	2		1				
		Kesalahan konstruksi		3	2												1	3	1					1	1	3						
2	Efek eksternal	Bencana alam	2	2	1												2	2	1					1	1	3						
		Gangguan dari luar		4	1													5						3	2							
		Dasar laut yang tidak rata		3	1	1											1	3		1				1	1	2	1					
		Kesalahan saat <i>maintenance</i>		3	1	1											1	2	2					2	1	1	1					
3	Kesalahan manusia	Operasi ilegal	3	1	1												2		2	1				1	3		1					
		Keadaan psikologis yang buruk			4	1										1	4							3	1	1						
		Kurangnya kompetensi pekerja		3	2									1	2	2								1	3		1					
		Kesalahan operasi		3	2										2	3								3	1		1					
4	Kesalahan manajemen	Kegagalan pengawasan		1	3	1								1		1	1	2					1	2	1	1						
		Efisiensi operasi keselamatan		4	1										1	1	1	1	1					3	2							

## LAMPIRAN B DASAR ATURAN FUZZY OUTPUT 1

No.	Occurrence	Severity	(Not) detection	Fuzzy output
1	Almost none	Almost none	Almost none	None
2	Almost none	Almost none	Low	None
3	Almost none	Almost none	Medium	Very low
4	Almost none	Almost none	High	Low
5	Almost none	Almost none	Very high	Low
6	Almost none	Low	Almost none	Very low
7	Almost none	Low	Low	Low
8	Almost none	Low	Medium	Low
9	Almost none	Low	High	High low
10	Almost none	Low	Very high	Low medium
11	Almost none	Medium	Almost none	Very low
12	Almost none	Medium	Low	Low
13	Almost none	Medium	Medium	Low
14	Almost none	Medium	High	High low
15	Almost none	Medium	Very high	High low
16	Almost none	High	Almost none	Low
17	Almost none	High	Low	High low
18	Almost none	High	Medium	Low medium
19	Almost none	High	High	Medium
20	Almost none	High	Very high	High medium
21	Almost none	Very high	Almost none	High low
22	Almost none	Very high	Low	Low medium
23	Almost none	Very high	Medium	Medium
24	Almost none	Very high	High	High medium
25	Almost none	Very high	Very high	High
26	Low	Almost none	Almost none	None
27	Low	Almost none	Low	None
28	Low	Almost none	Medium	Very low
29	Low	Almost none	High	Low
30	Low	Almost none	Very high	Low
31	Low	Low	Almost none	Very low
32	Low	Low	Low	Low
33	Low	Low	Medium	High low
34	Low	Low	High	Low medium
35	Low	Low	Very high	Medium

36	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>High low</i>
37	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Low medium</i>
38	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>
39	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>High medium</i>
40	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>Low high</i>
41	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low medium</i>
42	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>
43	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>High medium</i>
44	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Low high</i>
45	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>
46	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low medium</i>
47	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Low medium</i>
48	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>
49	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>High</i>
50	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>
51	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very low</i>
52	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>	<i>Very low</i>
53	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
54	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>High</i>	<i>High low</i>
55	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very high</i>	<i>Low medium</i>
56	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>
57	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>High low</i>
58	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Low medium</i>
59	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>
60	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>High medium</i>
61	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low medium</i>
62	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>
63	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>High medium</i>
64	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Low high</i>
65	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>
66	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>
67	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>High low</i>
68	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low medium</i>
69	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>High medium</i>
70	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>Low high</i>
71	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low high</i>
72	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>
73	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>High medium</i>
74	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Low high</i>

75	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>
76	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Almost none</i>	<i>None</i>
77	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>	<i>Very low</i>
78	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
79	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>
80	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very high</i>	<i>High low</i>
81	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very low</i>
82	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>
83	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High low</i>
84	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Low medium</i>
85	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>
86	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>
87	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>High low</i>
88	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Low medium</i>
89	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>
90	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>High medium</i>
91	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low medium</i>
92	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>
93	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>High medium</i>
94	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Low high</i>
95	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>
96	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>Medium</i>
97	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>High medium</i>
98	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Low high</i>
99	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>High</i>
100	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>
101	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very low</i>
102	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>	<i>Very low</i>
103	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
104	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>
105	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very high</i>	<i>High low</i>
106	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>
107	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>High low</i>
108	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High low</i>
109	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Low medium</i>
110	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>
111	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>High low</i>
112	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>High low</i>
113	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Low medium</i>

114	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>
115	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>High medium</i>
116	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low medium</i>
117	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>
118	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>High medium</i>
119	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Low high</i>
120	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>
121	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>High medium</i>
122	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Low high</i>
123	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
124	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>
125	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>

## LAMPIRAN C DASAR ATURAN FUZZY OUTPUT 2

No.	Occurrence	Severity	(Not) detection	Fuzzy output
1	Almost none	Almost none	Almost none	None
2	Almost none	Almost none	Low	None
3	Almost none	Almost none	Medium	Very Low
4	Almost none	Almost none	High	Very Low
5	Almost none	Almost none	Very high	Low
6	Almost none	Low	Almost none	None
7	Almost none	Low	Low	Very Low
8	Almost none	Low	Medium	Very Low
9	Almost none	Low	High	Low
10	Almost none	Low	Very high	High Low
11	Almost none	Medium	Almost none	Very Low
12	Almost none	Medium	Low	Very Low
13	Almost none	Medium	Medium	Low
14	Almost none	Medium	High	High Low
15	Almost none	Medium	Very high	Low Medium
16	Almost none	High	Almost none	Very Low
17	Almost none	High	Low	Low
18	Almost none	High	Medium	High Low
19	Almost none	High	High	Medium
20	Almost none	High	Very high	Medium
21	Almost none	Very high	Almost none	Low
22	Almost none	Very high	Low	High Low
23	Almost none	Very high	Medium	Low Medium
24	Almost none	Very high	High	Medium
25	Almost none	Very high	Very high	High Medium
26	Low	Almost none	Almost none	None
27	Low	Almost none	Low	Very Low
28	Low	Almost none	Medium	Very Low
29	Low	Almost none	High	Low
30	Low	Almost none	Very high	High Low
31	Low	Low	Almost none	Very Low
32	Low	Low	Low	Very Low
33	Low	Low	Medium	Low
34	Low	Low	High	High Low

35	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Low Medium</i>
36	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very Low</i>
37	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>
38	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>High Low</i>
39	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Low Medium</i>
40	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>
41	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>
42	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>High Low</i>
43	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low Medium</i>
44	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>
45	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>High Medium</i>
46	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>High Low</i>
47	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Low Medium</i>
48	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>
49	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>High Medium</i>
50	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Low High</i>
51	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very Low</i>
52	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>	<i>Very Low</i>
53	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
54	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>High</i>	<i>High Low</i>
55	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very high</i>	<i>Low</i>
56	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Almost none</i>	<i>Very Low</i>
57	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>	<i>Low</i>
58	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High Low</i>
59	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Low Medium</i>
60	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>
64	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low</i>
62	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>High Low</i>
63	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Low Medium</i>
64	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>
65	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>High Medium</i>
66	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>High Low</i>
67	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>Low Medium</i>
68	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>
69	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>High Medium</i>
70	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>Low High</i>
71	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low Medium</i>

72	Medium	Very high	Low	Medium
73	Medium	Very high	Medium	High Medium
74	Medium	Very high	High	Low High
75	Medium	Very high	Very high	High
76	High	Almost none	Almost none	Very Low
77	High	Almost none	Low	Low
78	High	Almost none	Medium	High Low
79	High	Almost none	High	Low Medium
80	High	Almost none	Very high	Medium
81	High	Low	Almost none	Low
82	High	Low	Low	High Low
83	High	Low	Medium	Low Medium
84	High	Low	High	Medium
85	High	Low	Very high	High Medium
86	High	Medium	Almost none	High Low
87	High	Medium	Low	Low Medium
88	High	Medium	Medium	Medium
89	High	Medium	High	High Medium
90	High	Medium	Very high	Low High
91	High	High	Almost none	Low Medium
92	High	High	Low	Medium
93	High	High	Medium	High Medium
94	High	High	High	Low High
95	High	High	Very high	High
96	High	Very high	Almost none	Medium
97	High	Very high	Low	High Medium
98	High	Very high	Medium	Low High
99	High	Very high	High	High
100	High	Very high	Very high	Very High
101	Very high	Almost none	Almost none	Low
102	Very high	Almost none	Low	High Low
103	Very high	Almost none	Medium	Low Medium
104	Very high	Almost none	High	Medium
105	Very high	Almost none	Very high	High Medium
106	Very high	Low	Almost none	High Low
107	Very high	Low	Low	Low Medium
108	Very high	Low	Medium	Medium

109	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>High Medium</i>
110	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Very high</i>	<i>Low High</i>
111	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Almost none</i>	<i>Low Medium</i>
112	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>
113	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Medium</i>	<i>High Medium</i>
114	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Low High</i>
115	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>
116	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Almost none</i>	<i>Medium</i>
117	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>	<i>High Medium</i>
118	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low High</i>
119	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>High</i>	<i>High</i>
120	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Very high</i>	<i>Very High</i>
121	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Almost none</i>	<i>High Medium</i>
122	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Low</i>	<i>Low High</i>
123	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
124	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>High</i>	<i>Very High</i>
125	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Very high</i>	<i>Very High</i>

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Dengan berakhirnya tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah turut andil dalam memberikan arahan serta bimbingan selama proses penggerjaan. Semoga seluruh bantuan dan dukungannya kepada penulis mendapat balasan yang lebih baik dari Allah SWT. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW. Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT., yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya serta diberikan nikmat sehat serta kelancaran sehingga tugas akhir ini dapat selesai dengan baik.
2. Bapak dan Mama yang selalu memberikan dukungan baik moril maupun materiil, doa, dan motivasi sehingga penulis mendapatkan semangat untuk menyelesaikan kuliah tepat waktu.
3. Kakak-kakak dan adik yang selalu menyemangati dan menjadi semangat terbesar dalam menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
4. Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. dan Ibu Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang selalu meluangkan waktu untuk membimbing penulis, memberikan saran dan masukan, serta membantu dalam melancarkan penggerjaan tugas akhir.
5. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. dan Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M. Eng selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak ilmu, pengalaman, dan saran yang berguna untuk penulis.
6. Pak Sudjarwoko, Pak Agus, Pak Anjas, Pak Cecep, Bu Tanti, dan Bu Widya dari Kangean Energy Indonesia Ltd. yang telah bersedia untuk menjadi responden dan membantu dalam pelaksanaan program tugas akhir.
7. Seluruh Dosen, Karyawan Tata Usaha, dan Administrasi Departemen Teknik Kelautan FTK-ITS yang telah memberi banyak ilmu pengetahuan, serta bantuan selama masa perkuliahan penulis.
8. Teman-teman di masa perkuliahan terutama Santuyin (Anggie, Bella, Bheta, Emira, Izdihar, Leni, Nida), 3 Manusya Kelaparan (Daffa dan Randhita), Kaza Group (Cigo dan Naomi) yang selalu memberi dukungan dari awal penggerjaan tugas akhir hingga selesai.
9. Teman-teman satu angkatan, Revastra Teknik Kelautan 2018.
10. Teman-teman penulis dari masa sekolah yaitu Ines, Bella, Helwa, Shafa, dan Anbia.
11. Pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, turut berperan dalam penyelesaian tugas akhir ini,

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BIODATA PENULIS



Faza Izzati dilahirkan di Tangerang Selatan, Banten pada tanggal 20 Februari 2000. Penulis telah menempuh pendidikan formal di Al-Azhar Bumi Serpong Damai dari jenjang Pendidikan Sekolah Dasar, Menengah Pertama, hingga lulus dari Sekolah Menengah Atas pada tahun 2018. Setelah itu, penulis memilih untuk melanjutkan pendidikan sarjana (S1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama masa perkuliahan penulis sempat aktif dalam divisi Hubungan Luar di organisasi kemahasiswaan seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (HIMATEKLA) dan Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM ITS). Selain organisasi, terdapat beberapa acara kepanitiaan yang penulis ikuti, diantaranya *Petroleum Integrated Days* (Petrolida), *Ocean Engineering Exhibition and Competition* (OCEANO), Generasi Integralistik (GERIGI), dan Makrab FTK. Selain berkontribusi dalam organisasi dan kepanitiaan, penulis juga sempat menjadi finalis dalam *Oil Rig Design Competition* pada ajang lomba *Oil and Gas Intellectual Parade* (OGIP) yang diselenggarakan UPN “Veteran” Yogyakarta. Pada tahun ketiga perkuliahan penulis berkesempatan melaksanakan kerja praktik selama dua bulan di Kangean Energy Indonesia Ltd. secara daring (*online*).