



**THESIS – ME5401**

**PENILAIAN RISIKO PIPA BAWAH LAUT AKIBAT INSTALASI DAN OPERASI  
SINGLE POINT MOORING (SPM)**

**DESTA RIFKY ALDARA**

**NRP 0421 18 5001 0009**

**Dosen Pembimbing**

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

**Dr. I Made Ariana, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN**

**FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2020**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



THESIS – ME5401

**PENILAIAN RISIKO PIPA BAWAH LAUT AKIBAT INSTALASI DAN  
OPERASI SINGLE POINT MOORING (SPM)**

DESTA RIFKY ALDARA

NRP 0421 18 5001 0009

Dosen Pembimbing:

1. Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.
2. Dr. I Made Ariana, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



THESIS – ME5401

**RISK ASSESSMENT OF SUBSEA PIPELINE DUE TO INSTALLATION  
AND OPERATION OF SINGLE POINT MOORING (SPM)**

DESTA RIFKY ALDARA

NRP 0421 18 5001 0009

Supervisor:

1. Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.
2. Dr. I Made Ariana, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Teknik (MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**DESTA RIFKY ALDARA**

**NRP: 04211850010009**

Tanggal Ujian: 16 Januari 2020

Disetujui oleh:

**Pembimbing:**

1. Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.  
NIP: 197109151994121001

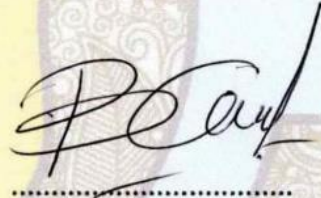


2. Dr. I. Made Ariana, S.T., M.T.  
NIP: 197106101995121001

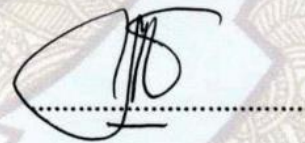


**Penguji:**

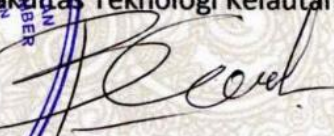
1. Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph. D  
NIP: 197903192008011008



2. Dr. Eng. Dhimas Widhi Handani, S.T., M.Sc.  
NIP: 198705272014041001



Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan

  
Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph. D

NIP: 197903192008011008

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



## ABSTRAK

### PENILAIAN RISIKO PIPA BAWAH LAUT AKIBAT INSTALASI DAN OPERASI SINGLE POINT MOORING (SPM)

Nama Mahasiswa : Desta Rifky Aldara  
NRP : 04211850010009  
Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.  
2. Dr. I Made Ariana, S.T., M.T.

Fasilitas eksplorasi lepas pantai yang berada pada daerah terpencil memerlukan investasi dan biaya operasional yang tinggi. Sehingga aset-aset yang dimiliki tergolong menjadi aset yang sangat penting bagi perusahaan. Oleh karena itu, studi dan pemeriksaan yang cermat diperlukan untuk memastikan bahwa risiko fasilitas dapat diterima. Eksplorasi lepas pantai tidak terlepas dari penggunaan pipa bawah laut yang memiliki beberapa risiko apabila terjadi kerusakan. Berdasarkan data historis, kegagalan pipa bawah laut disebabkan oleh faktor pihak ketiga (*dropped anchor*, *dragged anchor*, dan *ship sinking*). Dalam kajian ini, penilaian risiko terhadap pipa bawah laut akibat dari instalasi dan operasional *Single Point Mooring (SPM)* dilakukan dengan menggunakan standar DNVGL RP F107 dan simulasi numerik. Frekuensi dinilai dengan membandingkan hasil dari metode *Event Tree Analysis (ETA)*, *Fault Tree Tree Analysis (FTA)*, dan *Bayesian Network*. Sedangkan penilaian konsekuensi dilakukan dengan perhitungan pada standar DNVGL RP F107, simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dan *Finite Element Method (FEM)*. Hasil frekuensi dan konsekuensi dipetakan dalam matriks risiko menurut DNVGL RP F107. Berdasarkan hasil perhitungan, semua jenis kapal memiliki nilai frekuensi kurang dari  $10^{-5}$  (peringkat 1). Sedangkan peringkat konsekuensi terendah berada pada peringkat 3 dengan nilai dent 12.32% dan tertinggi berada pada peringkat 5 (>20%) yang mengakibatkan kerusakan pada pipa bawah laut. Hasil pemetaan risk matrix menunjukkan bahwa tingkat risiko berada pada kondisi *acceptable* dan *ALARP (As Low As Reasonably Practicable)*. Kondisi *acceptable* diperoleh dari peringkat frekuensi 1 dan konsekuensi peringkat 3 dan 4. Sedangkan kondisi *ALARP* diperoleh dari frekuensi pada peringkat 1 dan konsekuensi pada peringkat 5. Meskipun tidak wajib untuk dilakukan mitigasi, akan tetapi tetap disarankan untuk melengkapi pipa bawah laut dengan proteksi eksternal. Proteksi eksternal berupa *rock dumping* disarankan untuk melindungi pipa bawah laut karena memiliki kemampuan yang baik untuk melindungi pipa bawah laut dari benturan benda dan memiliki yang lebih murah dibandingkan dengan *concrete mattress*.

**Kata Kunci:** CFD, DNVGL RP F107, FEM, Penilaian risiko, Pipa bawah laut

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## ABSTRACT

### **RISK ANALYSIS OF SUBSEA PIPELINE DUE TO INSTALLATION AND OPERATION OF SINGLE POINT MOORING (SPM)**

Name : Desta Rifky Aldara  
NRP : 04211850010009  
Supervisor : 1. Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.  
2. Dr. I Made Ariana, S.T., M.T.

Offshore exploration facilities located in remote areas require high investment and high operational cost. The assets are classified as vital assets for the companies. The careful study and examination is therefore required to ensure that the risk of the facility is acceptable. Offshore exploration used subsea pipelines that has several risks if the accident occurs. Based on historical data, most of subsea pipelines failures are caused by third party factors (dropped anchor, dragged anchor, and ship sinking). This paper examines risk assessment of subsea pipelines due to installation and operation of Single Point Mooring (SPM) used DNVGL RP F107 standard and numerical simulations. Frequency is assessed by comparing the results of the Event Tree Analysis (ETA), Computational Fluid Dynamics (CFD), and Fault Tree Tree Analysis (FTA), and Bayesian Network methods. Whereas the consequences were assessed by using calculations on the DNVGL RP F107 standard and Finite Element Method (FEM). The results of frequency and consequences are mapped within a risk matrix according to DNVGL RP F107. Based on the calculation, the frequency of all types of vessels is less than  $10^{-5}$  (rank 1). While the lowest consequence was rank 3 with a dent/diameter is 12.32% and the highest was rank 5 ( $>20\%$ ) which can damage the subsea pipelines. The risk matrix shows that the risk level are in acceptable and ALARP (As Low As Reasonably Practicable) condition. Acceptable obtained by frequency in rank 1 and the consequence in rank 3 and 4. While ALARP obtained by frequency rank 1 and consequence rank 5. Although it is not mandatory for mitigation, it is recommended to provide the subsea pipeline with external protection. Rock dumping is recommended as external protection for subsea pipelines due to the good ability to protect the subsea pipelines and it has lower cost compared to concrete mattress.

**Keywords: CFD, DNVGL RP F107, FEM, Risk Analysis, Subsea Pipeline**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT karena dengan rahmat, karunia serta taufik hidayahnya penulis dapat menyelesaikan tesis dengan tepat waktu yang berjudul:

### **“PENILAIAN RISIKO PIPA BAWAH LAUT AKIBAT INSTALASI DAN OPERASI SINGLE POINT MOORING (SPM)”**

Tesis ini sebagai syarat memperoleh gelar Magister Teknik pada bidang studi Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) Program Studi S-2 Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Selama proses pengerjaan laporan thesis ini tidak lepas dari beberapa bantuan baik berupa semangat, doa dan motivasi, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Keluarga tercinta, yaitu orang tua Capt. Zaenal Mutaqin dan Suwanti. Adik penulis Aldo, Aldi, dan Itsa.
2. Bapak Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T, M.Sc, selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan nasihat serta kritik dan saran yang membangun dalam pengerjaan tesis ini.
3. Bapak Dr. I Made Ariana, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua atas kesabaran dalam mengajarkan ilmunya serta selalu membantu penulis ketika mengalami kesulitan dalam progres pengerjaan tesis.
4. Bapak A. A. B Dinariyana S.T., MES., Ph. D sebagai ketua laboratorium RAMS yang selalu memberikan arahan, pelajaran dan wejangan kepada mahasiswanya.
5. Bapak Dr. Eng. Dhimas Widhi Handani, S.T., M.Sc. dan Ibu Dr. Emmy Pratiwi, S.T., M.T selaku dosen di Laboratorium RAMS yang selalu memberikan arahan, pelajaran dan wejangan kepada mahasiswanya.
6. Bapak Raja Oloan Saut Gurning, S.T., M.Sc., Ph. D selaku Kepala Prodi Pascasarjana Siskal ITS dan Bapak Dr. Eddy Setyo K., S.T., M. Sc. Selaku

Sekretaris Prodi Pascasarjana Siskal ITS sekaligus dosen wali, terimakasih atas arahan dan pengalaman yang diberikan kepada penulis.

7. Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T., M.T. selaku ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan periode 2015-2019 dan Bapak Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph. D selaku ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan periode 2020-2024.
8. Bapak Achmad Baidowi, ST., MT. dan Bapak Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc. terimakasih atas pengalaman pengadaan E-RTG dan Container Crane.
9. Bapak Ir. Hari Prastowo, M.Sc. terimakasih atas pengalaman survey tugboat dan pilot boat.
10. Teman-teman pascasarjana DTSP, Lord Guntur, Ustad Bowo, Akhi Ghofur, Barok, Chika, Mas Luthfi, Mas Adam, Jangka, Pak Suratno, Sulfia, dan Mas Donny. Terimakasih telah menjadi teman yang menyenangkan selama perkuliahan di DTSP.
11. Teman-teman Laboratorium RAMS, MMD, dan MMS.
12. Kepada Alm. Ibnu Qoyyim, semoga tenang mendapatkan tempat yang terbaik di sisiNya.
13. Dea Anggun Nabella Kimata yang sudah menemani hari-hari penulis selama lebih dari 6 tahun.

Tesis ini tentunya masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun atas ketidaksempurnaan penyusunan Tesis ini sangat penulis harapkan. Semoga Tesis ini dapat memberi manfaat bagi para pembaca pada umumnya dan penyusun pada khususnya.

Surabaya, 16 Januari 2019

Penulis

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	vii
ABSTRAK .....	ix
ABSTRACT .....	xi
KATA PENGANTAR .....	xiii
DAFTAR ISI .....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Konfigurasi Single Point Mooring .....	4
1.3. Perumusan Masalah .....	6
1.4. Tujuan Penelitian .....	6
1.5. Batasan Masalah .....	6
1.6. Manfaat Penelitian .....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	9
2.1 Risk Assessment .....	9
2.2 Pipa Bawah Laut .....	14
2.3 Beban pada Pipa Bawah Laut .....	14
2.3.1. Primary Load .....	14
2.3.2. Secondary Load .....	16
2.3.3. Occasional Load .....	18
2.4 Single Point Mooring (SPM) .....	18
2.5 Standard DNVGL RP F107 .....	20
2.5.1 Metode Analisa Frekuensi .....	23
2.5.2 Metode Analisa Konsekuensi .....	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	31
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	31
3.2 Identifikasi Masalah .....	32
3.3 Studi Literatur .....	32
3.4 Pengumpulan Data .....	33
3.5 Identifikasi Bahaya .....	37

3.6	Menghitung Frekuensi Kejadian.....	39
3.7	Menganalisa Konsekuensi yang Terjadi.....	40
3.7.1.	Analisa Konsekuensi Akibat dari Kejatuhan Jangkar.....	40
3.7.2.	Analisa Konsekuensi Akibat dari Terseret Jangkat.....	42
3.7.3.	Analisa Konsekuensi Akibat dari Kapal Tenggelam.....	43
3.8	Kajian pada Struktur Pipa.....	43
3.8.1.	Pemilihan Skenario.....	44
3.8.2.	Pembuatan Geometri dan Simulasi.....	44
3.8.3.	Analisa Kerusakan.....	45
3.9	Penilaian Risiko Menggunakan Risk Matrix.....	45
3.10	Mitigasi Risiko.....	46
<b>BAB IV PEMODELAN FREKUENSI.....</b>		<b>47</b>
4.1.	Fault Tree Analysis (FTA).....	47
4.1.1.	Dropped Anchor.....	47
4.1.2.	Dragged Anchor.....	50
4.1.3.	Ship Sinking.....	53
4.2.	Event Tree Analysis (ETA).....	58
4.2.1.	Dropped Anchor.....	59
4.2.2.	Dragged Anchor.....	61
4.2.3.	Ship Sinking.....	64
4.3.	Bayesian Network.....	67
4.3.1.	Penilaian Frekuensi Dropped Anchor.....	67
4.3.2.	Penilaian Frekuensi Dragged Anchor.....	73
4.3.3.	Penilaian Frekuensi Ship Sinking.....	79
<b>BAB V ANALISA KONSEKUENSI.....</b>		<b>87</b>
5.1.	Dropped Anchor.....	87
5.2.	Dragged Anchor.....	94
5.3.	Ship Sinking.....	97
<b>BAB VI SIMULASI NUMERIK.....</b>		<b>105</b>
6.1.	Simulasi Computational Fluid Dynamics.....	105
6.1.1.	Pre-Processing.....	105
6.1.2.	Processing.....	106
6.1.3.	Post Processing.....	107
6.2.	Simulasi Finite Element Method.....	108
6.2.1.	Pre-Processing.....	108



6.2.2.	Processing .....	109
6.2.3.	Post Processing .....	109
6.2.1.	Variasi Model.....	112
<b>BAB VII MITIGASI RISIKO.....</b>		<b>115</b>
7.1.	Pemetaan Risiko .....	115
7.1.1.	Dropped Anchor.....	115
7.1.2.	Dragged Anchor .....	117
7.1.3.	Ship Sinking .....	118
7.2.	Mitigasi Risiko .....	119
7.2.1.	Concrete Mattress.....	120
7.2.2.	Rock Dumping .....	126
7.2.3.	Analisa Keuntungan dan Kerugian .....	129
<b>BAB VIII KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>		<b>133</b>
8.1.	Kesimpulan.....	133
8.2.	Saran.....	134
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>135</b>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Penerimaan Negara Bukan Pajak (PNBP) 2018 .....	1
Gambar 1. 2. Distribusi Faktor Kegagalan Pipa Bawah Laut .....	2
Gambar 1. 3. Konfigurasi Single Point Mooring (SPM) .....	5
Gambar 2. 1. Matriks Risiko .....	10
Gambar 2. 2. Desain Primer Jalur Pipa Bawah Laut .....	15
Gambar 2. 3. <i>Hoop Stress</i> .....	15
Gambar 2. 4. Longitudinal Stress.....	16
Gambar 2. 5. Buckling pada Span.....	16
Gambar 2. 6. Pengangkatan Pipa di Teluk Balikpapan.....	17
Gambar 2. 7. Dampak dari Kecelakaan Pipa Bawah Laut di Teluk Balikpapan ..	17
Gambar 2. 8. Konfigurasi Sistem <i>Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)</i> .....	19
Gambar 2. 9. Konfigurasi Sistem <i>Single Anchor Leg Mooring (SALM)</i> .....	19
Gambar 2. 10. Konfigurasi <i>Turret Mooring System (TMS)</i> .....	20
Gambar 2. 11. Konfigurasi <i>Soft Yoke Mooring (SYM) System</i> .....	20
Gambar 2. 12 Batasan Penilaian Risiko pada Standar DNVGL RP F107 .....	21
Gambar 2. 13. Struktur <i>Fault Tree Analysis</i> .....	23
Gambar 2. 14. Contoh Aplikasi ETA.....	24
Gambar 2. 15. Contoh Bayesian Network .....	26
Gambar 2. 16. Struktur Bayesian Network untuk bahaya Anchor Dropping .....	27
Gambar 2. 17 Skenario Pipa Bawah Laut yang Kejatuhan Benda.....	29
Gambar 2. 18. Dampak Pipa Bawah Laut yang Kejatuhan Benda (a) Kotak, (b) Prisma, dan (c) Bulatan.....	29
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	31
Gambar 3. 2. Kepadatan Lalu-lintas Pelayaran.....	36
Gambar 3. 3. Pipa yang Diteliti.....	39
Gambar 3. 4. Contoh Aplikasi Bayesian Network.....	39
Gambar 3. 5 Diagram Alir Finite Element Method (FEM) .....	44
Gambar 3. 6. Contoh Hasil Simulasi <i>ANSYS Explicit Dynamics</i> .....	45
Gambar 3. 7. Matriks Risiko (DNVGL, 2017a) .....	45
Gambar 4. 1. Contoh Hasil FTA Dropped Anchor .....	49
Gambar 4. 2. Contoh Hasil FTA Draggged Anchor .....	51
Gambar 4. 3. Layout Single Point Mooring.....	54
Gambar 4. 4. Contoh Hasil FTA Ship Sinking Skenario 1 .....	55
Gambar 4. 5. Cross Section Area .....	56
Gambar 4. 6. Contoh Hasil FTA Ship Sinking Skenario 2 .....	58
Gambar 4. 7. Perhitungan FTA event “Loss of Control” .....	59
Gambar 4. 8. Contoh Hasil <i>ETA Dropped Anchor</i> .....	60
Gambar 4. 9. Contoh Hasil ETA Draggged Anchor .....	62
Gambar 4. 10. Layout Single Point Mooring.....	64
Gambar 4. 11. Contoh Hasil ETA Ship Sinking Skenario 1 .....	65
Gambar 4. 12. Cross Section Area .....	66

Gambar 4. 13. Contoh Hasil ETA Ship Sinking Skenario 2 .....	67
Gambar 4. 14. Struktur Bayesian Network untuk Dropped Anchor .....	68
Gambar 4. 15. Struktur Bayesian Network untuk Dragged Anchor.....	75
Gambar 4. 16. Layout Single Point Mooring .....	79
Gambar 4. 17. Struktur Bayesian Network untuk Ship Sinking Skenario 1 .....	80
Gambar 4. 18. Struktur Bayesian Network untuk Ship Sinking Skenario 2 .....	85
Gambar 4. 19. Cross Section Area .....	85
Gambar 5. 1. Concrete Coating Absorbed Energy .....	88
Gambar 5. 2. Hasil Stress Analysis pada Kapal Jenis Passenger .....	95
Gambar 5. 3. Hasil Displacements Analysis pada kapal Jenis Passenger .....	96
Gambar 5. 4. Ship Sinking .....	97
Gambar 5. 5. Concrete Coating Absorbed Energy .....	98
Gambar 6. 1. Meshing pada Jangkar .....	106
Gambar 6. 2. Contoh dari Hasil Simulasi CFD .....	107
Gambar 6. 4. Kondisi Awal Simulasi FEM.....	108
Gambar 6. 5. Meshing pada Simulasi FEM .....	109
Gambar 6. 6. Hasil Simulasi FEM Concrete Coating.....	110
Gambar 6. 7. Hasil Simulasi FEM Pipeline.....	110
Gambar 6. 8. Perbandingan Perhitungan vs FEM untuk Dent pada Pipa.....	111
Gambar 6. 9. Perbandingan Perhitungan vs FEM untuk Dent pada Pipa.....	112
Gambar 6. 10. Hasil Simulasi FEM Variasi 1 .....	113
Gambar 6. 11. Perbandingan hasil simulasi FEM (Impact Energy).....	113
Gambar 6. 12. Perbandingan hasil simulasi FEM (Dent).....	114
Gambar 7. 1. Risk Matrix Dropped Anchor Tahap Instalasi SPM.....	116
Gambar 7. 2. Risk Matrix Dropped Anchor Tahap Operasi SPM Skenario 1 ....	116
Gambar 7. 3. Risk Matrix Dropped Anchor Tahap Operasi SPM Skenario 2 ....	116
Gambar 7. 4. Risk Matrix Dragged Anchor Tahap Instalasi SPM.....	117
Gambar 7. 5. Risk Matrix Dragged Anchor Tahap Operasi SPM Skenario 1.....	117
Gambar 7. 6. Risk Matrix Dragged Anchor Tahap Operasi SPM Skenario 2.....	118
Gambar 7. 7. Risk Matrix Ship Sinking Tahap Operasi SPM Skenario 2.....	118
Gambar 7. 8. Risk Matrix Ship Sinking Tahap Operasi SPM Skenario 2.....	119
Gambar 7. 9. Concrete Mattress .....	120
Gambar 7. 10. Instalasi Concrete Mattress.....	121
Gambar 7. 11. Simulasi FEM pada Concrete Mattress .....	122
Gambar 7. 12. Hasil Simulasi FEM pada Pipa (Concrete Mattress).....	122
Gambar 7. 13. Hasil Simulasi FEM pada Concrete Mattress .....	122
Gambar 7. 14. Layout Instalasi Concrete Mattress .....	123
Gambar 7. 15. Prosedur Instalasi Rock Dumping .....	126
Gambar 7. 16. Dimensi Rock Dumping .....	126
Gambar 7. 17. Simulasi FEM pada <i>Rock Dumping</i> .....	127
Gambar 7. 18. Hasil Simulasi FEM pada Pipa (Rock Dumping).....	127

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Spesifikasi Storage Tanker.....	5
Tabel 1. 2. Spesifikasi Jangkar dan Rantai Jangkar .....	5
Tabel 2. 1. Tinjauan Pustaka Penelitian Terdahulu.....	13
Tabel 2. 2 Possible External Hazards (DNVGL, 2017a) .....	22
Tabel 2. 3 Kategori Frekuensi Tahunan (DNVGL, 2017a) .....	22
Tabel 2. 4. Contoh CPT pada Bayesian Network .....	26
Tabel 3. 1. Spesifikasi Pipa Bawah Laut.....	34
Tabel 3. 2. Spesifikasi Buoy .....	34
Tabel 3. 3. Spesifikasi Rantai Jangkar .....	34
Tabel 3. 4. Spesifikasi Jankar.....	34
Tabel 3. 5. Spesifikasi Hawser .....	35
Tabel 3. 6. Spesifikasi AHTS.....	35
Tabel 3. 7. Spesifikasi Storage & Shuttle Tanker .....	35
Tabel 3. 8. Jumlah Kapal.....	36
Tabel 3. 9. Sample Kapal .....	37
Tabel 3. 10. Wave Data.....	37
Tabel 3. 11. Current Data.....	37
Tabel 3. 12. Hazard Compatibility Matrix .....	38
Tabel 3. 13. Conditional Probability Table dari P(C) .....	39
Tabel 3. 14. Kofesien Drag dan Koefisien Tambahan.....	41
Tabel 3. 15. Klasifikasi Kerusakan pada Pipa.....	42
Tabel 4. 1. Frekuensi Dropped Anchor Metode FTA pada Tahap Instalasi SPM .....	49
Tabel 4. 2. Frekuensi Dropped Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 1 .....	49
Tabel 4. 3. Frekuensi Dropped Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2 .....	49
Tabel 4. 4. Frekuensi Dragged Anchor Metode FTA pada saat Instalasi SPM .....	52
Tabel 4. 5. Frekuensi Dragged Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 1 .....	52
Tabel 4. 6. Frekuensi Dragged Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2 .....	52
Tabel 4. 7. Frekuensi Ship Sinking Metode FTA Skenario 1 .....	55
Tabel 4. 8. Frekuensi Ship Sinking Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2 .....	58
Tabel 4. 9. Frekuensi Dropped Anchor Metode ETA Tahap Instalasi SPM .....	61
Tabel 4. 10. Frekuensi Dropped Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 1 .....	61
Tabel 4. 11. Frekuensi Dropped Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2 .....	61

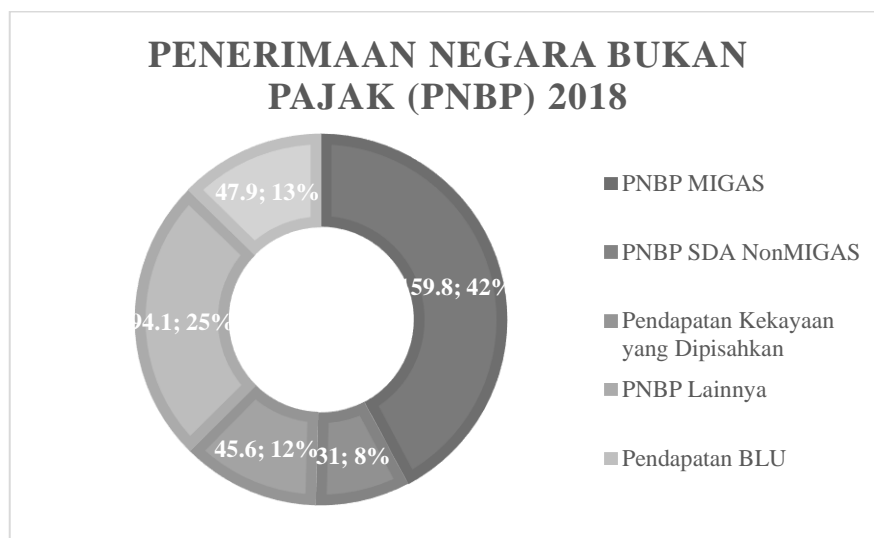
Tabel 4. 12. Frekuensi Dragged Anchor Metode ETA pada saat Instalasi SPM.....	63
Tabel 4. 13. Frekuensi Dragged Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 1.....	63
Tabel 4. 14. Frekuensi Dragged Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2.....	63
Tabel 4. 15. Frekuensi Ship Sinking Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 1.....	66
Tabel 4. 16. Frekuensi Ship Sinking Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2.....	67
Tabel 4. 17. Frekuensi Dropped Anchor Metode BN Tahap Instalasi SPM.....	72
Tabel 4. 18. Frekuensi Dropped Anchor Metode BN pada Operasi SPM Skenario 1.....	72
Tabel 4. 19. Frekuensi Dropped Anchor Metode BN pada Operasi SPM Skenario 2.....	72
Tabel 4. 20. Frekuensi Dragged Anchor Metode BN pada saat Instalasi SPM....	78
Tabel 4. 21. Nilai Frekuensi Dragged Anchor pada Operasi SPM Skenario 1 ....	78
Tabel 4. 22. Nilai Frekuensi Dragged Anchor pada Operasi SPM Skenario 2 ....	78
Tabel 4. 23. Nilai Frekuensi Ship Sinking pada Operasi SPM Skenario 1 .....	84
Tabel 4. 24. Nilai Frekuensi Ship Sinking pada Operasi SPM Skenario 2 .....	86
Tabel 4. 25. Impact Energy dan Ranking Konsekuensi Ship Sinking.....	104
Tabel 5. 1. Rangking konsekuensi.....	87
Tabel 5. 2. Concrete Absorbed Energy (Drop Anchor).....	89
Tabel 5. 3. Range of Impact Energy .....	91
Tabel 5. 4. Impact Energy dan Ranking Konsekuensi Dropped Anchor .....	94
Tabel 5. 5. Maximum Breaking Load.....	95
Tabel 5. 6. Hasil Stress dan Displacements Analysis.....	96
Tabel 5. 7. Ranking Konsekuensi Seretan Jangkar .....	97
Tabel 5. 8. Concrete Absorbed Energy (Ship Sinking) .....	99
Tabel 5. 9. Range of Impact Energy .....	101
Tabel 6. 1. Parameter CFD .....	107
Tabel 6. 2. Hasil Simulasi CFD .....	107
Tabel 6. 3. Parameter Simulasi FEM.....	109
Tabel 6. 4. Hasil Simulasi FEM .....	110
Tabel 6. 5. Variasi Luasan Impact .....	113
Tabel 7. 1. Kategori Risiko.....	115
Tabel 7. 2. Estimasi Biaya Material Concrete Mattress .....	124
Tabel 7. 3. Estimasi Biaya Instalasi Concrete Mattress .....	125
Tabel 7. 4. Estimasi Biaya Material Rock Dumping .....	128
Tabel 7. 5. Estimasi Biaya Instalasi Rock Dumping .....	131

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

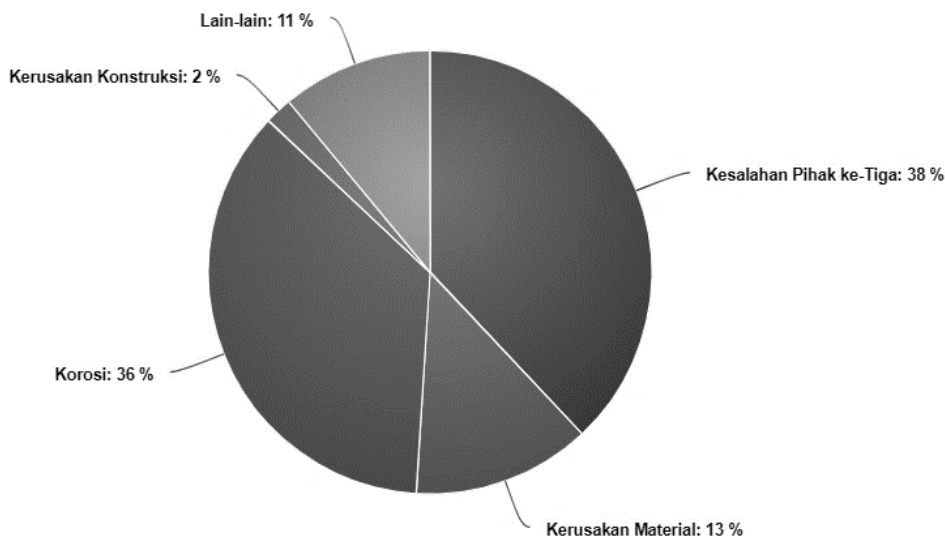
Energi merupakan kebutuhan yang sangat penting dalam pembangunan sosial dan ekonomi di semua negara (Mulder and Tembe, 2008). Dari sekian banyak sumber energi yang tersedia, pemerintah Indonesia masih bergantung kepada minyak dan gas bumi sebagai sumber energi utama (BPPT, 2018). Hal tersebut dibuktikan dengan kontribusi industri minyak dan gas dalam menyumbang pendapatan negara sebesar 42% dari total 378,3 T Penerimaan Negara Bukan Pajak (PNBP) tahun 2018 seperti yang tersaji pada gambar 1.1 (DJA, 2018). Oleh karena itu, eksplorasi sumber minyak dan gas terus dilakukan guna memenuhi kebutuhan masyarakat. Dimana pada saat ini, industri hulu migas di Indonesia mulai bergeser dari sumur-sumur di darat (*onshore*) yang telah berumur tua menuju ke eksplorasi lepas pantai (*offshore*) (Yudhistira, 2017). Di masa mendatang, Indonesia akan bergantung kepada eksplorasi migas lepas pantai, dimana 70% dari potensi cadangan migas berada di daerah tersebut. Eksplorasi lepas pantai yang berada pada daerah terpencil (*remoteness area*) dan memerlukan investasi dan operasional yang tinggi, oleh karena itu aset yang dimiliki tergolong menjadi aset yang penting dan vital bagi perusahaan eksplorasi tersebut (Kawsar et al., 2015).



Gambar 1. 1. Penerimaan Negara Bukan Pajak (PNBP) 2018 (DJA, 2018)

Eksplorasi lepas pantai tidak terlepas dari penggunaan pipa bawah laut sebagai salah satu sarana transportasi untuk mengirimkan produk. Akan tetapi, pipa bawah laut memiliki beberapa risiko yang dapat membahayakan lingkungan sekitar jika terjadi kerusakan (Artana, 2009). Selain itu, perusahaan juga akan menanggung kerugian secara finansial akibat terhentinya produksi, pembersihan tumpahan migas, biaya ganti rugi korban, dan perbaikan fasilitas (Bai, 2001; Girgin et al., 2019). Jalur pipa bawah laut telah menjadi perhatian khusus sejak tahun 80-an ketika terjadi kecelakaan pada pipa bawah laut walaupun dampak dari kejadian tersebut belum dievaluasi lebih dalam (AL-Warthan et al., 1993). Tinjauan historis dan literatur mengenai kegagalan dan insiden pipa bawah laut menunjukkan bahwa penyebab kegagalan pada pipa dapat diakibatkan oleh beberapa faktor seperti, pihak ketiga, korosi, desain, dan kesalahan operasional (Muhlbauer, 2004; Sulaiman and Tan, 2014). Gambar 1.2. menunjukkan distribusi faktor yang menyebabkan kegagalan pada pipa bawah laut, dimana kesalahan pihak ketiga menjadi kontributor terbesar dalam kegagalan pipa bawah laut yaitu sebesar 38%, kemudian diikuti oleh korosi sebesar 36%.

### Faktor Kegagalan Pipa Bawah Laut



Gambar 1. 2. Distribusi Faktor Kegagalan Pipa Bawah Laut (Sulaiman and Tan, 2014)

Faktor umum dari kategori kesalahan pihak ketiga yang dapat menyebabkan kegagalan pada pipa antara lain adalah: aktivitas penangkapan ikan, aktivitas kapal



niaga (*emergency anchoring, dragged anchor, dropped containers, dan ship sinking*), dan aktivitas kapal konstruksi (Bai, 2001). Jaringan pipa berada pada daerah aktivitas produksi minyak dan gas, jika terjadi kecelakaan, maka akan menimbulkan kerusakan pada pipa dan dampak yang besar. Defleksi dan kebocoran pada pipa merupakan kerusakan yang dapat terjadi apabila terjadi kecelakaan pada pipa bawah laut. Menurut Mulyadi et al., (2013), 11 insiden yang disebabkan oleh jangkar kapal dicatat oleh Health and Safety Executive (HSE) dan Pipeline and Riser Loss of Containment (PARLOC) pada 25.000 km pipa bawah laut pada tahun 1991-2001. Oleh karena itu, setiap aktivitas pengeboran lepas pantai memerlukan penilaian risiko yang bertujuan untuk memastikan bahwa tingkat risiko dari aset yang dimiliki perusahaan berada pada tingkat risiko yang dapat diterima (Sari et al., 2016).

PT. X merupakan salah satu perusahaan yang mengelola salah satu sumber minyak dan gas di Indonesia. Fasilitas ini memanfaatkan pipa bawah laut sebagai penyalur minyak dan gas. Produk gas disalurkan ke onshore facility dengan menggunakan pipa bawah laut, sedangkan produk minyak disalurkan dari platform menuju ke onshore facility dengan menggunakan *Floating Storage and Offloading unit (FSO)*. Dikarenakan adanya perbaikan jalur pipa bawah laut yang digunakan untuk menyalurkan minyak dari platform menuju *FSO*, maka PT. X berencana untuk memasang *Single Point Mooring (SPM)* sementara yang digunakan sebagai sarana tambat kapal untuk menampung produksi minyak mentah dari *processing platform* dengan kapasitas 10,000 barrel per bulan. Hal tersebut bertujuan untuk menghindari terhentinya produksi akibat dari aktivitas perbaikan tersebut.

Studi teknis telah dilakukan oleh internal perusahaan untuk pemilihan fasilitas sementara yang digunakan sebagai sarana tambat kapal untuk menampung produksi minyak, studi teknis tersebut meliputi simulasi kekuatan, pergerakan *mooring* pada beberapa kondisi, dan konfigurasi *mooring*. Simulasi tersebut membandingkan *Spread Mooring* dan *Single Point Mooring (SPM)*. Berdasarkan studi tersebut *SPM* dipilih sebagai fasilitas terapung sementara karena beberapa faktor, yaitu: kemudahan dalam pemasangan fasilitas, tidak memerlukan modifikasi khusus pada

kapal, dan biaya investasi yang lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan *Spread Mooring*.

Penelitian ini berfokus kepada penilaian risiko terhadap pipa bawah laut di yang dioperasikan oleh PT. X akibat dari pemasangan *Single Point Mooring (SPM)* dan kegiatan operasional fasilitas terapung sementara tersebut. Standar yang digunakan pada penelitian ini adalah DNVGL RP F107. Menurut DNVGL RP F107, ada beberapa kemungkinan bahaya yang terjadi pada pipa bawah laut, diantaranya adalah kejatuhan jangkar kapal, terseret jangkar kapal, dan tertimpa kapal tenggelam (DNVGL, 2017a). Potensi bahaya (*hazard*) yang terjadi akibat dari pemasangan pipa bawah laut diidentifikasi, kemudian dihitung frekuensi dan konsekuensi dari hazard tersebut untuk dilakukan penilaian risiko. Penilaian risiko digunakan untuk mengetahui kategori tingkat risiko yang akan dihadapi, yaitu: risiko tinggi (*high risk*), risiko sedang (*medium risk*), dan risiko rendah (*low risk*). Pada penelitian ini juga dilakukan simulasi *software* untuk mengetahui bagaimana dampak pada struktur pipa bawah laut dari kejadian/kecelakaan yang terjadi akibat dari pemasangan fasilitas terapung sementara dengan menggunakan *Finite Element Method (FEM)*.

## **1.2. Konfigurasi Single Point Mooring**

Perawatan pada *CALM Buoy* dan *pipeline end manifold (PLEM)* mengakibatkan terhentinya operasi pengiriman atau tidak tersalurkannya minyak bumi dari *processing platform* menuju ke *FSO*. Oleh karena itu, PT. X melakukan Instalasi *Single Point Mooring (SPM)* sebagai sarana tambat storage tanker yang digunakan sebagai penyimpanan sementara dan *offloading* dengan operasi *side by side*.

*SPM* memiliki konfigurasi seperti yang digambarkan pada Gambar 1.4. dengan kedalaman perairan sekitar 54 meter. *SPM* direncanakan beroperasi sekitar 2 bulan atau hingga proses perawatan *PLEM* dan *CALM Buoy* selesai. *SPM* berjarak sekitar 400 meter dari *AW Platform* dan terdiri dari 1 set *buoy* dan 3 set jangkar dan rantai jangkar dengan jarak horizontal dari *SPM* ke *anchor point* sejauh 200 meter. Alur pelayaran pada pengerjaan thesis diasumsikan memiliki panjang 4093 meter, berada pada daerah terbatas berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia no. 129 tahun 2016.

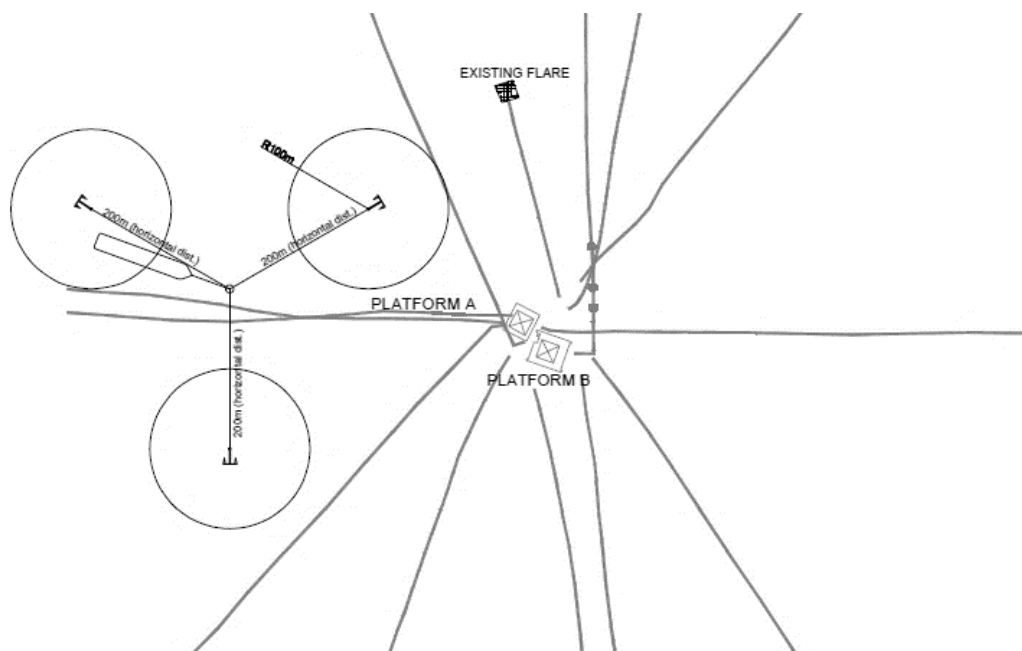
Spesifikasi dari storage tanker yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.1. Sedangkan Tabel 1.2. merupakan spesifikasi dari *buoy*, jangkar, dan rantai jangkar yang digunakan.

Tabel 1. 1. Spesifikasi Storage Tanker

Description	Value	Unit
Length Overall	160	meter
Breadth (moulded)	26.8	meter
Depth (moulded)	11.0	meter
Dull Draught	9.0	meter
Ballast Draught	6.0	meter
Capacity	20,000	meter

Tabel 1. 2. Spesifikasi Jangkar dan Rantai Jangkar

Description	Value	Unit
<b>Buoy</b>		
Diameter	7.6	meter
Overall Depth	2.45	meter
Draught	0.82	meter
<b>Jangkar</b>		
Tipe Jangkar	Stevin MK3	-
Berat Jangkar	20	Ton
Holding Capacity	250	Ton
<b>Rantai Jangkar</b>		
Tipe	Stud less	-
Diameter	92	Mm
Panjang Rantai	220	meter
Minimum Breaking Load (MBL)	866	Ton



Gambar 1. 3. Konfigurasi Single Point Mooring (SPM)

### **1.3. Perumusan Masalah**

Dari penjelasan latar belakang, maka perumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana potensi risiko pada pipa bawah laut akibat dari instalasi dan operasi *Single Point Mooring (SPM)*?
2. Bagaimana dampak pada struktur pipa bawah laut dari kejadian akibat dari instalasi dan operasi *Single Point Mooring (SPM)*?
3. Bagaimana tingkat risiko pada pipa bawah laut akibat dari instalasi dan operasi *Single Point Mooring (SPM)*?
4. Apa langkah mitigasi dan pengendalian untuk menangani tingkat risiko tersebut?
5. Bilamana diperlukan, apakah mitigasi risiko yang paling baik sesuai dengan *Cost Benefit Analysis*?

### **1.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa potensi risiko pada pipa bawah laut akibat dari instalasi dan operasi *Single Point Mooring (SPM)*.
2. Menganalisa dampak pada struktur pipa bawah laut dari kejadian yang terjadi akibat dari instalasi dan operasi *Single Point Mooring (SPM)*.
3. Menganalisa tingkat risiko dampak dari instalasi dan operasi *Single Point Mooring (SPM)*.
4. Memberikan rekomendasi terkait dengan mitigasi dan pengendalian yang tepat berdasarkan dari tingkat risiko tersebut.
5. Menghitung biaya yang diperlukan apabila diperlukan langkah mitigasi untuk menurunkan tingkat risiko.

### **1.5. Batasan Masalah**

Agar penulisan ini terarah sesuai dengan rumusan masalah dan tujuan penelitian, maka diperlukan batasan masalah. Berikut ini adalah batasan masalah pada penelitian ini:

1. Analisa dilakukan pada pipa bawah laut yang dioperasikan oleh PT. X.
2. Pipa tidak dalam kondisi cacat atau mengalami kerusakan.

3. Standard risk assessment yang dipakai adalah DNVGL-RP-F107.
4. Analisa Frekuensi dengan menggunakan metode *Bayesian Network*.
5. Analisa Konsekuensi berdasarkan standar DNVGL-RP-F107 dan dengan menggunakan pendekatan FEM.

### **1.6. Manfaat Penelitian**

Adapun penelitian ini dapat bermanfaat bagi beberapa pihak, diantaranya adalah:

1. Manfaat Bagi Penulis

Menambah wawasan dan melatih pola pikir yang sistematis dalam menghadapi masalah-masalah di bidang manajemen operasi khususnya manajemen risiko pada pipa bawah laut.

2. Manfaat Bagi Perusahaan

Penelitian ini diharapkan memberikan informasi dan rekomendasi pada perusahaan terkait dengan risiko yang diakibatkan oleh instalasi SPM dan operasionalnya. Dapat juga dijadikan acuan ketika perusahaan memiliki permasalahan serupa seperti yang ada dalam penelitian ini.

3. Manfaat Bagi Civitas Akademi

Penilaian risiko terhadap pipa bawah laut merupakan topik yang menarik dimana pada saat ini sebagian besar eksplorasi pipa bawah laut berada di daerah lepas pantai yang memiliki risiko tersendiri sesuai dengan skenario yang digunakan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi sumber informasi, dokumentasi, dan dapat digunakan sebagai referensi tambahan bagi penelitian serupa.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Risk Assessment

Risiko merupakan probabilitas suatu bahaya (*hazard*) yang menyebabkan kerugian. Risiko merupakan parameter untuk menentukan tingkat keselamatan suatu sistem yang risiko memiliki dua parameter penting yaitu frekuensi dan konsekuensi. Apabila frekuensi dan konsekuensi pada suatu bahaya tinggi, maka dapat dikatakan bahaya tersebut memiliki tingkat risiko yang tinggi (Muhlbauer, 2004). Pada eksplorasi lepas pantai menggunakan pipa bawah laut yang terbukti aman dan andal dalam menyalurkan minyak dan gas bumi. Akan tetapi, beberapa faktor risiko mungkin dapat menyebabkan kegagalan pada pipa bawah laut. Dimana faktor eksternal seperti kesalahan pihak ketiga merupakan penyumbang tertinggi dalam kegagalan pipa bawah laut (Sulaiman and Tan, 2014). Konsekuensi dari kegagalan pipa bawah laut dapat berdampak besar bagi keselamatan makhluk hidup, lingkungan, hingga ekonomi. Oleh karena itu, penilaian risiko dapat membantu pihak terkait dalam memutuskan langkah mitigasi untuk meminimalisir risiko tersebut.

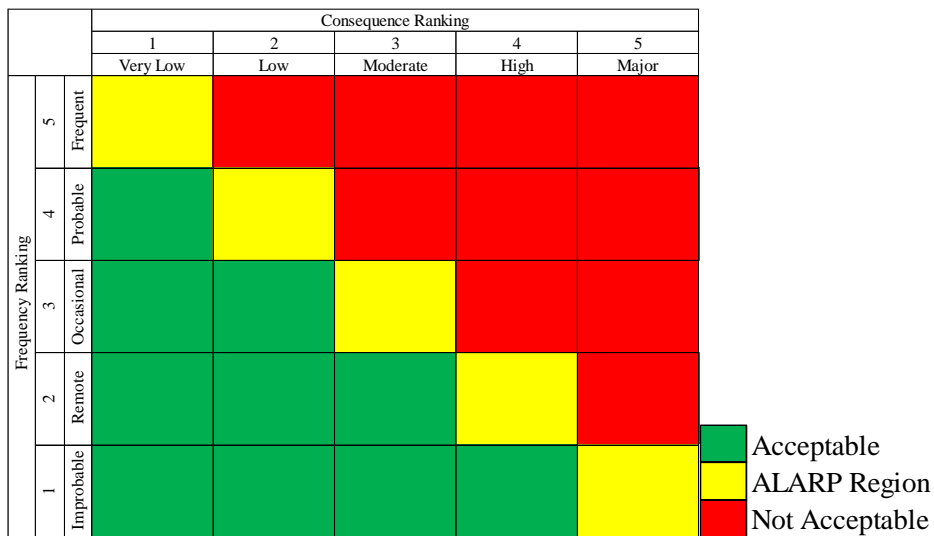
Ada beberapa metode penilaian risiko seperti metode Kent Muhlbauer dalam buku *pipeline risk management* dan metode standar DNVGL RP F107. Metode Kent Muhlbauer melakukan *indexing model* untuk mendapatkan *relative risk score*, dimana dalam metode tersebut dibagi menjadi empat indeks utama yaitu: *third-party damage*, *corrosion*, *design*, dan *incorrect operation* (Muhlbauer, 2004). Sedangkan standar DNVGL RP F107 "*Risk Assessment of Pipeline Protection*" digunakan dalam acuan untuk menentukan rangking frekuensi dan konsekuensi serta pembuatan matriks risiko untuk peristiwa yang terjadi karena faktor eksternal seperti *dropped object*, *ship sinking*, *dragged anchor*, dan lain-lain (DNVGL, 2017a). Secara umum, penilaian risiko dilakukan dalam dua tahap yaitu analisa frekuensi dan analisa konsekuensi.

Frekuensi merupakan potensi kejadian yang tidak diinginkan yang dinyatakan sebagai peristiwa per satuan waktu, biasanya dinyatakan per tahun. Frekuensi dapat

didapatkan melalui: data historis, pemodelan frekuensi, pendapat ahli, dan lain-lain. Beberapa metode dalam yang dapat digunakan untuk menentukan frekuensi dari bahaya yang telah diidentifikasi adalah *Fault Tree Analysis (FTA)*, *Event Tree Analysis (ETA)*, *Markov Chain*, *Bayesian Network*, dan lain-lain. *FTA* dan *ETA* merupakan metode konvensional yang terbukti efektif untuk menganalisa probabilitas kegagalan pada sistem perpipaan. Akan tetapi metode konvensional tersebut merupakan metode yang statik atau tidak dapat menangkap variasi risiko karena perubahan yang terjadi dalam operasional dan lingkungannya (Li et al., 2016).

Konsekuensi merupakan besarnya efek ketika terjadi bahaya yang dinyatakan sebagai efek/peristiwa. Konsekuensi dapat dinilai dalam beberapa aspek, seperti: kematian, kerugian finansial, dampak lingkungan, dan lain-lain. Besarnya konsekuensi dapat didapatkan melalui beberapa cara, diantaranya adalah: data historis, pendapat ahli, pemodelan komputer, dan lain-lain.

Kombinasi diberikan oleh frekuensi dan konsekuensi tersebut akan memberikan level risiko pada jalur pipa. Level risiko tersebut akan ditampilkan dalam matriks risiko untuk mengetahui tingkat risiko yang terjadi seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.1. Tingkat risiko tersebut yang akan menentukan apakah jalur pipa offshore masih dalam aman (*acceptable*), *ALARP* (*as low as reasonably practicable*), atau tidak dapat diterima (*not acceptable*).



Gambar 2. 1. Matriks Risiko



Penulis telah melakukan tinjauan pustaka penilaian risiko pipa bawah laut terkait dengan metode yang digunakan dalam menghitung frekuensi dan konsekuensi serta faktor yang mempengaruhi kegagalan pada pipa bawah laut pada Tabel 2.1. Berdasarkan tinjauan pada beberapa penelitian terkait dengan penilaian risiko pipa bawah laut, sebagian besar menggunakan standar DNVGL RP F107. Pada kasus penilaian risiko akibat dari kejadian eksternal, standar DNVGL RP F107 (*Risk Assessment of Pipeline Protection*) paling banyak digunakan karena standar tersebut memang fokus kepada penilaian risiko pipa bawah laut akibat dari faktor eksternal.

Sebagian besar penelitian mengenai penelitian risiko pipa bawah laut menggunakan *Event Tree Analysis (ETA)*. Artana, (2009) menggunakan metode *Event Tree Analysis (ETA)* untuk menghitung frekuensi munculnya bahaya (*anchor drop*) dengan konsep *joint probability* dimana peluang jangkar mengenai pipa adalah gabungan antara peluang kapal berada di *Critical Anchor Damage Zone (CADZ)*, digabungkan dengan peluang kapal akan menjatuhkan jangkar serta peluang kapal dari kelompok yang mana yang menjatuhkan jangkar. Metode *ETA* juga digunakan oleh Artana 2016 untuk menghitung frekuensi bahaya yang mengancam selama proses instalasi *hot-tapping* dan Padova et al., (2018) dalam menghitung probabilitas *dragged anchor*. Metode *ETA* sangat membantu dalam menjelaskan runtutan antara *initial event* dan faktor penyebabnya. Akan tetapi *ETA* memiliki kelemahan karena hanya memiliki satu *initial event* sehingga diperlukan beberapa *ETA* untuk menghitung probabilitas pada kasus yang memiliki lebih dari satu *initial event*.

Mulyadi et al., (2013) mengusulkan metode *Bayesian Network* untuk mengidentifikasi dan menghitung frekuensi dari bahaya akibat dari *dregging anchor* pada pipa bawah laut di area pelabuhan. Metode *Bayesian Network* juga diaplikasikan oleh Sulaiman and Tan, (2014) untuk menghitung probabilitas kegagalan pipa bawah laut akibat dari *dropped anchor* hingga menghitung konsekuensi dari bahaya tersebut. Sementara itu, (Liu et al., 2013) menggunakan metode *Bayesian Network* pada penilaian risiko pipa bawah laut akibat dari faktor

eksternal karena *Bayesian Network* memiliki struktur yang lebih fleksibel dibandingkan dengan *Event Tree Analysis*.

Beberapa peneliti menggunakan metode numerik untuk menganalisa dampak pipa bawah laut terhadap faktor eksternal. Hvam (1990) menganalisa seretan jangkar terhadap pipa bawah laut, penelitian tersebut dilakukan untuk mengetahui *respond* pipa bawah laut akibat dari seretan jangkar. Al-Warthan (1993) menganalisa objek terjatuh yang mengenai area *span* pipa bawah laut dengan *Discrete Element Method (DEM)* dimana *dropped anchor* menyebabkan tingkat *stress* paling tinggi pada *span* pipa. Beberapa peneliti menggunakan perhitungan numerik yang mengacu pada standar DNVGL RP F107 untuk menghitung konsekuensi pada pipa bawah laut akibat dari *dropped object* dan *dropped anchor*. Artana, (2009) menggunakan metode numerik untuk menganalisa konsekuensi pada pipa bawah laut akibat dari *dropped anchor* yang mengacu pada standar DNVGL RP F107. Perhitungan tersebut juga diaplikasikan oleh Putranta et al., (2013) dan Sulaiman and Tan, (2014). Sedangkan untuk perhitungan numerik terkait dengan dragging anchor

Selain metode numerik, metode *Finite Element Method (FEM)* juga dapat digunakan untuk menganalisa konsekuensi pipa bawah laut. Kawsar et al., (2015) menganalisa dampak *dropped object* pada pipa yang berkarat. Dampak pada sistem proteksi pipa bawah laut yang terkena *dropped object* dianalisa oleh Sari et al., (2016). Sedangkan Padova et al., (2018) menganalisa dampak *dropped object* pada pipa dengan sistem proteksi *corrosion resistant alloy (CRA)*. Yu et al., (2016) membandingkan hasil dari *FEM* dan eksperimen pada pipa bawah laut yang terkena *dropped object* dan menunjukkan bahwa Metode *FEM* menghasilkan hasil yang rasional jika dibandingkan dengan hasil eksperimen.

Tabel 2. 1. Tinjauan Pustaka Penelitian Terdahulu.

No	Peneliti	Standar	Metode		Faktor
			Frekuensi	Konsekuensi	
1	(Hvam et al., 1990)	-		Numerical	Dragged Anchor
2	(AL-Warthan et al., 1993)	-		Discrete Element Method	Dropped Anchor
3	(Artana, 2009)	DNVGL RP F107	ETA	Numerical	Dropped Object
4	(Putranta et al., 2013)	DNVGL RP F107	FMEA	Numerical	Dropped Anchor Dropped Object Dragged Anchor Ship Sinking
5	(Liu et al., 2013)	DNVGL RP F107	Bayesian Network	Numerical	Anchor Damage Trawling Damage
6	(Mulyadi et al., 2013)	DNVGL RP F107	Bayesian Network		Dragged Anchor
7	(Sulaiman and Tan, 2014)	DNVGL RP F107	Bayesian Network	Numerical	Dropped Anchor
8	(Mulyadi et al., 2014)		Bayesian Network		Ship Sinking
9	(Kawsar et al., 2015)	DNVGL RP F107		Finite Element Method	Dropped Object
10	(Artana et al., 2016)	DNVGL RP F107	ETA	Numerical	Dropped Anchor Dragged Anchor Ship Sinking
11	(Sari et al., 2016)	DNVGL RP F107	Monte Carlo	Finite Element Method	Dropped object
12	(Yu et al., 2016)			Finite Element Method, Eksperimen	Dropped Anchor
13	(Kusuma, 2017)	Kent Muhlbauer		Numerical	
14	(Odina et al., 2018)			Finite Element Method	Dropped Object
15	(Padova et al., 2018)		ETA		Dragged Anchor
16	(Pratiwi et al., 2019)	DNVGL RP F107	FMEA	Numerical	Dropped Anchor Dropped Object Dragged Anchor
17	Usulan Penelitian	DNVGL RP F107	Bayesian Network	Numerical, Finite Element Method	Dropped Anchor Dragged Anchor Ship Sinking

## 2.2 Pipa Bawah Laut

Pipa laut awalnya digunakan untuk jalur bongkar muat jarak pendek, umumnya digunakan untuk menyalurkan minyak dari dari pantai ke lepas pantai atau untuk mendistribusikan minyak dari sungau dan muara. Pipa laut pada industri minyak lepas pantai pertama kali dibangun di Teluk Meksiko pada tahun 1947 di Ship Shoal, Kerr McGee, blok 32, 17 km dari pantai dan kedalaman 6 m (Palmer and King, 2008). Dalam desain pipa bawah laut, pipa tersebut harus memiliki integritas dimana pipa harus mampu untuk beroperasi dengan aman dan dapat menahan beban yang ada selama siklus hidup (*lifecycle*) pipa tersebut (DNVGL, 2017b). Jalur pipa dihunakan untuk beberapa tujuan dalam pengembangan sumber daya hidrokarbon di lepas pantai (Bai, 2001), diantaranya adalah:

1. Jalur pipa transportasi ekspor,
2. Flowlines untuk mentransfer produk dari platform ke jalur ekspor,
3. Jalur pipa penyalur injeksi air dan bahan kimia,
4. Jalur pipa untuk mentransfer produk antara platforms, subsea manifolds, dan satellite wells,
5. Pipelines Bundles.

Pipa bawah laut memiliki desain yang berbeda-beda sesuai dengan tujuannya yang biasanya dipengaruhi oleh cara pengoperasian, dan ukuran dari ukuran atau kapasitas proyeknya. Desain dari jalur pipa bawah laut terdiri dari 3 tahap yaitu: Conceptual engineering, Preliminary engineering, dan Detail engineering. Pada umumnya, desain primer dari jalur pipa bawah laut seperti pada Gambar 2.2.

## 2.3 Beban pada Pipa Bawah Laut

Pada desain pipa bawah laut, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, salah satunya adalah beban (*load*) yang bekerja pada pipa bawah laut tersebut. Berikut ini merupakan beban yang bekerja pada pipa bawah laut:

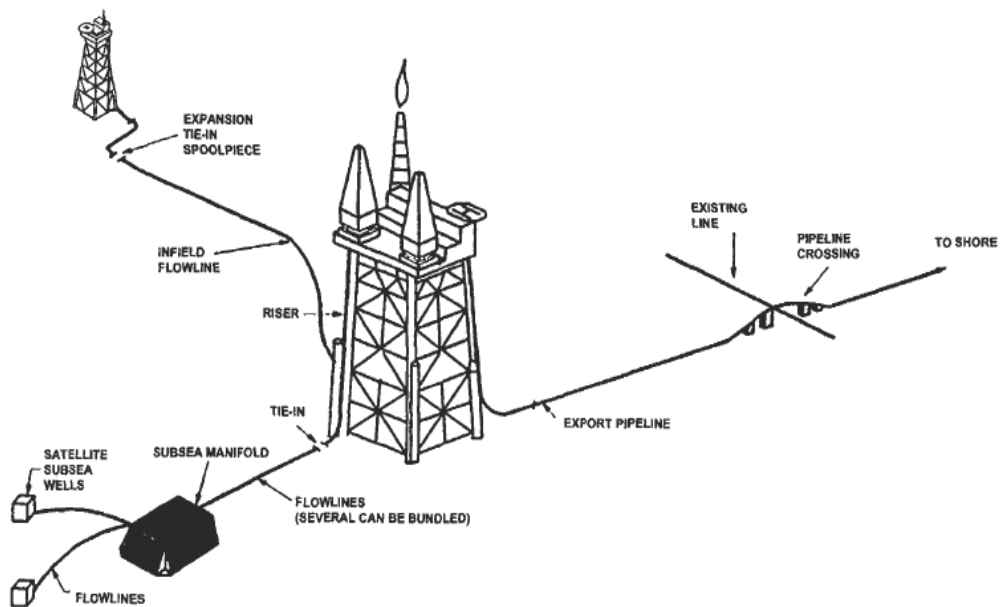
### 2.3.1. Primary Load

Beban primer (*primary load*) merupakan beban yang berkelanjutan (*sustained load*) seperti tekanan internal, gaya gravitasi yang bekerja pada pipa (berat fluida dan pipa), dan lain-lain. Beban tersebut dapat mengakibatkan tegangan (*stress*) pada pipa seperti *hoop stress* dan *longitudinal stress*. Beban

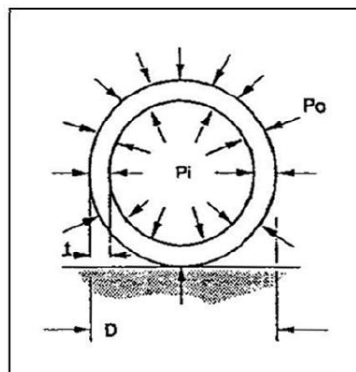
primer merupakan "*non-self-limitting*" sehingga tegangan akan terus ada dan tidak akan hilang seiring berjalannya waktu atau dengan terjadinya deformasi selama ada gaya yang mengenai pipa tersebut (PV Eng, 2018). DNVGL mengklasifikasikan Berikut ini merupakan efek yang terjadi akibat adanya beban primer:

### 1. Hoop Stress

*Hoop stress* dapat terjadi akibat dari tekanan internal yaitu fluida yang mengalir pada pipa, tekanan tersebut bekerja dalam arah tangensial terhadap dinding pipa. Gaya tersebut dapat dilihat di gambar 2.3



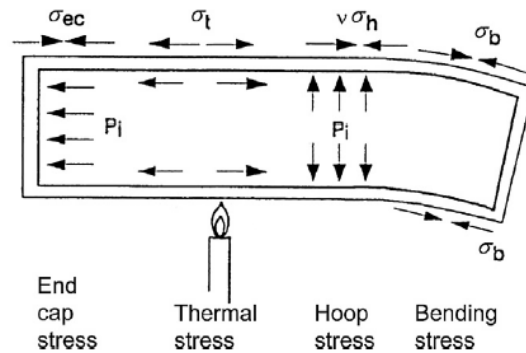
Gambar 2. 2. Desain Primer Jalur Pipa Bawah Laut (Bai, 2001)



Gambar 2. 3. *Hoop Stress* (Bai and Bai, 2014)

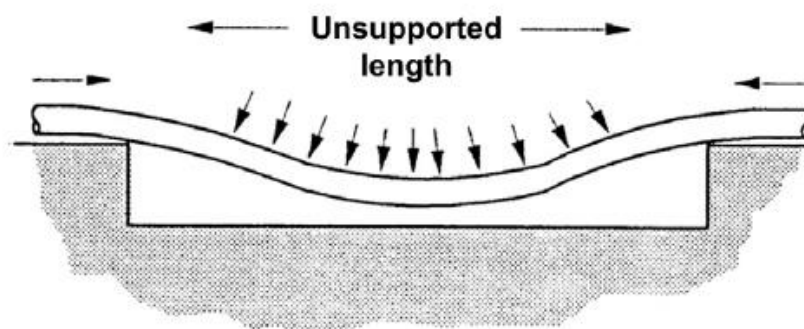
## 2. Longitudinal Stress

*Longitudinal Stress* merupakan tegangan yang arahnya sejajar dengan pipa yang diakibatkan oleh: *Endcap force-induced stress*, *Bending stress*, *Thermal stress*, dan *Hoop stress*. *Longitudinal stress* dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Longitudinal Stress  
(Bai and Bai, 2014)

Dampak dari beban primer dapat diminimalisir dengan perancangan yang tepat dengan mempertimbangkan aspek teknis yang berkaitan dengan skenario pada pipa bawah laut seperti: perbedaan beban tekanan. Beban longitudinal, dan beban dampak eksternal (Soegiono, 2007). Gambar 2.5 merupakan contoh akibat dari pipa bawah laut karena beban internal yaitu kerusakan pada span atau bentang pipa yang tidak tersangga.



Gambar 2. 5. Buckling pada Span

### 2.3.2. Secondary Load

Beban sekunder pada pipa merupakan beban "*self limiting*" dimana tegangan (*stress*) yang muncul akibat dari beban sekunder akan berkurang bahkan hilang ketika telah terjadi *yielding* atau deformasi pada pipa. Beban

sekunder terjadi dari beban ekspansi termal seperti perubahan suhu, jangkar, pukut, tertimpa benda, dan lain-lain. Di Indonesia, kecelakaan pada pipa bawah laut akibat dari beban sekunder pernah terjadi di teluk Balikpapan pada tahun 2018 yang mengakibatkan patahnya pipa bawah laut sehingga terjadi tumpahan minyak yang dapat memicu terjadinya kebakaran, pencemaran lingkungan, dan kerugian ekonomi. Gambar 2.6 merupakan dokumentasi pengangkatan pipa bawah laut yang pecah dan Gambar 2.7 merupakan kebakaran dan tumpahan minyak akibat dari kejadian tersebut. Menurut DNVGL, (2017b) jika frekuensi munculnya kurang dari  $10^{-2}$  per tahun, maka beban tersebut dapat diklasifikasikan sebagai beban yang tidak disengaja (*accidental load*).



Gambar 2. 6. Pengangkatan Pipa di Teluk Balikpapan  
(Koto and Putrawidjaja, 2018)



Gambar 2. 7. Dampak dari Kecelakaan Pipa Bawah Laut di Teluk Balikpapan  
(Koto and Putrawidjaja, 2018)

### 2.3.3. Occasional Load

*Occasional load* merupakan beban pada pipa yang jarang terjadi, akan tetapi tetap harus diperhitungkan dalam sistem perpipaan bawah laut apabila beban tersebut terjadi. Contoh dari *occasional load* adalah angin topan, gempa bumi, atau fenomena alam lainnya (Bai and Bai, 2014).

## 2.4 Single Point Mooring (SPM)

Kegiatan eksplorasi minyak dan gas terus dilakukan seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sumber energi tersebut. Penemuan ladang minyak yang besar di lepas pantai dimana tidak ada tempat untuk kapal tanker melakukan aktifitas bongkar dan muat, kebutuhan akan aktifitas tersebut melatar belakangi untuk pembuatan tempat tambat buatan. Berbagai tipe terminal telah dikembangkan, *single point mooring (SPM)* menjadi salah satu jenis terminal yang bagus dari segi fleksibilitas, reliabilitas, dan ekonomis.

*Single point mooring (SPM)* pada dasarnya adalah pelampung yang berfungsi sebagai titik tambat kapal tanker untuk proses *loading* dan *unloading*. Salah satu kelebihan *SPM* adalah mampu menangani kapal tanker ukuran apapun bahkan *very large crude carrier (VLCC)* dimana tidak ada fasilitas alternatif tersedia. Dalam perkembangannya, ada beberapa jenis sistem *SPM*, beberapa diantaranya adalah: *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)*, *Single Anchor Leg Mooring (SALM)*, *Turret Mooring*, dan *Soft Yoke System*.

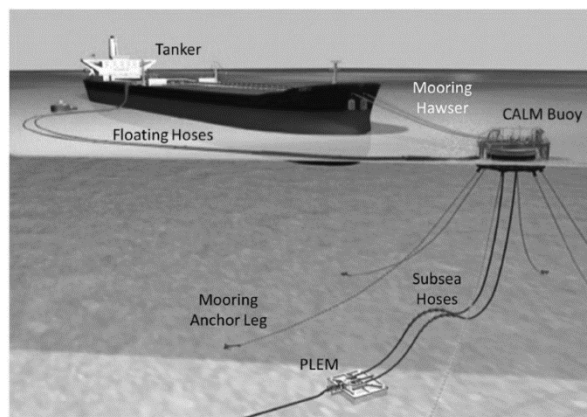
#### a. Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)

*CALM* terdiri dari floating buoy yang ditambatkan ke dasar laut dengan beberapa kaki rantai catenary yang diamankan dengan jangkar atau piles. Konfigurasi sistem *CALM* dapat dilihat pada Gambar 2.8. Kapal tanker ditambatkan ke floating buoy dengan ditahan menggunakan satu atau lebih tali elastis sintetis (*hawser*). *CALM* merupakan tipe yang paling populer dan banyak digunakan pada berbagai aplikasi, kedalaman laut, dan mampu digunakan untuk berbagai ukuran kapal mulai dari kapal kecil hingga *very large crude carrier (VLCC)*.

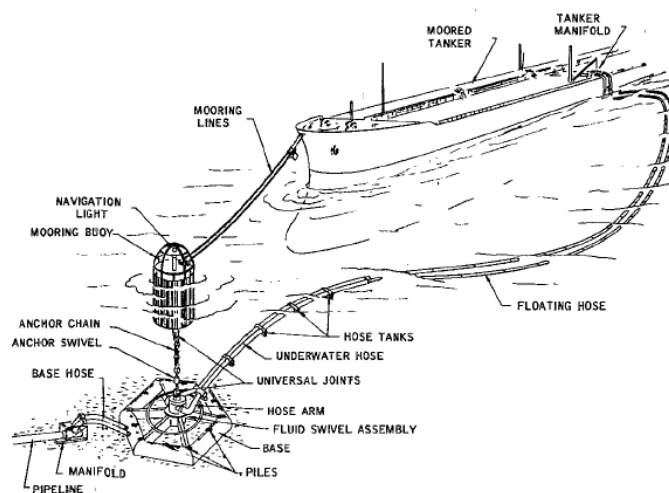


b. *Single Anchor Leg Mooring (SALM)*

Sistem *SALM* disebut juga *tension leg mooring system*, *floating buoy* yang ditambatkan ke dasar laut dengan sebuah rantai jangkar dan terdiri dari pipa yang disambungkan pada sambungan universal dan rantai jangkar pendek dengan *swivel* seperti yang terlihat pada Gambar 2.9 (Pecher et al., 2014). Sistem *SALM* pertama kali terpasang pada tahun 1969 di Brega, Libya. Fasilitas tersebut mampu menahan kapal tanker hingga 167,000 dwt dengan kapasitas 50,000 barrels per jam (Flory et al., 1972). Sistem *SALM* biasanya digunakan di perairan yang dangkal.



Gambar 2. 8. Konfigurasi Sistem *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)* (Jonathan Collins et al., 2015).



Gambar 2. 9. Konfigurasi Sistem *Single Anchor Leg Mooring (SALM)* (Flory et al., 1972)

c. *Turret Mooring System (TMS)*

*TMS* menghubungkan kapal dengan *turret* yang ditambatkan ke dasar laut dengan beberapa rantai jangkar sehingga dapat menahan kapal.

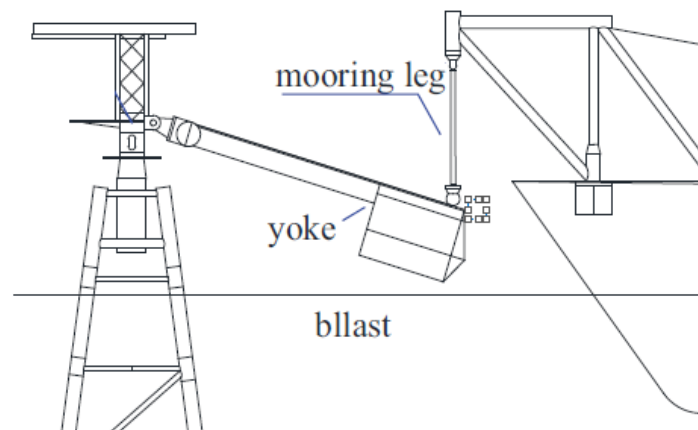
*TMS* memiliki *bearing* yang memungkinkan kapal untuk bergerak memutar *TMS* sesuai dengan arus dan gelombangnya (Babicz, 2015). *TMS* dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10. Konfigurasi *Turret Mooring System (TMS)*

d. *Soft Yoke Mooring (SYM) System*

*SYM* system memerlukan kapal khusus yang dimodifikasi pada lambung kapal untuk mendukung struktur pendulum yang digunakan. *SYM* biasanya ditempatkan pada perairan dengan kedalaman kurang dari 50 meter dan terdiri dari sebuah menara (Fan et al., 2015). *Soft Yoke Mooring (SYM)* dapat dilihat pada Gambar 2.11.

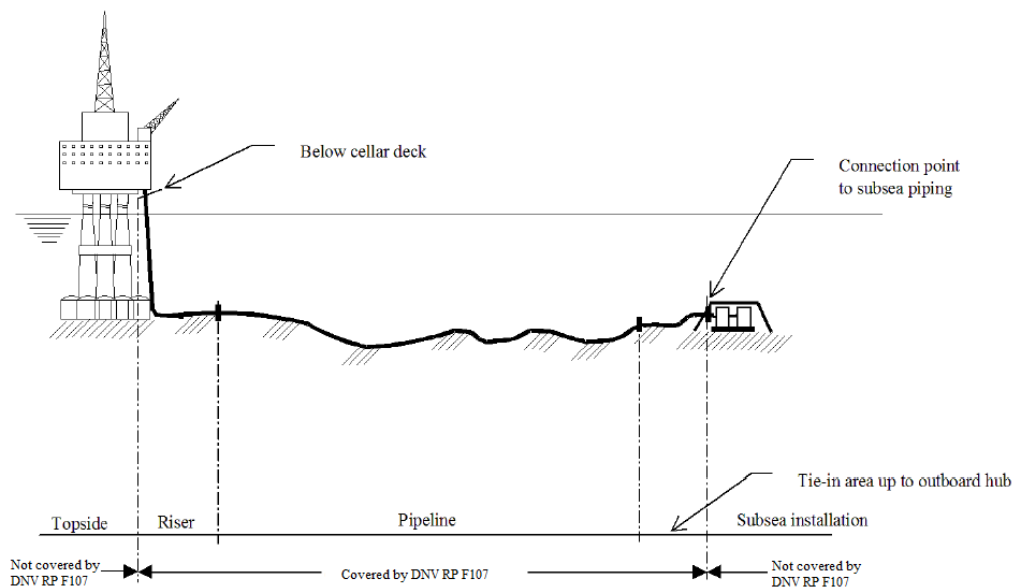


Gambar 2. 11. Konfigurasi *Soft Yoke Mooring (SYM) System*  
(Fan et al., 2015)

## 2.5 Standard DNVGL RP F107

Evaluasi mengenai dampak dan risiko yang terjadi pada kecelakaan pipa bawah laut telah banyak dilakukan dengan menggunakan beberapa metode yang berbeda.

Penilaian risiko pipa bawah laut dengan menggunakan standar DNVGL RP F107 (*Risk Assessment of Pipeline Protection*) paling banyak digunakan untuk menilai risiko pipa bawah laut akibat dari kejadian eksternal (Artana et al., 2016; Artana, 2009; Kawsar et al., 2015; Mulyadi et al., 2013; Pratiwi et al., 2019; Putranta et al., 2013; Sari et al., 2016). Standar DNVGL RP F107 menekankan pada penilaian risiko pada pipa bawah laut akibat dari beban-beban eksternal seperti: kejatuhan jangkar kapal, terseret jangkar kapal, kejatuhan benda, dan tertimpa kapal tenggelam yang dapat mempengaruhi *offshore risers*, *pipeline*, dan *umbilicals* (DNVGL, 2017a). Identifikasi bahaya akibat faktor eksternal tersebut harus secara sistematis diidentifikasi sehingga dapat mengetahui skenario dari kemungkinan kecelakaan dan konsekuensi yang terjadi. Tabel 2.2. menunjukkan beberapa skenario kecelakaan yang mungkin terjadi dan membahayakan *pipeline*, *risers*, dan *umbilicals*. Oleh karena DNVGL RP F107 hanya menekankan pada faktor eksternal, maka risiko yang terjadi akibat faktor internal seperti: korosi, erosi, kerusakan pipa akibat tekanan yang berlebihan, dll tidak diatur dalam standar ini. DNVGL RP F107 memiliki batasan dalam melakukan penilaian risiko seperti yang digambarkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Batasan Penilaian Risiko pada Standar DNVGL RP F107 (DNVGL, 2017a)

Untuk membandingkan frekuensi dari salah satu bahaya (*hazard*) yang relevan, DNVGL RP F107 memberikan peringkat untuk masing-masing peristiwa mulai

dari peringkat 1 (*low frequency*) hingga 5 (*high frequency*). Ranging frekuensi kegagalan tahunan sesuai dengan standar DNVGL RP F107 dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 2 Possible External Hazards (DNVGL, 2017a)

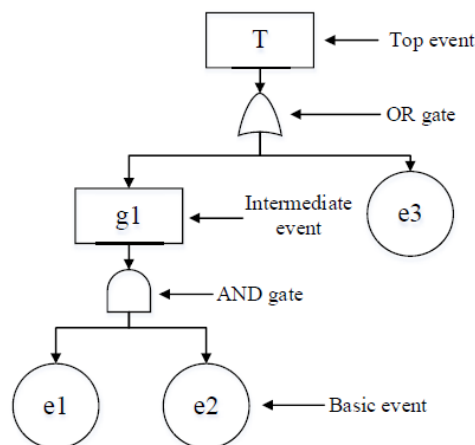
<b>Operation/activity</b>	<b>Hazard</b>	<b>Possible consequence to pipeline</b>
<i>Installation of pipeline</i>	<i>Dropped and dragged anchor/anchor chain from pipe lay vessel, Vessel collision during laying leading to dropped object, etc.</i>	<i>Impact damage</i>
	<i>Loss of tension, drop of pipe end,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

Tabel 2. 3 Kategori Frekuensi Tahunan (DNVGL, 2017a)

<b>Kategori</b>	<b>Deskripsi</b>	<b>Frekuensi Tahunan</b>
1 ( <i>Low</i> )	Kemungkinan kejadian dianggap diabaikan.	$<10^{-5}$
2	Kejadian diharapkan jarang terjadi.	$10^{-4}>10^{-5}$
3 ( <i>Medium</i> )	Kejadian secara individu tidak mungkin terjadi. Akan tetapi, mengingat banyaknya pipeline, kejadian mungkin terjadi satu tahun sekali.	$10^{-3}>10^{-4}$
4	Kejadian secara individu mungkin terjadi selama masa operasi pipa.	$10^{-2}>10^{-3}$
5 ( <i>High</i> )	Kejadian secara individu mungkin terjadi lebih dari satu kali selama masa operasi pipa.	$>10^{-2}$

### 2.5.1 Metode Analisa Frekuensi

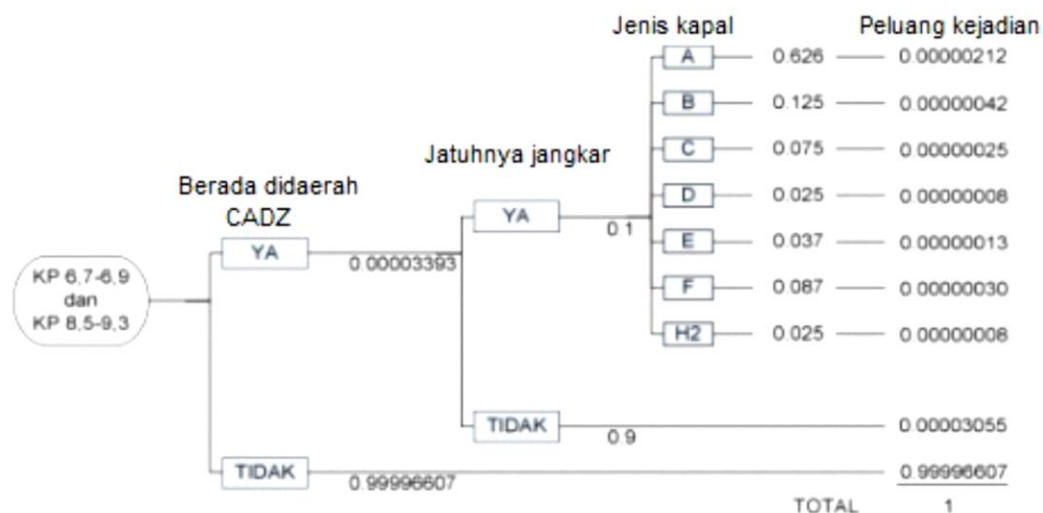
Penilaian risiko dilakukan mengetahui tingkat risiko dengan cara mengidentifikasi kemungkinan bahaya, mengevaluasi kemungkinan terjadinya bahaya, dan mengidentifikasi konsekuensi akibat dari bahaya tersebut. Beberapa metode dapat digunakan untuk mengidentifikasi bahaya dan menghitung peluang terjadinya bahaya seperti *Fault Tree Analysis*, *Event Tree Analysis*. *FTA* adalah proses deduktif yang dimulai dari *top event* hingga elemen-elemen yang menyebabkan kegagalan. Metode yang digunakan berdasarkan asumsi bahwa: suatu *event* adalah *binary event* (misalnya: bekerja atau tidak), suatu *event* diasumsikan independen, dan hubungan antara *top event* dan faktor penyebab dinyatakan dalam gerbang logika *AND* atau *OR* (Bobbio et al., 2001). Struktur dari *FTA* dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2. 13. Struktur *Fault Tree Analysis*

Hampir sama dengan *FTA*, *Event Tree Analysis (ETA)* merupakan proses deduktif yang berawal dari initial event menuju ke faktor penyebabnya. Model ini memiliki jalur untuk menganalisis probabilitas dan faktor penyebab dari initial event. *ETA* digunakan untuk memeriksa fungsi, atau kegagalan sistem. Suatu sistem pada *ETA* juga diasumsikan sebagai independen. Contoh dari *ETA* dapat dilihat pada gambar 2.14. Baik *FTA* dan *ETA* merupakan metode yang sudah terbukti dan banyak digunakan dalam menganalisa dan menghitung probabilitas pada suatu sistem (Bobbio et al., 2001; Liu et al., 2013). *FTA* hanya dapat menganalisa masalah terbatas pada satu top event saja, sehingga dibutuhkan lebih banyak grafik pada

kejadian yang memiliki lebih dari satu top event. Begitu juga dengan metode *ETA* yang hanya terbatas pada satu *initial event* saja.



Gambar 2. 14. Contoh Aplikasi ETA

Selain *FTA* dan *ETA*, *Bayesian Network* juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi bahaya dan menghitung peluang munculnya bahaya tersebut. *Bayesian Network* merupakan metode probabilistik dalam bentuk grafik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antar variabel pada masalah yang kompleks. *Bayesian Network* telah banyak diaplikasikan pada berbagai masalah, mulai dari diagnosis medis, evaluasi ilmiah, hingga diaplikasikan pada penilaian risiko dikarenakan kemampuannya untuk melakukan analisa prediktif dan diaknostik (Bhandari et al., 2015; Cai et al., 2013; Uusitalo, 2007). Mulyadi et al., (2014, 2013) menggunakan pendekatan *Bayesian Network* untuk menghitung frekuensi tubrukan kapal dan *anchor dropped* di selat madura. Dalam penelitian Li et al., (2016) *Bayesian Network* mampu untuk menganalisa masalah dan menghitung frekuensi dari penyebab bocornya pipa bawah laut. Liu et al., (2013) juga menggunakan metode *Bayesian Network* untuk melakukan penilaian risiko pipa bawah laut akibat dari faktor eksternal karena *Bayesian Network* memiliki struktur yang lebih fleksibel dibandingkan dengan *FTA*. *Bayesian Network* juga mampu digunakan untuk memprediksi faktor penyebab kebakaran hutan (Adi, 2013), bahkan digunakan untuk diagnosis penyakit pada hewan ternak (Putra et al., 2018). *Bayesian Network* terdiri dari dua komponen utama, yaitu:

## 1. Komponen Kualitatif

Komponen kualitatif direpresentasikan oleh *Directed Acyclic Graph (DAG)* yang terdiri dari *node* dan *arcs*. *Node* merepresentasikan variabel acak dan *arcs* merepresentasikan adanya hubungan ketergantungan langsung atau dapat juga merepresentasikan sebagai pengaruh antara variabel yang dihubungkannya. Tidak adanya *arcs* menandakan adanya hubungan kebebasan kondisional di antara variabel (Cai et al., 2013).

## 2. Komponen Kuantitatif

Komponen kuantitatif merupakan himpunan parameter yang mendefinisikan distribusi probabilitas kondisional untuk setiap variabel. Pada Bayesian Network, node berkorespondensi dengan variabel acak. Tiap node diasosiasikan dengan sekumpulan peluang bersyarat,  $P(X_i|A_i)$  sehingga  $X_i$  adalah variabel yang diasosiasikan dengan node dan  $A_i$  adalah set dari parent dalam graph (Cai et al., 2013).

Secara mendasar, persamaan dari teorema Bayes adalah:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(B)} \quad (1.1)$$

Dimana:

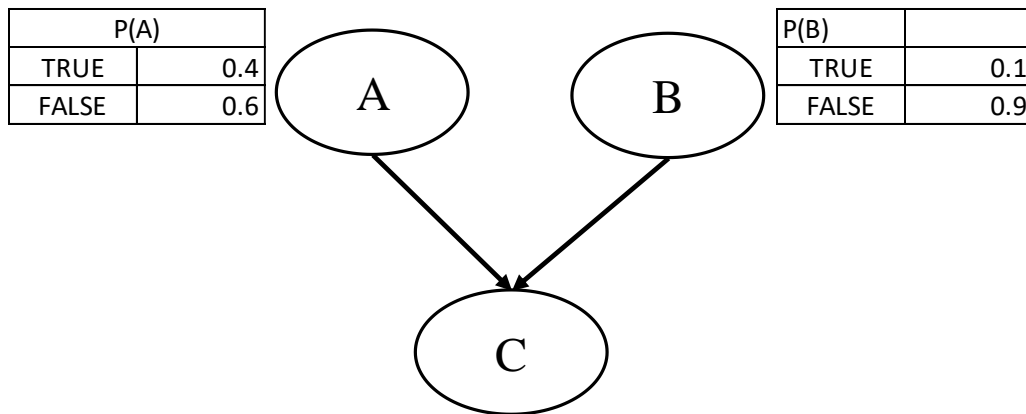
$P(A|B)$  adalah kemungkinan dari A terjadi apabila nilai B diketahui

$P(B|A)$  adalah kemungkinan dari B terjadi apabila nilai A diketahui

$P(A)$  adalah nilai dari kemungkinan A terjadi

$P(B)$  adalah nilai dari kemungkinan B terjadi.

Sebagai contoh Bayesian Network dapat dilihat pada gambar 2.15, node A, B, dan C dianggap sebagai variabel acak di mana C dipengaruhi oleh A & B. Node C adalah parent node dan node A & B adalah child node. Sedangkan, Conditional Probability Table (CPT) dari contoh bayesian network dapat dilihat pada Tabel 2.4.



Gambar 2. 15. Contoh Bayesian Network

Tabel 2. 4. Contoh CPT pada Bayesian Network

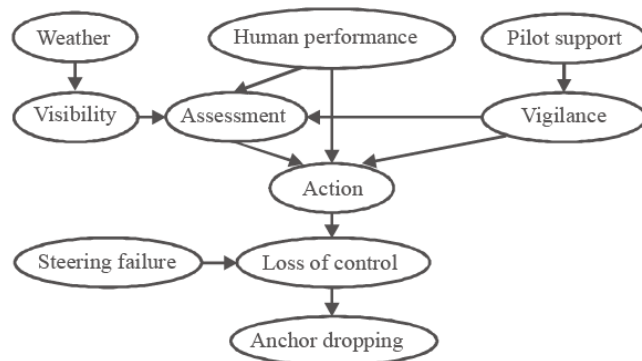
P(C)				
A	TRUE		FALSE	
B	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE
TRUE	0.95	0.7	0.4	0.01
FALSE	0.05	0.3	0.6	0.99

Dalam menghitung frekuensi munculnya bahaya *dropped anchor*, Mulyadi et al., (2013) mempertimbangkan faktor-faktor penyebab keadaan darurat yang mengakibatkan kapal menurunkan jangkar, dimana faktor tersebut adalah faktor cuaca, human error, tingkat kewaspadaan pandu, kegagalan sistem kemudi, dan jarak penglihatan yang buruk. Kelima parameter tersebut kemudian diterjemahkan kedalam struktur Bayesian Network seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.16.

Bayesian Network memiliki keuntungan dan kerugian. Keuntungan dari metode Bayesian Network adalah:

1. Bayesian Network direpresentasikan dalam bentuk DAG sehingga mudah untuk dipahami hubungan pada setiap variabelnya.
2. Bayesian Network dapat digunakan untuk analisa prediksi dan diagnostik.
3. Mampu untuk menggabungkan variabel langsung dan variabel tidak langsung kedalam analisis tunggal.
4. Jika ada banyak sumber informasi mengenai subjek tersebut, atau jika tidak banyak yang diketahui, Bayesian Network dapat menggabungkan berbagai sumber informasi.





Gambar 2. 16. Struktur Bayesian Network untuk bahaya Anchor Dropping (Mulyadi et al., 2013)

Dengan keuntungan diatas, dapat disimpulkan bahwa metode Bayesian Network merupakan metode yang tepat untuk diaplikasikan dalam penarikan kesimpulan pada kasus-kasus dengan multiple source of measurement. Akan tetapi, Bayesian network juga memiliki beberapa kelemahan, diantaranya adalah:

1. Bayesian Network berguna untuk memodelkan pendapat ahli, akan tetapi cukup sulit untuk mendapatkan informasi yang dapat dikonversi menjadi distribusi probabilitas.
2. Bayesian Network direpresentasikan dengan Directed Acyclic Graph (DAG) dimana pada grafik acyclic tidak mendukung adanya feedback yang mungkin berguna pada pemodelan beberapa kasus.

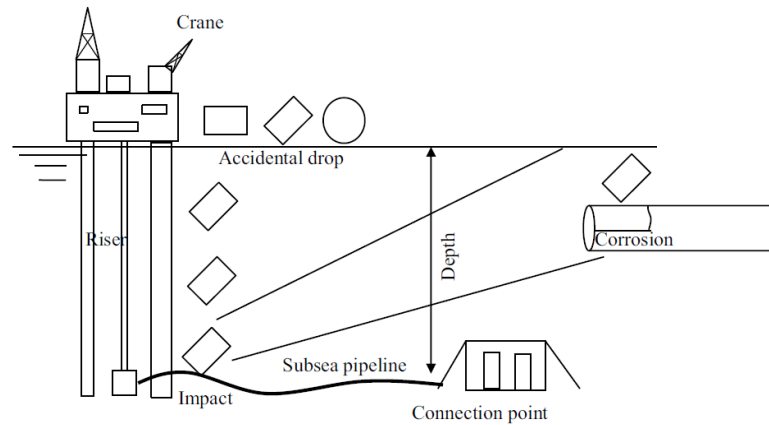
Pada penelitian ini, metode Bayesian Network digunakan untuk menganalisa frekuensi dari terjadinya bahaya. Analisa frekuensi dilakukan dengan menggunakan software *Hugin Expert*. *Hugin Expert* adalah software analisa berbasis Bayesian Network yang digunakan untuk mengambil keputusan dibawah ketidakpastian.

### 2.5.2 Metode Analisa Konsekuensi

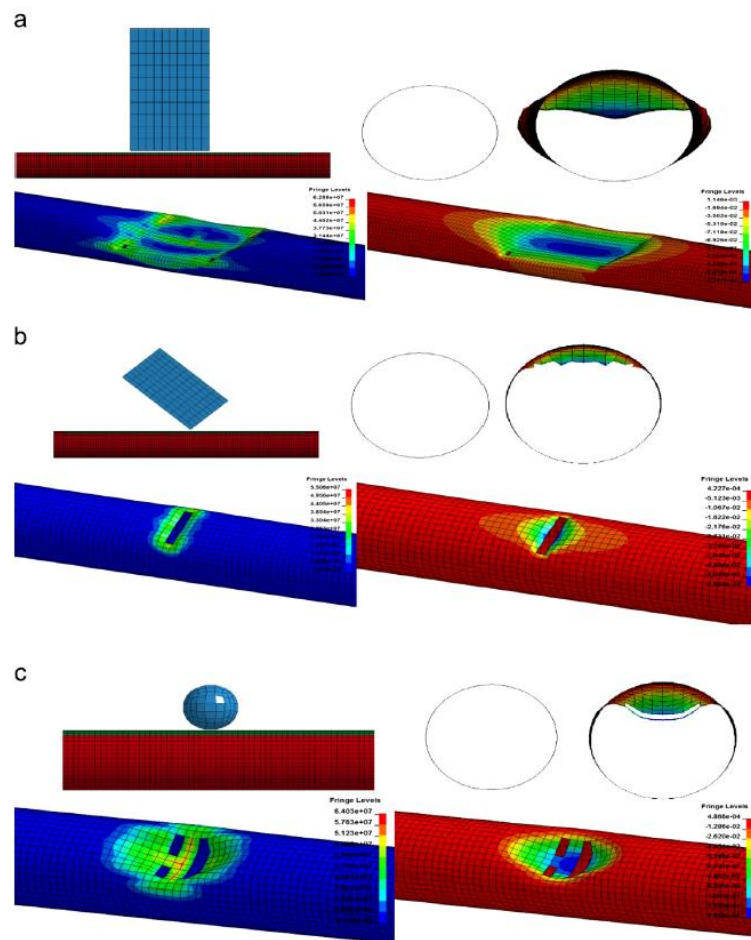
Ada banyak metode yang dapat dilakukan untuk menghitung konsekuensi yang terjadi akibat dari kecelakaan pada pipa bawah llaut. AL-Warthan et al., (1993), Hvam et al., (1990), dan Yu et al., (2016) melakukan perhitungan dampak dari kecelakaan pada pipa bawah laut menggunakan metode numerik, sedangkan Kawsar et al., (2015) dan Sari et al., (2016) meneliti dampak dari object terjatuh yang mengenai pipa bawah laut dengan menggunakan FEM sehingga mendapatkan

gambaran secara visual pada pipa bawah laut yang mengalami kecelakaan akibat dari kejatuhan benda.

*Finite element method (FEM)* merupakan sebuah metode numerik untuk menemukan solusi *partial differential equations (PDEs)* dari geometri yang kompleks dengan membagi-bagi menjadi bagian kecil (*mesh*). *FEM* secara luas digunakan dalam banyak disiplin ilmu *continuum mechanics, fluid dynamics, and biophysics* (Fu et al., 2014). *FEM* dapat diaplikasikan mulai dari memprediksi kekuatan struktur bangunan, hingga perpipaan. Penggunaan *FEM* untuk menganalisa risiko objek jatuh pada pipa bawah laut telah dilakukan oleh Kawsar et al., (2015), penelitian tersebut mensimulasikan 3 skenario pipa bawah laut yang kejatuhan benda berupa kotak, prisma, dan bulatan seperti yang dipresentasikan pada gambar 2.17. Hasil dari penggunaan *FEM* dari penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.18. Gambar 2.18. (a) merupakan dampak dari pipa bawah laut akibat dari kejatuhan benda yang berbentuk kotak. Gambar 2.18. (b) merupakan dampak dari pipa bawah laut akibat dari kejatuhan benda yang berbentuk prisma. Sedangkan Gambar 2.18. (c) merupakan dampak dari pipa bawah laut akibat dari kejatuhan benda yang berbentuk bulatan. Penggunaan *FEM* secara efektif dapat digunakan untuk mempermudah analisa terkait dengan struktur geometri yang kompleks dan menunjukkan hasil yang rasional ketika dibandingkan dengan hasil eksperimen (Yu et al., 2016). Pada pengaplikasian di pipa bawah laut, pendekatan *FEM* mampu digunakan untuk memprediksi dampak yang terjadi akibat suatu kecelakaan pada pipa bawah laut yang diakibatkan oleh faktor eksternal dengan hasil yang rasional apabila dibandingkan dengan hasil eksperimen (Yu et al., 2016). Penelitian ini menggunakan *software ANSYS Explicit Dynamics* untuk melakukan analisa kerusakan pada pipa dengan pendekatan *FEM*. *ANSYS Explicit Dynamics* merupakan software yang dapat mensimulasikan respon struktur terhadap pembebanan dalam durasi yang pendek seperti tabrakan, drop test, dan lain-lain.



Gambar 2. 17 Skenario Pipa Bawah Laut yang Kejatuhan Benda (Kawsar et al., 2015)



Gambar 2. 18. Dampak Pipa Bawah Laut yang Kejatuhan Benda (a) Kotak, (b) Prisma, dan (c) Bulatan (Kawsar et al., 2015)

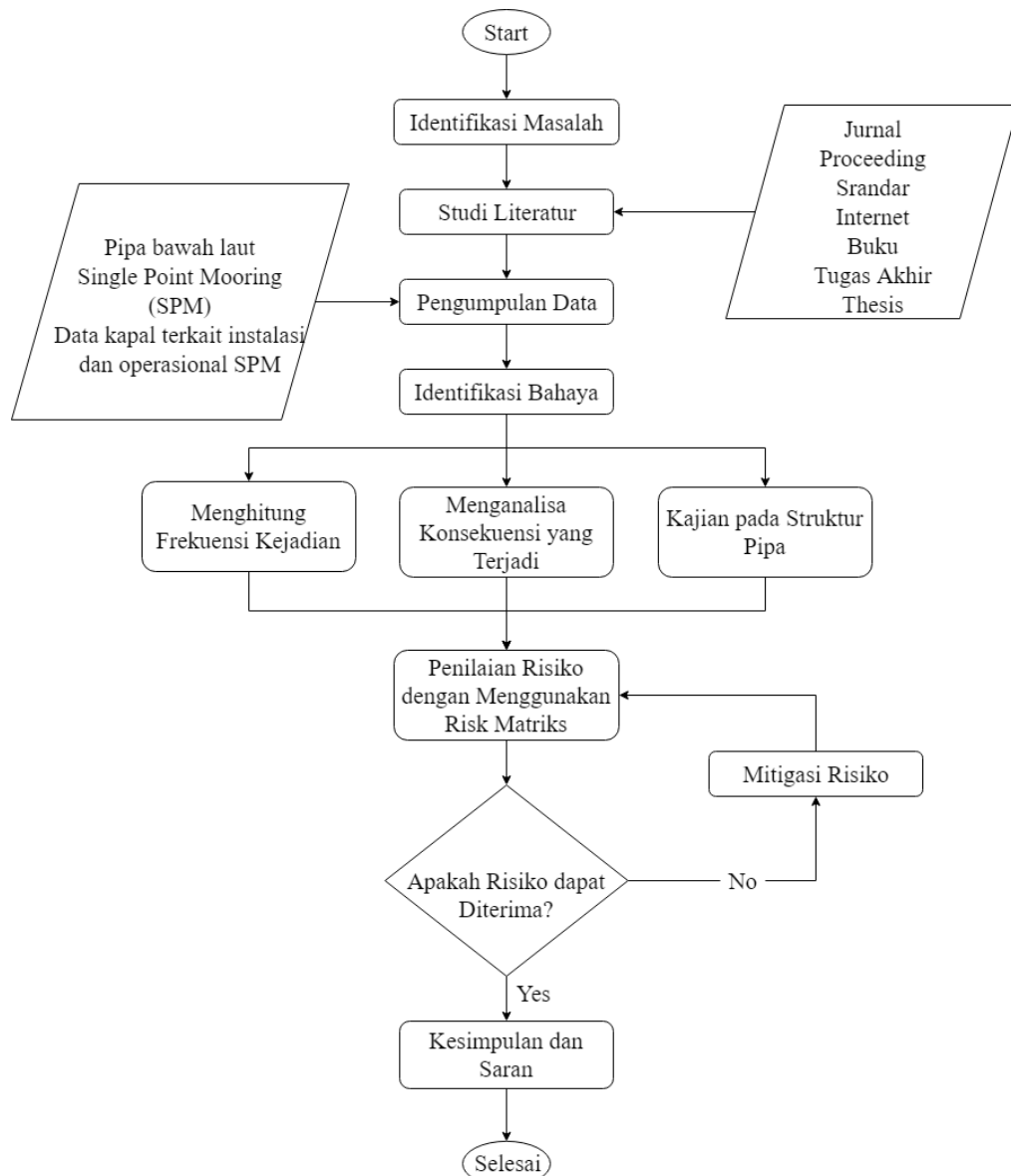
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan bagaimana langkah-langkah dalam pengerjaan penelitian ini. Langkah-langkah tersebut digambarkan dalam diagram alir penelitian kemudian dijelaskan proses pada setiap poin yang ada dalam diagram alir tersebut.

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

### **3.2 Identifikasi Masalah**

Identifikasi terhadap masalah yang diangkat dalam pengerjaan tesis diangkat dari kondisi saat ini dan permasalahan yang mungkin akan terjadi. Permasalahan dapat diketahui melalui observasi, menggali informasi ataupun melalui data statistik yang ada dan kecenderungannya di waktu yang akan datang. Dari hasil identifikasi masalah dapat ditentukan langkah-langkah yang harus dilakukan dalam pengerjaan tesis beserta metode yang diterapkan dalam menyelesaikan masalah yang ada. pada penelitian ini, permasalahan yang akan dibahas adalah penilaian risiko terhadap pipa bawah laut akibat instalasi *Single Point Mooring (SPM)* dan operasionalnya.

### **3.3 Studi Literatur**

Setelah suatu permasalahan sudah diketahui, maka selanjutnya adalah studi literatur. Pada tahap ini, dilakukan studi terhadap referensi-referensi yang terdapat pada jurnal/paper, internet, dan buku-buku materi penunjang. Studi literatur dilakukan untuk mempelajari tentang teori-teori dasar mengenai permasalahan yang diangkat, yaitu:

1. Penilaian Risiko

Penilaian risiko dilakukan untuk memperkirakan suatu risiko dari skenario yang bisa didefinisikan dengan jelas ataupun potensi dari suatu ancaman atau bahaya baik secara kuantitatif atau kualitatif. Sehingga, pengetahuan tentang penilaian risiko sangat penting untuk menunjang penelitian ini.

2. Pipa Bawah Laut

Penelitian ini mengangkat tema mengenai penilaian risiko terhadap pipa bawah laut akibat pemasangan fasilitas terapung sementara, sehingga pengetahuan terkait dengan pipa bawah laut diperlukan untuk menunjang penelitian ini.

3. *Single Point Mooring (SPM)*

Pengetahuan tentang *SPM* dibutuhkan untuk menunjang penelitian ini karena fasilitas terapung sementara yang digunakan sebagai objek

penelitian ini adalah *SPM*. Apa itu *SPM*, jenis dan sistem kerjanya serta karakteristik yang dimiliki dibutuhkan dalam penelitian ini.

#### 4. Standar Penilaian Risiko

Penilaian risiko harus mempunyai acuan atau standar yang jelas, pada penelitian ini menggunakan standar penilaian risiki DNVGL RP F107: Risk Assessment of Pipeline Protection. Standar penilaian risiko tersebut menekankan kepada penilaian risiko pipa bawah laut akibat dari faktor eksternal.

### 3.4 Pengumpulan Data

Setelah melakukan studi literatur, maka tahap selanjutnya adalah pengumpulan data yang terkait dengan penelitian, dimana data-data pendukung terkait tentang permasalahan yang sesuai dengan metode yang digunakan dikumpulkan untuk analisa lebih lanjut. Adapun data yang diperlukan dalam pengerjaan tesis ini adalah:

#### 1. Spesifikasi pipa bawah laut

Data atau spesifikasi pipa bawah laut diperlukan dalam analisa konsekuensi dengan menggunakan standar DNVGL RP F107 dan sebagai dasar desain untuk simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Adapun spesifikasi pipa yang didapatkan dari PT. X dapat dilihat pada tabel 3.1.

#### 2. Spesifikasi dari *single point mooring (SPM)* yang digunakan.

*Single point mooring (SPM)* merupakan struktur terapung yang digunakan sebagai sarana tambat kapal tanker untuk loading atau unloading. PT. X berencana melakukan instalasi *SPM* dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada tabel 3.2. Sebagai sarana tambat, *SPM* dikaitkan ke dasar laut dengan menggunakan jangkar. Spesifikasi rantai jangkar dan jangkar dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4.

Tabel 3. 1. Spesifikasi Pipa Bawah Laut

<b>Spesifikasi Pipa</b>		
<b>Description</b>	<b>Value</b>	<b>Unit</b>
Outside Diameter	40.64	cm
Thickness	1.27	cm
Pipeline Joint Length	12	m
Steel Pipe Density	7850	kg/m <sup>3</sup>
SMYS	395	Mpa
Pipeline Grade	API 5L X52	-
Concrete Coating Thickness	2.54	cm
Concrete Coating Density	3040	kg/m <sup>3</sup>
Corrosion Coating Thickness	0.55	cm
Corrosion Coating Density	1300	kg/m <sup>3</sup>
Internal Coating Thickness	0	cm
Internal Coating Density	0	kg/m <sup>3</sup>
Insulation Coating Thickness	0	cm
Insulation Coating Density	0	kg/m <sup>3</sup>
Jacket Pipe Thickness	0	cm
Jacket Pipe Density	0	kg/m <sup>3</sup>

Tabel 3. 2. Spesifikasi Buoy

<b>Spesifikasi Buoy</b>		
<b>Description</b>	<b>Value</b>	<b>Unit</b>
Outer Diameter	7.6	m
Overall Depth	2.45	m
Operating Draught	0.82	m

Tabel 3. 3. Spesifikasi Rantai Jangkar

<b>Spesifikasi Rantai Jangkar</b>		
<b>Description</b>	<b>Value</b>	<b>Unit</b>
Type	Studless	-
Diameter	92	mm
Length of Mooring Line	220	m
Estimated Minimum Breaking Load (MBL)	866 (Grade 4)	Tons

Tabel 3. 4. Spesifikasi Jangkar

<b>Spesifikasi Jangkar</b>		
<b>Description</b>	<b>Value</b>	<b>Unit</b>
Anchor Type	Stevin MK3	-
Anchor Weight	20	Tons
Estimated Holding Capacity	250	Tons

Dua buah nylon *hawser* menghubungkan storage tanker dan buoy ketika proses loading/unloading. Selain itu, tali polypropylene menghubungkan *storage tanker* ke *shuttle tanker* dan *shuttle tanker* ke *tugboat* yang bertujuan



untuk menjaga posisi kapal pada tempatnya. Spesifikasi dari nylon dan tali polypropylene dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 5. Spesifikasi Hawser

Description	Nylon	Polypropylene	Unit
Diameter	60	80	mm
Length	55	55	meter
Estimated Minimum Breaking Load (MBL)	81	69	Tons

### 3. Data kapal yang digunakan dalam instalasi dan operasi SPM.

*Anchor handling tug supply vessel (AHTS)* dibutuhkan Untuk mendukung proses instalasi SPM, adapun principal dimension dari AHTS yang dibutuhkan dapat dilihat pada tabel 3.6.

Tabel 3. 6. Spesifikasi AHTS

Spesifikasi AHTS		
Description	Value	Unit
LOA	58.70	m
B	14.60	m
H	5.50	m
T	4.75	m
GT	1468	Tons
Engine	2 X 2610	BHP
Bollard Pull	68	Tons
Anchor Weight	2 X 1740	Tons

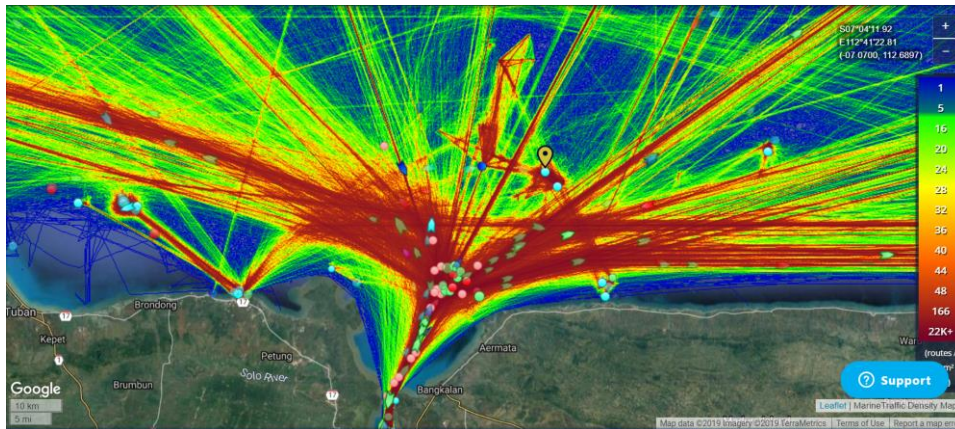
Ketika beroperasi, *storage tanker* dibutuhkan untuk menampung minyak dari *platform*. Sedangkan *shuttle tanker* diperlukan untuk pengiriman minyak dari storage tanker menuju ke darat. Spesifikasi dari *Storage Tanker & Shuttle Tanker* dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3. 7. Spesifikasi Storage & Shuttle Tanker

Spesifikasi Storage & Shuttle Tanker		
Description	Value	Unit
LOA	159.92	m
B	26.20	m
H	11.00	m
T	7.00	m
GT	12662	Tons
DWT	18520	Tons
Engine	7560	BHP
Anchor Weight	3 X 5610	Tons

#### 4. Data Lalu-lintas Pelayaran

Kepadatan lalu-lintas pelayaran di sekitar fasilitas dapat berdampak pada terjadinya kecelakaan pada pipa bawah laut. Oleh sebab itu, lalu lintas pelayaran di sekitar area instalasi *Single Point Mooring (SPM)* harus dipertimbangkan juga dalam penilaian risiko pada pipa bawah laut sesuai dengan standar DNVGL RP F107. Gambar 3.2 merupakan gambar kepadatan lalu-lintas pelayaran dari rekaman historis data *Automatic Identification System (AIS)* di sekitar area instalasi *SPM* yang diperoleh dari *marinetraffic.com*.



Gambar 3. 2. Kepadatan Lalu-lintas Pelayaran

Jumlah kapal berdasarkan data Automatic Identification System (AIS) pada radius 10 nm di area instalasi single point mooring (SPM) dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Tabel 3. 8. Jumlah Kapal

Jenis Kapal	Jumlah Kapal
Passenger	5432
Cargo	11703
Tanker	7677
Container	9854
Tug	1262
<b>Jumlah</b>	<b>35928</b>

Untuk perhitungan frekuensi dan konsekuensi, maka dipilih 1 kapal pada masing-masing jenis kapal tersebut sebagai sampel perhitungan yang dapat dilihat pada Tabel 3.9.

Tabel 3. 9. Sample Kapal

Type of Vessel	Vessel Name	DWT (ton)	L (m)	B (m)	T (m)	Anchor Weight (ton)	Chain Diameter (mm)
Passenger	KM Niki Barokah	1054	91.66	15.6	4.2	2280	42
Cargo	CTP. Innovation	7697	126.65	19.8	6.39	4320	62
Tanker	Ontari	18520	152	26.2	7	5610	58
Container	Meratus Ambon	8122	123.5	20.8	6.5	4050	56
Tug	Sms Endeavour	1322	58.7	14.6	4.75	1740	40

## 5. Data Lingkungan

Data lingkungan digunakan pada simulasi konsekuensi agar hasil dari simulasi tersebut sesuai dengan kondisi asli. Table 3.10 dan Table 3. 11 merupakan data gelombang dan arus pada 1 tahun, 10 tahun, dan 50 tahun.

Tabel 3. 10. Wave Data

Wave Data					
1-years		10-years		50-years	
Hs(m)	Tp (s)	Hs(m)	Tp (s)	Hs(m)	Tp (s)
1.88	6.46	3.47	8.65	4.25	9.8

Tabel 3. 11. Current Data

% of depth (m)	1-years	10-years	50-years
	Speed (cm/s)		
0	59.73	85.33	97.8
20	57.86	82.05	95.54
40	55.53	79.32	90.73
60	52.4	74.86	85.63
80	47.26	76.8	77.55
100	37.69	53.85	61.59

### 3.5 Identifikasi Bahaya

Identifikasi bahaya (*hazard*) dilakukan untuk mengetahui apa saja kemungkinan bahaya yang dapat menyebabkan kegagalan pada pipa bawah laut akibat dari instalasi *SPM*. Kemungkinan bahaya yang dapat menyebabkan kegagalan pada pipa diidentifikasi berdasarkan dari kegiatan di daerah tersebut (DNVGL, 2017a). Pada tahap ini, identifikasi bahaya juga dilakukan untuk membuat skenario kecelakaan yang berpotensi untuk merusak pipa bawah laut. Studi kasus penilaian risiko diterapkan pada pipa bawah laut akibat dari instalasi dan operasi *SPM*. Dengan mempertimbangkan lokasi instalasi dan

operasi *SPM* dengan pipa bawah laut, maka penilaian risiko pada pipa bawah laut ini dibagi menjadi dua kondisi yaitu:

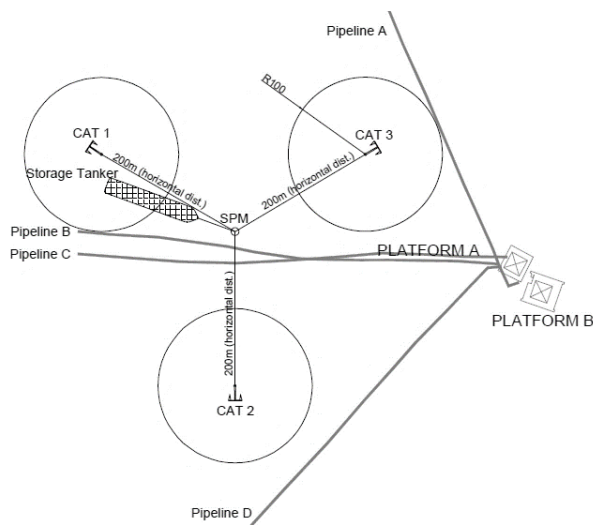
1. Instalasi *SPM*: beberapa *AHTS* dioperasikan pada saat instalasi *SPM*. Selain itu, satu *tanker* ditambahkan pada *SPM* sebagai sarana penampungan minyak sementara.
2. Operasi *SPM*: beberapa tugboat dan shuttle tanker dioperasikan pada saat proses operasional dari *SPM*. Selain itu, aktifitas lalulintas kapal di sekitar *SPM* dipertimbangkan karena dikhawatirkan akan berdampak kepada pipa bawah laut.

Tabel 3.12 merupakan *hazard compatibility matrix* pada penilaian risiko akibat dari instalasi dan operasi *SPM*.

Tabel 3. 12. Hazard Compatibility Matrix

<b>During Installation</b>			
<b>Type of Vessel</b>	<b>Hazard</b>		
	<b>Dropped Anchor</b>	<b>Dragged Anchor</b>	<b>Ship Sinking</b>
AHTS	v	v	-
Storage Tanker	v	v	-
<b>During Operation</b>			
<b>Type of Vessel</b>	<b>Hazard</b>		
	<b>Dropped Anchor</b>	<b>Dragged Anchor</b>	<b>Ship Sinking</b>
<b>Vessel used for SPM's Operation</b>			
Tugboat	v	v	v
Shuttle Tanker	v	v	v
<b>Vessel Traffic around SPM</b>			
Passenger	v	v	v
Cargo	v	v	v
Tanker	v	v	v
Container	v	v	v
Tug	v	v	v

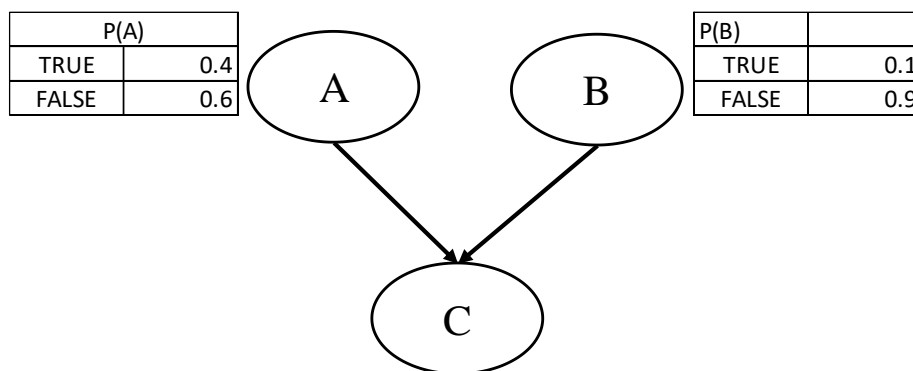
Pada penelitian ini, penilaian risiko pipa bawah laut dilakukan ketika proses instalasi dan operasional *SPM*, dimana Instalasi *SPM* berada di atas pipa bawah laut dengan diameter 16” yang menuju ke *Platform A*. Sehingga penilaian risiko pipa bawah laut dilakukan pada ke-empat pipa yang menuju ke *Platform A* seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3. 3. Pipa yang Diteliti

### 3.6 Menghitung Frekuensi Kejadian

Pada tahap ini, frekuensi kejadian yang telah diidentifikasi sebelumnya dihitung untuk mengetahui berapa besarnya frekuensi kejadian tersebut muncul dengan menggunakan metode *Bayesian Network*. Dimana peluang jangkar kapal yang mengenai pipa atau menyeret pipa merupakan peluang yang dipengaruhi oleh peluang penyebab kapal menjatuhkan jangkar, peluang kapal berada di CADZ, dan peluang kapal apa yang menjatuhkan jangkar di daerah tersebut. Gambar 3.4 merupakan contoh pengaplikasian Bayesian Network, dan Tabel 3.13 merupakan Conditional Probability Table dari P(C).



Gambar 3. 4. Contoh Aplikasi Bayesian Network

Tabel 3. 13. Conditional Probability Table dari P(C)

P(C)				
A	TRUE		FALSE	
B	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE
TRUE	0.95	0.7	0.4	0.01
FALSE	0.05	0.3	0.6	0.99

### 3.7 Menganalisa Konsekuensi yang Terjadi

Konsekuensi merupakan dampak dari suatu kejadian/kecelakaan yang terjadi. Pada tahap ini, konsekuensi dari kejadian/kecelakaan pada pipa dianalisa dan dikategorikan sesuai dengan standar DNVGL RP F107. Kerusakan pada pipa bawah laut akibat dari faktor eksternal sebagian besar adalah berupa penyokan (*dents*) dan pada kondisi tertentu dapat menyebabkan pipa pecah (*rupture*) (DNVGL, 2017a). Bahaya yang mungkin terjadi sesuai dengan standar DNVGL RP F107 yang telah dibahas pada sub bab 3.5 adalah kejatuhan jangkar (*dropped anchor*), terseret jangkar (*dragged anchor*), dan kapal tenggelam (*ship sinking*).

#### 3.7.1. Analisa Konsekuensi Akibat dari Kejatuhan Jangkar

Pada studi kasus dalam pengerjaan tesis ini, kemungkinan kejatuhan jangkar berasal dari AHTS pada saat proses instalasi SPM, tug boat dan shuttle tanker ketika dalam keadaan darurat. Dampak kerusakan dapat diketahui dimana energi kinetik dari objek dibandingkan dengan energi yang diperlukan untuk menghasilkan penyokan (*dent*) (Putranta et al., 2013). Sesuai dengan standar DNVGL RP F107, persamaan energy yang diperlukan untuk menghasilkan penyokan (*dent*) adalah:

$$E = 16 \cdot \left(\frac{2\pi}{9}\right) \times m_p \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot D \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Dimana:

$m_p$  : *plastic moment capacity of the wall* ( $= \frac{1}{4} \times \sigma_y \times t^2$ )

$D$  : *steel outer diameter.*

$T$  : *wall thickness (nominal)*

$\delta$  : *pipe deformation, dent depth*

$\sigma_y$  : *yield stress*

Sedangkan energi kinetik yang dihasilkan oleh objek tergantung kepada masa dan kecepatan jatuh benda (DNVGL, 2017a). Hubungan antar keduanya dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$(m - V \cdot \rho_{water}) \cdot g = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A \cdot v_T^2$$

Dimana:

$m$  : *mass of the object* (kg)

$g$  : *gravitation acceleration* (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$V$  : *volume of the object* (m<sup>3</sup>)

$\rho_{water}$  : *density of water* (i.e. 1025 kg/m<sup>3</sup>)

$C_D$  : *drag-coefficient of the object*

$A$  : *projected area of the object in the flow-direction* (m<sup>2</sup>)

$v_T$  : *terminal velocity through the water* (m/s).

Dari persamaan diatas, maka energi kinetik efektif EE dapat diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$E_E = E_T + E_A = \frac{1}{2} (m + m_a) v_T^2$$

Dimana:

$m_a = \text{added mass (kg)} = \rho_{water} \cdot C_a \cdot V$

Nilai dari koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien tambahan ( $C_a$ ) dapat dilihat pada tabel 3.14. Standar DNVGL RP F107 menyarankan nilai koefisien drag ( $C_D$ ) adalah 1 (DNVGL, 2017a).

Tabel 3. 14. Kofesien Drag dan Koefisien Tambahan

Kategori	Deskripsi	CD	Ca
1,2,3	Slender Shape	0.7 – 1.5	0.1 – 1.0
4,5,6,7	Box Shaped	1.2 – 1.3	0.6 – 1.5
All	Misc. Shaped (spherical to complex)	0.6 – 2.0	1.0 – 2.0

Hasil dari persamaan energi kinetik dari objek yang terjatuh dan persamaan energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan penyokan (*dent*) kemudian dibandingkan untuk mengetahui kategori kerusakan pada pipa. DNVGL RP F107 mengelompokkan tingkat kerusakan seperti yang dapat dilihat pada tabel 3.15.

Tabel 3. 15. Klasifikasi Kerusakan pada Pipa

Dent/Diameter (%)	Impact Energy	Deskripsi Kerusakan	Conditional Probability					
			D1	D2	D3	R0	R1	R2
<5	E	Kerusakan ringan	1.0	0	0	1.0	0	0
5 – 10	E	Kerusakan besar Kebocoran diantisipasi	0.1	0.8	0.1	0.9	0.1	0
10 – 15	E	Kerusakan besar Kebocoran dan pecah diantisipasi	0	0.75	0.25	0.75	0.2	0.05
15 – 20	E	Kerusakan besar Kebocoran dan pecah diperkirakan terjadi	0	0.25	0.75	0.25	0.5	0.25
> 20	E	Pecah	0	0.1	0.9	0.1	0.2	0.7

Dimana:

- Kerusakan ringan (D1): Kerusakan tidak memerlukan perbaikan dan tidak ada kebocoran hidrokarbon
- Kerusakan sedang (D2): Kerusakan memerlukan perbaikan namun tidak menyebabkan kebocoran hidrokarbon
- Kerusakan berat (D3): Kerusakan yang menyebabkan kebocoran
- Tidak ada kebocoran (R0): tidak terjadi kebocoran
- Kebocoran kecil (R1): kebocoran dari lubang kecil ke menengah di dinding pipa (diameter  $\leq 80$  mm). Pipa dapat melepaskan sejumlah kecil konten sampai terdeteksi baik dengan penurunan tekanan atau secara visual.
- Kebocoran besar (R2): Kebocoran dari pipa yang pecah. Pecah penuh akan menyebabkan pelepasan total volume pipa dan akan berlanjut sampai pipa terisolasi.

### 3.7.2. Analisa Konsekuensi Akibat dari Terseret Jangkar

Kemungkinan pipa terseret jangkar berasal dari AHTS yang sedang melakukan operasi pemasangan single point mooring (SPM). Selain itu, kemungkinan pipa terseret jangkar terjadi akibat dari keadaan darurat *tug boat* dan *shuttle tanker*. Gaya seret dari jangkar tersebut tergantung dari gaya



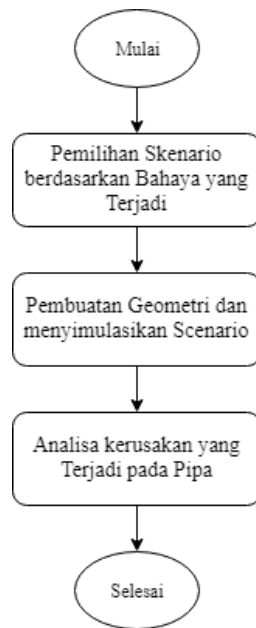
dorong (thrust) yang dihasilkan oleh kapal dimana seretan jangkar tersebut akan menyalurkan energi kinetis kepada pipa bawah laut (Hvam et al., 1990).

### **3.7.3. Analisa Konsekuensi Akibat dari Kapal Tenggelam**

Kapal tenggelam merupakan salah satu bahaya yang juga harus diperhitungkan mengingat jalur pipa bawah laut merupakan aset yang penting. Kemungkinan kapal tenggelam pada studi kasus ini berasal dari AHTS, tug boat, storage tanker, dan shuttle tanker. Dimana tenggelamnya kapal yang mengakibatkan kerusakan pada pipa merupakan sistem yang kompleks dan melibatkan sejumlah variabel tertentu yang terkait dengan lambung kapal, pipa bawah laut dan interaksi pada dasar laut (Artana et al., 2016; Pratiwi et al., 2019). Oleh karena itu, untuk penilaian risiko akibat dari tenggelamnya kapal, model disederhanakan, dimana kapal dianggap tenggelam secara lambat dengan posisi horizontal. Asumsi lainnya adalah masa jenis pada plat baja kapal adalah  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Deadweight tonnage (DWT) kapal digunakan pada kalkulasi dan estimasi dari berat tercelup air. selain itu, kapal yang tenggelam diasumsikan tidak ada udara yang terjebak didalamnya.

## **3.8 Kajian pada Struktur Pipa**

Pada tahap ini, kajian dilakukan terhadap struktur pipa akibat dari kecelakaan/kejadian yang terjadi. *Finite element method (FEM)* digunakan sebagai metode untuk menyimulasikan skenario yang telah dibuat. *FEM* adalah metode numerik untuk memecahkan masalah teknik dan fisika matematika seperti analisis struktural, perpindahan panas, aliran fluida, transportasi massa, dan potensi elektromagnetik. Pada penelitian ini *FEM* digunakan untuk memprediksikan kerusakan pada pipa akibat dari kejadian/kecelakaan yang telah di skenario. Gambar 3. 7 merupakan diagram alir pengerjaan kajian pada struktur pipa.



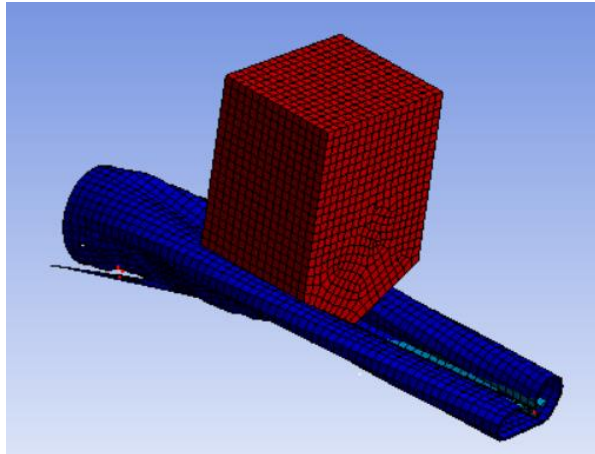
Gambar 3. 5 Diagram Alir Finite Element Method (FEM)

### 3.8.1. Pemilihan Skenario

Pada tahap ini, pemilihan skenario dilakukan berdasarkan identifikasi bahaya yang dilakukan pada sub-bab 3.5. Adapun skenario yang disimulasikan dalam tesis ini adalah kejatuhan jangkar (*dropped anchor*) dan terseret jangkar (*dragged anchor*), dan kapal tenggelam (*ship sinking*).

### 3.8.2. Pembuatan Geometri dan Simulasi

Setelah tahap pemilihan skenario selesai, selanjutnya geometri dari masing-masing skenario dibuat secara 3 dimensi pada software komputer untuk disimulasikan dengan menggunakan software FEM. Pada tahap ini diharapkan untuk mendapatkan gambaran secara visual terkait dengan kerusakan yang terjadi pada pipa bawah laut. Simulasi pipa bawah laut dengan menggunakan *software ANSYS Explicit Dynamics* untuk mengetahui seberapa besar deformasi yang diakibatkan oleh kecelakaan yang terjadi (*dropped anchor, dragged anchor, dan ship sinking*). Contoh hasil dari simulasi menggunakan *ANSYS Explicit Dynamics* dapat dilihat pada gambar 3.8.



Gambar 3. 6. Contoh Hasil Simulasi ANSYS Explicit Dynamics

### 3.8.3. Analisa Kerusakan

Setelah simulasi dilakukan, maka akan didapatkan gambaran secara visual terhadap kerusakan pipa bawah laut pada skenario yang telah dibuat. Analisa kerusakan merupakan tahap akhir pada kajian struktur pipa yang digunakan untuk validasi terhadap analisa konsekuensi pada sub bab 3.7.

### 3.9 Penilaian Risiko Menggunakan Risk Matrix

Pemetaan peluang kejadian beserta konsekuensinya ke dalam matriks risiko sesuai dengan ranking dari masing-masing peluang kejadian dan konsekuensi perlu dilakukan pada tahap penilaian risiko untuk mengevaluasi hasil pemetaan peluang kejadian dengan konsekuensi dalam matriks resiko. Pada tahap ini sebuah kejadian dapat ditentukan apakah risiko dapat diterima atau tidak. Gambar 3.9 menunjukkan matriks risiko berdasarkan standar DNVGL RP F107.

		Consequence Ranking					
		1	2	3	4	5	
		Very Low	Low	Moderate	High	Major	
Frequency Ranking	5	Frequent	Yellow	Red	Red	Red	Red
	4	Probable	Green	Yellow	Red	Red	Red
	3	Occasional	Green	Green	Yellow	Red	Red
	2	Remote	Green	Green	Green	Yellow	Red
	1	Improbable	Green	Green	Green	Green	Yellow

Acceptable  
 ALARP Region  
 Not Acceptable

Gambar 3. 7. Matriks Risiko (DNVGL, 2017a)

### **3.10 Mitigasi Risiko**

Mitigasi risiko merupakan tindakan-tindakan untuk mengurangi atau meminimalkan risiko dari suatu kejadian apabila diperlukan. Mitigasi risiko dilakukan ketika pada tahap penilaian risiko terdapat suatu kejadian yang dikategorikan tidak dapat diterima. Metode yang digunakan untuk pemilihan mitigasi risiko adalah Cost-Benefit Analysis, dimana biaya dan manfaat dari suatu mitigasi tersebut dihitung dan dibandingkan sehingga mendapatkan langkah mitigaasi yang tepat dengan biaya yang rendah dan manfaat yang tinggi. Beberapa mitigasi yang mungkin dapat dilakukan adalah lowering pipeline, memasang proteksi tambahan pada pipa, dan pemasangan buoy tambahan sebagai penanda pipa bawah laut di sekitar area pemasangan dan operasi *SPM*.

## **BAB IV**

### **PEMODELAN FREKUENSI**

Dalam penilaian risiko, analisa frekuensi dilakukan untuk mengetahui besarnya peluang kegagalan pada suatu sistem yang dapat menginisiasi terjadinya bahaya. Pada analisa frekuensi bertujuan untuk menentukan peringkat atau rangking terjadinya peristiwa pada satu tahun. Dalam pengerjaan thesis ini, standar DNVGL RP F107 digunakan sebagai acuan dalam menentukan peringkat frekuensi pada suatu peristiwa. Beberapa metode dapat digunakan untuk menganalisa frekuensi pada suatu kejadian seperti *Fault Tree Analysis*, *Event Tree Analysis*, *Bayesian Network*, Dll.

Dalam pengerjaan thesis ini, beberapa metode penilaian frekuensi dibandingkan untuk mengetahui kelebihan dan kekurangan dari masing-masing metode tersebut. Perhitungan frekuensi pada thesis ini dilakukan pada tahap instalasi dan operasi *SPM*. Perhitungan frekuensi pada tahap operasi *SPM* dibagi menjadi dua skenario, dimana skenario pertama merupakan penilaian frekuensi bahaya akibat dari kapal yang digunakan saat operasional *SPM*, sedangkan skenario kedua merupakan penilaian frekuensi terhadap lalu-lintas kapal di sekitar area *SPM*.

#### **4.1. Fault Tree Analysis (FTA)**

*Fault tree analysis (FTA)* merupakan metode yang banyak digunakan terkait fikasi risiko pada sebuah kejadian. Metode *FTA* dilakukan dengan pendekatan *Top-Down* dimana kejadian puncak (*top event*) di analisa secara rinci sebab dari puncak kejadian tersebut hingga ke dasar (*basic event*). Pemodelan frekuensi menggunakan *FTA* pada pengerjaan thesis ini menggunakan aplikasi Relex 2009 evaluation.

##### **4.1.1. Dropped Anchor**

Frekuensi dropped anchor dihitung dengan menggunakan *FTA* dari peluang tahunan kapal melewati *CADZ*, peluang kapal melewati *CADZ*, peluang kapal menjatuhkan jangkar dan peluang kapal dalam keadaan *loss of control* yang dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu: cuaca, *human performance*, kegagalan mesin, atau kegagalan sistem kemudi. *Critical Anchor*

*Dropped Zone (CADZ)* merupakan daerah kritis penurunan jangkar yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$CADZ = D + 2T + 2W + (2 \times \delta) \quad (4.1)$$

Dimana:

- D : Diameter pipa (m)
- T : Tebal lapisan pipa (m)
- W : Lebar jangkar Terbesar (m)
- $\delta$  : *Lateral deviation* (m) ( $\delta$  : Kedalaman perairan.tan  $\alpha$ )

Peluang tahunan kapal melewati *CADZ* dapat dihitung dengan membagi total waktu yang dibutuhkan kapal dibagi dengan waktu dalam satu tahun. Dalam penilaian frekuensi pada *dropped anchor*, terdapat 2 (dua) skenario dimana skenario pertama merupakan penilaian frekuensi terhadap *dropped anchor* pada kapal yang digunakan dalam proses instalasi dan operasional *SPM*. Skenario kedua merupakan penilaian frekuensi terhadap *dropped anchor* pada kapal yang beroperasi di sekitar area instalasi *SPM*. Selain itu, kecepatan kapal pada saat menjatuhkan jangkar di divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot karena pada saat menjatuhkan jangkar, kapal tersebut tidak dalam kecepatan *service*. Variasi kecepatan dilakukan untuk menganalisa probabilitas tahunan kapal melewati *CADZ*. Probabilitas tahunan kapal melewati *CADZ* dapat diketahui dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk melewati pipa dikalikan dengan perkiraan jumlah kapal yang melewati pipa dan selanjutnya dibagi dengan waktu dalam satu tahun (Artana and Dinariyana, 2013).

Gambar 4. 1 merupakan contoh hasil dari perhitungan frekuensi menggunakan aplikasi Relex 2019 Evaluation untuk kapal jenis tugboat pada kondisi operasi *SPM* dan skenario 1 dengan kecepatan 0.25 knot. Berdasarkan hasil tersebut, frekuensi memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$  sehingga berada pada peringkat 1 menurut standar DNVGL RP F107.

Dengan menggunakan cara yang sama, Tabel 4.1 merupakan rekapitulasi hasil dari perhitungan frekuensi pada saat proses instalasi *SPM*. Sedangkan

Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 merupakan hasil rekapitulasi perhitungan frekuensi dengan menggunakan metode *FTA* ketika operasi *SPM* pada skenario 1 dan 2. Berdasarkan tabel tersebut, nilai frekuensi ketika instalasi dan operasi *SPM* berada pada peringkat satu berdasarkan standar DNVGL RP F107 untuk semua jenis kapal karena memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$ .



Gambar 4. 1. Contoh Hasil FTA Dropped Anchor

Tabel 4. 1. Frekuensi Dropped Anchor Metode FTA pada Tahap Instalasi SPM

Frequency Dropped Anchor during SPM Installation						
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	8.56E-10	4.28E-10	2.85E-10	1.40E-10	7.02E-11	4.68E-11
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 2 . Frekuensi Dropped Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 1

Frequency Dropped Anchor						
Skenario	Skenario 1					
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	1.28E-09	6.42E-10	4.28E-10	7.02E-10	3.51E-10	2.34E-10
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 3. Frekuensi Dropped Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2

Frequency Dropped Anchor During SPM Operation						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Passenger			Cargo		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	3.35E-07	1.67E-07	1.12E-07	6.85E-07	3.42E-07	2.28E-07
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 3. Frekuensi Dropped Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

Frequency Dropped Anchor During SPM Operation						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Tanker			Container		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	5.39E-07	2.70E-07	1.80E-07	5.61E-07	2.80E-07	1.87E-07
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 3. Frekuensi Dropped Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

Frequency Dropped Anchor During SPM Operation			
Skenario	Skenario 2		
Type of Vessel	Tug		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75
Frequency	6.75E-08	3.37E-08	2.25E-08
Rank	1	1	1

Berdasarkan perhitungan frekuensi pada tahap instalasi maupun operasi SPM dapat diketahui bahwa semakin rendah kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya *dropped anchor* semakin besar yang dikarenakan waktu tempuh kapal pada daerah CSZ semakin lama. Sebaliknya, semakin cepat kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya *dropped anchor* semakin kecil.

#### 4.1.2. Dragged Anchor

Penilaian frekuensi terhadap *dragged anchor* dilakukan pada tahap instalasi dan operasi *SPM*. Pada saat kondisi operasi *SPM*, terdapat dua skenario dimana skenario pertama merupakan penilaian frekuensi terhadap *dragged anchor* pada kapal yang digunakan dalam proses instalasi dan operasional *SPM* dan skenario kedua merupakan penilaian frekuensi terhadap *dragged anchor* pada kapal yang beroperasi di sekitar area instalasi *SPM*. Penilaian frekuensi dilakukan berdasarkan peluang tahunan kapal melewati *CADRZ*, peluang kapal melewati *CADRZ*, peluang kapal menjatuhkan jangkar dan peluang kapal dalam keadaan *loss of control* yang dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu: cuaca, *human performance*, kegagalan mesin, atau kegagalan sistem kemudi.

Kecepatan kapal pada saat menjatuhkan jangkar divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot. Variasi kecepatan dilakukan untuk menganalisa probabilitas tahunan kapal melewati *CADRZ*. Probabilitas



tahunan kapal melewati *CADRZ* dapat diketahui dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk melewati pipa dikalikan dengan perkiraan jumlah kapal yang melewati pipa dan selanjutnya dibagi dengan waktu dalam satu tahun (Artana and Dinariyana, 2013).

*Critical Anchor Drag Zone (CADRZ)* merupakan daerah kritis dimana jangkar dapat menyeret pipa bawah laut. *CADRZ* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

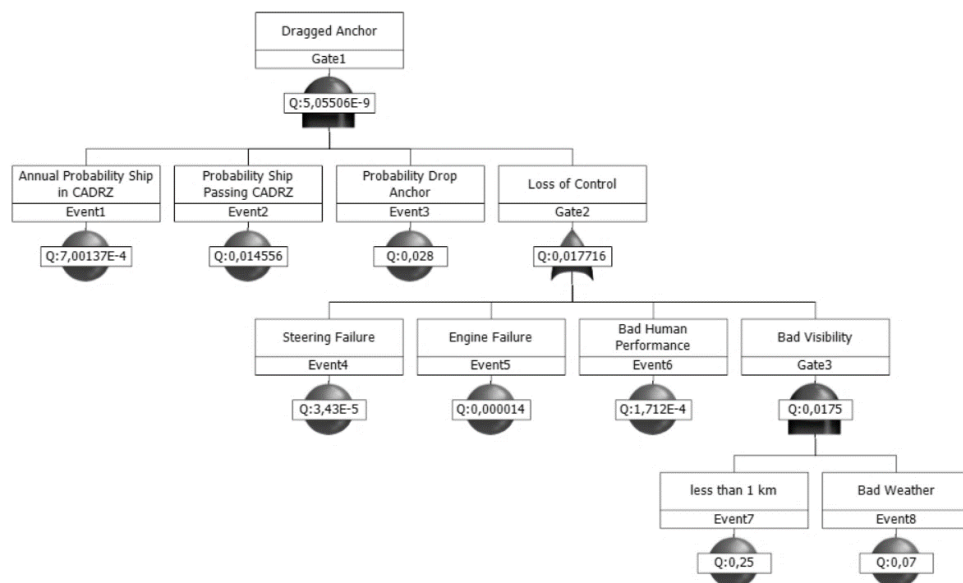
$$CADRZ = 27L + (2 \times \delta) \quad (4.2)$$

Dimana:

$L$  : Lebar jangkar Terbesar (m)

$\delta$  : *Lateral deviation* (m) ( $\delta$  : Kedalaman perairan.tan  $\alpha$ )

Peluang tahunan kapal melewati *CADRZ* dapat dihitung dengan membagi total waktu yang dibutuhkan kapal dibagi dengan waktu dalam satu tahun. Gambar 4. 2 merupakan contoh hasil dari perhitungan frekuensi menggunakan aplikasi Relex 2019 Evaluation ketika operasional SPM untuk tug boat pada skenario 1 dengan kecepatan 0.25 knot. Berdasarkan DNVGL RP F107, hasil tersebut berada pada peringkat 1 karena nilai dari frekuensi kurang dari  $10^{-5}$ .



Gambar 4. 2. Contoh Hasil FTA Dragged Anchor

Dengan menggunakan langkah yang sama, Tabel 4.4. merupakan rekapitulasi hasil perhitungan frekuensi *dragged anchor* pada tahap instalasi *SPM*. Sedangkan Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 merupakan rekapitulasi perhitungan frekuensi bahaya *dragged anchor* dengan menggunakan metode *FTA* pada saat operasi *SPM* skenario 1 dan 2. Berdasarkan kedua tabel tersebut, nilai frekuensi berada pada peringkat satu berdasarkan standar DNVGL RP F107 untuk semua jenis kapal karena memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$ . Frekuensi akibat dari *dragged anchor* cenderung memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan frekuensi akibat dari *dropped anchor*.

Berdasarkan perhitungan frekuensi pada tahap instalasi maupun operasi *SPM* dapat diketahui bahwa semakin rendah kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin besar yang dikarenakan waktu tempuh kapal pada daerah *CSZ* semakin lama. Sebaliknya, semakin cepat kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin kecil.

Tabel 4. 4. Frekuensi Dragged Anchor Metode FTA pada saat Instalasi SPM

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	3.37E-09	1.69E-09	1.12E-09	8.84E-10	4.42E-10	2.95E-10
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 5. Frekuensi Dragged Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 1

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Skenario	Skenario 1					
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	5.06E-09	2.53E-09	1.69E-09	4.42E-09	2.21E-09	1.47E-09
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 6. Frekuensi Dragged Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Passenger			Cargo		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	1.21E-06	6.07E-07	4.04E-07	4.25E-06	2.13E-06	1.42E-06
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 6. Frekuensi Dragged Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

Frequency Dragged Anchor						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Tanker			Container		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	3.39E-06	1.70E-06	1.13E-06	3.50E-06	1.75E-06	1.17E-06
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 6. Frekuensi Dragged Anchor Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

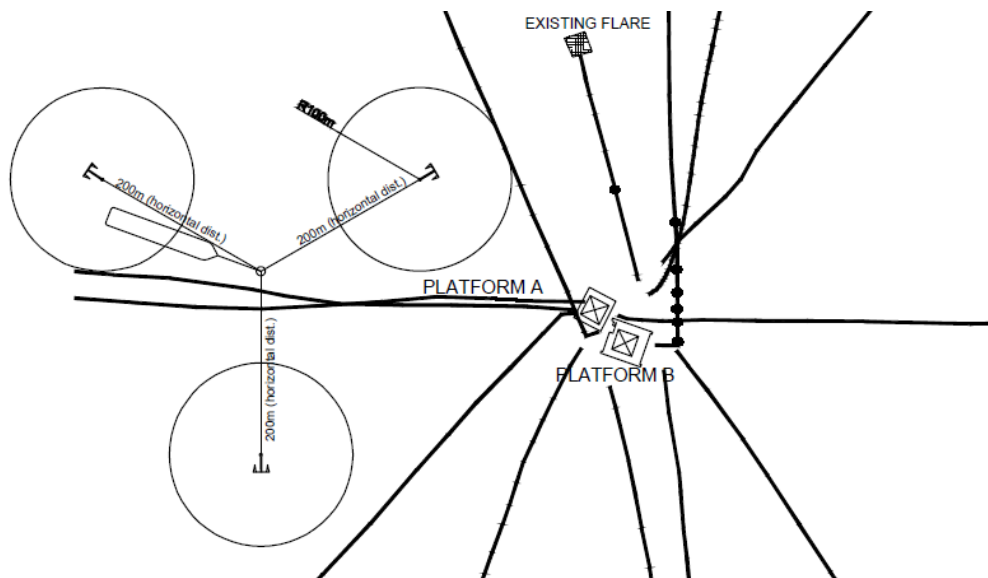
Frequency Dragged Anchor			
Skenario	Skenario 2		
Type of Vessel	Tug		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75
Frequency	2.66E-07	1.33E-07	8.86E-08
Rank	1	1	1

#### 4.1.3. Ship Sinking

Penilaian Frekuensi pada *ship sinking* hanya dilakukan pada tahap operasi *SPM* karena pada tahap instalasi tidak ada potensi tubrukan kapal dengan *storage tanker* yang menyebabkan kapal tenggelam. Perhitungan frekuensi pada tahap operasi *SPM* memiliki 2 (dua) skenario dimana skenario pertama merupakan penilaian frekuensi kapal tenggelam pada kapal *tug boat* dan *tanker* yang digunakan untuk operasional *SPM*. Sedangkan skenario dua merupakan penilaian frekuensi pada lalu lintas kapal di sekitar area *SPM* yang dikhawatirkan menyimpang dari jalur yang seharusnya, sehingga dapat menubruk *storage tanker* yang tepat berada di atas pipa bawah laut.

#### Penilaian Frekuensi pada Skenario 1

Pada skenario satu, *tug boat* dan *shuttle tanker* digunakan dalam operasi *single point mooring* dimana *storage tanker* tepat berada di atas pipa bawah laut seperti yang digambarkan pada gambar 4.3. Sehingga, potensi bahaya pada pipa bawah laut yang berada tepat dibawah *storage tanker* menjadi besar ketika terjadi tubrukan antara kapal dan *storage tanker* yang dapat mengakibatkan kapal tenggelam.



Gambar 4. 3. Layout Single Point Mooring

Penilaian frekuensi dilakukan berdasarkan peluang kapal dalam keadaan *loss of control*, peluang tahunan kapal melewati CSZ, peluang kapal menubruk storage tanker, peluang terjadinya kerusakan lambung kapal ketika terjadi tubrukan dan peluang kapal tenggelam ketika terjadi kerusakan pada lambung kapal. *Critical Sinking Zone (CSZ)* merupakan daerah kritis kapal tenggelam yang dapat mengenai pipa bawah laut. CSZ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

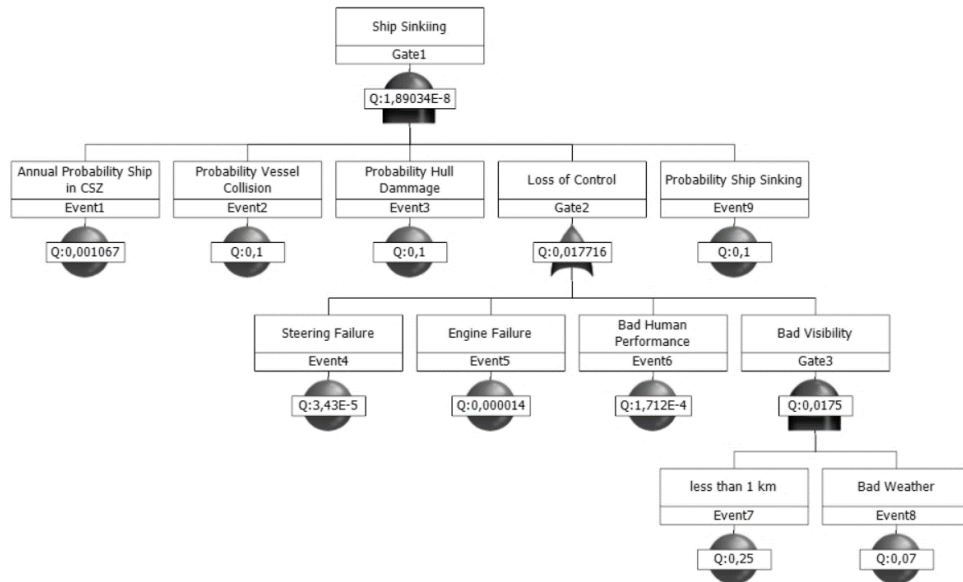
$$CSZ = D + 2T + 2L + (2 \times \delta) \quad (4.3)$$

Dimana:

- D : Diameter pipa (m)
- T : Tebal lapisan pipa (m)
- L : Panjang Kapal (m)
- $\delta$  : *Lateral deviation* (m) ( $\delta$  : Kedalaman perairan.tan  $\alpha$ )

Kecepatan kapal di divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot. Variasi kecepatan dilakukan untuk menganalisa probabilitas tahunan kapal melewati CSZ. Probabilitas tahunan kapal melewati CSZ dapat diketahui dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk melewati pipa dikalikan dengan perkiraan jumlah kapal yang melewati pipa dan selanjutnya dibagi dengan waktu dalam satu tahun (Artana and Dinariyana, 2013).

Gambar 4.4 merupakan contoh hasil dari *FTA* untuk tug boat. Berdasarkan hasil dari *FTA* tersebut, peringkat frekuensi berada pada peringkat 1 menurut standar DNVGL RP F107 karena nilai dari hasil tersebut kurang dari  $10^{-5}$ .



Gambar 4. 4. Contoh Hasil FTA Ship Sinking Skenario 1

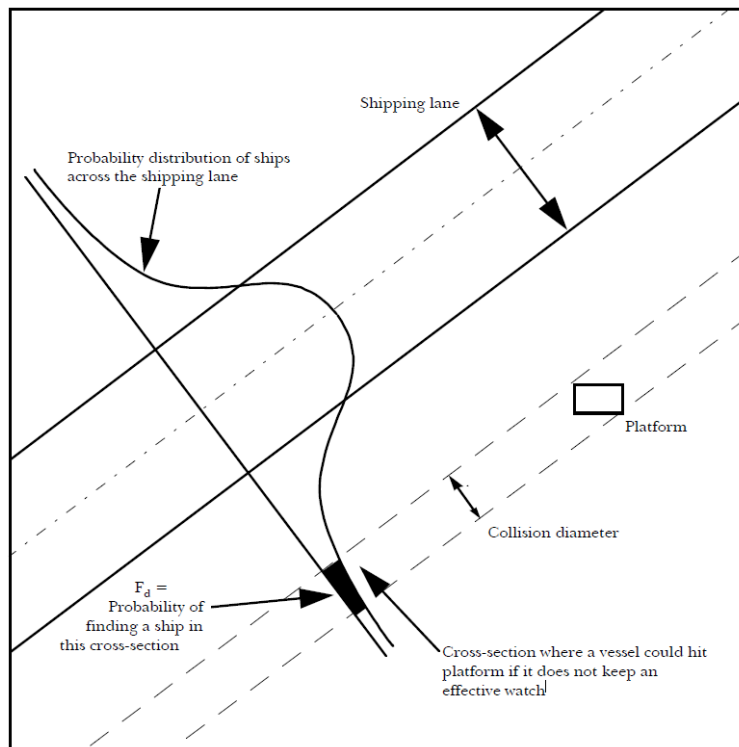
Tabel 4.7. merupakan hasil rekapitulasi perhitungan frekuensi bahaya ship sinking dengan menggunakan metode *FTA* pada tahap operasi *SPM* skenario 1. Berdasarkan tabel tersebut, semua jenis kapal memiliki frekuensi bahaya ship sinking kurang dari  $10^{-5}$  sehingga berada pada peringkat 1 menurut standar DNVGL RP F107. Selain itu, hasil dari perhitungan frekuensi menunjukkan bahwa semakin rendah kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin besar yang dikarenakan waktu tempuh kapal pada daerah CSZ semakin lama. Sebaliknya, semakin cepat kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin kecil.

Tabel 4. 7. Frekuensi Ship Sinking Metode FTA Skenario 1

Frequency Ship Sinking						
Skenario	Skenario 1					
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	1.89E-08	9.45E-09	6.30E-09	2.01E-08	1.01E-08	6.70E-09
Rank	1	1	1	1	1	1

## Penilaian Frekuensi pada Skenario 2

Pada skenario dua, lalu lintas kapal yang berada di sekitar area *SPM* dikhawatirkan menyimpang dari jalur yang seharusnya, sehingga dapat menubruk *storage tanker* yang tepat berada di atas pipa bawah laut. Pada skenario dua, sebuah parameter ditambahkan, yaitu *Ship in Cross Area* dimana *nodes* tersebut mendeskripsikan probabilitas kapal yang menyimpang dari lalu lintas pelayaran yang sebenarnya dan kapal dapat menabrak *platform* atau *storage tanker* jika tidak dalam pengawasan yang tepat (Spouge, 1999). Ilustrasi dari *cross area* tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4. 5. Cross Section Area

*Cross area* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Fd = D \times f(A) \quad (4.4)$$

Dimana:

$D$  : Collision diameter ( $D = W_A + B$ )

$W_A$  : Apparent platform width ( $W_A = L_p |\sin\theta| + W_p |\cos\theta|$ )

$L_p$  : Length of platform

- $W_p$  : Width of platform  
 $B$  : Ship beam  
 $f(A)$  : Probability density at the centre of the platform ( $f(A) = \frac{1}{2\sigma} \exp \frac{-k^2}{2}$ )  
 $A$  : distance from platform to lane centreline at closest point of approach  
 $\sigma$  : standard deviation of traffic distribution across the lane, normally 50% of  $A$  (Fikri et al., 2014)  
 $k$  :  $A/\sigma$  i.e. the number of standard deviations that the platform from the lane centreline.

Berikut ini merupakan contoh dari perhitungan untuk kapal *Tanker* pada skenario 2:

$$D = W_A + B$$

$$D = L_p |\sin \theta| + W_p |\cos \theta| + B$$

$$D = 152 |\sin 45^\circ| + 26.2 |\cos 45^\circ| + 26.2$$

$$D = 152.206 \text{ m}$$

$$f(A) = \frac{1}{2\sigma} \exp \frac{-k^2}{2}$$

$$f(A) = \frac{1}{2(6197.718)} \exp \frac{-0.5^2}{2}$$

$$f(A) = 0.0000712$$

$$Fd = D \times f(A)$$

$$Fd = 152.26 \times 0.0000712$$

$$Fd = 0.01083$$

Contoh analisa frekuensi menggunakan FTA untuk kapal jenis passenger pada skenario 2 dapat dilihat pada gambar 4.6. Berdasarkan hasil tersebut, dapat diketahui bahwa peringkat frekuensi berada pada peringkat 1 menurut standar DNVGL RP F107 karena memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$ . Tabel 4.8.

merupakan hasil rekapitulasi perhitungan frekuensi bahaya ship sinking dengan menggunakan metode *FTA* pada skenario 2.



Gambar 4. 6. Contoh Hasil FTA Ship Sinking Skenario 2

Tabel 4. 8. Frekuensi Ship Sinking Metode FTA pada Operasi SPM Skenario 2

Frequency Ship Sinking					
Skenario	Skenario 2				
Type of Vessel	Passenger	Cargo	Tanker	Container	Tug Boat
Vessel Speed	5.8	10.1	9.1	5.3	7.1
Frequency	2.40E-09	5.20E-09	4.59E-09	8.07E-09	4.81E-10
Rank	1	1	1	1	1

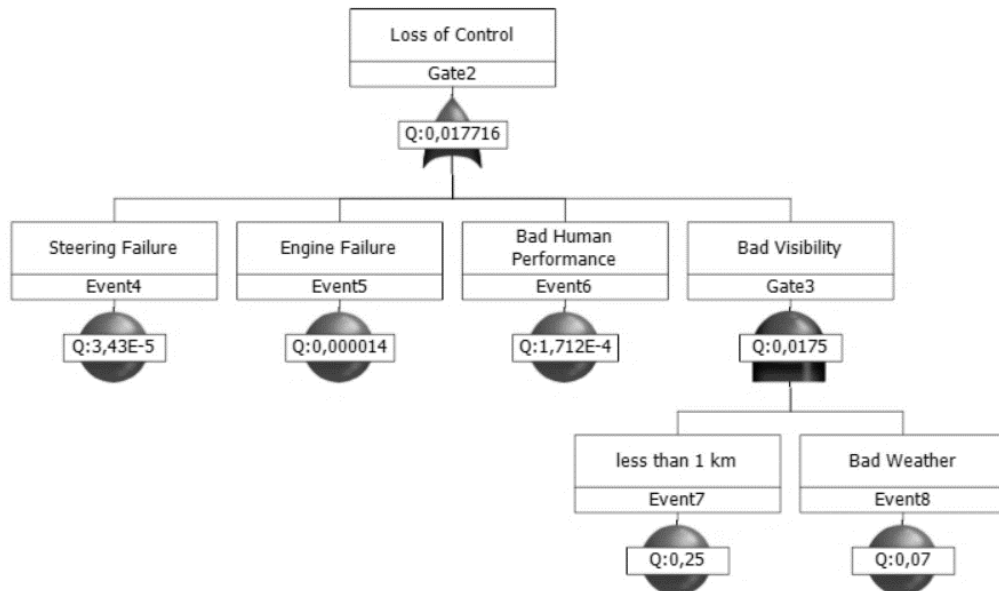
Berdasarkan tabel tersebut, semua jenis kapal memiliki frekuensi bahaya ship sinking kurang dari  $10^{-5}$  sehingga berada pada peringkat 1 menurut standar DNVGL RP F107.

#### 4.2. Event Tree Analysis (ETA)

*Event Tree analysis (ETA)* merupakan metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi atau mengidentifikasi runtutan peristiwa yang menyebabkan suatu kejadian yang mengakibatkan sistem gagal maupun sukses. Peluang dari suatu kejadian pada *ETA* merupakan perkalian dari setiap urutan peristiwa, sehingga apabila salah satu peristiwa dalam urutan itu tidak terjadi, maka tidak akan ada bahaya yang terjadi. Metode *ETA* hanya dapat memiliki satu initial event, sehingga *event loss of control* dianalisa dengan menggunakan metode *FTA*. Gambar 4. 7



merupakan hasil perhitungan probabilitas untuk *event loss of control* dengan menggunakan metode *FTA*. Berikut ini merupakan perhitungan frekuensi dengan menggunakan metode *ETA* pada bahaya *dropped anchor*, *dragged anchor*, dan *ship sinking* pada pipa bawah laut.

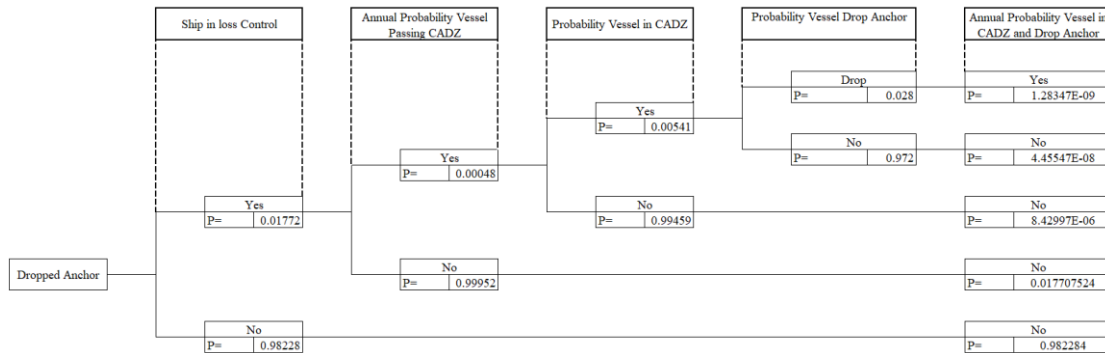


Gambar 4. 7. Perhitungan FTA event “Loss of Control”

#### 4.2.1. Dropped Anchor

Sama seperti metode *FTA*, analisa frekuensi bahaya dengan menggunakan metode *ETA* menggunakan konsep joint probability antara peluang kapal dalam keadaan loss control, peluang tahunan kapal melewati *CADZ*, peluang kapal berada di *CADZ*, dan peluang kapal menjatuhkan jangkar. Pada analisa frekuensi bahaya *dropped anchor* dilakukan pada tahap instalasi dan operasi *SPM*. Pada tahap operasi *SPM* terdapat 2 (dua) skenario dimana skenario pertama merupakan penilaian frekuensi terhadap *dropped anchor* pada kapal yang digunakan dalam operasional *SPM*. Skenario kedua merupakan penilaian frekuensi terhadap *dropped anchor* pada kapal yang beroperasi di sekitar area instalasi *SPM*. Selain itu, kecepatan kapal pada saat menjatuhkan jangkar di divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot karena pada saat menjatuhkan jangkar, kapal tersebut tidak dalam kecepatan *service*. Variasi kecepatan dilakukan untuk menganalisa probabilitas tahunan kapal melewati *CADZ*. Probabilitas tahunan kapal melewati *CADZ* dapat diketahui dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk melewati pipa dikalikan

dengan perkiraan jumlah kapal yang melewati pipa dan selanjutnya dibagi dengan waktu dalam satu tahun (Artana and Dinariyana, 2013). Gambar 4.8 merupakan hasil analisa dengan menggunakan metode *ETA* pada bahaya *dropped anchor* untuk *tug boat* pada tahap operasi *SPM* skenario satu kecepatan 0.25 knot.



Gambar 4. 8. Contoh Hasil *ETA Dropped Anchor*

Berdasarkan hasil dengan menggunakan metode *ETA*, dapat dilihat bahwa nilai frekuensi kurang dari  $10^{-5}$  sehingga berada pada peringkat 1 menurut standar DNVGL RP F107. Dengan menggunakan langkah yang sama, tabel 4.9 merupakan rekapitulasi dari perhitungan frekuensi *dropped anchor* pada tahap instalasi *SPM*. Sedangkan Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 merupakan hasil perhitungan frekuensi *dropped anchor* dengan menggunakan metode *ETA* pada tahap operasi *SPM* skenario satu dan dua.

Berdasarkan perhitungan frekuensi, semua jenis kapal baik pada tahap instalasi dan operasional *SPM* skenario satu ataupun dua memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa semua jenis kapal berada pada peringkat 1 sesuai dengan standar DNVGL RP F107. Selain itu, hasil dari perhitungan frekuensi pada tahap instalasi maupun operasi *SPM* dapat diketahui bahwa semakin rendah kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya *dropped anchor* semakin besar yang dikarenakan waktu tempuh kapal pada daerah *CSZ* semakin lama. Sebaliknya, semakin cepat kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya *dropped anchor* semakin kecil.

Tabel 4. 9. Frekuensi Dropped Anchor Metode ETA Tahap Instalasi SPM

<b>Frequency Dropped Anchor during SPM Installation</b>						
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	8.56E-10	4.28E-10	2.85E-10	1.40E-10	7.02E-11	4.68E-11
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 10. Frekuensi Dropped Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 1

<b>Frequency Dropped Anchor</b>						
Skenario	Skenario 1					
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	1.28E-09	6.42E-10	4.28E-10	7.02E-10	3.51E-10	2.34E-10
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 11. Frekuensi Dropped Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2

<b>Frequency Dropped Anchor During SPM Operation</b>						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Passenger			Cargo		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	3.35E-07	1.67E-07	1.12E-07	6.85E-07	3.42E-07	2.28E-07
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 11. Frekuensi Dropped Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

<b>Frequency Dropped Anchor During SPM Operation</b>						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Tanker			Container		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	5.39E-07	2.70E-07	1.80E-07	5.61E-07	2.80E-07	1.87E-07
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 11. Frekuensi Dropped Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

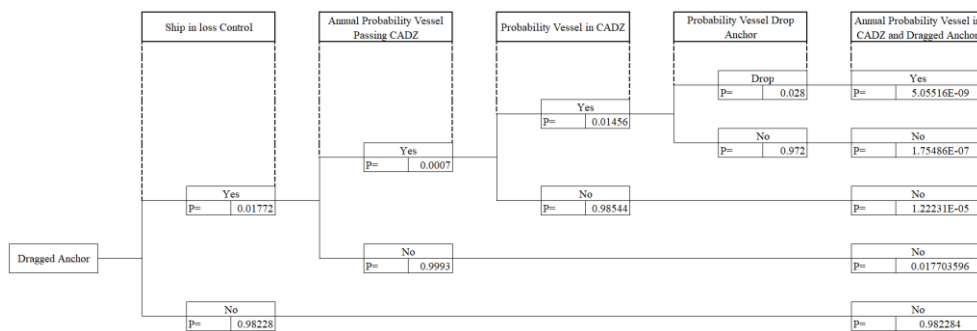
<b>Frequency Dropped Anchor During SPM Operation</b>			
Skenario	Skenario 2		
Type of Vessel	Tug		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75
Frequency	6.75E-08	3.37E-08	2.25E-08
Rank	1	1	1

#### 4.2.2. Dragged Anchor

Penilaian frekuensi pada bahaya dragged anchor menggunakan metode ETA dilakukan pada tahap instalasi dan operasi *SPM*. Dimana pada tahap operasi *SPM* memiliki dua skenario, skenario pertama merupakan penilaian frekuensi terhadap *dragged anchor* pada kapal yang digunakan dalam proses instalasi dan operasional *SPM* dan skenario kedua merupakan penilaian frekuensi terhadap dragged anchor pada kapal yang beroperasi di sekitar area

instalasi *SPM*. Selain itu, kecepatan kapal pada saat menjatuhkan jangkar di divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot. Variasi kecepatan dilakukan untuk menganalisa probabilitas tahunan kapal melewati *CADRZ*. Probabilitas tahunan kapal melewati *CADRZ* dapat diketahui dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk melewati pipa dikalikan dengan perkiraan jumlah kapal yang melewati pipa dan selanjutnya dibagi dengan waktu dalam satu tahun (Artana and Dinariyana, 2013).

Penilaian frekuensi dilakukan berdasarkan peluang tahunan kapal melewati *CADRZ*, peluang kapal berada di *CADRZ*, peluang kapal menjatuhkan jangkar dan peluang kapal dalam keadaan *loss of control* yang dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu: cuaca, *human performance*, kegagalan mesin, atau kegagalan sistem kemudi. Gambar 4. 9 merupakan contoh hasil analisa dan perhitungan frekuensi untuk tug boat pada operasi *SPM* skenario 1 dengan kecepatan 0.25 knot. Berdasarkan perhitungan tersebut, peringkat frekuensi berdasarkan pada standar DNVGL RP F107 berada pada peringkat 1 karena memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$ .



Gambar 4. 9. Contoh Hasil ETA Drugged Anchor

Dengan menggunakan langkah yang sama, Tabel 4.12 merupakan rekapitulasi frekuensi pada tahap instalasi *SPM*. Sedangkan Tabel 4.13 dan Tabel 4.14 merupakan hasil perhitungan frekuensi bahaya *dragged anchor* dengan menggunakan metode *ETA* pada tahap operasi *SPM* skenario 1 dan 2. Berdasarkan tabel tersebut, nilai frekuensi berada pada peringkat satu berdasarkan standar DNVGL RP F107 untuk semua jenis kapal baik pada tahap instalasi dan operasi *SPM* karena memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$ .

Tabel 4. 12. Frekuensi Dragged Anchor Metode ETA pada saat Instalasi SPM

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	3.37E-09	1.69E-09	1.12E-09	8.84E-10	4.42E-10	2.95E-10
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 13. Frekuensi Dragged Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 1

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Skenario	Skenario 1					
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	5.06E-09	2.53E-09	1.69E-09	4.42E-09	2.21E-09	1.47E-09
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 14. Frekuensi Dragged Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Passenger			Cargo		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	1.21E-06	6.07E-07	4.04E-07	4.25E-06	2.13E-06	1.42E-06
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 14. Frekuensi Dragged Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Tanker			Container		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	3.39E-06	1.70E-06	1.13E-06	3.50E-06	1.75E-06	1.17E-06
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 14. Frekuensi Dragged Anchor Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

<b>Frequency Dragged Anchor</b>			
Skenario	Skenario 2		
Type of Vessel	Tug		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75
Frequency	2.66E-07	1.33E-07	8.86E-08
Rank	1	1	1

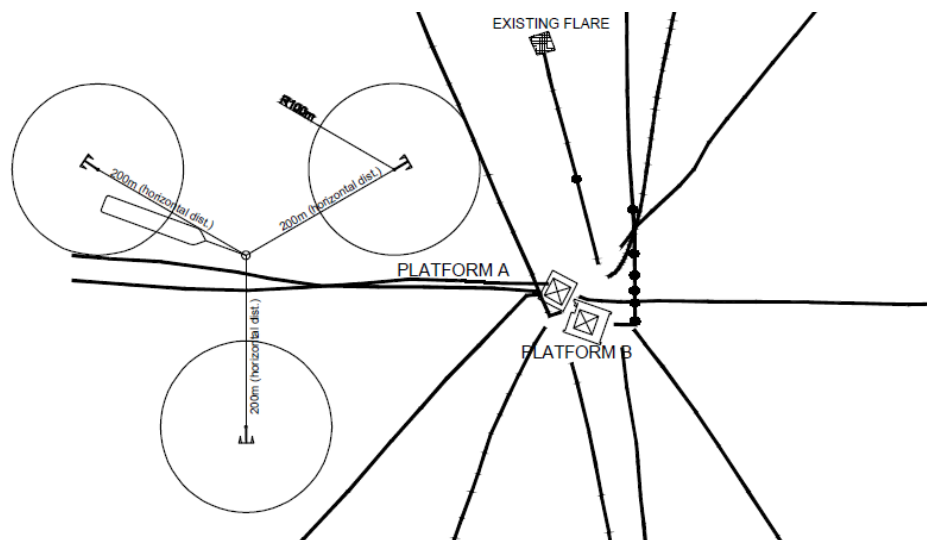
Berdasarkan perhitungan frekuensi pada tahap instalasi maupun operasi SPM dapat diketahui bahwa semakin rendah kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin besar yang dikarenakan waktu tempuh kapal pada daerah CSZ semakin lama. Sebaliknya, semakin cepat kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin kecil.

### 4.2.3. Ship Sinking

Penilaian Frekuensi pada *ship sinking* hanya dilakukan pada tahap operasi SPM karena pada saat tahap instalasi SPM tidak ada potensi tubrukan kapal dengan storage tanker yang dapat menyebabkan kapal tenggelam. Tahap operasi SPM memiliki 2 (dua) skenario dimana skenario pertama merupakan penilaian frekuensi kapal tenggelam pada kapal tug boat dan tanker yang digunakan untuk operasional SPM. Sedangkan skenario dua merupakan penilaian frekuensi pada lalu lintas kapal yang berada di sekitar area SPM dikhawatirkan menyimpang dari jalur yang seharusnya, sehingga dapat menubruk *storage tanker* yang tepat berada di atas pipa bawah laut.

#### Penilaian Frekuensi pada Skenario 1

Pada skenario satu, *tug boat* dan *shuttle tanker* digunakan dalam operasi *single point mooring* dimana *storage tanker* tepat berada di atas pipa bawah laut seperti yang digambarkan pada gambar 4.10. Sehingga, potensi bahaya pada pipa bawah laut yang berada tepat dibawah *storage tanker* menjadi besar ketika terjadi tubrukan antara kapal dan *storage tanker* yang dapat mengakibatkan kapal tenggelam.

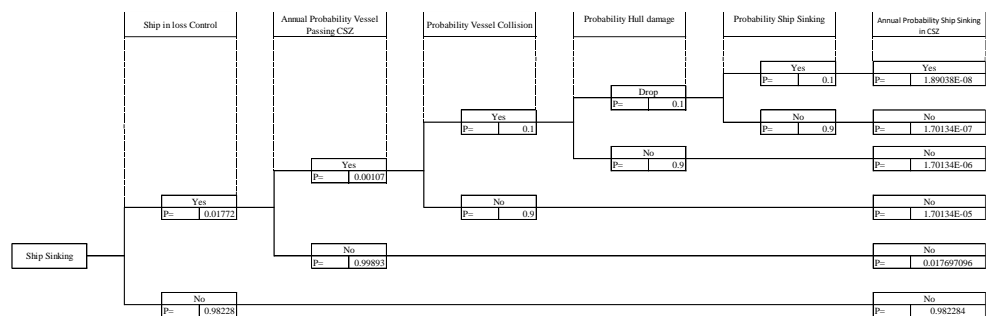


Gambar 4. 10. Layout Single Point Mooring

Penilaian frekuensi dilakukan berdasarkan peluang kapal dalam keadaan *loss of control*, peluang tahunan kapal melewati CSZ, peluang kapal menubruk

storage tanker, peluang terjadinya kerusakan lambung kapal ketika terjadi tubrukan dan peluang kapal tenggelam ketika terjadi kerusakan pada lambung kapal. Kecepatan kapal di divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot. Variasi kecepatan dilakukan untuk menganalisa probabilitas tahunan kapal melewati CSZ. Probabilitas tahunan kapal melewati CSZ dapat diketahui dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk melewati pipa dikalikan dengan perkiraan jumlah kapal yang melewati pipa dan selanjutnya dibagi dengan waktu dalam satu tahun (Artana and Dinariyana, 2013).

Gambar 4.11 merupakan contoh hasil dari ETA untuk tug boat. Berdasarkan hasil dari ETA tersebut, peringkat frekuensi berada pada peringkat 1 menurut standar DNV RP F107 karena nilai dari hasil tersebut kurang dari  $10^{-5}$ .



Gambar 4. 11. Contoh Hasil ETA Ship Sinking Skenario 1

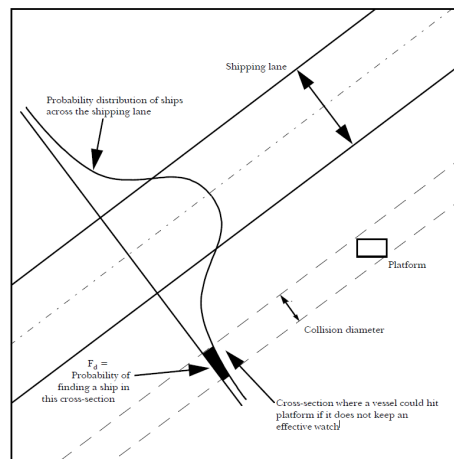
Dengan menggunakan metode yang sama, tabel 4.15 merupakan rangkuman hasil dari frekuensi pada ship sinking skenario 1. Berdasarkan hasil tersebut, semua jenis kapal berada pada peringkat 1 berdasarkan standar DNVGL RP F107 karena memiliki frekuensi kurang dari  $10^{-5}$ . Selain itu, hasil dari perhitungan frekuensi menunjukkan bahwa semakin rendah kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin besar yang dikarenakan waktu tempuh kapal pada daerah CSZ semakin lama. Sebaliknya, semakin cepat kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin kecil.

Tabel 4. 15. Frekuensi Ship Sinking Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 1

Frequency Ship Sinking						
Skenario	Skenario 1					
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	1.89E-08	9.45E-09	6.30E-09	2.01E-08	1.01E-08	6.70E-09
Rank	1	1	1	1	1	1

### Penilaian Frekuensi pada Skenario 2

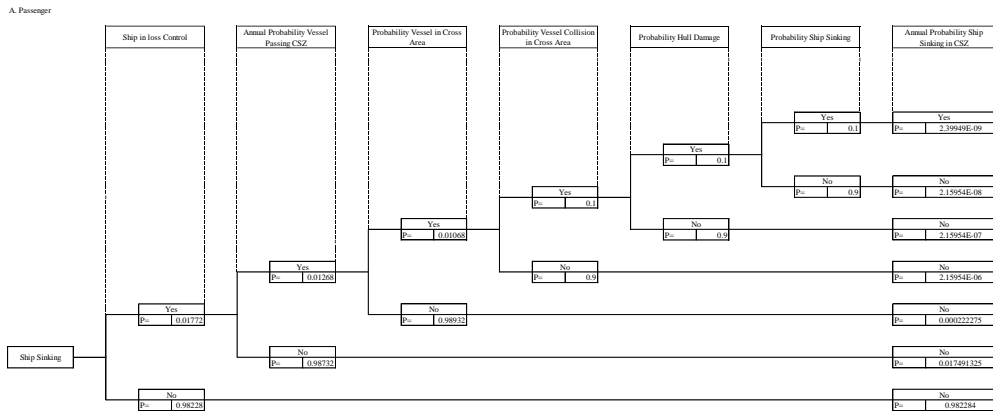
Pada skenario dua, lalu lintas kapal yang berada di sekitar area *SPM* dikhawatirkan menyimpang dari jalur yang seharusnya, sehingga dapat menubruk *storage tanker* yang tepat berada di atas pipa bawah laut. Pada skenario dua, sebuah parameter ditambahkan, yaitu *Ship in Cross Area* dimana *nodes* tersebut mendeskripsikan probabilitas kapal yang menyimpang dari lalu-lintas pelayaran yang sebenarnya dan kapal dapat menabrak *platform* atau *storage tanker* jika tidak dalam pengawasan yang tepat (Spouge, 1999). Ilustrasi dari *cross area* tersebut dapat dilihat pada gambar 4.12. Peluang kapal berada di *cross area* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4.4.



Gambar 4. 12. Cross Section Area

Contoh analisa frekuensi menggunakan ETA untuk kapal jenis passenger pada skenario 2 dapat dilihat pada gambar 4.13. Berdasarkan hasil tersebut, dapat diketahui bahwa peringkat frekuensi berada pada peringkat 1 menurut standar DNVGL RP F107 karena memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$ .





Gambar 4. 13. Contoh Hasil ETA Ship Sinking Skenario 2

Dengan menggunakan langkah yang sama, tabel 4.16 merupakan rangkuman hasil dari frekuensi pada ship sinking skenario 2. Berdasarkan hasil tersebut, semua jenis kapal berada pada peringkat 1 berdasarkan standar DNVGL RP F107 karena memiliki frekuensi kurang dari  $10^{-5}$ .

Tabel 4. 16. Frekuensi Ship Sinking Metode ETA pada Operasi SPM Skenario 2

Frequency Ship Sinking					
Skenario	Skenario 2				
Type of Vessel	Passenger	Cargo	Tanker	Container	Tug Boat
Vessel Speed	5.8	10.1	9.1	5.3	7.1
Frequency	2.40E-09	5.20E-09	4.59E-09	8.07E-09	4.81E-10
Rank	1	1	1	1	1

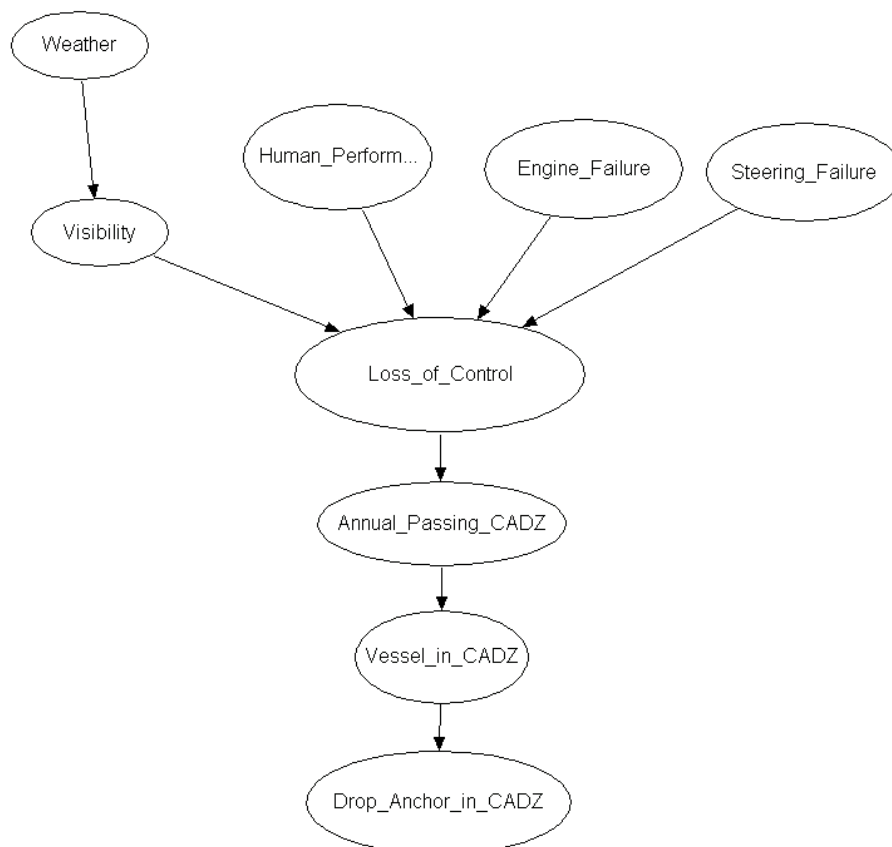
### 4.3. Bayesian Network

#### 4.3.1. Penilaian Frekuensi Dropped Anchor

Penilaian Frekuensi pada dropped anchor dilakukan berdasarkan kemungkinan kapal menjatuhkan jangkar pada *Critical Anchor Damage Zone (CADZ)*, pada saat kapal melintasi *CADZ*, frekuensi tahunan kapal melewati *CADZ*, dan dalam keadaan *loss of control* yang dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu: cuaca, *human performance*, kegagalan mesin, atau kegagalan sistem kemudi. Penilaian frekuensi pada *dropped anchor* dilakukan pada tahap Instalasi dan Operasi *SPM*. Pada tahap operasi *SPM* terdapat 2 (dua) skenario dimana skenario pertama merupakan penilaian frekuensi terhadap *dropped anchor* pada kapal yang digunakan dalam proses operasional *SPM*. Skenario kedua merupakan penilaian frekuensi terhadap *dropped anchor* pada kapal yang beroperasi di sekitar area instalasi *SPM*. Selain itu, kecepatan kapal pada saat

menjatuhkan jangkar di divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot karena pada saat menjatuhkan jangkar, kapal tersebut tidak dalam kecepatan *service*.

Langkah pertama dalam penilaian frekuensi menggunakan metode *Bayesian Network (BN)* adalah menyusun struktur *BN* dari suatu hal yang dapat menyebabkan terjatuhnya jangkar (*dropped anchor*). Struktur *BN* pada thesis ini mengadopsi struktur *BN* pada penelitian yang dilakukan oleh DNVGL (2003), Mulyadi et al., (2013), dan Sulaiman and Tan (2014). Struktur *BN* untuk *dropped anchor* dapat dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4. 14. Struktur Bayesian Network untuk Dropped Anchor

Langkah kedua adalah menentukan probabilitas pada masing-masing node, berikut ini merupakan penjelasan pada masing-masing nodes beserta probabilitas nodes tersebut.

## 1. Weather

*Node* tersebut mendeskripsikan kondisi cuaca di sekitar daerah instalasi dan operasi *single point mooring*. Pernyataan dalam *node* “*Weather*” adalah sebagai berikut:

- *Good Weather* (tidak terjadi badai/hujan deras dan memiliki jarak pandang yang baik)
- *Bad Weather/Heavy Rain* (terjadi hujan deras yang secara signifikan mengurangi jarak pandang)

Berdasarkan data historis dari badan meteorologi, klimatologi, dan geofisika Tanjung Perak, probabilitas *bad weather/heavy rain* adalah 0.07 dan probabilitas *good weather* adalah 0.93 (Mulyadi et al., 2013).

## 2. Visibility

*Visibility* mendeskripsikan jarak pandang kapal di sekitar daerah instalasi dan operasi *SPM* yang dipengaruhi oleh cuaca. Menurut DNVGL, (2003) cuaca yang bagus memiliki jarak pandang lebih dari 1nm, sedangkan ketika cuaca buruk mengakibatkan penurunan jarak pandang sebesar 25%. Oleh karena itu, pernyataan dalam *node* “*Visibility*” adalah:

- < 1 nm
- > 1 nm

## 3. Human Performance

Human performance mendeskripsikan faktor kinerja manusia terhadap kecelakaan kapal. Studi terkait dengan kinerja manusia dalam kecelakaan kapal di sekitar pelabuhan Tanjung Perak Surabaya telah dilakukan oleh (Harahap and Rosyid, 2010). Berdasarkan studi tersebut, probabilitas manusia memiliki kinerja yang buruk adalah 1.712E-4 dan probabilitas manusia yang memiliki kinerja bagus adalah 0.9998288. Oleh karena itu, *node* human performance dinyatakan dalam:

- Good Human Performance
- Bad Human Performance.

#### 4. Engine Failure

Engine Failure mendeskripsikan kondisi probabilitas kerusakan pada mesin. Berdasarkan (DNVGL, 2017a) probabilitas kegagalan mesin pada supply vessel atau kapal dengan lebih dari satu mesin adalah  $1.4E-5$ . Node engine failure dinyatakan dalam:

- Engine Failure
- No Engine Failure

#### 5. Steering Failure

Node steering failure mendeskripsikan keandalan pada sistem kemudi. Berdasarkan data historis, probabilitas kegagalan sistem kemudi disestimasi sebesar  $3.43E-5$  dan probabilitas sistem kemudi berfungsi dengan baik adalah  $0.9999657$  (Mulyadi et al., 2014). Node steering failure dinyatakan dalam:

- Steering Failure
- No Steering Failure

#### 6. Loss of Control

Node loss of control mendeskripsikan probabilitas kapal kehilangan kontrol dikarenakan kegagalan mesin, kegagalan sistem kemudi, human factor, atau keadaan cuaca. Pernyataan dalam node loss of control adalah:

- Loss of Control
- No Loss of Control

Node ini hanya memiliki nilai probabilitas logis yaitu 1 dan 0. Misalnya ketika jarak pandang baik, tidak terjadi kegagalan pada mesin, tidak terjadi kegagalan sistem kendali, dan pekerja memiliki performa yang bagus maka nilai dari loss of control adalah 0.

## 7. Annual Ship Passing CADZ

Annual Ship Passing CADZ mendeskripsikan probabilitas tahunan kapal melewati *Critical Anchor Damage Zone (CADZ)*. Pernyataan dalam node “Annual Ship Passing CADZ” adalah:

- Annual Passing CADZ
- No

Kecepatan kapal pada saat menjatuhkan jangkar di divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot karena pada saat menjatuhkan jangkar, kapal tersebut tidak dalam kecepatan *service*. Probabilitas tahunan kapal melewati CADZ dapat diketahui dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk melewati pipa dikalikan dengan perkiraan jumlah kapal yang melewati pipa dan selanjutnya dibagi dengan waktu dalam satu tahun (Artana and Dinariyana, 2013). Tabel 4.17 merupakan contoh perhitungan probabilitas tahunan kapal melewati CADZ untuk tipe kapal Tugs pada skenario 1 atau pada saat proses instalasi dan operasi *Single Point Mooring*.

## 8. Ship in CADZ

Passing CADZ mendeskripsikan probabilitas kapal berada di *Critical Anchor Damage Zone (CADZ)*. Pernyataan dalam node “Passing CADZ” adalah:

- Passing CADZ
- No Passing CADZ

Nilai dari ZADZ adalah:

$$CADZ = D + 2T + 2W + (2 \times Lateral\ Deviaton)$$

Dimana:

D : Diameter pipa (m)

T : Tebal lapisan pipa (m)

W : Lebar jangkar Terbesar (m)

Probabilitas kapal berada di CADZ diperoleh dengan mencari rasio lebar CADZ dan perkiraan lebar alur pelayaran. Perhitungan probabilitas

kapal melewati CADZ untuk tipe kapal Tugs pada tahap operasi *SPM* skenario 1 dapat dilihat pada lampiran 1.

## 9. Dropped Anchor in CADZ

Node drop anchor in CADZ mendeskripsikan probabilitas kapal menjatuhkan jangkar di CADZ. Berdasarkan data historis, probabilitas kapal menjatuhkan jangkar setelah kehilangan kontrol adalah 0.028 (Mulyadi et al., 2013). Pernyataan dalam node drop anchor adalah:

- Drop Anchor
- No Drop Anchor

Dari nodes dan probabilitas yang telah ditentukan dan dibuat pada software Hugin Expert, Tabel 4.17 merupakan rekapitulasi nilai dari frekuensi beserta dengan peringkatnya pada tahap instalasi *SPM*. Sedangkan Tabel 4.18 dan Tabel 4.19 merupakan rekapitulasi perhitungan frekuensi pada tahap operasi *SPM* skenario 1 (satu) dan skenario 2 (dua).

Tabel 4. 17. Frekuensi Dropped Anchor Metode BN Tahap Instalasi *SPM*

<b>Frequency Dropped Anchor during SPM Installation</b>						
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	8.56E-10	4.28E-10	2.85E-10	1.40E-10	7.02E-11	4.68E-11
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 18. Frekuensi Dropped Anchor Metode BN pada Operasi *SPM* Skenario 1

<b>Frequency Dropped Anchor</b>						
Skenario	Skenario 1					
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	1.28E-09	6.42E-10	4.28E-10	7.02E-10	3.51E-10	2.34E-10
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 19. Frekuensi Dropped Anchor Metode BN pada Operasi *SPM* Skenario 2

<b>Frequency Dropped Anchor During SPM Operation</b>						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Passenger			Cargo		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	3.35E-07	1.67E-07	1.12E-07	6.85E-07	3.42E-07	2.28E-07
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 19. Frekuensi Dropped Anchor Metode BN pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

<b>Frequency Dropped Anchor During SPM Operation</b>						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Tanker			Container		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	5.39E-07	2.70E-07	1.80E-07	5.61E-07	2.80E-07	1.87E-07
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 19. Frekuensi Dropped Anchor Metode BN pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

<b>Frequency Dropped Anchor During SPM Operation</b>			
Skenario	Skenario 2		
Type of Vessel	Tug		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75
Frequency	6.75E-08	3.37E-08	2.25E-08
Rank	1	1	1

Berdasarkan Tabel diatas, dapat disimpulkan bahwa peringkat frekuensi *dropped anchor* pada masing-masing jenis kapal berada pada ranking 1 atau memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$  sesuai dengan Standar DNVGL RP F107. Selain itu, berdasarkan perhitungan frekuensi pada tahap instalasi maupun operasi SPM dapat diketahui bahwa semakin rendah kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya *dropped anchor* semakin besar yang dikarenakan waktu tempuh kapal pada daerah CSZ semakin lama. Sebaliknya, semakin cepat kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya *dropped anchor* semakin kecil.

#### 4.3.2. Penilaian Frekuensi Dragged Anchor

Penilaian frekuensi terhadap *dragged anchor* dilakukan pada tahap instalasi dan operasi SPM, pada tahap operasi SPM terdapat dua skenario dimana skenario pertama merupakan penilaian frekuensi terhadap *dragged anchor* pada kapal yang digunakan dalam proses operasional SPM dan skenario kedua merupakan penilaian frekuensi terhadap *dragged anchor* pada kapal yang beroperasi di sekitar area instalasi SPM. Penilaian frekuensi dilakukan berdasarkan kemungkinan kapal menjatuhkan jangkar pada *Critical Anchor Drag Zone (CADRZ)*, kemungkinan kapal melintasi *CADRZ*, frekuensi tahunan kapal melewati *CADRZ*, dan dalam keadaan *loss of control* yang dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu: cuaca, *human performance*, kegagalan mesin, dan kegagalan sistem kemudi. Selain itu, kecepatan kapal divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot.

Langkah pertama dalam penilaian frekuensi menggunakan metode *Bayesian Network (BN)* adalah menyusun struktur *BN* dari suatu hal yang dapat menyebabkan *dragged anchor*. Struktur *BN* pada pengerjaan thesis ini mengadopsi struktur *BN* pada penelitian yang dilakukan oleh DNVGL (2003), Mulyadi et al., (2013), dan Sulaiman and Tan (2014). Struktur *BN* untuk *dragged anchor* dapat dilihat pada gambar 4.15.

Langkah selanjutnya adalah menentukan probabilitas pada masing-masing nodes yang telah dibuat pada *software Hugin Expert*. Berikut ini merupakan penjelasan pada masing-masing nodes beserta dengan probabilitas dari nodes tersebut.

#### 1. Weather

*Node* tersebut mendeskripsikan kondisi cuaca di sekitar daerah instalasi dan operasi *single point mooring*. Pernyataan dalam *node* “*Weather*” adalah sebagai berikut:

- *Good Weather* (tidak terjadi badai/hujan deras dan memiliki jarak pandang yang baik)
- *Bad Weather/Heavy Rain* (terjadi hujan deras yang secara signifikan mengurangi jarak pandang)

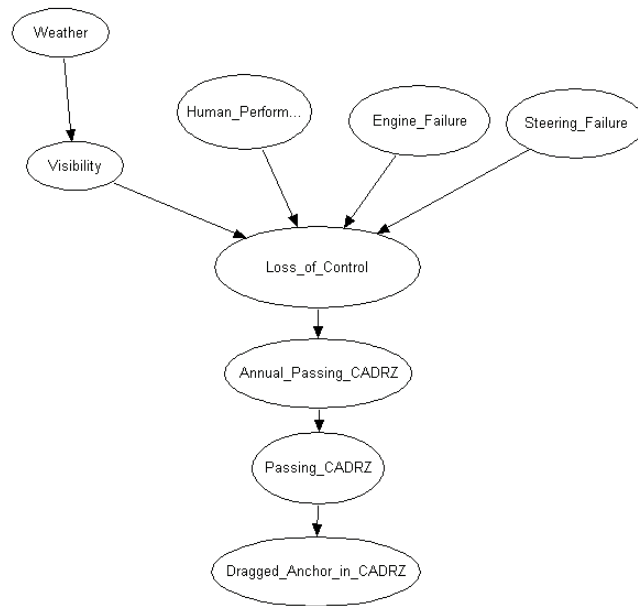
Berdasarkan data historis dari badan meteorologi, klimatologi, dan geofisika Tanjung Perak, probabilitas *bad weather/heavy rain* adalah 0.07 dan probabilitas *good weather* adalah 0.93 (Mulyadi et al., 2013).

#### 2. Visibility

*Visibility* mendeskripsikan jarak pandang kapal di sekitar daerah instalasi dan operasi *SPM* yang dipengaruhi oleh cuaca. Menurut DNVGL, (2003) cuaca yang bagus memiliki jarak pandang lebih dari 1nm, sedangkan ketika cuaca buruk mengakibatkan penurunan jarak pandang sebesar 25%. Oleh karena itu, pernyataan dalam *node* “*Visibility*” adalah:

- < 1 nm
- > 1 nm





Gambar 4. 15. Struktur Bayesian Network untuk Dragged Anchor

### 3. Human Performance

Human performance mendeskripsikan faktor kinerja manusia terhadap kecelakaan kapal. Studi terkait dengan kinerja manusia dalam kecelakaan kapal di sekitar pelabuhan Tanjung Perak Surabaya telah dilakukan oleh (Harahap and Rosyid, 2010). Berdasarkan studi tersebut, probabilitas manusia memiliki kinerja yang buruk adalah  $1.712E-4$  dan probabilitas manusia yang memiliki kinerja bagus adalah  $0.9998288$ . Oleh karena itu, node human performance dinyatakan dalam:

- Good Human Performance
- Bad Human Performance.

### 4. Engine Failure

Engine Failure mendeskripsikan kondisi probabilitas kerusakan pada mesin. Berdasarkan (DNVGL, 2017a) probabilitas kegagalan mesin pada supply vessel atau kapal dengan lebih dari satu mesin adalah  $1.4E-5$ . Node engine failure dinyatakan dalam:

- Engine Failure
- No Engine Failure

## 5. Steering Failure

Node steering failure mendeskripsikan keandalan pada sistem kemudi. Berdasarkan data historis, probabilitas kegagalan sistem kemudi disestimasikan sebesar  $3.43E-5$  dan probabilitas sistem kemudi berfungsi dengan baik adalah  $0.9999657$  (Mulyadi et al., 2014). Node steering failure dinyatakan dalam:

- Steering Failure
- No Steering Failure

## 6. Loss of Control

Node loss of control mendeskripsikan probabilitas kapal kehilangan kontrol dikarenakan kegagalan mesin, kegagalan sistem kemudi, human factor, atau keadaan cuaca. Pernyataan dalam node loss of control adalah:

- Loss of Control
- No Loss of Control

Node ini hanya memiliki nilai probabilitas logis yaitu 1 dan 0. Misalnya ketika jarak pandang baik, tidak terjadi kegagalan pada mesin, tidak terjadi kegagalan sistem kendali, dan pekerja memiliki performa yang bagus maka nilai dari loss of control adalah 0.

## 7. Annual Ship Passing CADRZ

Annual Ship Passing CADRZ mendeskripsikan probabilitas tahunan kapal melewati *Critical Anchor Dragged Zone (CADRZ)*. Pernyataan dalam node “Annual Ship Passing CADRZ” adalah:

- Annual Passing CADRZ
- No

Kecepatan kapal divariasikan pada kecepatan 0.25, 0.5, dan 0.75 knot. Probabilitas tahunan kapal melewati CADRZ dapat diketahui dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk melewati pipa dikalikan dengan perkiraan jumlah kapal yang melewati pipa dan selanjutnya dibagi dengan waktu dalam satu tahun (Artana and Dinariyana, 2013). Tabel 4.14 merupakan contoh perhitungan probabilitas

tahunan kapal melewati CADRZ untuk tipe kapal Tugs pada skenario 1 atau pada saat proses instalasi dan operasi *Single Point Mooring*.

#### 8. Ship Passing CADRZ

Passing CADRZ mendeskripsikan probabilitas kapal melewati *Critical Anchor Drag Zone (CADRZ)*. Pernyataan dalam node “*Passing CADRZ*” adalah:

- Passing CADRZ
- No Passing CADRZ

Nilai dari CADRZ adalah:

$$CADRZ = 27L + (2 \times Lateral\ Deviation)$$

Dimana:

L : Lebar jangkar Terbesar (m)

Probabilitas kapal berada di CADRZ diperoleh dengan mencari rasio lebar CADRZ dan perkiraan lebar alur pelayaran. Perhitungan probabilitas kapal melewati CADRZ dapat dilihat pada Lampiran 2.

#### 9. Dropped Anchor in CADZ

Node drop anchor in CADZ mendeskripsikan probabilitas kapal menjatuhkan jangkar di CADZ. Berdasarkan data historis, probabilitas kapal menjatuhkan jangkar setelah kehilangan kontrol adalah 0.028 (Mulyadi et al., 2013). Pernyataan dalam node drop anchor adalah:

- Drop Anchor
- No Drop Anchor

Dari *nodes* dan probabilitas yang telah ditentukan dan dibuat pada *software Hugin Expert*, Tabel 4.20 merupakan rangkuman nilai dari frekuensi pada tahap instalasi SPM. Sedangkan Tabel 4.21 dan Tabel 4.22 merupakan rekapitulasi perhitungan frekuensi pada tahap operasi SPM skenario 1(satu) dan 2 (dua).

Tabel 4. 20. Frekuensi Dragged Anchor Metode BN pada saat Instalasi SPM

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	3.37E-09	1.69E-09	1.12E-09	8.84E-10	4.42E-10	2.95E-10
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 21. Nilai Frekuensi Dragged Anchor pada Operasi SPM Skenario 1

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Skenario	Skenario 1					
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	5.06E-09	2.53E-09	1.69E-09	4.42E-09	2.21E-09	1.47E-09
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 22. Nilai Frekuensi Dragged Anchor pada Operasi SPM Skenario 2

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Passenger			Cargo		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	1.21E-06	6.07E-07	4.04E-07	4.25E-06	2.13E-06	1.42E-06
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 22. Frekuensi Dragged Anchor Metode BN pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

<b>Frequency Dragged Anchor</b>						
Skenario	Skenario 2					
Type of Vessel	Tanker			Container		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	3.39E-06	1.70E-06	1.13E-06	3.50E-06	1.75E-06	1.17E-06
Rank	1	1	1	1	1	1

Tabel 4. 22. Frekuensi Dragged Anchor Metode BN pada Operasi SPM Skenario 2 (Lanjutan)

<b>Frequency Dragged Anchor</b>			
Skenario	Skenario 2		
Type of Vessel	Tug		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75
Frequency Dragged Anchor	2.66E-07	1.33E-07	8.86E-08
Rank	1	1	1

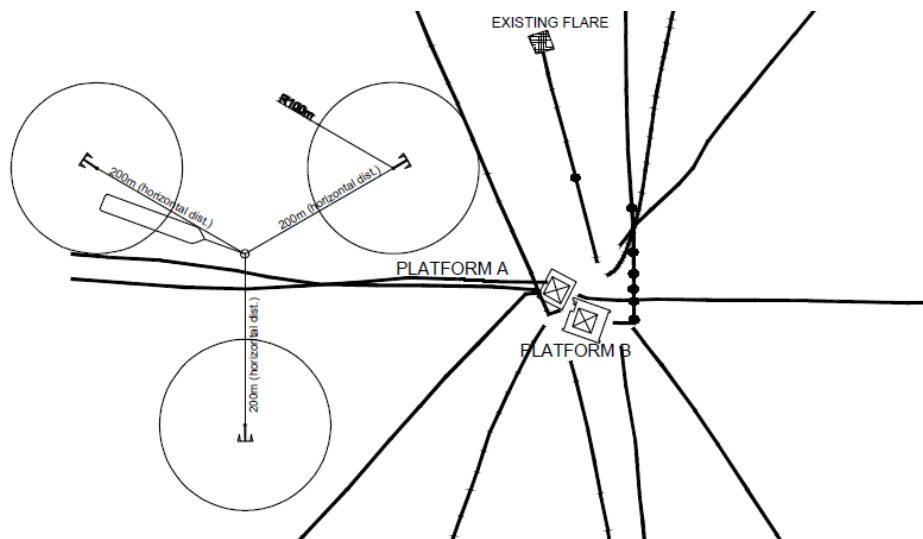
Berdasarkan hasil perhitungan diatas, dapat disimpulkan bahwa peringkat frekuensi untuk *dragged anchor* pada semua jenis kapal dibawah  $10^{-5}$  atau berada pada peringkat 1 sesuai dengan standar DNVGL RP F107. Selain itu, hasil dari perhitungan frekuensi pada tahap instalasi maupun operasi SPM dapat diketahui bahwa semakin rendah kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin besar yang dikarenakan waktu tempuh kapal pada daerah CSZ semakin lama. Sebaliknya, semakin cepat kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin kecil.

### 4.3.3. Penilaian Frekuensi Ship Sinking

Penilaian Frekuensi pada *ship sinking* hanya dilakukan pada saat tahap operasi SPM karena tidak terdapat potensi kapal tubrukan kapal dengan storage tanker yang dapat menyebabkan kapal tenggelam. Pada tahap operasi SPM terdiri dari 2 (dua) skenario dimana skenario pertama merupakan penilaian frekuensi kapal tenggelam pada kapal tug boat dan tanker yang digunakan untuk operasional SPM. Sedangkan skenario dua merupakan penilaian frekuensi pada lalu lintas kapal yang berada di sekitar area SPM dikhawatirkan menyimpang dari jalur yang seharusnya, sehingga dapat menubruk *storage tanker* yang tepat berada di atas pipa bawah laut.

#### Penilaian Frekuensi pada Skenario 1

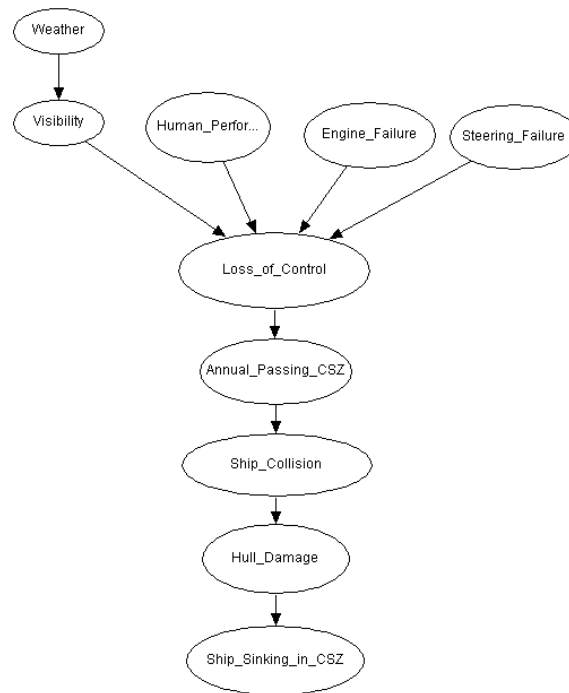
Pada skenario satu, *tug boat* dan *shuttle tanker* digunakan dalam operasi *single point mooring* dimana *storage tanker* tepat berada di atas pipa bawah laut seperti yang digambarkan pada gambar 4.16. Sehingga, potensi bahaya pada pipa bawah laut yang berada tepat dibawah *storage tanker* menjadi besar ketika terjadi tubrukan antara kapal dan *storage tanker* yang dapat mengakibatkan kapal tenggelam.



Gambar 4. 16. Layout Single Point Mooring

Langkah pertama dalam penilaian frekuensi menggunakan metode *Bayesian Network (BN)* adalah menyusun struktur *BN* dari suatu hal yang dapat menyebabkan terjatuhnya jangkat (*dropped anchor*). Struktur *BN* pada thesis ini

mengadopsi struktur *BN* pada penelitian yang dilakukan oleh DNVGL (2003), Mulyadi et al. (2014), Sulaiman and Tan (2014). Struktur *BN* untuk *ship sinking* pada skenario satu dapat dilihat pada gambar 4.17.



Gambar 4. 17. Struktur Bayesian Network untuk Ship Sinking Skenario 1

Langkah selanjutnya adalah menentukan probabilitas pada masing-masing *nodes* yang telah dibuat pada *software Hugin Expert*. Berikut ini merupakan penjelasan pada masing-masing *nodes* beserta dengan probabilitas dari *nodes* pada tahap operasi *SPM* skenario satu.

#### 1. Weather

*Node* tersebut mendeskripsikan kondisi cuaca di sekitar daerah instalasi dan operasi *single point mooring*. Pernyataan dalam *node* “*Weather*” adalah sebagai berikut:

- *Good Weather* (tidak terjadi badai/hujan deras dan memiliki jarak pandang yang baik)
- *Bad Weather/Heavy Rain* (terjadi hujan deras yang secara signifikan mengurangi jarak pandang)

Berdasarkan data historis dari badan meteorologi, klimatologi, dan geofisika Tanjung Perak, probabilitas *bad weather/heavy rain* adalah 0.07 dan probabilitas *good weather* adalah 0.93 (Mulyadi et al., 2013).

## 2. Visibility

*Visibility* mendeskripsikan jarak pandang kapal di sekitar daerah instalasi dan operasi *SPM* yang dipengaruhi oleh cuaca. Menurut DNVGL, (2003) cuaca yang bagus memiliki jarak pandang lebih dari 1nm, sedangkan ketika cuaca buruk mengakibatkan penurunan jarak pandang sebesar 25%. Oleh karena itu, pernyataan dalam node “*Visibility*” adalah:

- < 1 nm
- > 1 nm

## 3. Human Performance

Human performance mendeskripsikan faktor kinerja manusia terhadap kecelakaan kapal. Studi terkait dengan kinerja manusia dalam kecelakaan kapal di sekitar pelabuhan Tanjung Perak Surabaya telah dilakukan oleh (Harahap and Rosyid, 2010). Berdasarkan studi tersebut, probabilitas manusia memiliki kinerja yang buruk adalah 1.712E-4 dan probabilitas manusia yang memiliki kinerja bagus adalah 0.9998288. Oleh karena itu, node human performance dinyatakan dalam:

- Good Human Performance
- Bad Human Performance.

## 4. Engine Failure

Engine Failure mendeskripsikan kondisi probabilitas kerusakan pada mesin. Berdasarkan (DNVGL, 2017a) probabilitas kegagalan mesin pada supply vessel atau kapal dengan lebih dari satu mesin adalah 1.4E-5. Node engine failure dinyatakan dalam:

- Engine Failure
- No Engine Failure

## 5. Steering Failure

Node steering failure mendeskripsikan keandalan pada sistem kemudi. Berdasarkan data historis, probabilitas kegagalan sistem kemudi disestimasikan sebesar  $3.43E-5$  dan probabilitas sistem kemudi berfungsi dengan baik adalah  $0.9999657$  (Mulyadi et al., 2014). Node steering failure dinyatakan dalam:

- Steering Failure
- No Steering Failure

## 6. Loss of Control

Node loss of control mendeskripsikan probabilitas kapal kehilangan kontrol dikarenakan kegagalan mesin, kegagalan sistem kemudi, human factor, atau keadaan cuaca. Pernyataan dalam node loss of control adalah:

- Loss of Control
- No Loss of Control

Node ini hanya memiliki nilai probabilitas logis yaitu 1 dan 0. Misalnya ketika jarak pandang baik, tidak terjadi kegagalan pada mesin, tidak terjadi kegagalan sistem kendali, dan pekerja memiliki performa yang bagus maka nilai dari loss of control adalah 0.

## 7. Annual Ship Passing CSZ

Annual Ship Passing CSZ mendeskripsikan probabilitas tahunan kapal melewati *Critical Ship Sinking Zone (CSZ)*. Pernyataan dalam node “Annual Ship Passing CSZ” adalah:

- Annual Passing CSZ
- No

Probabilitas tahunan kapal melewati CSZ dapat diketahui dengan menghitung waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk melewati pipa dikalikan dengan perkiraan jumlah kapal yang melewati pipa dan selanjutnya dibagi dengan waktu dalam satu tahun (Artana and



Dinariyana, 2013). Perhitungan probabilitas tahunan kapal melewati CSZ dapat dilihat pada Lampiran 3.

#### 8. Collision

Node Collision mendeskripsikan probabilitas kapal tubrukan dengan storage tanker. Probabilitas dari kapal yang bertubrukan dengan Storage Tanker diasumsikan sebesar 10%. Pernyataan dalam *node collision* adalah:

- Collision
- No Collision

#### 9. Hull Damage

*Node hull damage* mendeskripsikan probabilitas kerusakan lambung kapal setelah terjadi tubrukan. Probabilitas dari kerusakan lambung kapal setelah terjadi tubrukan diasumsikan sebesar 10%. Pernyataan dalam *node hull damage* adalah:

- Hull Damage
- No Hull Damage

#### 10. Ship sinking

Node ship sinking mendeskripsikan probabilitas kapal tenggelam ketika terjadi kerusakan lambung kapal. Probabilitas dari kapal tenggelam ketika terjadi kerusakan lambung kapal diasumsikan sebesar 10%. Pernyataan dalam *node ship sinking* adalah:

- Ship Sinking
- No Ship Sinking

Dari *nodes* dan probabilitas yang telah ditentukan dan dibuat pada *software Hugin Expert*, Tabel 4.23 merupakan rangkuman nilai dari frekuensi beserta dengan peringkatnya untuk skenario 1 (satu). Berdasarkan dari tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa peringkat frekuensi berada pada peringkat 1 (satu) berdasarkan standar DNVL RP F107 karena memiliki nilai kudang dari  $10^{-5}$ . Selain itu, hasil dari perhitungan frekuensi menunjukkan bahwa semakin rendah kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin besar yang dikarenakan waktu tempuh kapal pada daerah CSZ semakin lama. Sebaliknya, semakin cepat kecepatan kapal, maka frekuensi bahaya terseret jangkar kapal semakin kecil.

Tabel 4. 23. Nilai Frekuensi Ship Sinking pada Operasi SPM Skenario 1

Frequency Ship Sinking						
Skenario	Skenario 1					
Type of Vessel	Tugs			Tanker		
Vessel Speed	0.25	0.5	0.75	0.25	0.5	0.75
Frequency	1.89E-08	9.45E-09	6.30E-09	2.01E-08	1.01E-08	6.70E-09
Rank	1	1	1	1	1	1

### **Penilaian Frekuensi pada Skenario 2**

Pada skenario dua, lalu lintas kapal yang berada di sekitar area *SPM* dikhawatirkan menyimpang dari jalur yang seharusnya, sehingga dapat menubruk *storage tanker* yang tepat berada di atas pipa bawah laut. Sama seperti skenario satu, langkah pertama dalam penilaian frekuensi pada skenario dua dilakukan dengan membuat struktur *BN* yang dapat dilihat pada gambar 4.18. Langkah selanjutnya adalah menentukan probabilitas pada masing-masing nodes yang telah dibuat pada *software Hugin Expert*.

Pada skenario dua, sebuah parameter ditambahkan, yaitu *Ship in Cross Area* dimana *nodes* tersebut mendeskripsikan probabilitas kapal yang menyimpang dari lalu-lintas pelayaran yang sebenarnya dan kapal dapat menabrak *platform* atau *storage tanker* jika tidak dalam pengawasan yang tepat (Spouge, 1999). Ilustrasi dari *cross area* tersebut dapat dilihat pada gambar 4.19.

*Cross area* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Fd = D \times f(A)$$

Dimana:

D : Collision diameter ( $D = W_A + B$ )

WA : Apparent platform width ( $W_A = L_p |\sin\theta| + W_p |\cos\theta|$ )

Lp : Length of platform

Wp : Width of platform

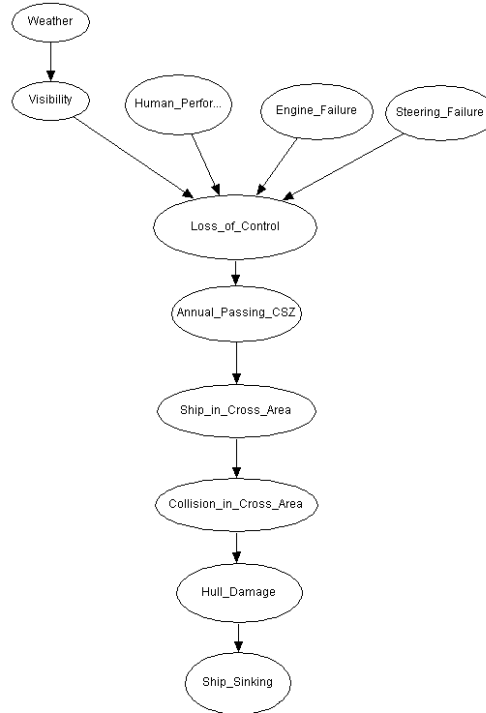
B : Ship beam

F(A) : Probability density at the centre of the platform ( $f(A) = \frac{1}{\sigma} \exp \frac{-k^2}{2}$ )

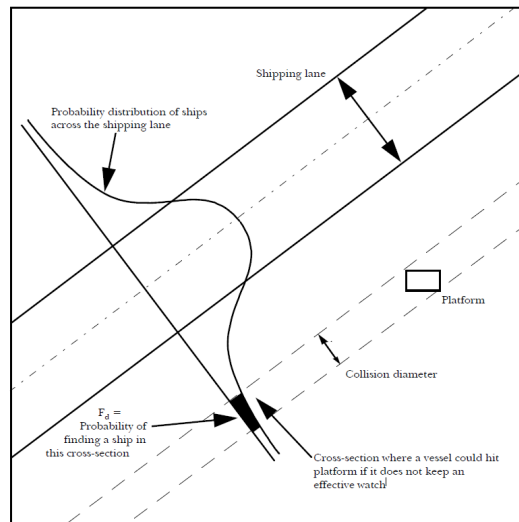
A : distance from platform to lane centreline at closest point of approach

$\sigma$  : standard deviation of traffic distribution across the lane, normally 50% of A (Fikri et al., 2014)

k :  $A/\sigma$  i.e. the number of standard deviations that the platform from the lane centreline.



Gambar 4. 18. Struktur Bayesian Network untuk Ship Sinking Skenario 2



Gambar 4. 19. Cross Section Area

Berikut ini merupakan contoh dari perhitungan untuk kapal *Passenger* pada skenario 2:

$$D = W_A + B$$

$$D = L_p |\sin\theta| + W_p |\cos\theta| + B$$

$$D = 152 |\sin 45^\circ| + 26.2 |\cos 45^\circ| + 14.6$$

$$D = 140.70 \text{ m}$$

$$f(A) = \frac{1}{2\sigma} \exp \frac{-k^2}{2}$$

$$f(A) = \frac{1}{2(5813.428)} \exp \frac{-0.5^2}{2}$$

$$f(A) = 0.0000759$$

$$Fd = D \times f(A)$$

$$Fd = 140.70 \times 0.0000759$$

$$Fd = 0.0106$$

Dari struktur *BN* yang telah disusun dan diinput probabilitas dari masing-masing nodes pada *software Hugin Express*, maka didapatkan nilai dari frekuensi dan peringkat frekuensi berdasarkan pada standar DNVGL RP F107 yang dapat dilihat pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24. Nilai Frekuensi Ship Sinking pada Operasi SPM Skenario 2

Frequency Ship Sinking					
Skenario	Skenario 2				
Type of Vessel	Passenger	Cargo	Tanker	Container	Tug Boat
Vessel Speed	5.8	10.1	9.1	5.3	7.1
Frequency	2.40E-09	5.20E-09	4.59E-09	8.07E-09	4.81E-10
Rank	1	1	1	1	1

Berdasarkan dari penilaian frekuensi pada ship sinking, dapat diketahui bahwa nilai frekuensi dari semua jenis kapal baik pada tahap instalasi dan operasi SPM skenario satu ataupun skenario dua memiliki nilai kurang dari  $10^{-5}$ . Sehingga, berdasarkan standar DNVGL RP F107, maka peringkat dari frekuensi ship sinking pada seluruh jenis kapal berada pada rangking 1.

## BAB V

### ANALISA KONSEKUENSI

Analisa konsekuensi dilakukan untuk menentukan rangking atau tingkat konsekuensi dari bahaya *dropped anchor*, *dragged anchor*, dan *ship sinking* pada suatu fasilitas. Pada penelitian ini, konsekuensi dihitung dengan menggunakan standar DNVGL RP-F107 kemudian dibandingkan dengan menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Setelah melakukan penilaian konsekuensi, selanjutnya dilakukan penentuan rangking atau peringkat konsekuensi sesuai dengan standar DNVGL RP-F107 seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 5. 1. Rangking konsekuensi

Rank	Dent/Diameter (%)	Damage Description
1	< 5	Minor Damage
2	5 – 10	Major Damage Leakage anticipated
3	10 – 15	Major Damage Leakage and Rupture Anticipated
4	15 – 20	Major Damage Leakage and Rupture Anticipated
5	> 20	Rupture

#### 5.1. Dropped Anchor

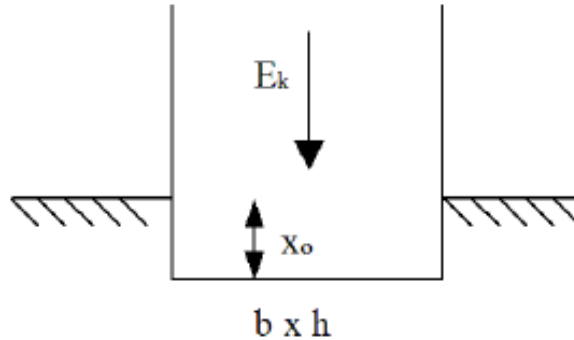
Untuk mendapatkan rangking atau tingkat konsekuensi dari *dropped anchor*, perlu dilakukan perhitungan total energi yang diserap untuk membuat penyokan pada pipa. Mengacu pada DNVGL RP F107, total energi meliputi energi yang dapat diserap oleh pipa itu sendiri ditambah dengan energi yang dapat diserap oleh sistem proteksi pipa seperti *Concrete Coating*, *Polymer Coating*, *Gravel Dump*, dan sistem proteksi lainnya. Berikut ini merupakan contoh perhitungan *impact energy* yang diperlukan untuk membuat penyokan atau dent sebesar 5%.

##### **Pipeline Protection Absorbed Energy**

*Pipeline protection absorbed energy* merupakan energi yang dapat ditahan oleh sistem perlindungan pada pipa akibat dari benturan jangkar. Berdasarkan DNVGL (2017a) sistem proteksi pada pipa bawah laut yang umumnya digunakan adalah *concrete coating*, *polymer coating*, *gravel dump* and *natural backfill*, dan lain-lain.

### 1. Concrete Coating

*Concrete coating* digunakan untuk melindungi pipa dari potensi kerusakan. Energi yang diserap oleh *concrete coating* merupakan energi yang dapat ditahan oleh lapisan *concrete* akibat dari benturan jangkar seperti yang digambarkan pada Gambar 4.9.



Gambar 5. 1. Concrete Coating Absorbed Energy

*Concrete coating absorbed energy* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$E_k = Y \times b \times h \times x_0 \quad (5.1)$$

Dimana:

Y : *Crushing Strength*

b x h : *Area of Impacting Object*

x<sub>0</sub> : Ketebalan lapisan pipa

Dengan menggunakan persamaan 5.1, berikut ini merupakan contoh perhitungan energi yang dapat diserap lapisan *concrete* yang disebabkan oleh jangkar yang dibawa kapal dengan jenis *tanker*.

$$E_{Concrete} = 3.35 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \times 0.132 \text{ m} \times 0.0508 \text{ m} \times 0.0254 \text{ m}$$

$$E_{Concrete} = 17.884 \text{ kJ}$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama, maka didapatkan energi yang dapat diserap lapisan *concrete* pada semua jenis kapal yang disajikan pada tabel 5.2. berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui bahwa energi yang diserap oleh lapisan *concrete* semakin besar ketika luasan area impactnya

besar. Begitu juga sebaliknya, energi yang diserap oleh lapisan concrete menjadi lebih kecil ketika area impactnya lebih kecil.

Tabel 5. 2. Concrete Absorbed Energy (Drop Anchor)

Type of Vessel	Berat Jangkar (kg)	b (meter)	h (meter)	Y (N/m <sup>2</sup> )	x <sub>0</sub>	Absorbed Energy (kJ)
Passenger	2280	0.1104	0.0508	1.05E+08	0.0254	14.957
Cargo	4320	0.12	0.0508	1.05E+08	0.0254	16.258
Tanker	5610	0.132	0.0508	1.05E+08	0.0254	17.884
Container	4050	0.12	0.0508	1.05E+08	0.0254	16.258
Tug	1740	0.09104	0.0508	1.05E+08	0.0254	12.334

## 2. Polymer Coating

*Polymer coating* pada umumnya terdiri dari kombinasi beberapa lapisan pelindung dengan ketebalan dan properti material yang berbeda (DNVGL, 2017a). Pada pipa bawah laut yang ditinjau memiliki lapisan *polymer coating* berupa corrosion coating dengan ketebalan 5.5 mm. Berdasarkan standar DNVGL RP F107, *corrosion coating* dengan ketebalan antara 3 mm hingga 6 mm memiliki nilai untuk menyerap energi sebesar 0 kJ. Sehingga nilai dari *polymer coating* adalah:

$$Polymer\ Coating = 0\ kJ$$

## 3. Gravel Dump and Natural Backfill

*Gravel dump* dan *natural backfill* merupakan sistem proteksi pipa bawah laut dengan cara menimbun pipa bawah laut dengan material tertentu yang bertujuan untuk melindungi pipa bawah laut dari benturan. Pada pipa bawah laut yang ditinjau tidak memiliki sistem proteksi berupa *gravel dump* dan *natural backfill*, sehingga diasumsikan energi yang diserap oleh *gravel dump* dan *natural backfill* adalah 0 kJ.

$$Gravel\ dump\ \&\ Natural\ Backfill = 0\ kJ$$

## Pipeline Absorbed Energy

Setelah menghitung energi yang dapat diserap oleh pelindung pipa bawah laut, maka langkah selanjutnya adalah menghitung energi yang dapat diserap oleh pipa bawah laut itu sendiri. Sebelum menghitung *pipeline absorbed energy*, maka diperlukan perhitungan *plastic moment capacity* dari

pipa bawah laut. Dimana *plastic moment capacity* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$mp = 1/4 \times \sigma_y \times t^2 \quad (5.2)$$

Dimana:

$\sigma_y$  : *Specified Minimum Yield Strength* (N/m<sup>2</sup>)

t : Ketebalan pipa (m)

Sehingga, dari persamaan diatas nilai dari *plastic moment capacity* adalah:

$$mp = 1/4 \times \sigma_y \times t^2$$

$$mp = \frac{1}{4} \times 395 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \times 0.0127^2 m$$

$$mp = 15927.39 N$$

Setelah didapatkan nilai dari *plastic moment capacity*, maka selanjutnya dapat dihitung nilai dari energi yang dapat diserap oleh pipa bawah laut dengan persamaan sebagai berikut:

$$E = 16 \times \left(\frac{2\pi}{9}\right)^{\frac{1}{2}} \times m_p \times \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{1}{2}} \times D \times \left(\frac{\delta}{D}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5.3)$$

Dimana:

$m_p$  : *Plastic Moment Capacity* (N)

D : *Pipeline Outer Diameter* (m)

t : Ketebalan pipa (m)

$\delta$  : *Pipeline Deformation, Dent Depth* (m)

DNVGL telah mengklasifikasikan peringkat berdasarkan deformasi yang dialami oleh pipa bawah laut seperti yang dapat dilihat pada Tabel 5.1. Berikut ini merupakan contoh perhitungan energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan penyokan sebesar 5% pada pipa bawah laut.

$$E = 16 \times \left(\frac{2\pi}{9}\right)^{\frac{1}{2}} \times 15927.39 N \times \left(\frac{0.4064 m}{0.0127 m}\right)^{\frac{1}{2}} \times 0.4064 m \times (5\%)^{\frac{3}{2}}$$

$$E = 5.47 kJ$$



Dengan menggunakan persamaan yang sama, maka didapatkan rentang nilai dari energi yang dibutuhkan untuk membuat pipa bawah laut deformasi sesuai dengan standar DNVGL RP F107 yang dapat dilihat pada tabel 5.3.

Tabel 5. 3. Range of Impact Energy

Dent/Diameter (%)	Impact Energy			
	Steel Pipe Only			
<5		<	5.47	kJ
5-10	5.47	-	15.48	kJ
10-15	15.48	-	28.44	kJ
15-20	28.44	-	43.79	kJ
>20		>	43.79	kJ

### **Dropped Anchor Impact**

Langkah selanjutnya adalah menghitung seberapa besar energi ketika jangkar dijatuhkan dan menubruk pipa bawah laut. Dibawah ini merupakan contoh perhitungan besarnya energi jangkar yang menubruk pipa bawah laut ketika dijatuhkan. Contoh yang diambil adalah jangkar pada jenis kapal *tanker*.

#### 1. Energi Kinetik

Energi kinetik merupakan energi yang dimiliki ketika sebuah benda bergerak. Energi kinetik dari benda yang jatuh tergantung pada massa dan kecepatan objek. Sedangkan, kecepatan objek pada yang tercelup di air tergantung pada bentuk benda dan berat dalam air (DNVGL, 2017a). Energi kinetik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$E_T = \left( \frac{m \times g}{C_D \times A} \right) \times \left( \frac{m}{\rho_{water}} - V \right) \quad (5.4)$$

Dimana:

- ET : Energi kinetik (J)
- m : Massa benda (kg)
- g : Kecepatan gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- C<sub>D</sub> : Koefisien drag dari jangkar
- A : Proyeksi luasan dari jangkar (m<sup>2</sup>)
- ρ<sub>water</sub> : Berat jenis air laut (1025 kg/m<sup>3</sup>)
- V : Volume jangkar (m<sup>3</sup>)

Sehingga didapatkan nilai dari kinetik energi berdasarkan spesifikasi jangkar yang dijatuhkan oleh kapal jenis passenger adalah:

$$E_T = \left( \frac{5610 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1 \times 1.730} \right) \times \left( \frac{5610 \text{ kg}}{1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} - 0.715 \text{ m}^3 \right)$$

$$E_T = 151693 \text{ J} = 151.693 \text{ kJ}$$

## 2. Terminal Velocity

Terminal velocity merupakan kecepatan jatuhnya benda pada air. Kecepatan terminal tercapai ketika benda itu seimbang sehubungan dengan gaya gravitasi, volume yang dipindahkan dan hambatan aliran (DNVGL, 2017a). Terminal velocity dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$E_T = \frac{1}{2} \times m \times v_t^2 \quad (5.5)$$

Dari persamaan diatas, nilai dari terminal velocity adalah:

$$v_t = \sqrt{\frac{2 \times E_T}{m}} \quad (5.6)$$

Dimana:

$v_t$  : Terminal velocity (m/s)

$E_T$  : Energi kinetik (J)

$m$  : Massa benda (kg)

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapatkan nilai dari terminal velocity adalah:

$$v_t = \sqrt{\frac{2 \times 151693}{2280}}$$

$$v_t = 7.354 \text{ m/s}$$

### 3. Added Mass

Added mass merupakan massa tambahan yang dimiliki benda akibat dari akselerasi pada suatu fluida. Nilai dari added mass dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$m_a = V \times C_a \times \rho_{water} \quad (5.7)$$

Dimana:

$m_a$  : mass added (kg)

$V$  : Volume jangkar ( $m^3$ )

$C_a$  : Koefisien massa tambahan (kg)

$\rho_{water}$  : Berat jenis air laut ( $1025 \text{ kg/m}^3$ )

Dari persamaan tersebut nilai dari massa tambahan benda adalah:

$$m_a = 0.715 \text{ m}^3 \times 1 \times 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$m_a = 732.516 \text{ kg}$$

### 4. Total Impact Energy

Total impact energy merupakan energi yang memiliki dampak terhadap pipa bawah laut ketika jangkar mengenai pipa. Total impact energy termasuk energi kinetik ( $E_T$ ) dan energi dari massa tambahan ( $E_A$ ). Total impact energy dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$E_E = E_T + E_A = \frac{1}{2} \times (m + m_a) \times v_t^2 \quad (5.8)$$

Dimana:

$m$  : Berat jangkar (kg)

$m_a$  : berat tambahan (kg)

$v_t$  : terminal velocity (m/s)

Berdasarkan persamaan diatas, maka nilai dari total impact energi adalah:

$$E_E = \frac{1}{2} \times (5610 + 732.516) \times 7.354^2$$

$$E_E = 41713 \text{ J} = 41.713 \text{ kJ}$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama, Tabel 5.4 merupakan hasil dari perhitungan impact energy dari dropped anchor dan rangking atau peringkat konsekuensi dari masing-masing jangkar pada masing-masing jenis kapal.

Tabel 5. 4. Impact Energy dan Ranking Konsekuensi Dropped Anchor

Jenis Kapal	Concrete Absorbed Energy (kJ)	Impact Energy (kJ)	Dent (mm)	Persentase	Rank
Passenger	14.95	46.157	64.61	15.90%	4
Cargo	16.258	119.036	159.35	39.21%	5
Tanker	17.884	171.500	226.64	55.77%	5
Container	16.258	107.450	144.02	35.44%	5
Tug	12.334	32.549	50.07	12.32%	3

Berdasarkan dari perhitungan impact energy, dampak dari jatuhnya jangkar pada jenis kapal Tugboat berada pada peringkat 3 berdasarkan standar DNVGL RP F107 dengan dent/diameter sebesar 50.07mm atau 12.32%. Jenis kapal passenger mengakibatkan dent/diameter sebesar 64.61mm atau 15.90%, berdasarkan standar DNVGL RP F107 dampak jatuhnya jangkar pada jenis kapal tersebut termasuk dalam peringkat 4 karena memiliki impact terhadap pipa sebesar 15%-20%. Sedangkan kapal dengan jenis cargo, tanker, dan container masing-masing memiliki dampak pada pipa bawah laut sebesar 159.35mm, 226.64mm, dan 144.02mm atau memiliki persentase dent/diameter sebesar 39.215%, 55.127%, dan 35.992% sehingga dikategorikan pada peringkat 5 (lima) menurut standar DNVGL RP F107.

## 5.2. Dragged Anchor

Pada analisa konsekuensi pipa bawah laut terhadap bahaya dragged anchor, dilakukan analisa stress dan displacement dengan menggunakan *software* autopipe. Autopipe merupakan *software* khusus yang digunakan untuk perancangan dan analisa kekuatan pada pipa bawah laut. Analisa *stress* dan *displacement* dilakukan dengan memasukkan nilai *external force* yang dihasilkan oleh masing-masing kapal. Nilai tersebut diambil dari *breaking load* dari rantai jangkar. Tabel 5.5 merupakan nilai *breaking load* dari rantai jangkar pada masing-masing jenis kapal.

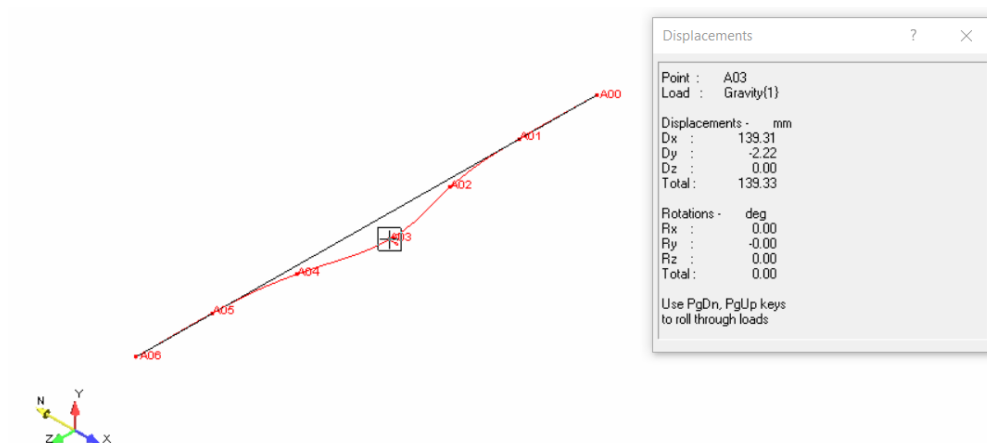
Tabel 5. 5. Maximum Breaking Load

Jenis Kapal	Diameter Rantai Jangkar (mm)	Breaking Load (kN)
Passenger	42	703
Cargo	62	1470
Tanker	58	1290
Container	56	1220
Tug	40	640

Nilai dari *breaking load* digunakan sebagai input *external force* dari tarikan jangkar terhadap pipa. Gambar 5. 2 dan Gambar 5.3 merupakan contoh hasil dari stress dan displacements analysis menggunakan *software Autopipe* untuk kapal jenis *passenger*. Dari *stress analysis* yang dilakukan, dapat dilihat bahwa *allowable stress* pada pipa adalah sebesar  $151.68 \text{ N/mm}^2$ , akan tetapi, nilai *stress* yang dihasilkan akibat dari *external force* yang diberikan adalah  $365 \text{ N/mm}^2$  dimana nilai tersebut sudah melebihi dari nilai dari *allowable stress*. *Ratio stress* yang dihasilkan adalah 2.41.



Gambar 5. 2. Hasil Stress Analysis pada Kapal Jenis Passenger



Gambar 5. 3. Hasil Displacements Analysis pada kapal Jenis Passenger

Berdasarkan Gambar 5.3, pipa bawah laut mengalami *displacement* sebesar 92.94 mm akibat dari beban eksternal yaitu terseret jangkar. Dengan menggunakan langkah-langkah yang sama, maka didapatkan nilai dari *stress* dan *displacements* terhadap pipa bawah laut yang dihasilkan oleh beban eksternal yang dapat dilihat pada Tabel 5.6.

Tabel 5. 6. Hasil Stress dan Displacements Analysis

Type of Vessel	Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Allowable (N/mm <sup>2</sup> )	Total Displacements (mm)
Passenger	572.08	151.68	139.31
Cargo	1085.94	151.68	291.3
Tanker	957.79	151.68	255.63
Container	903.79	151.68	241.76
Tug	481.18	151.68	126.83

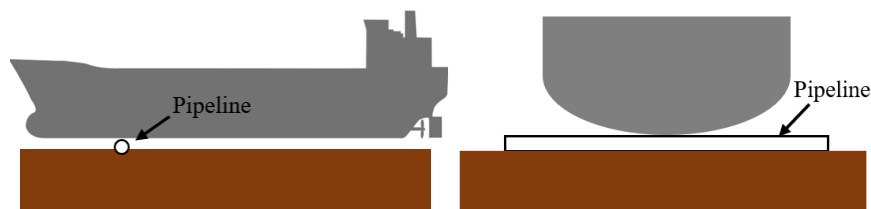
Berdasarkan hasil dari *stress* dan *displacements analysis* yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *stress* yang dihasilkan akibat dari tarikan jangkar pada semua jenis kapal melebihi nilai *stress* yang diperbolehkan pada pipa bawah laut sehingga terjadi *displacement* pada pipa bawah laut. Tabel 5.7 merupakan hasil dari penilaian konsekuensi terhadap pipa bawah laut akibat dari seretan jangkar. Hasil dari simulasi dengan menggunakan software Autopipe untuk kapal dengan jenis lainnya dapat dilihat pada Lampiran 2.

Tabel 5. 7. Ranking Konsekuensi Seretan Jangkar

Type of Vessel	Displacements (mm)	Diemeter (mm)	Displacement/Diameter (%)	Rank
Passenger	139.31	404.6	34%	5
Cargo	291.3	404.6	72%	5
Tanker	255.63	404.6	63%	5
Container	241.76	404.6	60%	5
Tug	126.83	404.6	31%	5

### 5.3. Ship Sinking

Kapal tenggelam merupakan salah satu bahaya yang juga harus diperhitungkan mengingat jalur pipa bawah laut merupakan aset yang sangat penting. Kerusakan pipa bawah laut akibat dari kapal tenggelam membutuhkan analisa dan variabel yang kompleks. Oleh karena itu, model disederhanakan untuk penilaian konsekuensi akibat dari tenggelamnya kapal. Kapal diasumsikan tenggelam dengan posisi horizontal seperti yang digambarkan pada Gambar 5.4. Asumsi lainnya adalah masa jenis pada plat baja kapal adalah  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Deadweight tonnage (DWT) kapal digunakan pada kalkulasi dan estimasi dari berat tercelup air. selain itu, kapal yang tenggelam diasumsikan tidak ada udara yang terjebak didalamnya.



Gambar 5. 4. Ship Sinking

Perhitungan energi ketika kapal tenggelam diperlukan untuk mengetahui seberapa besar dampaknya terhadap fasilitas pipa bawah laut. Dari perhitungan tersebut, maka akan didapatkan peringkat dari konsekuensi pada masing-masing jenis kapal berdasarkan dengan Standar DNVGL RP F107. Dibawah ini merupakan contoh perhitungan besarnya energi kapal tenggelam yang mengenai pipa bawah laut ketika. Contoh yang diambil adalah pada jenis kapal *tanker*.

### Pipeline Protection Absorbed Energy

*Pipeline protection absorbed energy* merupakan energi yang dapat ditahan oleh sistem perlindungan pada pipa akibat dari benturan jangkar. Berdasarkan DNVGL (2017a) sistem proteksi pada pipa bawah laut yang umumnya digunakan adalah *concrete coating*, *polymer coating*, *gravel dump* and *natural backfill*, dan lain-lain.

#### 1. Concrete Coating

*Concrete coating* digunakan untuk melindungi pipa dari potensi kerusakan. Energi yang diserap oleh *concrete coating* merupakan energi yang dapat ditahan oleh lapisan *concrete* akibat dari benturan jangkar seperti yang digambarkan pada Gambar 5.5.

*Concrete coating absorbed energy* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

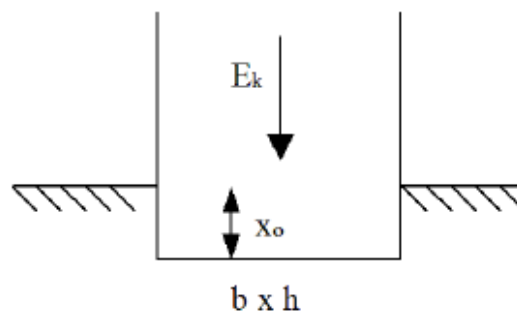
$$E_k = Y \times b \times h \times x_0 \quad (5.9)$$

Dimana:

Y : *Crushing Strength*

b x h : *Area of Impacting Object*

x<sub>0</sub> : *Ketebalan lapisan pipa*



Gambar 5. 5. Concrete Coating Absorbed Energy

Dengan menggunakan persamaan 5.9, berikut ini merupakan contoh perhitungan energi yang dapat diserap lapisan concrete akibat kapal dengan jenis tanker.

$$E_{Concrete} = 3.35.10^6 N/m^2 \times 1 m \times 0.4064 m \times 0.0254 m = 1083.87kJ$$



Dengan menggunakan persamaan yang sama, maka didapatkan energi yang dapat diserap lapisan concrete pada semua jenis kapal yang disajikan pada tabel 5.8.

Tabel 5. 8. Concrete Absorbed Energy (Ship Sinking)

Type of Vessel	DWT	B (meter)	h (meter)	Y N//m2	Absorbed Energy (kJ)
Passenger	600000	1	0.4064	105000000	1083.87
Cargo	7697000	1	0.4064	105000000	1083.87
Tanker	18520000	1	0.4064	105000000	1083.87
Container	8122000	1	0.4064	105000000	1083.87
Tug	1322000	1	0.4064	105000000	1083.87

#### 4. Polymer Coating

*Polymer coating* pada umumnya terdiri dari kombinasi beberapa lapisan pelindung dengan ketebalan dan properti material yang berbeda (DNVGL, 2017a). Pada pipa bawah laut yang ditinjau memiliki lapisan *polymer coating* berupa *corrosion coating* dengan ketebalan 5.5 mm. Berdasarkan standar DNVGL RP F107, *corrosion coating* dengan ketebalan antara 3 mm hingga 6 mm memiliki nilai untuk menyerap energi sebesar 0 kJ. Sehingga nilai dari *polymer coating* adalah:

$$Polymer\ Coating = 0\ kJ$$

#### 5. Gravel Dump and Natural Backfill

*Gravel dump* dan *natural backfill* merupakan sistem proteksi pipa bawah laut dengan cara menimbun pipa bawah laut dengan material tertentu yang bertujuan untuk melindungi pipa bawah laut dari benturan. Pada pipa bawah laut yang ditinjau tidak memiliki sistem proteksi berupa *gravel dump* dan *natural backfill*, sehingga diasumsikan energi yang diserap oleh *gravel dump* dan *natural backfill* adalah 0 kJ.

$$Gravel\ dump\ \&\ Natural\ Backfill = 0\ kJ$$

#### Pipeline Absorbed Energy

Setelah menghitung energi yang dapat diserap oleh pelindung pipa bawah laut, maka langkah selanjutnya adalah menghitung energi yang dapat diserap oleh pipa bawah laut itu sendiri. Sebelum menghitung *pipeline absorbed energy*, maka diperlukan perhitungan *plastic moment capacity* dari

pipa bawah laut. Dimana *plastic moment capacity* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$mp = 1/4 \times \sigma_y \times t^2 \quad (5.10)$$

Dimana:

$\sigma_y$  : *Specified Minimum Yield Strength* (N/m<sup>2</sup>)

t : Ketebalan pipa (m)

Sehingga, dari persamaan diatas nilai dari *plastic moment capacity* adalah:

$$mp = 1/4 \times \sigma_y \times t^2$$

$$mp = \frac{1}{4} \times 395 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \times 0.0127^2 m$$

$$mp = 15927.39 N$$

Setelah didapatkan nilai dari *plastic moment capacity*, maka selanjutnya dapat dihitung nilai dari energi yang dapat diserap oleh pipa bawah laut dengan persamaan sebagai berikut:

$$E = 16 \times \left(\frac{2\pi}{9}\right)^{\frac{1}{2}} \times m_p \times \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{1}{2}} \times D \times \left(\frac{\delta}{D}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5.11)$$

Dimana:

$m_p$  : *Plastic Moment Capacity* (N)

D : *Pipeline Outer Diameter* (m)

t : Ketebalan pipa (m)

$\delta$  : *Pipeline Deformation, Dent Depth* (m)

DNVGL telah mengklasifikasikan peringkat berdasarkan deformasi yang dialami oleh pipa bawah laut seperti yang dapat dilihat pada Tabel 5.1. Berikut ini merupakan contoh perhitungan energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan penyokan sebesar 5% pada pipa bawah laut.

$$E = 16 \times \left(\frac{2\pi}{9}\right)^{\frac{1}{2}} \times m_p \times \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{1}{2}} \times D \times \left(\frac{\delta}{D}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$E = 16 \times \left(\frac{2\pi}{9}\right)^{\frac{1}{2}} \times 15927.39 \text{ N} \times \left(\frac{0.4064 \text{ m}}{0.0127 \text{ m}}\right)^{\frac{1}{2}} \times 0.4064 \text{ m} \times (5\%)^{\frac{3}{2}}$$

$$E = 5.47 \text{ kJ}$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama, maka didapatkan rentang nilai dari energi yang dibutuhkan untuk membuat pipa bawah laut deformasi sesuai dengan standar DNVGL RP F107 yang dapat dilihat pada tabel 5.9.

Tabel 5. 9. Range of Impact Energy

Dent/Diameter (%)	Impact Energy			
	Steel Pipe Only			
<5		<	5.47	kJ
5-10	5.47	-	15.48	kJ
10-15	15.48	-	28.44	kJ
15-20	28.44	-	43.79	kJ
>20		>	43.79	kJ

## 1. Energi Kinetik

Energi kinetik merupakan energi yang dimiliki ketika sebuah benda bergerak. Energi kinetik dari benda yang jatuh tergantung pada massa dan kecepatan objek. Sedangkan, kecepatan objek pada yang tercelup di air tergantung pada bentuk benda dan berat dalam air (DNVGL, 2017a). Energi kinetik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$E_T = \left(\frac{m \times g}{C_D \times A}\right) \times \left(\frac{m}{\rho_{water}} - V\right) \quad (5.12)$$

Dimana:

ET : Energi kinetik (J)

m : Massa benda (kg)

g : Kecepatan gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)

C<sub>D</sub> : Koefisien drag dari kapal

A : Proyeksi luasan dari kapal (m<sup>2</sup>)

ρ<sub>water</sub> : Berat jenis air laut (1025 kg/m<sup>3</sup>)

V : Volume kapal (m<sup>3</sup>)

Sehingga didapatkan nilai dari kinetik energi berdasarkan spesifikasi kapal adalah:

$$E_T = \left( \frac{18520000 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1 \times 3982.4} \right) \times \left( \frac{18520000 \text{ kg}}{1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} - 2359.236 \text{ m}^3 \right)$$

$$E_T = 716663401 \text{ J} = 716663.401 \text{ kJ}$$

## 2. Terminal Velocity

Terminal velocity merupakan kecepatan jatuhnya benda pada air. Kecepatan terminal tercapai ketika benda itu seimbang sehubungan dengan gaya gravitasi, volume yang dipindahkan dan hambatan aliran (DNVGL, 2017a). Terminal velocity dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$E_T = \frac{1}{2} \times m \times v_t^2 \quad (5.13)$$

Dari persamaan diatas, nilai dari terminal velocity adalah:

$$v_t = \sqrt{\frac{2 \times E_T}{m}} \quad (5.14)$$

Dimana:

$v_t$  : Terminal velocity (m/s)

$E_T$  : Energi kinetik (J)

$m$  : Massa benda (kg)

Berdasarkan persamaan diatas, maka didapatkan nilai dari terminal velocity adalah:

$$v_t = \sqrt{\frac{2 \times E_T}{m}}$$

$$v_t = \sqrt{\frac{2 \times 716663401}{18520000}} = 8.797 \text{ m/s}$$

### 3. Added Mass

Added mass merupakan massa tambahan yang dimiliki benda akibat dari akselerasi pada suatu fluida. Nilai dari added mass dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$m_a = V \times C_a \times \rho_{water} \quad (5.15)$$

Dimana:

$m_a$  : mass added (kg)

$V$  : Volume kapal ( $m^3$ )

$C_a$  : Koefisien massa tambahan (kg)

$\rho_{water}$  : Berat jenis air laut ( $1025 \text{ kg/m}^3$ )

Dari persamaan tersebut nilai dari massa tambahan benda adalah:

$$m_a = 2359.236 \text{ m}^3 \times 1 \times 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$m_a = 2418216.561 \text{ kg}$$

### 4. Total Impact Energy

*Total impact energy* merupakan energi yang memiliki dampak terhadap pipa bawah laut ketika kapal tenggelam mengenai pipa. *Total impact energy* termasuk energi kinetik ( $E_T$ ) dan energi dari massa tambahan ( $E_A$ ). Total impact energy dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$E_E = E_T + E_A = \frac{1}{2} \times (m + m_a) \times v_t^2 \quad (5.16)$$

Dimana:

$m$  : Berat kapal(kg)

$m_a$  : Berat tambahan (kg)

$v_t$  : terminal velocity (m/s)

Berdasarkan persamaan diatas, maka nilai dari total impact energi adalah:

$$E_E = \frac{1}{2} \times (18520000 + 2418216.561) \times 8.797^2$$

$$E_E = 810240470 \text{ J} = 810240.470 \text{ kJ}$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama, Tabel 4.23 merupakan hasil dari perhitungan impact energy dari *ship sinking* dan rangking atau peringkat konsekuensi dari masing-masing jenis kapal.

Tabel 4. 25. Impact Energy dan Ranking Konsekuensi Ship Sinking

<b>Jenis Kapal</b>	<b>Absorbed Energy (kJ)</b>	<b>Impact Energy (kJ)</b>	<b>Dent/Diameter</b>	<b>Rank</b>
Passenger	1,083.87	7,308.93	> 20%	5
Cargo	1,083.87	222,253.92	> 20%	5
Tanker	1,083.87	810,240.47	> 20%	5
Container	1,083.87	241,586.42	> 20%	5
Tug	1,083.87	19,184.43	> 20%	5

Berdasarkan dari parameter nilai dan perhitungan impact energy pada bahaya tenggelamnya kapal yang dapat berdampak pada fasilitas pipa bawah laut, dapat disimpulkan bahwa seluruh jenis kapal memiliki dampak dent/diameter pada pipa lebih dari 20% sehingga berdasarkan standar DNVGL RP-F107 dikategorikan pada peringkat 5.

## **BAB VI**

### **SIMULASI NUMERIK**

Banyak metode yang digunakan untuk memecahkan dan menganalisa masalah yang berkaitan dengan fluida hingga benda yang *solid* seperti *Computational Fluid Dynamics (CFD)* yang digunakan untuk memecahkan analisa yang terkait dengan aliran fluida. Sedangkan metode untuk memecahkan dan menganalisa masalah terkait dengan struktur yang kompleks, diantaranya adalah *finite difference*, *finite element* dan *boundary element methods*. Pada pengerjaan thesis ini, metode *CFD* digunakan untuk menganalisa masalah terkait dengan kecepatan jangkar jatuh pada kedalaman perairan tertentu. Sedangkan *FEM* digunakan untuk menganalisa kerusakan yang terjadi pada pipa bawah laut akibat dari jatuhnya jangkar.

#### **6.1. Simulasi Computational Fluid Dynamics**

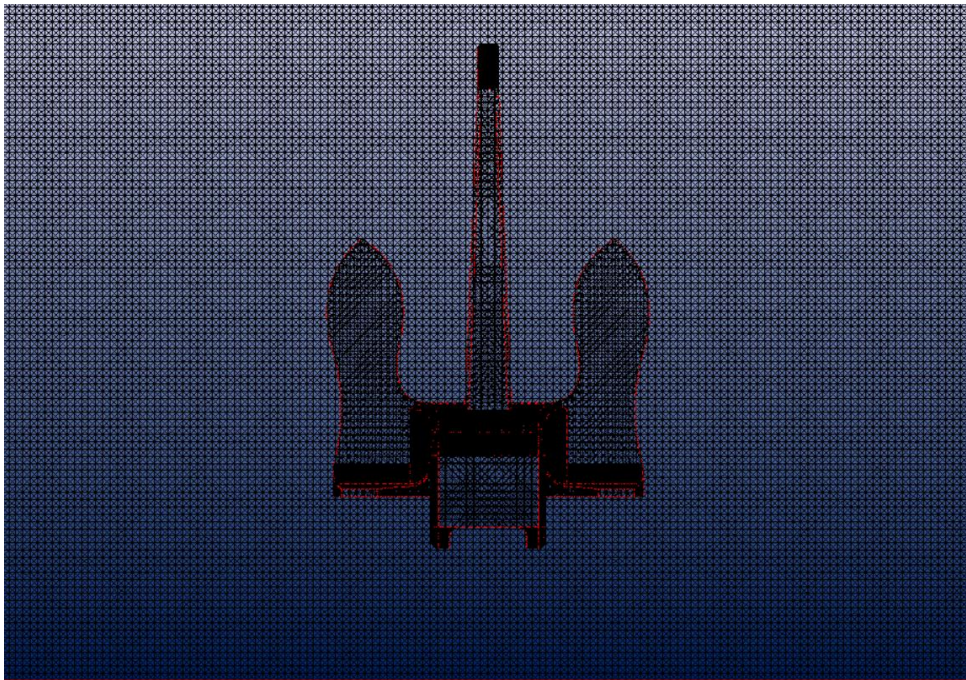
Permasalahan pada sektor minyak dan gas baik di *offshore* atau di *onshore* seringkali melibatkan aliran fluida. Dengan adanya pengembangan perangkat lunak yang dapat mensimulasikan permasalahan tersebut dengan akurat, maka *CFD* menjadi populer digunakan untuk memecahkan dan menganalisa permasalahan terkait dengan aliran fluida. Pada pengerjaan thesis ini, kecepatan jatuhnya jangkar dianalisa dengan metode *CFD* menggunakan software NUMECA FINE/MARINE. FINE/MARINE merupakan *software* berbasis *CFD* yang umumnya digunakan di industri perkapalan dan kelautan.

Tujuan dalam simulasi dengan menggunakan NUMECA FINE/MARINE adalah untuk memverifikasi perhitungan matematika yang ada pada DNVGL RP F107 dengan menggunakan metode *CFD*. Langkah-langkah pengerjaan simulasi dengan menggunakan metode *CFD*, terdiri dari tiga tahap yaitu *Pre-processing*, *Processing*, dan *Post processing*. Langkah-langkah tersebut akan dijabarkan pada sub-bab berikut.

##### **6.1.1. Pre-Processing**

Pada tahap *Pre-processing*, dimensi dari jangkar digambar kedalam bentuk 3 dimensi untuk dilakukan proses *meshing*. *Meshing* merupakan proses

diskritisasi *domain* yang kontinyu menjadi *domain* yang diskrit sehingga permasalahan pada *domain* dapat diselesaikan (Kawsar et al., 2015). Semakin kecil ukuran *mesh*, maka akan semakin akurat hasil yang didapatkan. Akan tetapi, apabila terlalu banyak *mesh*, maka hasil perhitungan akan semakin banyak dan membutuhkan waktu yang sangat lama. Gambar 6.1. merupakan gambar jangkar yang digunakan pada kapal jenis tanker yang telah dilakukan proses *meshing*.



Gambar 6. 1. Meshing pada Jangkar

### 6.1.2. Processing

*Processing* merupakan proses *solver* pada metode *CFD* sesuai dengan kondisi lingkungan yang dimasukkan sebagai parameter. Tabel 6.1. merupakan parameter yang digunakan pada tahap *processing* dengan menggunakan *software* NUMECA FINE/MARINE pada contoh jangkar kapal *tanker*. Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan tahap *processing* bergantung dengan banyaknya *mesh* yang dibuat pada tahap *pre-processing*.

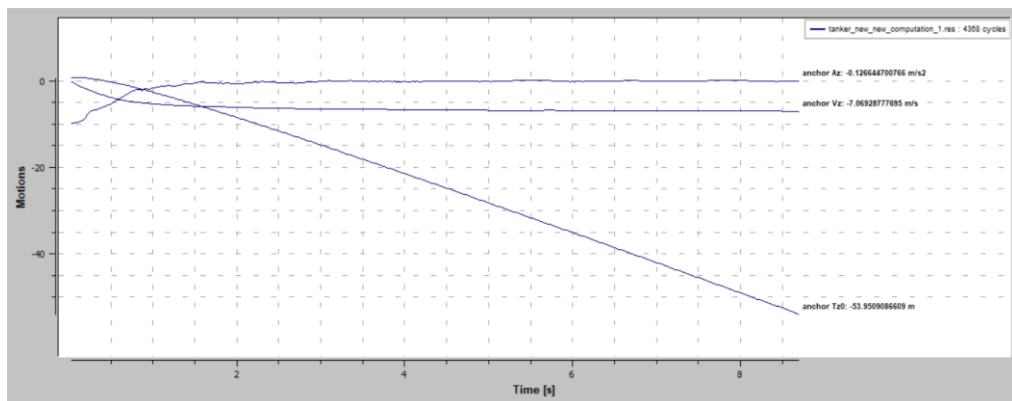


Tabel 6. 1. Parameter CFD

Parameters	Value	Unit
Time Configuration	Unsteady	-
Fluid Model		
Sea Water Density	1025	Kg/m <sup>3</sup>
Sea Water Temperature	26	°C
Air Density	1.2	Kg/m <sup>3</sup>
Gravity	9.81	m/s <sup>2</sup>
Mesh Displacement Definition	Rigid Motion	-
Anchor Mass	5610	kg

### 6.1.3. Post Processing

*Post processing* merupakan tahap dimana hasil dari solver software *CFD* divisualisasikan. Pada simulasi *CFD* jatuhnya jangkar, didapatkan nilai *terminal velocity* pada saat jangkar mengenai pipa bawah laut pada kedalaman 54 meter. Gambar 6.2 merupakan grafik hasil simulasi *CFD* pada jangkar kapal tanker. Dengan menggunakan cara yang sama, maka didapatkan hasil dari simulasi *CFD* pada Tabel 6.2.



Gambar 6. 2. Contoh dari Hasil Simulasi CFD

Tabel 6. 2. Hasil Simulasi CFD

Type of Vessel	Terminal Velocity	Unit	Coefficient Drag	Unit
Passenger	5.726	m/s	0.987	-
Cargo	6.613	m/s	0.971	-
Tanker	7.127	m/s	0.919	-
Container	6.494	m/s	0.972	-
Tug	5.727	m/s	0.925	-

Berdasarkan hasil simulasi dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* didapatkan bahwa nilai *terminal velocity* ( $V_t$ ) terendah adalah kapal jenis *passenger* dengan nilai  $V_t$  5.726 m/s dan *Coefficient Drag* ( $CD$ ) 0.987. Sedangkan nilai *terminal velocity* ( $V_t$ ) tertinggi adalah kapal jenis

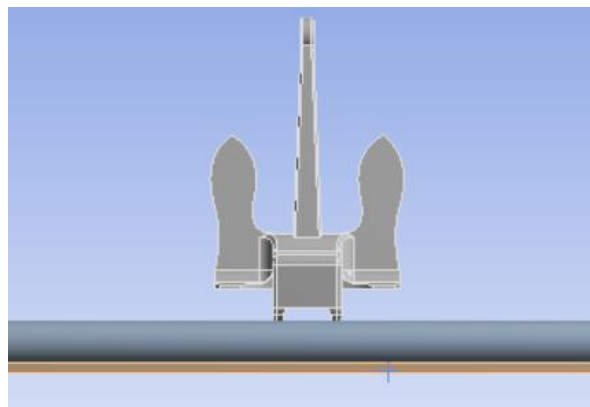
*Tanker* dengan nilai  $V_t$  7.127 m/s dengan *Coefficient Drag (CD)* 0.987. Perbedaan nilai  $V_t$  dan  $CD$  dapat terjadi dikarenakan oleh faktor berat dan dimensi benda tersebut.

## 6.2. Simulasi Finite Element Method

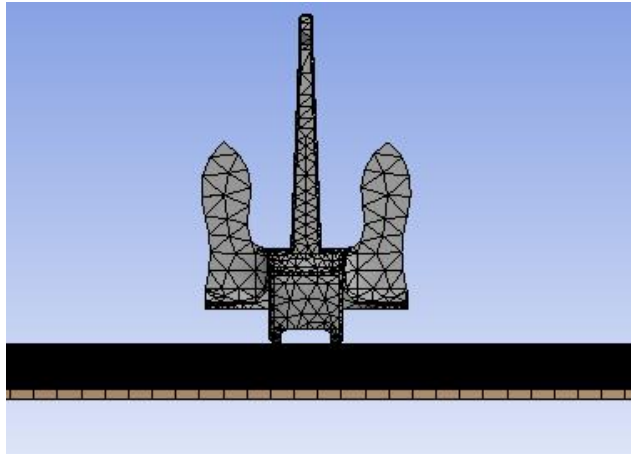
Finite Element Method (FEM) merupakan salah satu metode yang dipakai untuk memecahkan dan menganalisa suatu masalah yang berkaitan dengan struktur. Sama seperti metode Computational Fluid Dynamics, cara kerja FEM juga dengan membagi domain yang kontinyu menjadi domain yang diskrit sehingga permasalahan pada domain dapat diselesaikan. Dimana semakin kecil ukuran mesh, maka hasil dari komputasi menjadi semakin akurat, akan tetapi diperlukan waktu yang lebih lama untuk melakukan perhitungan. Software Ansys Explicit Dynamics digunakan pada pengerjaan thesis ini untuk menganalisa konsekuensi yang terjadi pada pipa bawah laut akibat dari jatuhnya jangkar. Terdapat tiga tahapan dalam melakukan simulasi FEM adalah processing, processing, dan post processing.

### 6.2.1. Pre-Processing

Untuk mengevaluasi konsekuensi pada pipa bawah laut akibat dari jatuhnya jangkar, maka pada tahap Pre-processing pada simulasi FEM objek seperti jangkar, lapisan concrete, dan pipa digambarkan dalam bentuk 3 dimensi untuk dilakukan proses meshing. Gambar 6.4 menunjukkan kondisi awal simulasi dimana objek jangkar pada kapal tanker jatuh mengenai pipa bawah laut. Sedangkan hasil dari meshing objek dapat dilihat pada gambar 6.5.



Gambar 6. 3. Kondisi Awal Simulasi FEM



Gambar 6. 4. Meshing pada Simulasi FEM

### 6.2.2. Processing

Tahap processing merupakan tahap dimana perhitungan solver dari simulasi FEM dilakukan. Agar hasil dari simulasi FEM mendekati hasil yang nyata, maka diperlukan parameter-parameter seperti dengan kondisi nyata. Parameter yang digunakan pada simulasi FEM berdasarkan dengan hasil perhitungan dan simulasi CFD yang telah dilakukan sebelumnya. Tabel 6.5 merupakan parameter yang digunakan untuk simulasi FEM jatuhnya jangkar pada jenis kapal tanker. Parameter dan properties material dapat dilihat pada Lampiran 3.

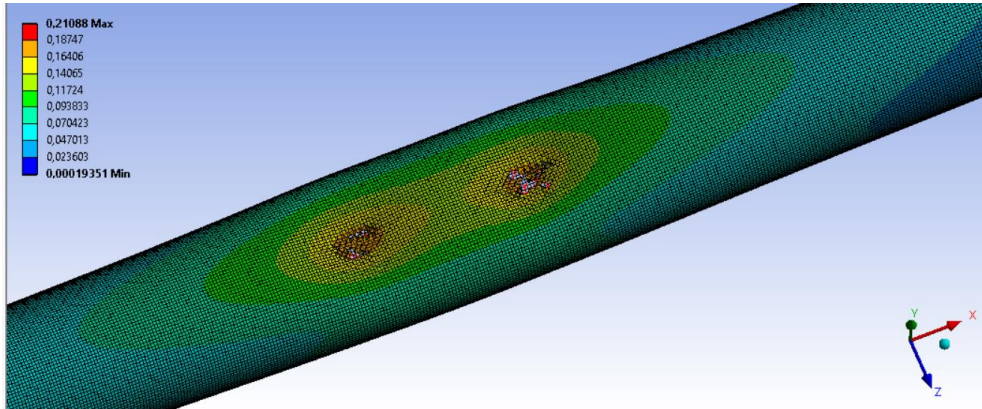
Tabel 6. 3. Parameter Simulasi FEM

Parameters	Value	Unit
Anchor Material	Steel	-
Density	7850	Kg/m <sup>3</sup>
Added Mass	732.52	kg
Bouyancy Force	7185.981	N
Vt (from CFD)	7.127	m/s
Concrete Material	Concrete	-
Density	1500	Kg/m <sup>3</sup>
Pipeline Material	Steel	
Density	7850	Kg/m <sup>3</sup>
Gravity	9.81	m/s <sup>2</sup>

### 6.2.3. Post Processing

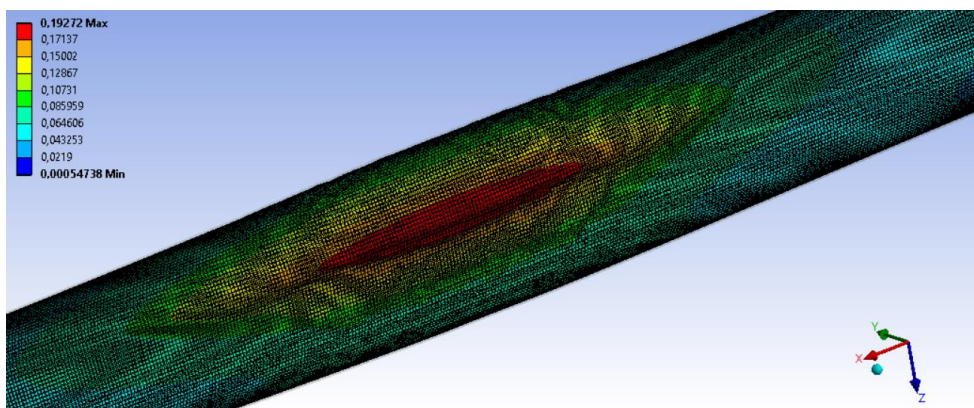
Visualisasi dari pipa bawah laut yang terkena dampak jatuhnya jangkar dapat divisualisasikan pada tahap post processing ini. Gambar 6.6 merupakan visualisasi dari lapisan concrete pada pipa bawah laut yang terkena dampak dari jatuhnya jangkar kapal tanker. Berdasarkan gambar tersebut, diketahui

jatuhnya jangkar pada kapal jenis tanker mengakibatkan lapisan concrete pecah yang menghasilkan displacement paling besar sebesar 210 mm.



Gambar 6. 5. Hasil Simulasi FEM Concrete Coating

Sedangkan dampak dari jatuhnya jangkar pada pipa bawah laut dapat dilihat pada gambar Gambar 6.7. Berdasarkan dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa dampak dari jatuhnya jangkar kapal tanker mengakibatkan penyokan sebesar 192.72mm pada pipa bawah laut. Dengan menggunakan langkah yang sama, maka didapatkan nilai penyokan dari hasil simulasi FEM pada Tabel 6.4. Hasil Simulasi untuk kapal jenis lainnya dapat dilihat pada Lampiran 4.



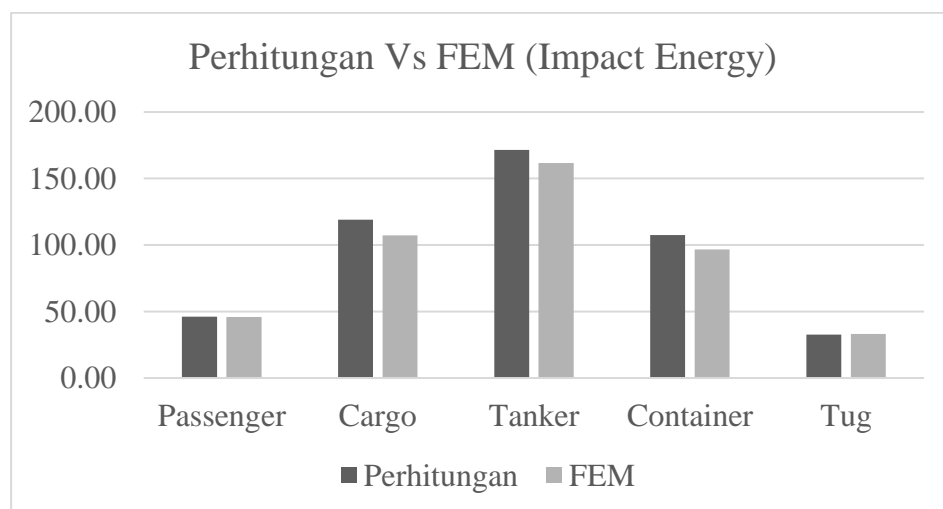
Gambar 6. 6. Hasil Simulasi FEM Pipeline

Tabel 6. 4. Hasil Simulasi FEM

Type of Vessel	FEM			
	Total Impact (kJ)	Dent (mm)	Dent/Diameter	Rank
Passenger	45.853	58.036	14.28%	3
Cargo	107.31	141.71	34.87%	5
Tanker	161.54	210.88	47.56%	5
Container	96.559	122.52	30.15%	5
Tug	33.221	44.33	10.91%	3

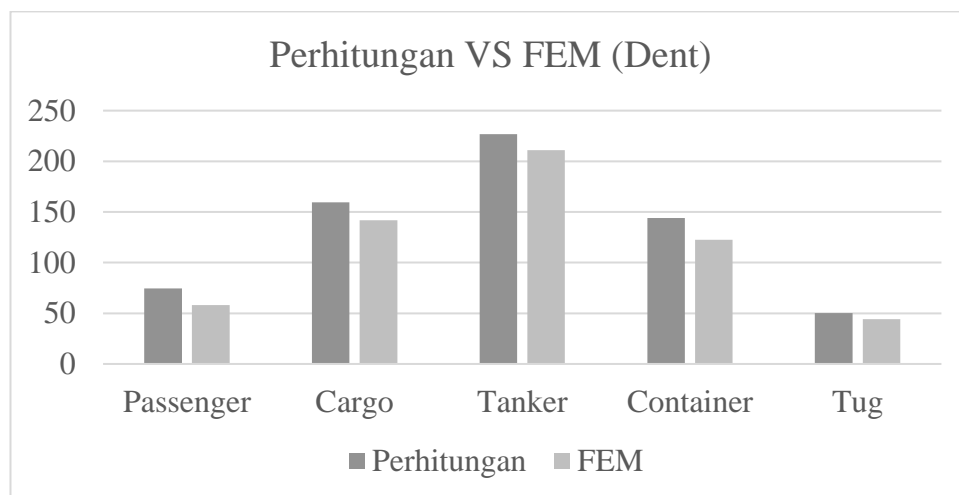
Berdasarkan dari hasil simulasi FEM, didapatkan bahwa dampak dari jatuhnya jangkar pada jenis kapal Passenger dan Tugboat berada pada peringkat 3 berdasarkan standar DNVGL RP F107 karena memiliki nilai dent/diameter diantara 10%-15%. Kedua jenis kapal tersebut masing-masing menghasilkan dent/diameter sebesar 58.036mm dan 44.33mm atau 14.28% dan 10.91%. Sedangkan kapal dengan jenis cargo, tanker, dan container masing-masing memiliki dampak pada pipa bawah laut sebesar 141.71mm, 192.72mm, dan 122.52mm atau memiliki presendasi dent/diameter sebesar 34.87%, 47.56%, dan 30.15% sehingga dikategorikan pada peringkat 5 (lima) menurut standar DNVGL RP F107 karena memiliki nilai dent/diameter diatas 20%.

Setelah hasil dari simulasi menggunakan *FEM* didapatkan, maka perbandingan hasil nilai *impact energy* pada pipa bawah laut akibat dari jatuhnya jangkar antara perhitungan DNVGL RP F107 dan FEM dapat dilihat pada Gambar 6.8. Berdasarkan grafik tersebut, terdapat perbedaan hasil antara perhitungan dengan simulasi *FEM*. Perbedaan nilai *impact energy* terkecil berada pada kapal jenis *Passenger*, dimana hasil perhitungan adalah 46.16 kJ dan hasil simulasi adalah 45.853 kJ sehingga selisih antara perhitungan dan simulasi *FEM* adalah 0.303 kJ. Sedangkan nilai selisih terbesar terjadi pada kapal dengan jenis *Cargo*, dimana nilai *impact energy* pada perhitungan adalah 119.04 kJ dan hasil simulasi *FEM* adalah 107.31 kJ dengan selisih antara keduanya adalah 11.72 kJ.



Gambar 6. 7. Perbandingan Perhitungan vs FEM untuk Dent pada Pipa

Perbandingan dent dari hasil perhitungan standar DNVGL RP F107 dan simulasi *FEM* dapat dilihat pada Gambar 6.9. Berdasarkan dari grafik tersebut, dapat diketahui bahwa terdapat selisih nilai *dent* yang terjadi pada pipa bawah laut. Selisih nilai dent pada pipa bawah laut terkecil terjadi pada jatuhnya kapal dengan jenis *Tug*, dimana berdasarkan hasil perhitungan memiliki nilai dent 50.07 mm dan hasil simulasi *FEM* adalah 44.33 mm sehingga memiliki selisih nilai sebesar 5.74 mm. Sedangkan nilai selisih terbesar terjadi pada kapal dengan jenis *Container*, dimana nilai dent pada perhitungan adalah 144.01 mm dan hasil simulasi *FEM* adalah 122.52 mm sehingga memiliki selisih nilai sebesar 21.49 mm. Selisih nilai antara perhitungan standar DNVGL RP F107 dan simulasi *FEM* kemungkinan dapat terjadi karena perbedaan pendekatan yang digunakan pada kedua metode tersebut, dimana standar DNVGL RP F107 berdasarkan pemodelan pada beban ujung pisau yang mengenai benda sedangkan simulasi *FEM* dilakukan dengan pendekatan membagi bentuk benda menjadi seperti jaring-jaring kecil (*mesh*) untuk dilakukan perhitungan secara numerik.



Gambar 6. 8. Perbandingan Perhitungan vs FEM untuk Dent pada Pipa

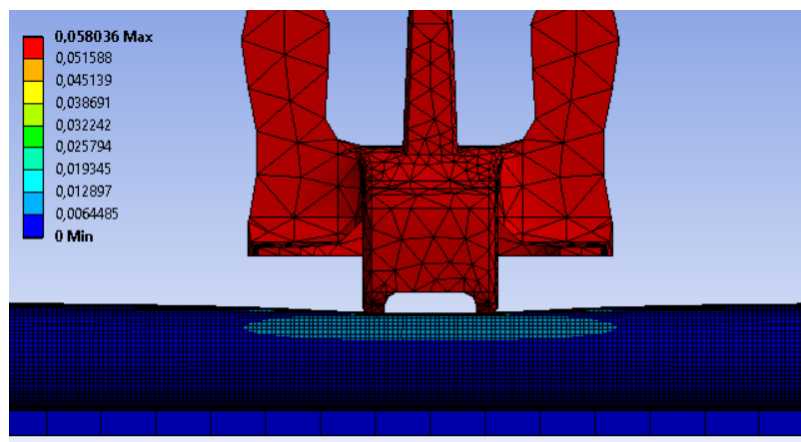
### 6.2.1. Variasi Model

Untuk menganalisa dampak kerusakan pipa bawah laut akibat dari luasan jangkar yang terkena pipa bawah laut, maka beberapa variasi model jangkar dibuat untuk disimulasikan dengan menggunakan finite element method (FEM). Tabel 6. 5. Menunjukkan beberapa variasi luasan *impact*.

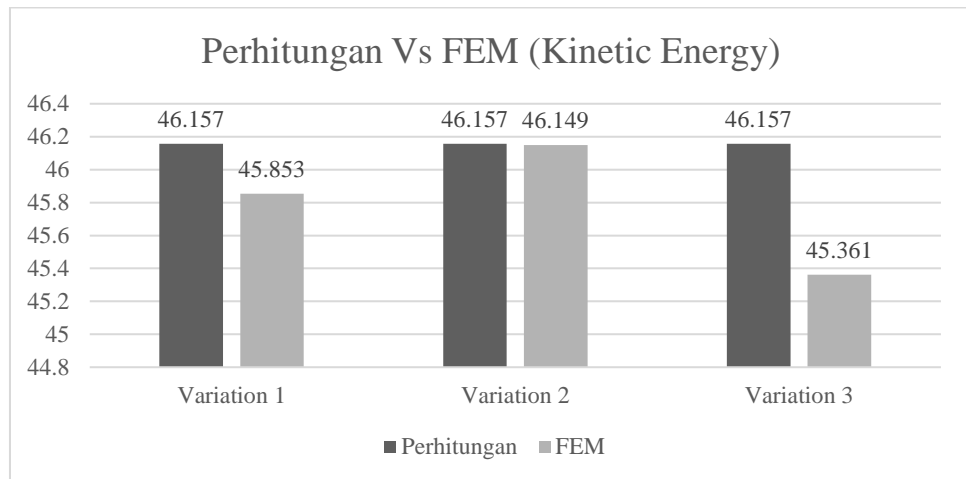
Tabel 6. 5. Variasi Luasan Impact

Variation	Panjang Impact	Lebar impact	Luas
Variation 1	0.1104	0.0508	0.005608
Variation 2	0.039	0.0508	0.001981
Variation 3	0.039	0.12	0.00468

Setelah melakukan pemodelan 3D, kemudian disimulasikan dengan software FEM. Gambar 6.10 merupakan contoh hasil simulasi FEM untuk variasi 1. Perbandingan impact energy antara perhitungan standar DNVGL RP F107 dapat dilihat pada Gambar 6.11. Hasil simulasi dari variasi lainnya dapat dilihat pada Lampiran 5.



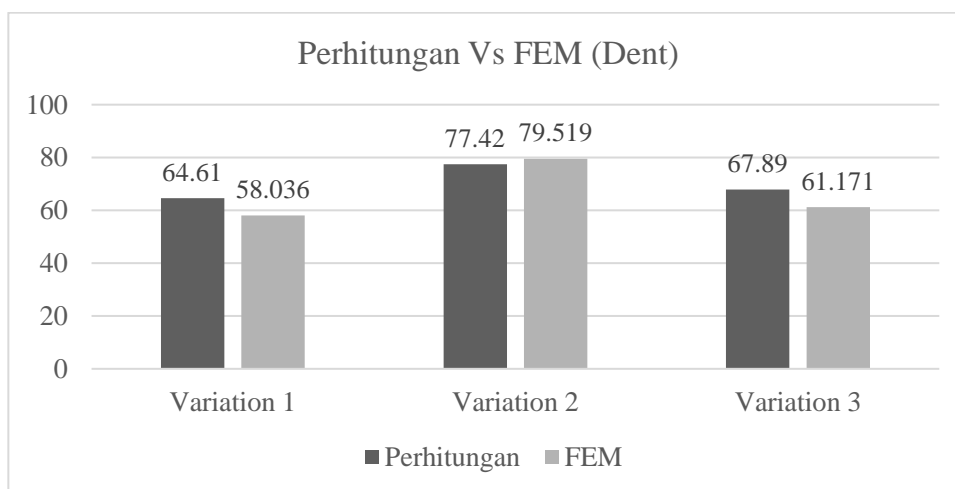
Gambar 6. 9. Hasil Simulasi FEM Variasi 1



Gambar 6. 10. Perbandingan hasil simulasi FEM (Impact Energy)

Berdasarkan Gambar 6.11, nilai dari impact energy dari perhitungan DNVGL RP F 107 untuk semua variasi adalah 46.167 kJ. Sedangkan pada hasil simulasi FEM nilai dari impact energy adalah 45.853 kJ, variasi 2 adalah 46.149 kJ, sedangkan variasi 3 memiliki nilai impact energy sebesar

45.361. Hasil dari simulasi FEM berbeda-beda kemungkinan dikarenakan oleh perbedaan komputasi antara masing-masing model tersebut. Sedangkan nilai dari perhitungan sama dikarenakan pada perhitungan tersebut menggunakan formula yang sama sesuai dengan standar DNV RP F107. Masing-masing variasi luasan area mengakibatkan penyokan (dent) yang dapat dilihat pada Gambar 4.12. berdasarkan gambar tersebut, nilai penyokan (dent) pada perhitungan sesuai dengan standar DNVGL RP F107 untuk variasi 1 adalah 64.61 mm, variasi 2 adalah 77.42 mm, dan variasi 3 adalah 61.171 mm. Sedangkan berdasarkan hasil simulasi FEM, variasi 1 menghasilkan dent sebesar 58.036 mm, variasi 2 menghasilkan dent sebesar 79.513 mm, dan variasi 3 menghasilkan dent 61.171. Antara perhitungan menurut DNVGL RP F 107 dan simulasi FEM dari masing-masing variasi memiliki hasil yang berbeda, perbedaan tersebut kemungkinan dikarenakan oleh perbedaan pendekatan yang digunakan pada kedua metode tersebut, dimana standar DNVGL RP F107 berdasarkan pemodelan pada beban ujung pisau yang mengenai benda sedangkan simulasi *FEM* dilakukan dengan pendekatan membagi bentuk benda menjadi seperti jaring-jaring kecil (*mesh*) untuk dilakukan perhitungan secara numerik. Selain itu, berdasarkan perhitungan ataupun simulasi FEM menunjukkan bahwa semakin kecil luasan area yang terkena, maka semakin dalam dent yang dihasilkan. Begitu pula sebaliknya, semakin besar luasan yang terkena maka nilai dent akan semakin kecil.



Gambar 6. 11. Perbandingan hasil simulasi FEM (Dent)



## BAB VII

### MITIGASI RISIKO

#### 7.1. Pemetaan Risiko

Setelah melakukan perhitungan serta menentukan tingkat frekuensi dan konsekuensi, maka selanjutnya adalah memetakan frekuensi dan konsekuensi kedalam matriks 5x5 berdasarkan standar DNV RP F107. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui profil risiko dari masing-masing bahaya yang mungkin terjadi pada pipa bawah laut. Pada standar DNV RP F107, kategori risiko dibagi menjadi tiga seperti yang dapat dilihat pada Tabel 7.1.

Tabel 7. 1. Kategori Risiko

Warna Kategori	Kategori Risiko	Mitigasi Risiko
	Acceptable	Risiko dapat diterima, Tidak memerlukan mitigasi risiko
	Alarp (as-low-as-reasonably-practicable)	Tidak wajib untuk dilakukan upaya mitigasi, akan tetapi perlu dilakukan inspeksi secara berkala
	Not Acceptable	Perlu dilakukan upaya mitigasi untuk menurunkan tingkat risiko

##### 7.1.1. **Dropped Anchor**

Berdasarkan dari hasil perhitungan tingkat frekuensi dan konsekuensi, kategori risiko *dropped anchor* pada tahap instalasi *SPM* dapat dilihat pada Gambar 7.2. Berdasarkan standar DNVGL RP F107, kapal dengan jenis *tug* berada pada kategori *acceptable*, akan tetapi kapal *tanker* berada pada kategori *ALARP*. Gambar 7.3 menunjukkan *risk matrix* untuk bahaya *dropped anchor* pada saat operasi *SPM* skenario 1, dimana kapal dengan jenis *tug* berada pada kategori *acceptable*, akan tetapi kapal *tanker* berada pada kategori *ALARP*. Sedangkan Gambar 7.4 menunjukkan *risk matrix* untuk bahaya *dropped anchor* pada saat operasi *SPM* skenario 2. Kapal jenis *Passenger* dan *Tug* berada pada kategori *acceptable* dan kapal dengan jenis *Cargo*, *Tanker*, dan *Container* berada pada kategori *ALARP*.

Dropped Anchor Skenario 1		Consequence Ranking					
		1	2	3	4	5	
		< 5%	5 – 10%	10-15%	15 – 20%	> 20%	
Frequency Ranking	5	>10 <sup>-2</sup>	Yellow	Red	Red	Red	Red
	4	10 <sup>-2</sup> > 10 <sup>-3</sup>	Green	Yellow	Red	Red	Red
	3	10 <sup>-3</sup> > 10 <sup>-4</sup>	Green	Green	Yellow	Red	Red
	2	10 <sup>-4</sup> > 10 <sup>-5</sup>	Green	Green	Green	Yellow	Red
	1	<10 <sup>-5</sup>	Green	Green	Tug	Green	Tanker

Gambar 7. 1. Risk Matrix Dropped Anchor Tahap Instalasi SPM

Dropped Anchor Skenario 1		Consequence Ranking					
		1	2	3	4	5	
		< 5%	5 – 10%	10-15%	15 – 20%	> 20%	
Frequency Ranking	5	>10 <sup>-2</sup>	Yellow	Red	Red	Red	Red
	4	10 <sup>-2</sup> > 10 <sup>-3</sup>	Green	Yellow	Red	Red	Red
	3	10 <sup>-3</sup> > 10 <sup>-4</sup>	Green	Green	Yellow	Red	Red
	2	10 <sup>-4</sup> > 10 <sup>-5</sup>	Green	Green	Green	Yellow	Red
	1	<10 <sup>-5</sup>	Green	Green	Tug	Green	Tanker

Gambar 7. 2. Risk Matrix Dropped Anchor Tahap Operasi SPM Skenario 1

Dropped Anchor Skenario 1		Consequence Ranking					
		1	2	3	4	5	
		< 5%	5 – 10%	10-15%	15 – 20%	> 20%	
Frequency Ranking	5	>10 <sup>-2</sup>	Yellow	Red	Red	Red	Red
	4	10 <sup>-2</sup> > 10 <sup>-3</sup>	Green	Yellow	Red	Red	Red
	3	10 <sup>-3</sup> > 10 <sup>-4</sup>	Green	Green	Yellow	Red	Red
	2	10 <sup>-4</sup> > 10 <sup>-5</sup>	Green	Green	Green	Yellow	Red
	1	<10 <sup>-5</sup>	Green	Green	Tug	Passenger	Cargo Tanker Container

Gambar 7. 3. Risk Matrix Dropped Anchor Tahap Operasi SPM Skenario 2

### 7.1.2. Dragged Anchor

Berdasarkan hasil perhitungan frekuensi dan konsekuensi, maka kategori risiko bahaya dragged anchor pada saat instalasi SPM dapat dilihat pada Gambar 7.4. Sedangkan kategori risiko pada tahap operasi skenario 1 dan skenario 2 dapat dilihat pada Gambar 7.5 dan Gambar 7.6. Berdasarkan risk matrix pada standar DNVGL RP F107, kapal tanker dan tug berada pada kondisi alarp pada saat instalasi SPM, begitu juga pada tahap operasi SPM skenario 1. Kategori risiko pada tahap operasi SPM untuk skenario 2 didapatkan bahwa kapal Passenger, Container, Tanker, Cargo, dan Tug berada pada kategori ALARP.

Dropped Anchor Skenario 2		Consequence Ranking				
		1	2	3	4	5
		< 5%	5 – 10%	10-15%	15 – 20%	> 20%
Frequency Ranking	5	>10 <sup>-2</sup>				
	4	10 <sup>-2</sup> > 10 <sup>-3</sup>				
	3	10 <sup>-3</sup> > 10 <sup>-4</sup>				
	2	10 <sup>-4</sup> > 10 <sup>-5</sup>				
	1	<10 <sup>-5</sup>				Tanker Tug

Gambar 7. 4. Risk Matrix Dragged Anchor Tahap Instalasi SPM

Dropped Anchor Skenario 2		Consequence Ranking				
		1	2	3	4	5
		< 5%	5 – 10%	10-15%	15 – 20%	> 20%
Frequency Ranking	5	>10 <sup>-2</sup>				
	4	10 <sup>-2</sup> > 10 <sup>-3</sup>				
	3	10 <sup>-3</sup> > 10 <sup>-4</sup>				
	2	10 <sup>-4</sup> > 10 <sup>-5</sup>				
	1	<10 <sup>-5</sup>				Tanker Tug

Gambar 7. 5. Risk Matrix Dragged Anchor Tahap Operasi SPM Skenario 1

Dropped Anchor Skenario 2		Consequence Ranking				
		1	2	3	4	5
		< 5%	5 – 10%	10-15%	15 – 20%	> 20%
Frequency Ranking	5	>10 <sup>-2</sup>				
	4	10 <sup>-2</sup> > 10 <sup>-3</sup>				
	3	10 <sup>-3</sup> > 10 <sup>-4</sup>				
	2	10 <sup>-4</sup> > 10 <sup>-5</sup>				
	1	<10 <sup>-5</sup>				Passenger Cargo Tanker Container Tug

Gambar 7. 6. Risk Matrix Draggged Anchor Tahap Operasi SPM Skenario 2

### 7.1.3. Ship Sinking

Penilaian risiko untuk bahaya *ship sinking* hanya dilakukan pada tahap operasi *SPM* karena tidak terdapat potensi tubrukan kapal dengan *storage tanker* yang dapat mengakibatkan kapal tenggelam. Hasil *risk matrix* untuk bahaya *ship sinking* pada tahap operasi *SPM* skenario satu dan skenario dua dapat dilihat pada gambar 7.7 dan Gambar 7.8. Berdasarkan pembacaan *risk matrix* tersebut dapat diketahui bahwa kapal *tanker* dan *tug* pada skenario satu berada pada kategori *ALARP*. Sedangkan pada skenario dua, kapal jenis *passenger, cargo, tanker, container, dan tug* juga berada pada kategori *ALARP*.

Dropped Anchor Skenario 2		Consequence Ranking				
		1	2	3	4	5
		< 5%	5 – 10%	10-15%	15 – 20%	> 20%
Frequency Ranking	5	>10 <sup>-2</sup>				
	4	10 <sup>-2</sup> > 10 <sup>-3</sup>				
	3	10 <sup>-3</sup> > 10 <sup>-4</sup>				
	2	10 <sup>-4</sup> > 10 <sup>-5</sup>				
	1	<10 <sup>-5</sup>				Tanker Tug

Gambar 7. 7. Risk Matrix Ship Sinking Tahap Operasi SPM Skenario 2

Dropped Anchor Skenario 2		Consequence Ranking				
		1	2	3	4	5
		< 5%	5 – 10%	10-15%	15 – 20%	> 20%
Frequency Ranking	5	>10 <sup>2</sup>				
	4	10 <sup>2</sup> > 10 <sup>3</sup>				
	3	10 <sup>3</sup> > 10 <sup>4</sup>				
	2	10 <sup>4</sup> > 10 <sup>5</sup>				
	1	<10 <sup>5</sup>				Passenger Cargo Tanker Container Tug

Gambar 7. 8. Risk Matrix Ship Sinking Tahap Operasi SPM Skenario 2

## 7.2. Mitigasi Risiko

Setelah tingkat risiko diketahui, mitigasi dilakukan untuk mengurangi tingkat risiko. Beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi tingkat risiko adalah:

1. Mengurangi probabilitas kejadian dengan cara mengurangi frekuensi tahunan jumlah kapal yang melintas di sekitar area instalasi dan operasi SPM,
2. Mengurangi tingkat konsekuensi pada pipa bawah laut dengan cara menggunakan sistem proteksi mekanis,
3. Memindahkan risiko (*risk transfer*) kepada pihak ketiga seperti perusahaan asuransi.

Pada kasus ini, tidak memungkinkan untuk mengurangi frekuensi tahunan kapal melewati pipa bawah laut. Hal tersebut dikarenakan area instalasi dan operasi SPM memang berada di dekat alur pelayaran. Selain itu, mengurangi frekuensi tahunan kapal tidak dapat menurunkan tingkat risiko pada kasus ini karena peringkat frekuensi berada pada peringkat 1.

*Risk transfer* kepada pihak ketiga tidak dapat menurunkan tingkat risiko pada pipa bawah laut. Proses tersebut hanya memindahkan risiko kepada pihak ketiga seperti perusahaan asuransi. Biaya yang dikeluarkan tergantung dari nilai aset yang diasuransikan. Opsi tersebut merupakan opsi yang paling mahal, karena membayarkan biaya secara berkala. Selain itu, ketika terjadi kecelakaan,

kompensasi yang dibayarkan oleh perusahaan asuransi hanya berdasarkan pada kerusakan yang terjadi dan tidak termasuk kerugian akibat dari terhentinya proses produksi.

Penggunaan sistem perlindungan mekanis hanya memerlukan sekali investasi untuk melindungi pipa bawah laut dalam jangka waktu tertentu dan relatif tidak memerlukan tindakan pemeliharaan. Pengurangan frekuensi tahunan kapal dan proses risk transfer belum menjadi pilihan yang terbaik, sehingga penggunaan sistem perlindungan mekanis mungkin dilakukan pada kasus ini untuk menurunkan tingkat risiko pada pipa bawah laut. Untuk memitigasi risiko kerusakan pipa bawah laut, penggunaan *concrete mattress* dan *rock dumping* dipertimbangkan sebagai metode perlindungan pada pipa bawah laut. Kedua metode tersebut merupakan penutup eksternal yang berfungsi untuk melindungi pipa bawah laut dari benturan benda.

#### 7.2.1. Concrete Mattress

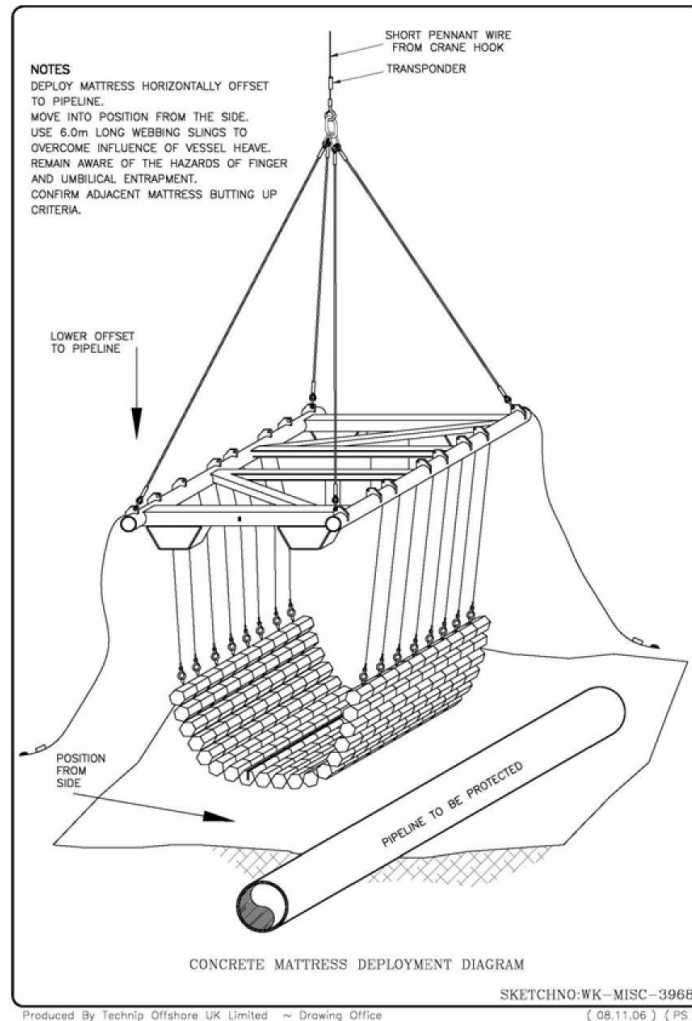
*Concrete mattress* merupakan salah satu perlindungan eksternal yang dapat diaplikasikan untuk melindungi pipa bawah laut dari dari benturan. *Concrete mattress* seperti yang ditampilkan pada Gambar 7.9. terdiri dari segmen-segmen beton yang dihubungkan dengan tali *polypropylene* sehingga memiliki bentuk yang fleksibel dan kekuatan yang tinggi untuk menyerap benturan. Instalasi *concrete mattress* pada pipa bawah laut dapat dilakukan dengan *frame* khusus menggunakan *crane barge*. Instalasi *concrete mattress* pada pipa bawah laut dapat dilihat pada gambar 7.10.



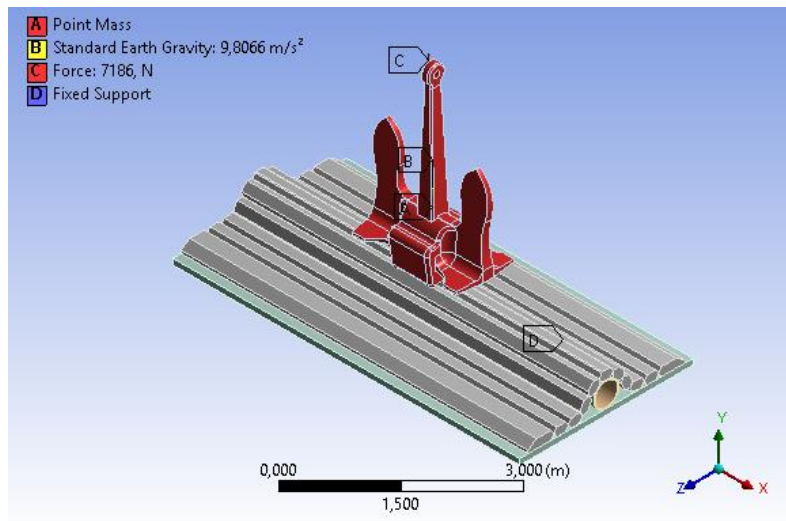
Gambar 7. 9. Concrete Mattress  
(Sumber: Pipeshield)

### Kajian Instalasi *Concrete Mattress*

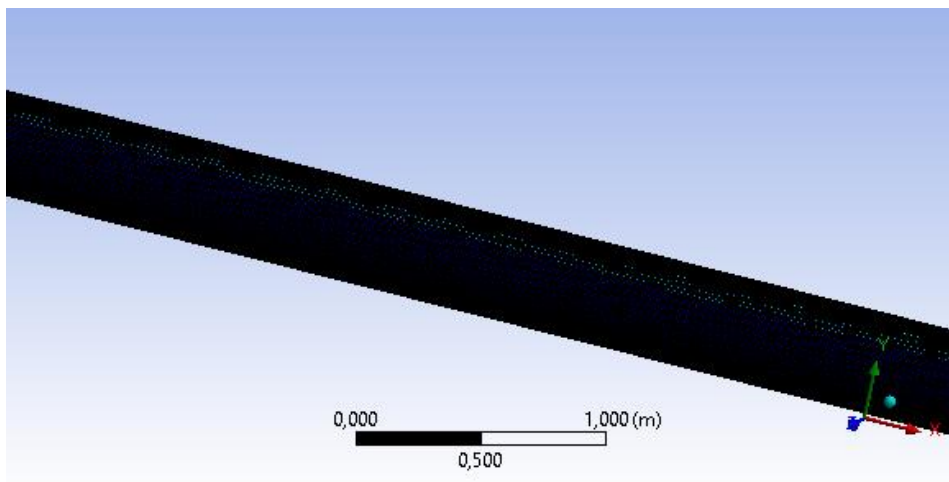
Kajian penggunaan *concrete mattress* sebagai sistem proteksi eksternal pada pipa bawah laut telah dilakukan dengan menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Simulasi *FEM* dilakukan dengan menjatuhkan jangkar kapal pada pipa bawah laut yang telah diinstal *concrete mattress* yang ditunjukkan pada gambar 7.11. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dengan *FEM*, pipa bawah laut tidak mengalami penyokan (*dent*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.12. Akan tetapi, pipa bawah laut mengalami penurunan elevasi seperti yang ditampilkan pada gambar 7.13. Hal tersebut kemungkinan dapat terjadi dikarenakan beban dari *concrete mattress* yang diaplikasikan pada pipa bawah laut.



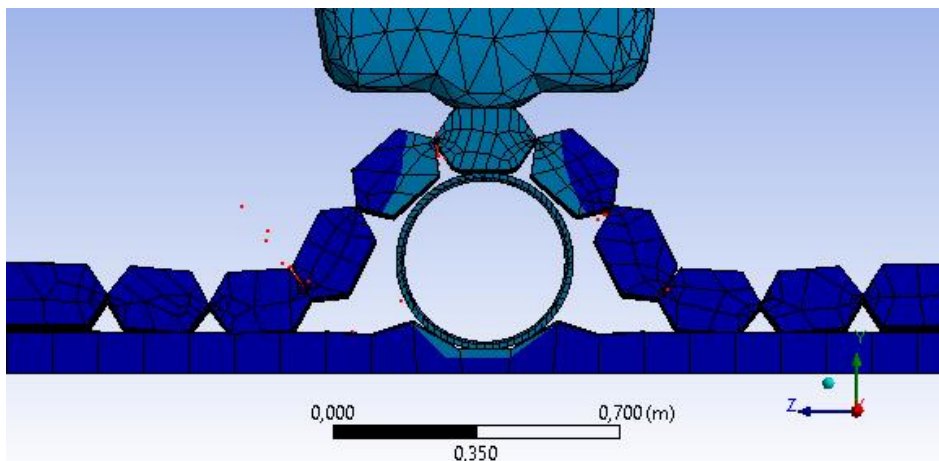
Gambar 7. 10. Instalasi *Concrete Mattress*



Gambar 7. 11. Simulasi FEM pada Concrete Mattress



Gambar 7. 12. Hasil Simulasi FEM pada Pipa (Concrete Mattress)

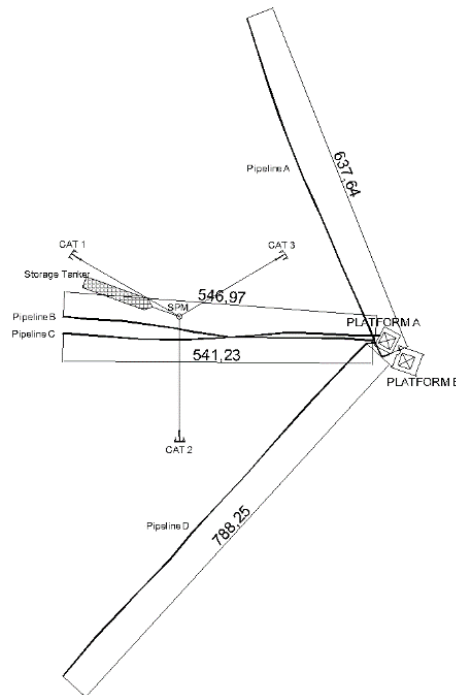


Gambar 7. 13. Hasil Simulasi FEM pada Concrete Mattress



### Analisa Biaya Material dan Instalasi Concrete Mattress

Selain faktor keamanan pada pipa bawah laut, biaya merupakan salah satu faktor yang penting dalam pemilihan sistem proteksi yang tepat untuk pipa bawah laut. *Concrete mattress* diinstal pada pipa bawah laut di sekitar operasi SPM dengan panjang 2,514.09 meter. Gambar 7.6. mempresentasikan layout pipa yang akan diinstal concrete mattress.



Gambar 7. 14. Layout Instalasi Concrete Mattress

Perhitungan biaya material *concrete mattress* dapat dilihat pada Tabel 7.5. Estimasi harga material concrete adalah USD 20 per *feet* (Kaiser, 2017). Nilai tersebut disesuaikan lagi berdasarkan nilai indeks perdagangan besar barang-barang konstruksi yang dikeluarkan oleh Badan Pusat Statistik (BPS). Sedangkan estimasi biaya pengiriman adalah 30% dari total harga *concrete mattress*. Berdasarkan perhitungan, didapatkan total harga material dan biaya pengiriman sebesar Rp. 3.212.851.249,00.

*Concrete mattress* dapat diinstal pada pipa bawah rata-rata dengan kecepatan 9 meter per jam (Yamba, 2010), sehingga estimasi waktu yang dibutuhkan untuk instalasi *concrete mattress* dengan panjang 2514.09 adalah 279.34 jam. Apabila jam kerja pegawai dalam satu hari adalah 8 jam, maka

instalasi *concrete mattress* diharapkan akan selesai sekitar 35 hari. Estimasi instalasi *concrete mattress* pada pipa bawah laut dapat dilihat pada Tabel 7.6. Berdasarkan perhitungan, dapat diketahui bahwa biaya instalasi *concrete mattress* adalah Rp 4.991.622.921,83.

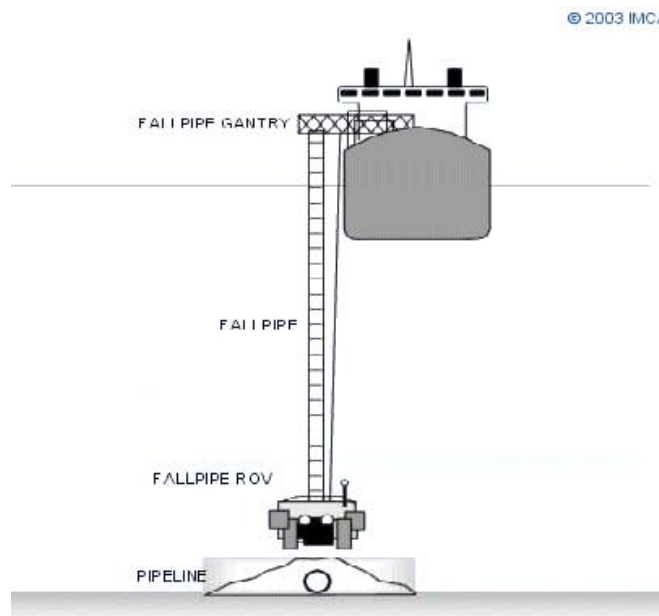
Tabel 7. 2. Estimasi Biaya Material Concrete Mattress

<b>Deskripsi</b>	<b>Persamaan</b>	<b>Perhitungan</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
Panjang	A	-	6	meter
Lebar	B	-	3	meter
Ketebalan	C	-	0.15	meter
Area	D	AxB	18	m <sup>2</sup>
Volume	E	CxD	2.7	m <sup>3</sup>
Density	F	-	2300	kg/m <sup>3</sup>
Panjang Pipa Bawah Laut	G	-	2514.09	meter
Jumlah Concrete Mattress	H	G/A	419.015	Set
Estimasi Harga Concrete Mattress per 6 meter	I	-	5,898,175.57	IDR
Total Harga Concrete Mattress	J	HxI	2,471,424,037.80	IDR
Biaya Pengiriman	K	Jx30%	741,427,211.34	IDR
Total Harga Material dan Biaya Pengiriman	L	J+K	3,212,851,249.15	IDR

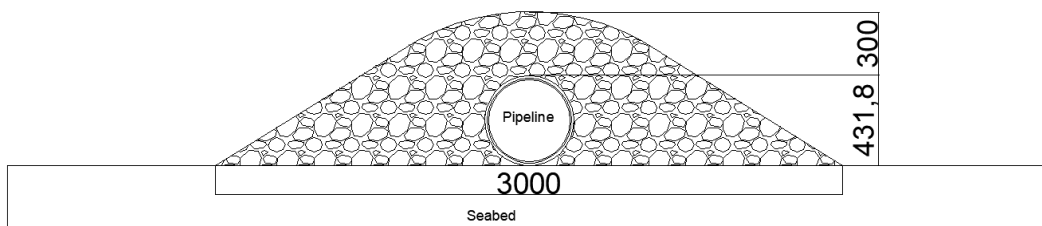


### 7.2.2. Rock Dumping

*Rock dumping* merupakan proteksi yang umum digunakan pada pipa bawah laut dari kondisi *floatation*, pergerakan lateral, *buckling*, dan proteksi mekanis terhadap bahaya jatuhnya benda (Bai and Bai, 2014). Pada daerah yang memiliki kecepatan arus laut yang tinggi, maka ukuran dari batu yang digunakan sebagai pelindung mekanis pada pipa bawah laut harus dipertimbangkan. Selain itu, pemeriksaan lebih lanjut juga harus dilakukan terkait dengan kemungkinan kerusakan yang terjadi pada pipa bawah laut akibat dari instalasi rock dumping. Proses instalasi rock dumping pada pipa bawah laut dilakukan rock dumping vessel dengan menggunakan fall pipe yang dapat dilihat pada gambar 7.7. Sedangkan dimensi dari rock dumping dapat dilihat pada gambar 7.8.



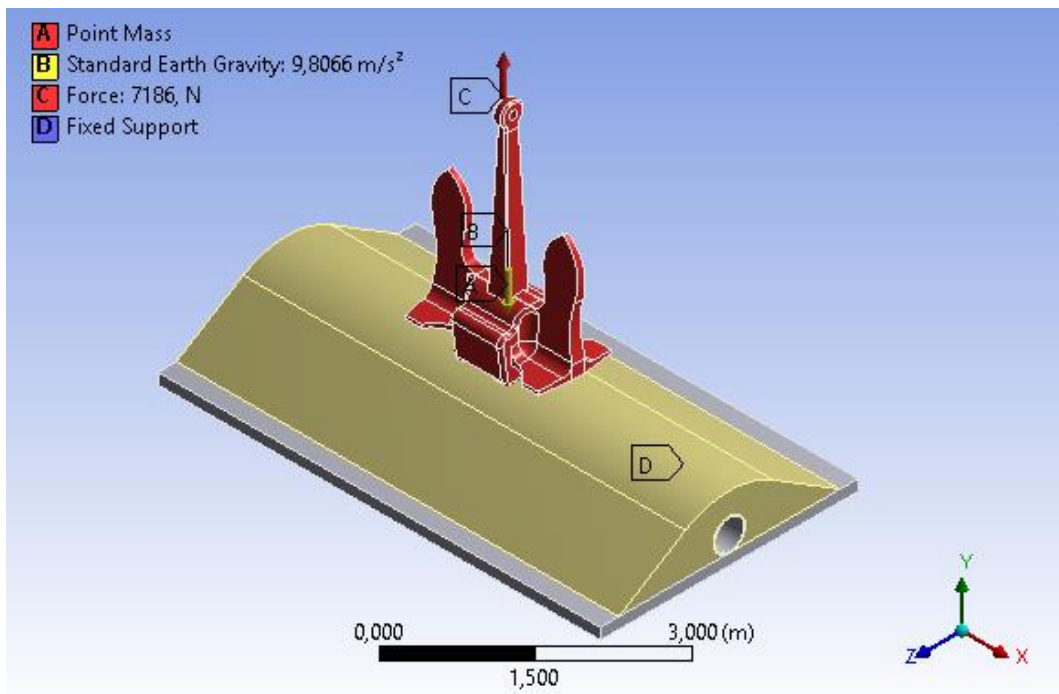
Gambar 7. 15. Prosedur Instalasi Rock Dumping  
(Sumber: IMCA)



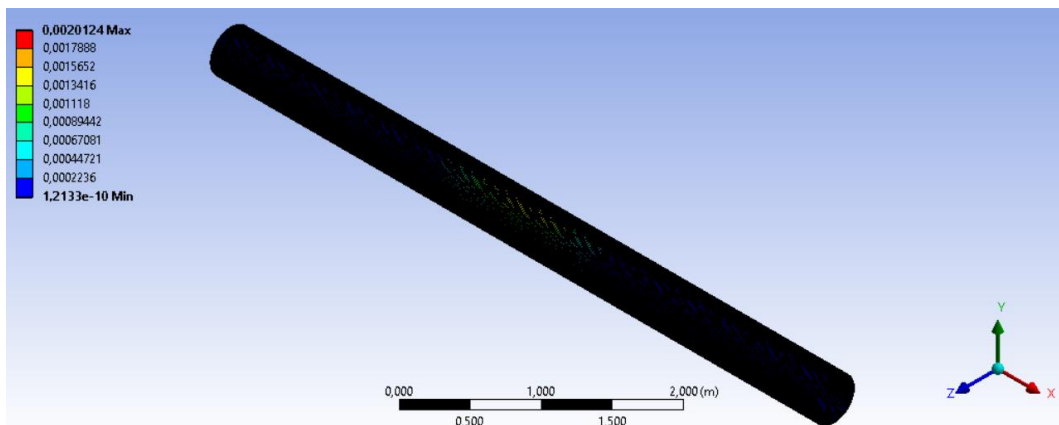
Gambar 7. 16. Dimensi Rock Dumping

### Kajian Instalasi *Rock Dumping*

Kajian instalasi *rock dumping* sebagai sistem proteksi eksternal pada pipa bawah laut telah dilakukan dengan menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Simulasi *FEM* dilakukan dengan menjatuhkan jangkar kapal diatas sistem proteksi *rock dumping* pada pipa bawah laut seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.9. Berdasarkan hasil simulasi *FEM*, kondisi pipa bawah laut seperti yang ditampilkan pada Gambar 7.18 tidak mengalami penyokan (*dent*) akibat dari jatuhnya jangkar. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *rock dumping* memiliki kemampuan yang bagus untuk melindungi pipa bawah laut.



Gambar 7. 17. Simulasi FEM pada *Rock Dumping*



Gambar 7. 18. Hasil Simulasi FEM pada Pipa (*Rock Dumping*)

### **Analisa Biaya Material dan Instalasi *Rock Dumping***

Biaya merupakan salah satu faktor yang paling penting untuk dipertimbangkan sebelum perusahaan mengambil sebuah keputusan. Oleh karena itu, diperlukan analisa biaya material dan instalasi rock dumping diperlukan sebagai pertimbangan untuk pemilihan sistem proteksi pada pipa bawah laut. Instalasi rock dumping pada pipa bawah laut di sekitar operasi SPM memiliki total panjang 2,514.09 meter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.6. Harga material dan biaya pengiriman batu yang digunakan untuk instalasi rock dumping dapat dilihat pada tabel 7.7. Berdasarkan harga pasar, batu yang digunakan untuk instalasi rock dumping adalah Rp. 210.000,00 per m<sup>3</sup>, sedangkan biaya kirim material diasumsikan 30% dari harga material. Sehingga, berdasarkan perhitungan didapatkan total harga material dan biaya pengiriman sebesar Rp. 976.671.169,00.

Tabel 7. 4. Estimasi Biaya Material Rock Dumping

<b>Deskripsi</b>	<b>Persamaan</b>	<b>Perhitungan</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
Panjang Pipa Bawah Laut	A	-	2,514	meter
Luasan Penampang	B	-	1,423	m <sup>2</sup>
Volume Batu yang Diperlukan	C	AxB	3,578	m <sup>3</sup>
Densitas Batu	D	-	2,500	kg/m <sup>3</sup>
Total Berat Batu	E	CxD	8,943,875	kg
			8,944	Ton
Estimasi Harga Batu per m <sup>3</sup>	F	-	210,000	IDR
Total Harga Batu	G	-	751,285,515	IDR
Biaya Pengiriman	H	Gx30%	225,385,654	IDR
Total Harga Material dan Biaya Pengiriman	I	G+H	976,671,169	IDR

Instalasi *rock dumping* diasumsikan dengan kecepatan 20 meter per jam, sehingga estimasi waktu yang dibutuhkan untuk instalasi *rock dumping* dengan panjang 2514.09 adalah 125.70 jam. Apabila jam kerja pegawai dalam satu hari diasumsikan selama 8 jam, maka instalasi *rock dumping* diharapkan akan selesai sekitar 16 hari. Kebutuhan batu sebanyak 8,944 ton akan diangkut dengan *rock dumping vessel* dengan kapasitas muatan maksimum 12,000 ton, sehingga tidak diperlukan gudang untuk menyimpan material. Estimasi biaya instalasi *rock dumping* pada pipa bawah laut dapat dilihat pada Tabel 7.8. Berdasarkan perhitungan, dapat diketahui bahwa biaya instalasi *rock dumping*

adalah Rp. 2,899,839,125.00. Sehingga, total biaya yang dikeluarkan perusahaan untuk material dan biaya instalasi adalah Rp 3,876,510,294.

### **7.2.3. Analisa Keuntungan dan Kerugian**

Keuntungan dan kerugian dari masing-masing sistem proteksi eksternal pada pipa bawah laut yang telah dibahas diatas adalah sebagai berikut:

#### **A. Concrete Mattress**

- **Keuntungan:**

1. Dapat diinstal dengan mudah,
2. Concrete mattress dapat menyesuaikan dengan bentuk pipa dan kontur dasar laut,
3. Berdasarkan simulasi *FEM*, *concrete mattress* memiliki kemampuan yang bagus untuk melindungi pipa bawah laut,
4. Dapat diinstal pada area dengan arus yang kencang,
5. Penggunaan concrete mattress cenderung tidak memerlukan tindakan perawatan.

- **Kerugian:**

1. Kesalahan pada saat instalasi dapat mengakibatkan kerusakan pada pipa bawah laut,
2. Memerlukan biaya yang mahal untuk pembuatan dan instalasi concrete mattress,
3. Belum ada produsen lokal yang memproduksi concrete mattress, sehingga memerlukan biaya pengiriman yang mahal untuk mengirim concrete mattress dari luar negeri.

#### **B. Rock Dumping**

- **Keuntungan:**

1. Dapat diinstal dengan mudah,
2. Material mudah didapatkan,
3. Biaya material dan instalasi lebih murah dibandingkan dengan concrete mattress,
4. Berdasarkan simulasi *FEM*, *rock dumping* memiliki kemampuan yang bagus untuk melindungi pipa bawah laut,

5. Penggunaan *rock dumping* cenderung tidak memerlukan tindakan perawatan,

- **Kerugian:**

1. Kesalahan pada saat instalasi dapat mengakibatkan kerusakan pada pipa bawah laut,
2. Mudah terbawa arus laut.



Tabel 7. 5. Estimasi Biaya Instalasi Rock Dumping

Alternative 2: Rock Dumping								
Activity	Type of Equipments / Personnel	Total		Rates		Total Hours	Total Day	Total Cost
		Equipments	Personnel	Hourly	Fix			
<b>A. Port</b>								
Loading to vessel	Conveyor	2		Rp 875,000		24.00		Rp 42,000,000.00
	Operator		2	Rp 22,829		24.00		Rp 1,095,792.00
<b>B. Installation Zone</b>								
Shipment to Site	Rock Dumping Vessel	1			Rp 175,000,000		15.71	Rp 2,749,250,000.00
ROV	ROV	1			Rp 5,517,160		15.71	Rp 86,674,583.60
	ROV Operators		1	Rp 50,000		125.70		Rp 6,285,000
Engineering	Enginers		2	Rp 50,000		125.70		Rp 12,570,000
<b>Total Workers</b>			<b>5</b>					
<b>C. Others</b>								
Food and Drink			5		Rp 25,000		15.71	Rp 1,963,750.00
<b>TOTAL INSTALLATION COST</b>								
								Rp 2,899,839,125.60

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB VIII

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 8.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisa terkait dengan penilaian risiko pada pipa bawah laut akibat dari instalasi dan operasi Single Point Mooring (SPM), maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada tahap instalasi Single Point Mooring (SPM) memiliki potensi risiko berupa *dropped anchor* dan *dragged anchor*. Sedangkan pada tahap operasi SPM memiliki potensi risiko berupa *dropped anchor*, *dragged anchor*, dan *ship sinking*.
2. Berdasarkan hasil dari *risk matrix* bahaya *dropped anchor*, pada tahap instalasi SPM kapal jenis *Tug* berada pada tingkat risiko *acceptable*, kapal *tanker* berada pada kondisi *ALARP* dan pada tahap operasi SPM, kapal jenis *Tug* dan *Passenger* berada pada tingkat risiko *acceptable* dan kapal jenis *cargo*, *tanker*, dan *container* berada pada kondisi *ALARP*. Sedangkan hasil dari *risk matrix* pada bahaya *dragged anchor* dan *ship sinking*, kapal jenis *passenger*, *tug*, *cargo*, *tanker*, dan *container* berada pada tingkat risiko *ALARP*.
3. Berdasarkan simulasi dengan *software Finite Element Method (FEM)*, *concrete coating* pada pipa bawah laut mengalami keretakan akibat dari *dropped anchor* pada semua jenis kapal. Sedangkan penyokan (*dent*) yang terjadi pada pipa bawah laut akibat dari *dropped anchor* kapal jenis *passenger*, *tug*, *cargo*, *tanker*, dan *container* adalah 58.036 mm, 44.33 mm, 141.71 mm, 193.27 mm, 122.52 mm.
4. Berdasarkan penilaian risiko yang telah dilakukan, terdapat kategori *ALARP* pada bahaya *dropped anchor*, *dragged anchor* dan *ship sinking*. Meskipun tidak wajib untuk dilakukan mitigasi, akan tetapi tetap disarankan untuk melengkapi pipa bawah laut dengan proteksi eksternal.
5. Berdasarkan analisa biaya, proteksi eksternal berupa *rock dumping* disarankan untuk melindungi pipa bawah laut karena memiliki kemampuan yang baik untuk melindungi pipa bawah laut dari benturan benda dan

memiliki total biaya material dan instalasi yang lebih murah dibandingkan dengan *concrete mattress*, yaitu sebesar Rp. 3,876,510,294.

## **8.2. Saran**

Berdasarkan hasil analisa dan kesimpulan yang didapatkan, maka saran terkait dengan permasalahan yang diangkat dalam tesis ini adalah:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait dengan pembobotan penyebab terjadinya loss of control pada kapal untuk metode Bayesian Network.
2. Perlu dilakukan analisa lebih lanjut yang membandingkan hasil simulasi beberapa software ataupun membandingkan simulasi software dengan eksperimen laboratorium.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adi, T.J.W., 2013. Pemodelan Probabilistik untuk Memprediksi Risiko Kebakaran Menggunakan Hirid BBN-Kriging 9.
- AL-Warthan, A.I., Chung, J.S., Huttelmaier, H.P., Mustoe, G.G.W., 1993. Effect of Ship Anchor Impact in Offshore Pipeline. International Offshore and Polar Engineering Conference.
- Arief, I.S., Aldara, D.R., 2018. Preliminary Design of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Axial Turbine for Laboratory Scale, in: 2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). Presented at the 2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), IEEE, Singapore, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ACEPT.2018.8610662>
- Artana, K., Ariana, I.M., Dinariyana, A., Handani, D.W., 2016. Subsea Gas Pipeline Risk Assessment during Hot Tapping Installation. *J. Technol. Sci.* 2.
- Artana, K.B., 2009. Penilaian Resiko Pipa Gas Bawah Laut Ujung Pangkah-Gresik Dengan Standard DNV RP F107. *J. Tek. Mesin* 9, 15.
- Artana, K.B., Dinariyana, A.A.B., 2013. Teori Keandalan Sistem dan Aplikasinya. Guna Widya, Surabaya.
- Babicz, J., 2015. WÄRTSILÄ Encyclopedia of Ship Technology, Second Edition. ed. WÄRTSILÄ CORPORATION, Helsinki.
- Bai, Q., Bai, Y., 2014. Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation, First. ed. Elsevier, United Kingdom.
- Bai, Y., 2001. Pipelines and Risers. Elsevier Science Ltd, UK.
- Bhandari, J., Abbassi, R., Garaniya, V., Khan, F., 2015. Risk analysis of deepwater drilling operations using Bayesian network. *J. Loss Prev. Process Ind.* 38, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.08.004>
- Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M., Ciancamerla, E., 2001. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 71, 249–260. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00077-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00077-6)
- BPPT, 2018. Indonesia Energy Outlook 2018. BPPT.
- Cai, B., Liu, Y., Liu, Z., Tian, X., Zhang, Y., Ji, R., 2013. Application of Bayesian Networks in Quantitative Risk Assessment of Subsea Blowout Preventer Operations: Bayesian Networks in Quantitative Risk Assessment. *Risk Anal.* 33, 1293–1311. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01918.x>
- DJA, 2018. Informasi APBN 2019: APBN Untuk Mendorong Investasi dan Daya Saing Melalui Pembangunan Sumber Daya Manusia. Kementerian Keuangan, Jakarta.
- DNVGL, 2017a. DNVGL RP F107: Risk Assessment of Pipeline Protection.
- DNVGL, 2017b. DNVGL-ST-F101: Submarine pipeline systems.
- DNVGL, 2003. Risk Assessment-Large Passenger Ships-Navigation.
- Fan, Z., Yue, Q., Qi, X., Wang, Y., 2015. Study on the dynamic characteristics of a soft yoke mooring system for floating production storage and offloading

- based on field measurements. *Adv. Mech. Eng.* 7, 168781401557245. <https://doi.org/10.1177/1687814015572459>
- Fikri, M.H.C., Artana, K.B., Ariana, M., Sambodho, K., 2014. Collision Risk assessment of Vessel and Offshore Platform: Case Study of Platform Construction Project at Bintuni Bay-West Papua. *Int. Symp. Marit. Sci.* 6.
- Flory, J.F., Mascenik, J.F., Pedersen, K.I., 1972. The Single Anchor Leg Mooring, in: *Offshore Technology Conference*. Presented at the Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, Houston, Texas. <https://doi.org/10.4043/1644-MS>
- Fu, Z., James Lewis, T., Kirby, R.M., Whitaker, R.T., 2014. Architecting the finite element method pipeline for the GPU. *J. Comput. Appl. Math.* 257, 195–211. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2013.09.001>
- Girgin, S., Necci, A., Krausmann, E., 2019. Dealing with cascading multi-hazard risks in national risk assessment: The case of Natech accidents. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 101072. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101072>
- Harahap, R.G., Rosyid, D.M., 2010. Studi Peran Keandalan Manusia dalam Tubrukan Kapal (Studi Kasus Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya) 10.
- Hvam, C., Bruschi, R., Tominez, M., Vitali, L., 1990. Risk of Pipe from Dragging Anchor. Presented at the European Offshore Mechanics Symposium, Norway.
- Jonathan Collins, Remi Morvan, Tim Whelan, 2015. Maintaining Aging Export System - Replace, Maintain or Renew? *Soc. Pet. Eng.*
- Kaiser, M.J., 2017. Offshore pipeline construction cost in the U.S. Gulf of Mexico. *Mar. Policy* 82, 147–166. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.05.003>
- Kawsar, Md.R.U., Youssef, S.A., Faisal, M., Kumar, A., Seo, J.K., Paik, J.K., 2015. Assessment of dropped object risk on corroded subsea pipeline. *Ocean Eng.* 106, 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.056>
- Koto, J., Putrawidjaja, M., 2018. Subsea Pipeline Damaged in Balikpapan Bay Caused by Anchor Load 7.
- Kusuma, D., 2017. Manajemen Risiko Pipa Migas Bawah Laut Dampak Jalur Pelayaran Kapal Peti Kemas Patimbangan Menggunakan Metode Kent Muhlbauer dan Analytic Hierarchy Process (AHP) di Lapangan Arjuna. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Li, X., Chen, G., Zhu, H., 2016. Quantitative risk analysis on leakage failure of submarine oil and gas pipelines using Bayesian network. *Process Saf. Environ. Prot.* 103, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.006>
- Liu, Y., Hu, H., Zhang, D., 2013. Probability Analysis of Damage to Offshore Pipeline by Ship Factors. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2326, 24–31. <https://doi.org/10.3141/2326-04>
- Muhlbauer, W.K., 2004. *Pipeline Risk Management Manual*, 3rd ed. Gulf Professional Publishing, USA.
- Mulder, P., Tembe, J., 2008. Rural electrification in an imperfect world: A case study from Mozambique. *Energy Policy* 36, 2785–2794. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.05.018>
- Mulyadi, Y., Kobayashi, E., Wakabayashi, N., Pitana, T., Wahyudi, 2014. Development of ship sinking frequency model over Subsea Pipeline for

- Madura Strait using AIS data. *WMU J. Marit. Aff.* 13, 43–59. <https://doi.org/10.1007/s13437-013-0049-2>
- Mulyadi, Y., Wakabayashi, N., Wahyudi, Kobayashi, E., Pitana, T., Prasetyo, E., 2013. Estimation Method for Draggged Anchor Accident Frequency on Subsea Pipelines in Busy Port Areas.
- Odina, L., Hardjanto, F., Walker, A., 2018. Effects of impact loads on CRA-Lined pipelines. *Ocean Eng.* 166, 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.014>
- Padova, A.D., Zuliani, C., Tallone, F., 2018. DRAGGED ANCHORS INTERACTION SCENARIOS: DETAILED FREQUENCY ANALYSIS FOR PIPELINE DESIGN. Los Angel. 11.
- Palmer, A.C., King, R.A., 2008. Subsea pipeline engineering, 2. ed. ed. PennWell, Tulsa, Okla.
- Pecher, A., Foglia, A., Kofoed, J., 2014. Comparison and Sensitivity Investigations of a CALM and SALM Type Mooring System for Wave Energy Converters. *J. Mar. Sci. Eng.* 2, 93–122. <https://doi.org/10.3390/jmse2010093>
- Pratiwi, E., Artana, K.B., Dinariyana, A.A.B., Ariana, I.M., Handani, D.W., 2019. Risk Assessment of Subsea Gas Pipeline Due to Port Development Located at Narrow Channel. *Asian J. Sci. Res.* <https://doi.org/10.3923/ajsr.2019.137.150>
- Putra, A.E., Hidayat, N., Cholissodin, I., 2018. Implementasi Metode Bayesian Network Untuk Diagnosis Penyakit Kambing (Studi Kasus : UPTD Pembibitan Ternak dan Hijauan Makanan Ternak Singosari Malang) 11.
- Putranta, D.D., Artana, K.B., Sambodho, K., Ariana, I.M., 2013. Risk Assessment on Subsea Gas Pipelines Located at Water Basin of Jetty Area due to Dredging and Operation After Dredging, in: Volume 2A: Structures, Safety and Reliability. Presented at the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, ASME, Nantes, France, p. V02AT02A031. <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10358>
- PV Eng, 2018. Types of Stresses in Piping Systems. URL <https://pveng.com/home/pipe-stress-analysis/types-of-stresses-in-piping-systems/> (accessed 12.8.19).
- Sari, A., Azimov, U., Nguyen, H., 2016. Dropped Object Assessment of Subsea Asset and Pipeline Protection System. Presented at the Offshore Technology Conference.
- Soegiono, 2007. Pipa Laut. Airlangga University Press, Surabaya.
- Spouge, J., 1999. A Guide to Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations. DNV Technica.
- Sulaiman, N.S., Tan, H., 2014. Third party damages of offshore pipeline 6.
- Uusitalo, L., 2007. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecol. Model.* 203, 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.11.033>
- Yamba, L., 2010. Risk Assessment for Subsea Gas Pipeline to Mitigate the Potential Hazard due to the Impact of the Sinking Vessel Using DNV RP F107 Standard. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Yu, J., Zhao, Y., Li, T., Yu, Y., 2016. A Three-dimensional Numerical Method to Sudy Pipeline Deformations due to Transverse Impacts from Dropped

Anchors.

Thin-Walled Structures.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2016.02.006>

Yudhistira, A.W., 2017. Potret Hulu Migas Indonesia: Titik Nadir Investasi? URL <https://katadata.co.id/infografik/2017/07/21/potret-hulu-migas-indonesia-titik-nadir-investasi/21> (accessed 2.8.19).



## **LAMPIRAN**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LAMPIRAN 1**  
**PERHITUNGAN PROBABILITAS**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## Perhitungan Probabilitas pada Tahap Instalasi SPM

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	58.7	58.7	58.7
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	1.517	1.517	1.517
7	G		Angular Deviation	°	10	10	10
8	H		Lateral Deviation	m	9.330	9.33023535	9.33023535
9	I	$D+2E+2F+2H$	Lebar CADZ (Critical Anchor Damage Zone)	m	22.152	22.152	22.152
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADZ	detik	628.6528423	314.326421	209.550947
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	16	16	16
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADZ	detik	10058.44548	5029.22274	3352.81516
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan melewati CADZ	-	0.000318951	0.00015948	0.00010632
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADZ	-	0.005408123	0.00540812	0.00540812

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CADZ dan probabilitas kapal di CADZ pada bahaya *dropped anchor* kapal jenis *Tug* pada tahap instalasi SPM.

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	152	152	152
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.15	2.15	2.15
7	G		Angular Deviation	°	5	5	5
8	H		Lateral Deviation	m	4.700	4.70046501	4.70046501
9	I	$D+2E+2F+2H$	Lebar CADZ (Critical Anchor Damage Zone)	m	14.158	14.158	14.158
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADZ	detik	1291.94338	645.97169	430.647793
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	2	2	2
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADZ	detik	2583.88676	1291.94338	861.295587
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan kapal di CADZ	-	8.19345E-05	4.0967E-05	2.7312E-05
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADZ	-	0.00345657	0.00345657	0.00345657

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADZ* dan probabilitas kapal di *CADZ* pada bahaya *dropped anchor* kapal jenis *Tanker* pada tahap instalasi *SPM*.

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	58.7	58.7	58.7
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	1.517	1.517	1.517
7	G		Angular Deviation	°	10	10	10
8	H		Lateral Deviation	m	9.33	9.33	9.33
9	I	$27F+2H$	Lebar CADRZ (Critical Anchor Drag Zone)	m	59.619	59.619	59.619
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADRZ	detik	919.979	459.990	306.660
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	16	16	16
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADRZ	detik	14719.670	7359.835	4906.557
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan kapal di CADRZ	-	0.000466758	0.000233379	0.000155586
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADRZ	-	0.01455553	0.01455553	0.01455553

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADRZ* dan probabilitas kapal di *CADRZ* pada bahaya *dragged anchor* kapal jenis *Tanker* pada tahap instalasi *SPM*.

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	152	152	152
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.15	2.15	2.15
7	G		Angular Deviation	°	5	5	5
8	H		Lateral Deviation	m	4.70	4.70	4.70
9	I	27F+2H	Lebar CADRZ (Critical Anchor Drag Zone)	m	67.451	67.451	67.451
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	(A+I)/B	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADRZ	detik	1706.315	853.158	568.772
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	2	2	2
13	M	K*L	Total Waktu kapal di CADRZ	detik	3412.631	1706.315	1137.544
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	M/N	Probabilitas tahunan kapal di CADRZ	-	0.000108214	5.41069E-05	3.60713E-05
16	P	I/J	Probabilitas kapal di CADRZ	-	0.01646751	0.01646751	0.01646751

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADRZ* dan probabilitas kapal di *CADRZ* pada bahaya *dragged anchor* kapal jenis *Tanker* pada tahap instalasi *SPM*.



## Perhitungan Probabilitas pada Tahap Operasi SPM

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	58.7	58.7	58.7
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	1.517	1.517	1.517
7	G		Angular Deviation	°	10	10	10
8	H		Lateral Deviation	m	9.330	9.33023535	9.33023535
9	I	$D+2E+2F+2H$	Lebar CADZ (Critical Anchor Damage Zone)	m	22.152	22.152	22.152
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADZ	detik	628.652842	314.326421	209.550947
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	24	24	24
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADZ	detik	15087.6682	7543.83411	5029.22274
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan kapal di CADZ	-	0.00047843	0.00023921	0.00015948
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADZ	-	0.00540812	0.00540812	0.00540812

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CADZ dan probabilitas kapal di CADZ pada bahaya *dropped anchor* kapal jenis *Tug* pada tahap Operasi SPM skenario 1 (kapal yang digunakan dalam operasi SPM).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	152	152	152
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.15	2.15	2.15
7	G		Angular Deviation	°	5	5	5
8	H		Lateral Deviation	m	4.700	4.70046501	4.70046501
9	I	$D+2E+2F+2H$	Lebar CADZ (Critical Anchor Damage Zone)	m	14.158	14.158	14.158
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADZ	detik	1291.94338	645.97169	430.647793
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	10	10	10
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADZ	detik	12919.4338	6459.7169	4306.47793
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan kapal di CADZ	-	0.00040967	0.00020484	0.00013656
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADZ	-	0.00345657	0.00345657	0.00345657

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADZ* dan probabilitas kapal di *CADZ* pada bahaya *dropped anchor* kapal jenis *Tanker* pada tahap Operasi *SPM* skenario 1 (kapal yang digunakan dalam operasi *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	71.82	71.82	71.82
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	1.447	1.447	1.447
7	G		Angular Deviation	°	10	10	10
8	H		Lateral Deviation	m	9.330	9.33023535	9.33023535
9	I	$D+2E+2F+2H$	Lebar CADZ (Critical Anchor Damage Zone)	m	22.012	22.012	22.012
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADZ	detik	729.577336	364.788668	243.192445
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	5432	5432	5432
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADZ	detik	3963064.09	1981532.04	1321021.36
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan kapal di CADZ	-	0.12566794	0.06283397	0.04188931
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADZ	-	0.00537394	0.00537394	0.00537394

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CADZ dan probabilitas kapal di CADZ pada bahaya *dropped anchor* kapal jenis *Passenger* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	126.65	126.65	126.65
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.008	2.008	2.008
7	G		Angular Deviation	°	5	5	5
8	H		Lateral Deviation	m	4.7	4.7	4.7
9	I	$D+2E+2F+2H$	Lebar CADZ (Critical Anchor Damage Zone)	m	13.874	13.874	13.874
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADZ	detik	1092.62917	546.314584	364.209723
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	11763	11763	11763
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADZ	detik	12852596.9	6426298.46	4284198.97
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan kapal di CADZ	-	0.40755317	0.20377659	0.13585106
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADZ	-	0.00338724	0.00338724	0.00338724

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CADZ dan probabilitas kapal di CADZ pada bahaya *dropped anchor* kapal jenis *Cargo* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	152	152	152
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C	-	Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.15	2.15	2.15
7	G	-	Angular Deviation	°	5	5	5
8	H	-	Lateral Deviation	m	4.700	4.70046501	4.70046501
9	I	$D+2E+2F+2H$	Lebar CADZ (Critical Anchor Damage Zone)	m	14.158	14.158	14.158
10	J	-	Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADZ	detik	1291.94338	645.97169	430.647793
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	7677	7677	7677
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADZ	detik	9918249.33	4959124.66	3306083.11
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan kapal di CADZ	-	0.31450562	0.15725281	0.10483521
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADZ	-	0.00345657	0.00345657	0.00345657

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CADZ dan probabilitas kapal di CADZ pada bahaya *dropped anchor* kapal jenis *Tanker* pada tahap Operasi SPM skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar SPM).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	123.5	123.5	123.5
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.008	2.008	2.008
7	G		Angular Deviation	°	5	5	5
8	H		Lateral Deviation	m	4.700	4.70046501	4.70046501
9	I	$D+2E+2F+2H$	Lebar CADZ (Critical Anchor Damage Zone)	m	13.874	13.874	13.874
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADZ	detik	1068.13671	534.068354	356.045569
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	9854	9854	9854
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADZ	detik	10525419.1	5262709.56	3508473.04
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan kapal di CADZ	-	0.33375885	0.16687943	0.11125295
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADZ	-	0.00338724	0.00338724	0.00338724

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CADZ dan probabilitas kapal di CADZ pada bahaya *dropped anchor* kapal jenis *Container* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	58.7	58.7	58.7
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C	-	Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	1.517	1.517	1.517
7	G	-	Angular Deviation	°	10	10	10
8	H	-	Lateral Deviation	m	9.330	9.33023535	9.33023535
9	I	$D+2E+2F+2H$	Lebar CADZ (Critical Anchor Damage Zone)	m	22.152	22.152	22.152
10	J	-	Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADZ	detik	628.652842	314.326421	209.550947
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	1262	1262	1262
13	M	$K*L$	Total Waktu kapal di CADZ	detik	793359.887	396679.943	264453.296
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	$M/N$	Probabilitas tahunan kapal di CADZ	-	0.02515728	0.01257864	0.00838576
16	P	$I/J$	Probabilitas kapal di CADZ	-	0.00540812	0.00540812	0.00540812

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CADZ dan probabilitas kapal di CADZ pada bahaya *dropped anchor* kapal jenis *Tug* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	58.7	58.7	58.7
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	1.517	1.517	1.517
7	G		Angular Deviation	°	10	10	10
8	H		Lateral Deviation	m	9.33	9.33	9.33
9	I	27F+2H	Lebar CADRZ (Critical Anchor Drag Zone)	m	59.619	59.619	59.619
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	(A+I)/B	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADRZ	detik	919.979	459.990	306.660
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	24	24	24
13	M	K*L	Total Waktu kapal di CADRZ	detik	22079.506	11039.753	7359.835
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	M/N	Probabilitas tahunan kapal di CADRZ	-	0.000700137	0.000350068	0.000233379
16	P	I/J	Probabilitas kapal di CADRZ	-	0.01455553	0.01455553	0.01455553

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADRZ* dan probabilitas kapal di *CADRZ* pada bahaya *dragged anchor* kapal jenis *Tug* pada tahap Operasi *SPM* skenario 1 (kapal yang digunakan dalam operasi *SPM*).



No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	152	152	152
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.15	2.15	2.15
7	G		Angular Deviation	°	5	5	5
8	H		Lateral Deviation	m	4.70	4.70	4.70
9	I	27F+2H	Lebar CADRZ (Critical Anchor Drag Zone)	m	67.451	67.451	67.451
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	(A+I)/B	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADRZ	detik	1706.315	853.158	568.772
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	10	10	10
13	M	K*L	Total Waktu kapal di CADRZ	detik	17063.154	8531.577	5687.718
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	M/N	Probabilitas tahunan kapal di CADRZ	-	0.000541069	0.000270535	0.000180356
16	P	I/J	Probabilitas kapal di CADRZ	-	0.01646751	0.01646751	0.01646751

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADRZ* dan probabilitas kapal di *CADRZ* pada bahaya *dragged anchor* kapal jenis *Tanker* pada tahap Operasi *SPM* skenario 1 (kapal yang digunakan dalam operasi *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	71.82	71.82	71.82
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	1.447	1.447	1.447
7	G		Angular Deviation	°	10	10	10
8	H		Lateral Deviation	m	9.33	9.33	9.33
9	I	27F+2H	Lebar CADRZ (Critical Anchor Drag Zone)	m	57.729	57.729	57.729
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	(A+I)/B	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADRZ	detik	1007.297	503.648	335.766
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	5432	5432	5432
13	M	K*L	Total Waktu kapal di CADRZ	detik	5471637.145	2735818.572	1823879.048
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	M/N	Probabilitas tahunan kapal di CADRZ	-	0.173504476	0.086752238	0.057834825
16	P	I/J	Probabilitas kapal di CADRZ	-	0.01409411	0.01409411	0.01409411

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADRZ* dan probabilitas kapal di *CADRZ* pada bahaya *dragged anchor* kapal jenis *Passenger* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	126.65	126.65	126.65
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.008	2.008	2.008
7	G		Angular Deviation	°	5	5	5
8	H		Lateral Deviation	m	4.70	4.70	4.70
9	I	27F+2H	Lebar CADRZ (Critical Anchor Drag Zone)	m	63.617	63.617	63.617
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	(A+I)/B	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADRZ	detik	1479.399	739.699	493.133
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	11763	11763	11763
13	M	K*L	Total Waktu kapal di CADRZ	detik	17402165.428	8701082.714	5800721.809
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	M/N	Probabilitas tahunan kapal di CADRZ	-	0.551819046	0.275909523	0.183939682
16	P	I/J	Probabilitas kapal di CADRZ	-	0.01553148	0.01553148	0.01553148

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADRZ* dan probabilitas kapal di *CADRZ* pada bahaya *dragged anchor* kapal jenis *Cargo* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	152	152	152
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.15	2.15	2.15
7	G		Angular Deviation	°	5	5	5
8	H		Lateral Deviation	m	4.70	4.70	4.70
9	I	27F+2H	Lebar CADRZ (Critical Anchor Drag Zone)	m	67.451	67.451	67.451
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	(A+I)/B	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADRZ	detik	1706.315	853.158	568.772
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	7677	7677	7677
13	M	K*L	Total Waktu kapal di CADRZ	detik	13099383.333	6549691.666	4366461.111
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	M/N	Probabilitas tahunan kapal di CADRZ	-	0.415378721	0.20768936	0.138459574
16	P	I/J	Probabilitas kapal di CADRZ	-	0.01646751	0.01646751	0.01646751

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADRZ* dan probabilitas kapal di *CADRZ* pada bahaya *dragged anchor* kapal jenis *Tanker* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	123.5	123.5	123.5
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	2.008	2.008	2.008
7	G		Angular Deviation	°	5	5	5
8	H		Lateral Deviation	m	4.70	4.70	4.70
9	I	27F+2H	Lebar CADRZ (Critical Anchor Drag Zone)	m	63.617	63.617	63.617
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	(A+I)/B	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADRZ	detik	1454.906	727.453	484.969
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	9854	9854	9854
13	M	K*L	Total Waktu kapal di CADRZ	detik	14336644.832	7168322.416	4778881.611
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	M/N	Probabilitas tahunan kapal di CADRZ	-	0.454612025	0.227306013	0.151537342
16	P	I/J	Probabilitas kapal di CADRZ	-	0.01553148	0.01553148	0.01553148

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADRZ* dan probabilitas kapal di *CADRZ* pada bahaya *dragged anchor* kapal jenis *Container* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	58.7	58.7	58.7
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F	-	Lebar Jangkar	m	1.517	1.517	1.517
7	G		Angular Deviation	°	10	10	10
8	H		Lateral Deviation	m	9.33	9.33	9.33
9	I	27F+2H	Lebar CADRZ (Critical Anchor Drag Zone)	m	59.619	59.619	59.619
10	J		Estimasi Lebar Alur Pelayaran	m	4096	4096	4096
11	K	(A+I)/B	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CADRZ	detik	919.979	459.990	306.660
12	L	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	1262	1262	1262
13	M	K*L	Total Waktu kapal di CADRZ	detik	1161014.004	580507.002	387004.668
14	N	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
15	O	M/N	Probabilitas tahunan kapal di CADRZ	-	0.036815513	0.018407756	0.012271838
16	P	I/J	Probabilitas kapal di CADRZ	-	0.01455553	0.01455553	0.01455553

Perhitungan probabilitas tahunan melewati *CADRZ* dan probabilitas kapal di *CADRZ* pada bahaya *dragged anchor* kapal jenis *Tug* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar *SPM*).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	58.7	58.7	58.7
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F		Angular Deviation	°	2	2	2
7	G		Lateral Deviation	m	1.88	1.88	1.88
8	H	$D+2E+2A+2H$	Lebar CSZ (Critical Ship Sinking Zone)	m	121.626	121.626	121.626
9	I	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CSZ	detik	1402.101	701.050	467.367
10	J	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	24	24	24
11	K	$I*J$	Total Waktu kapal di CSZ	detik	33650.419	16825.209	11216.806
12	L	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
13	M	$K/L$	Probabilitas tahunan kapal di CSZ	-	0.001067048	0.000533524	0.000355683

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CSZ dan probabilitas kapal di CSZ pada bahaya *ship sinking* kapal jenis *Tug* pada tahap Operasi SPM skenario 1 (kapal yang digunakan dalam operasi SPM).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)		
					0.25	0.5	0.75
1	A	-	Panjang Kapal	m	152	152	152
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	0.129	0.257	0.386
3	C		Kedalaman Perairan	m	54	54	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406	0.406	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025	0.025	0.025
6	F		Angular Deviation	°	2	2	2
7	G		Lateral Deviation	m	1.88	1.88	1.88
8	H	$D+2E+2A+2H$	Lebar CSZ (Critical Ship Sinking Zone)	m	308.226	308.226	308.226
9	I	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CSZ	detik	3578.431	1789.215	1192.810
10	J	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	10	10	10
11	K	$I*J$	Total Waktu kapal di CSZ	detik	35784.309	17892.155	11928.103
12	L	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000	31536000	31536000
13	M	$K/L$	Probabilitas tahunan kapal di CSZ	-	0.001134713	0.000567357	0.000378238

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CSZ dan probabilitas kapal di CSZ pada bahaya *ship sinking* kapal jenis *Tanker* pada tahap Operasi SPM skenario 1 (kapal yang digunakan dalam operasi SPM).



No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)
					5.8
1	A	-	Panjang Kapal	m	71.82
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	2.984
3	C		Kedalaman Perairan	m	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025
6	F		Angular Deviation	°	2
7	G		Lateral Deviation	m	1.88
8	H	$D+2E+2A+2H$	Lebar CSZ (Critical Ship Sinking Zone)	m	147.866
9	I	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CSZ	detik	73.627
10	J	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	5432
11	K	$I*J$	Total Waktu kapal di CSZ	detik	399940.345
12	L	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000
13	M	$K/L$	Probabilitas tahunan kapal di CSZ	-	0.012682025

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CSZ dan probabilitas kapal di CSZ pada bahaya *ship sinking* kapal jenis *Passenger* pada tahap Operasi SPM skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar SPM).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)
					10.1
1	A	-	Panjang Kapal	m	126.65
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	5.196
3	C		Kedalaman Perairan	m	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025
6	F		Angular Deviation	°	2
7	G		Lateral Deviation	m	1.88
8	H	$D+2E+2A+2H$	Lebar CSZ (Critical Ship Sinking Zone)	m	257.526
9	I	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CSZ	detik	73.938
10	J	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	11763
11	K	$I*J$	Total Waktu kapal di CSZ	detik	869737.859
12	L	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000
13	M	$K/L$	Probabilitas tahunan kapal di CSZ	-	0.027579207

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CSZ dan probabilitas kapal di CSZ pada bahaya *ship sinking* kapal jenis *Cargo* pada tahap Operasi SPM skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar SPM).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)
					9.1
1	A	-	Panjang Kapal	m	152
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	4.681
3	C		Kedalaman Perairan	m	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025
6	F		Angular Deviation	°	2
7	G		Lateral Deviation	m	1.88
8	H	$D+2E+2A+2H$	Lebar CSZ (Critical Ship Sinking Zone)	m	308.226
9	I	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CSZ	detik	98.309
10	J	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	7677
11	K	$I*J$	Total Waktu kapal di CSZ	detik	754714.681
12	L	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000
13	M	$K/L$	Probabilitas tahunan kapal di CSZ	-	0.023931846

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CSZ dan probabilitas kapal di CSZ pada bahaya *ship sinking* kapal jenis *Tanker* pada tahap Operasi SPM skenario 2 (kapal yang berlatu-lintas di sekitar SPM).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)
					5.3
1	A	-	Panjang Kapal	m	123.5
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	2.727
3	C		Kedalaman Perairan	m	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025
6	F		Angular Deviation	°	2
7	G		Lateral Deviation	m	1.88
8	H	$D+2E+2A+2H$	Lebar CSZ (Critical Ship Sinking Zone)	m	251.226
9	I	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CSZ	detik	137.436
10	J	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	9854
11	K	$I*J$	Total Waktu kapal di CSZ	detik	1354290.791
12	L	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000
13	M	$K/L$	Probabilitas tahunan kapal di CSZ	-	0.042944279

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CSZ dan probabilitas kapal di CSZ pada bahaya *ship sinking* kapal jenis *Container* pada tahap Operasi SPM skenario 2 (kapal yang berlalu-lintas di sekitar SPM).

No	Perhitungan	Persamaan	Keterangan	Satuan	Kecepatan Kapal (Knot)
					7.1
1	A	-	Panjang Kapal	m	58.7
2	B	-	Kecepatan Kapal	m/s	3.653
3	C		Kedalaman Perairan	m	54
4	D	-	Diameter Pipa	m	0.406
5	E	-	Tebal Lapisan Pipa (Concrete Coating)	m	0.025
6	F		Angular Deviation	°	2
7	G		Lateral Deviation	m	1.88
8	H	$D+2E+2A+2H$	Lebar CSZ (Critical Ship Sinking Zone)	m	121.626
9	I	$(A+I)/B$	Waktu yang dibutuhkan kapal untuk melewati CSZ	detik	49.370
10	J	-	Banyaknya kapal yang melewati pipa	-	1262
11	K	$I*J$	Total Waktu kapal di CSZ	detik	62304.619
12	L	-	Waktu dalam satu tahun	detik	31536000
13	M	$K/L$	Probabilitas tahunan kapal di CSZ	-	0.001975667

Perhitungan probabilitas tahunan melewati CSZ dan probabilitas kapal di CSZ pada bahaya *ship sinking* kapal jenis *Tug* pada tahap Operasi *SPM* skenario 2 (kapal yang berliku-lintas di sekitar *SPM*).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LAMPIRAN 2**  
**HASIL SIMULASI AUTOPIPE**

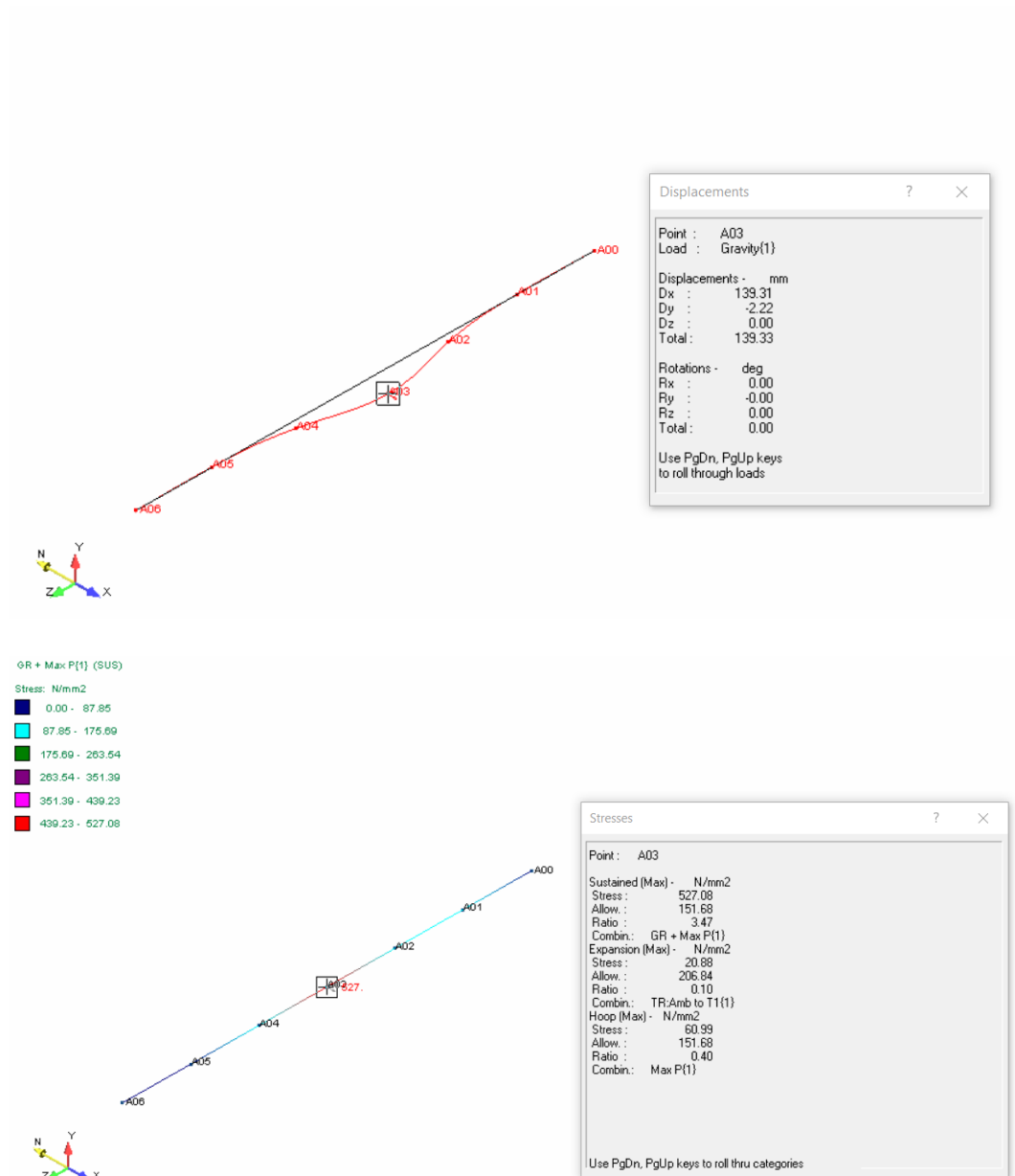
“Halaman ini sengaja dikosongkan”



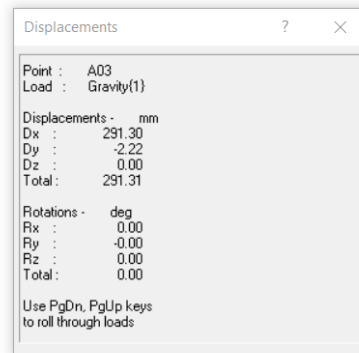
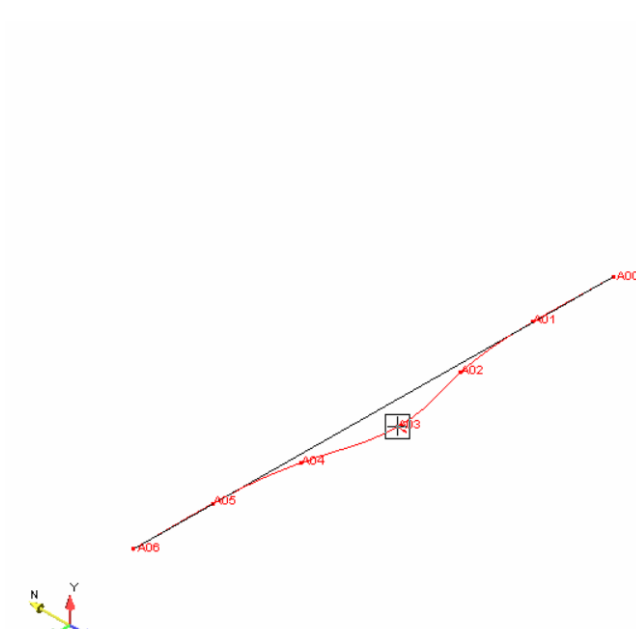
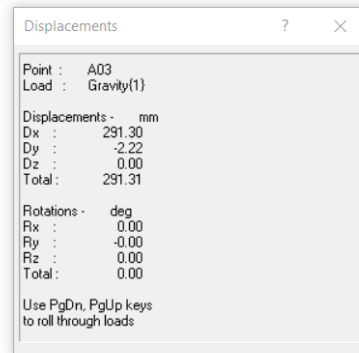
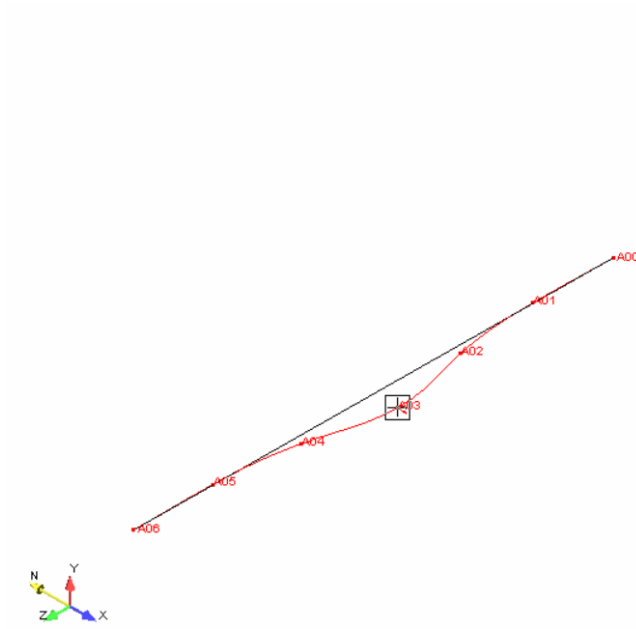
# Hasil Simulasi Autopipe

Berikut ini merupakan hasil dari simulasi dragged anchor menggunakan software Autopipe.

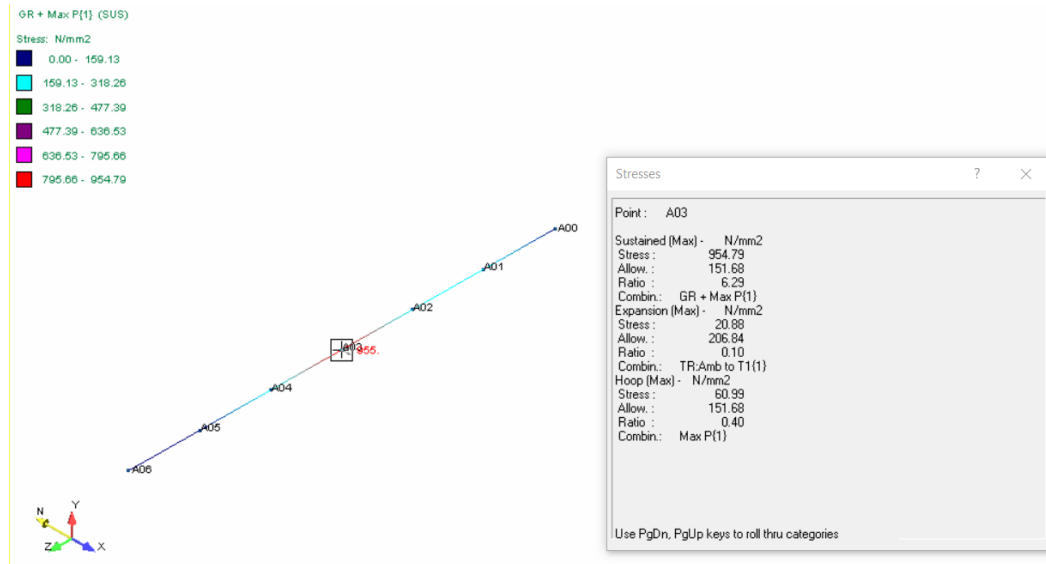
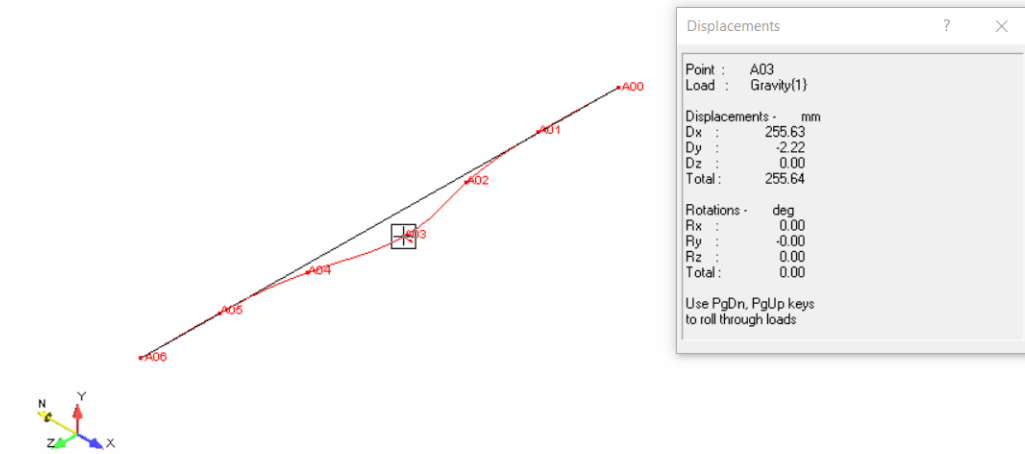
## 1. Passenger



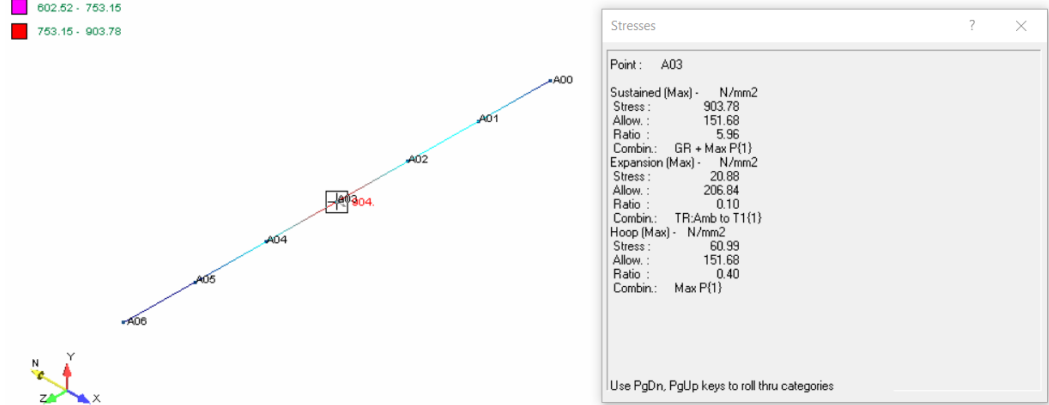
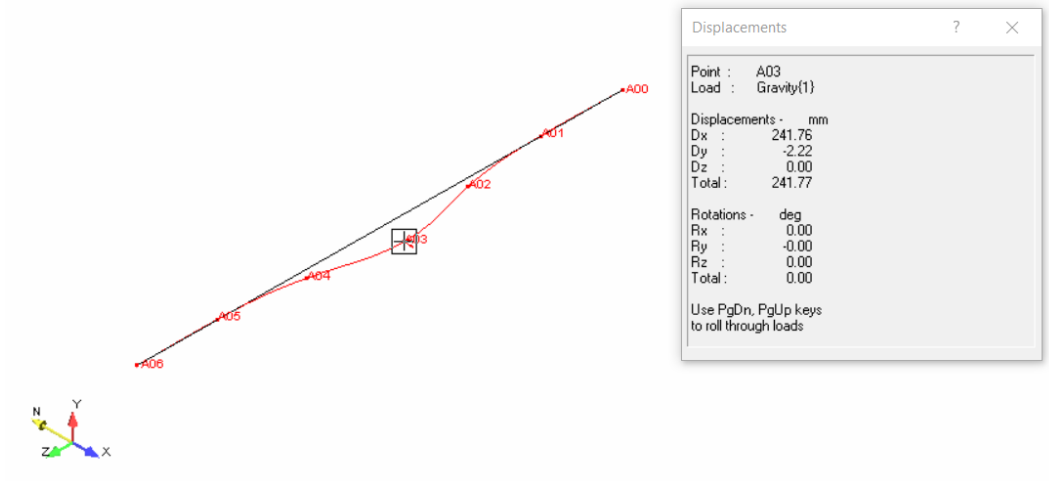
## 2. Cargo



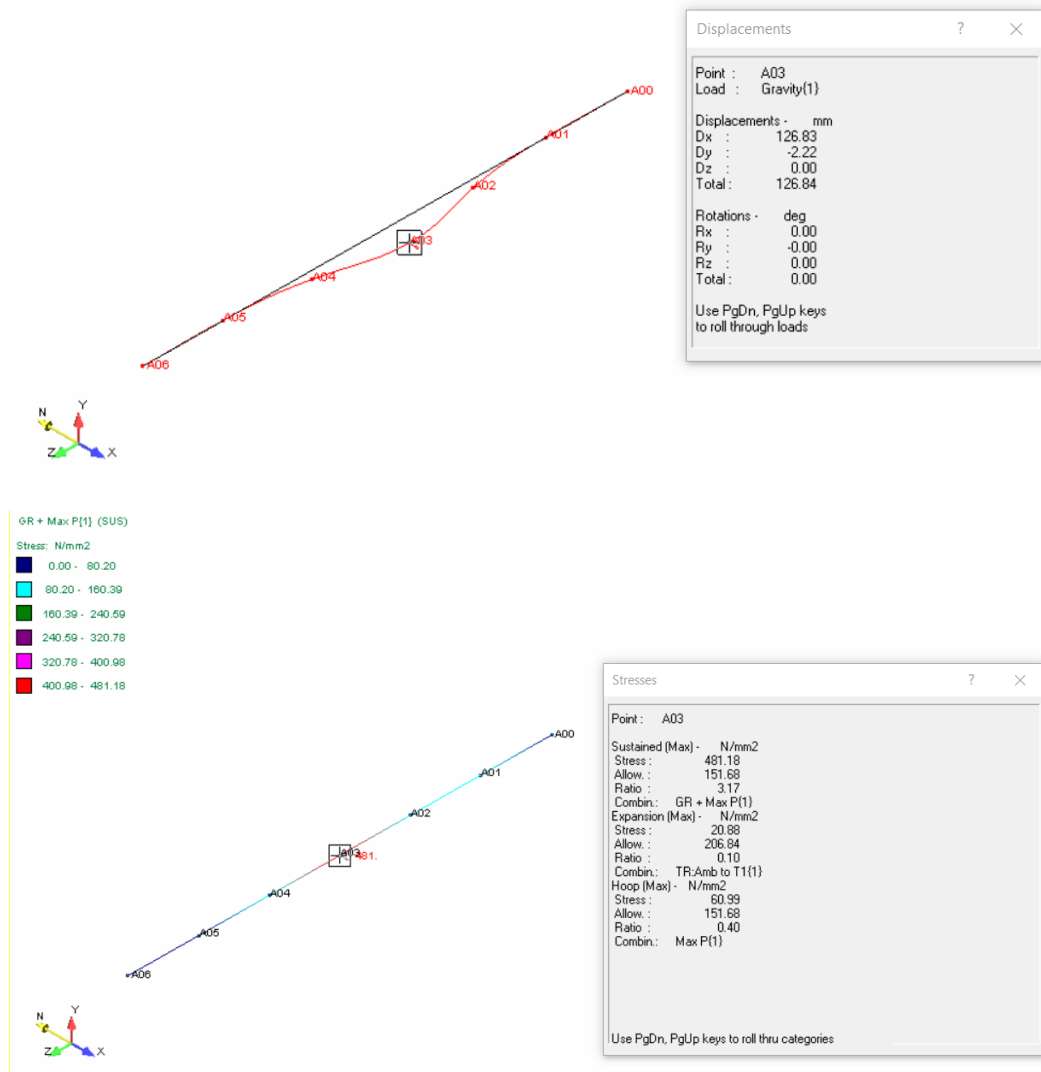
### 3. Tanker



## 4. Container



## 5. Tug



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LAMPIRAN 3**  
**PROPERTI MATERIAL**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



## Properti Material

Property	Value	Unit
<b>A. Anchor</b>		
Density	7850	Kg/m3
Young's Modulus	2E+11	Pa
Poisson's Ratio	0.30	Pa
<b>B. Subsea Pipeline</b>		
Material Grade	API 5L X52	-
Density	7850	Kg/m3
Young's Modulus	2.1E+11	Pa
Poisson's Ratio	0.30	Pa
<b>C. Concrete Coating</b>		
Density	3040	Kg/m3
Young's Modulus	3E+10	Pa
Poisson's Ratio	0.18	Pa
<b>D. Soft Clay</b>		
Density	1500	Kg/m3
Young's Modulus	1.8E+06	Pa
Poisson's Ratio	0.35	Pa
<b>E. Concrete Mattress</b>		
Density	1500	Kg/m3
Young's Modulus	3E+10	Pa
Poisson's Ratio	0.18	Pa
<b>F. Rock Dumping</b>		
Density	2500	Kg/m3
Young's Modulus	3.79E+10	Pa
Poisson's Ratio	0.3077	Pa

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

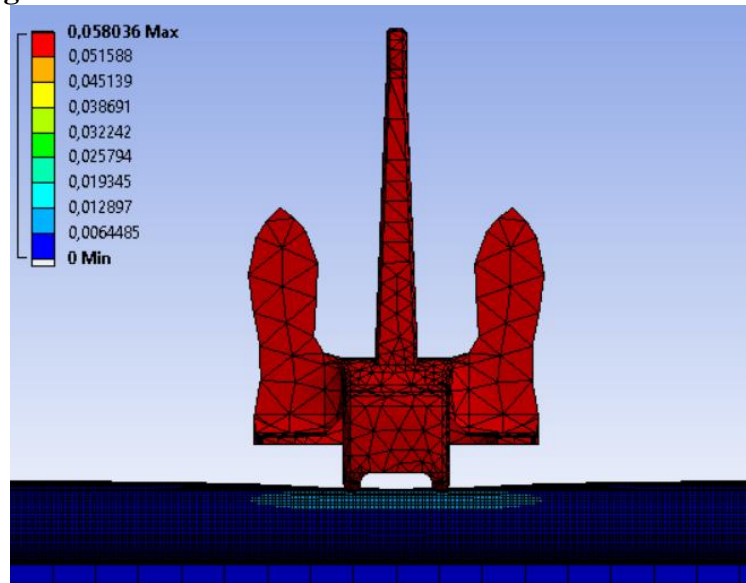
**LAMPIRAN 4**  
**HASIL SIMULASI FEM**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

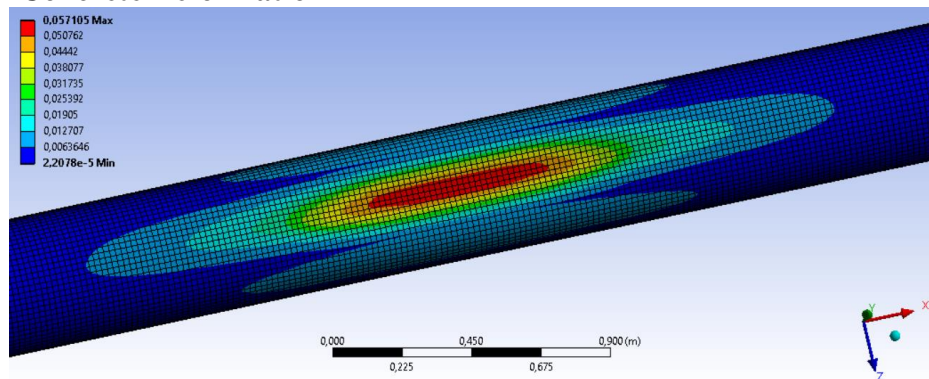
## Hasil Simulasi FEM

Type of Vessel	Perhitungan			FEM		
	Total Impact	Dent	Dent/Diameter	Total Impact	Dent	Dent/Diameter
Passenger	46.16	74.51	18.334%	45.853	58.036	14.281%
Cargo	119.04	159.35	39.210%	107.31	141.71	34.870%
Tanker	171.50	226.64	55.768%	161.54	210.88	51.890%
Container	107.45	144.01	35.436%	96.559	122.52	30.148%
Tug	32.55	50.07	12.320%	33.221	44.33	10.908%

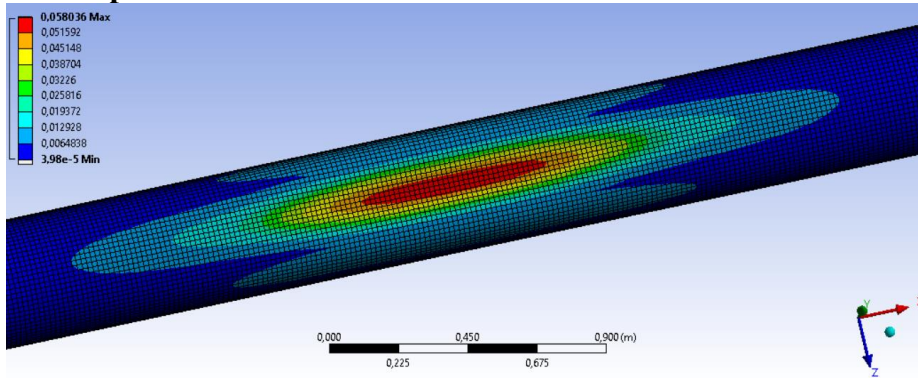
### 1. Passenger



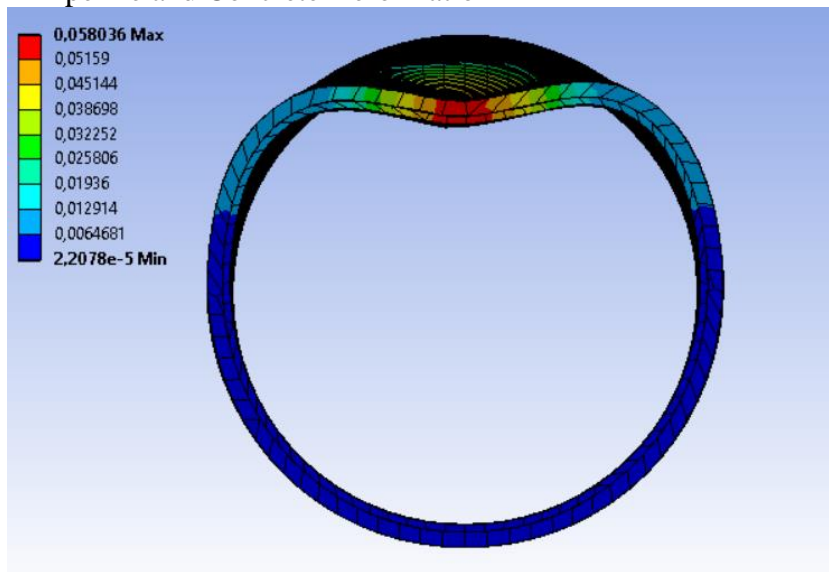
- Concrete Deformation



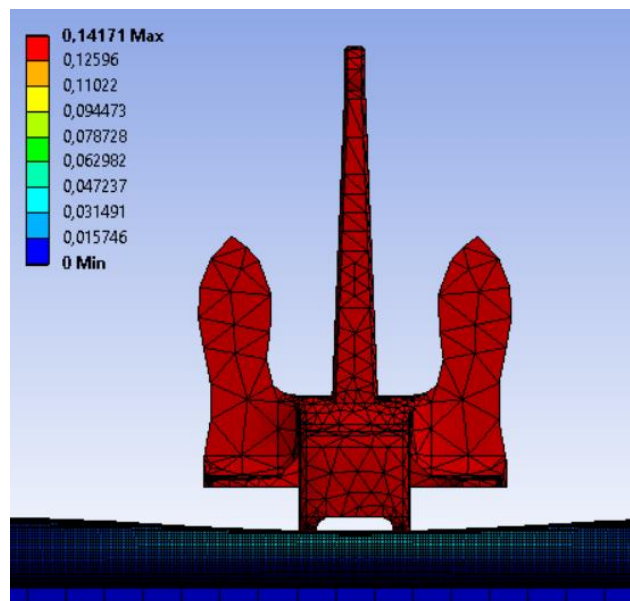
- Pipeline Deformation



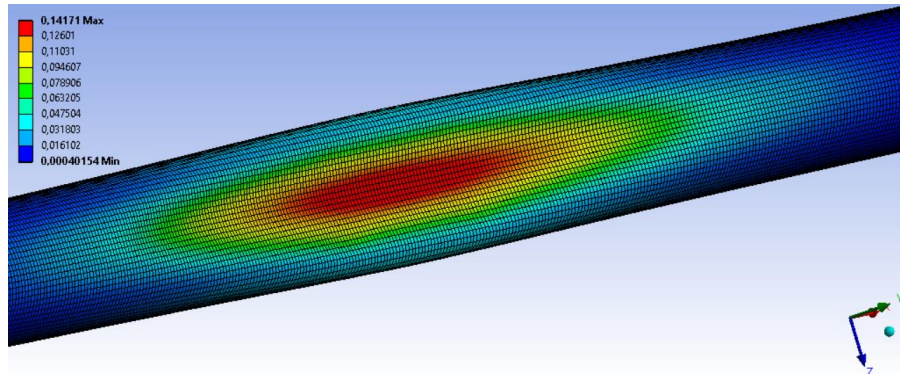
- Pipeline and Concrete Deformation



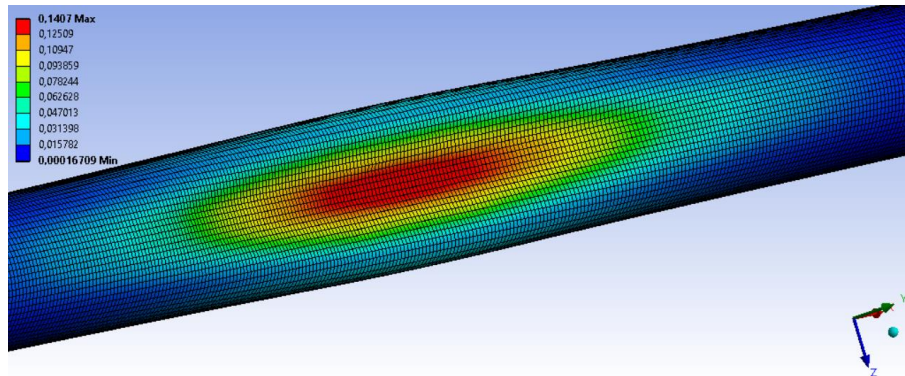
## 2. Cargo



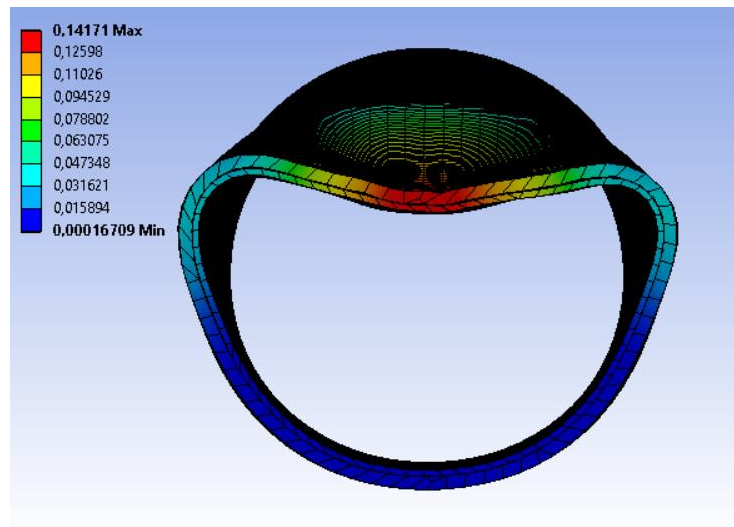
- Pipeline Deformation



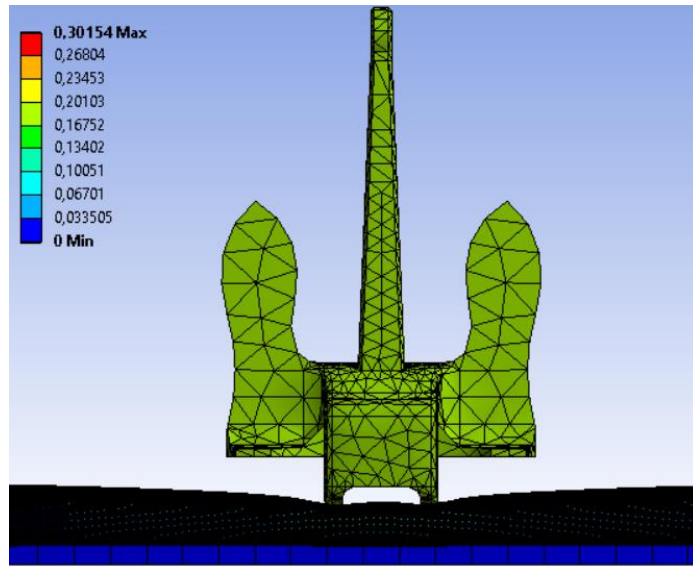
- Concrete Deformation



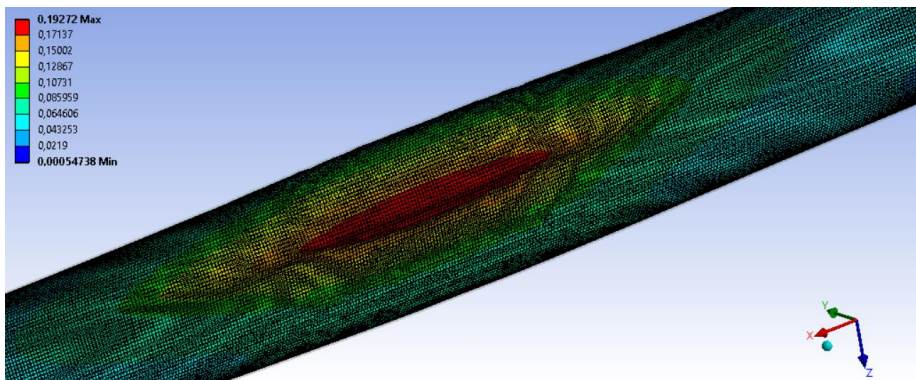
- Concrete and Pipeline Deformation



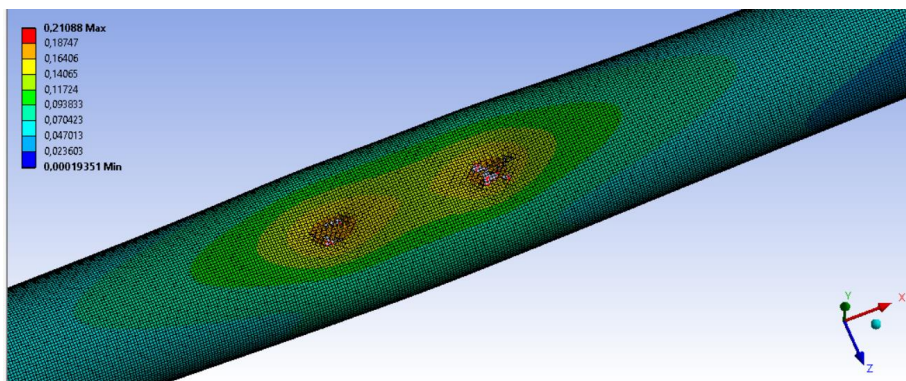
### 3. Tanker



- Pipeline Deformation

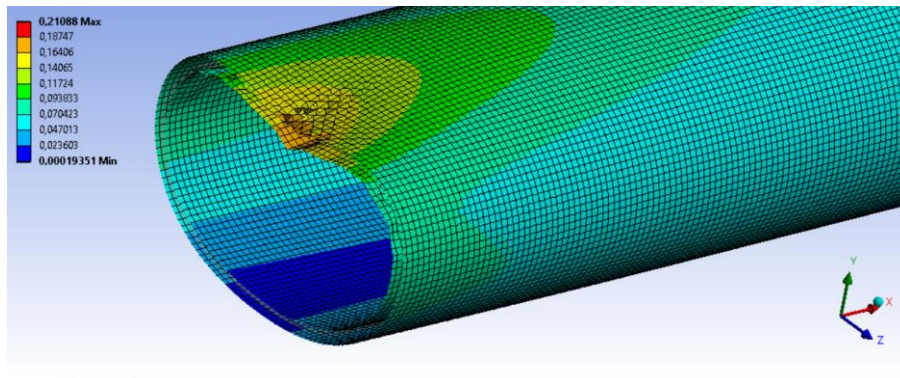


- Concrete Deformation

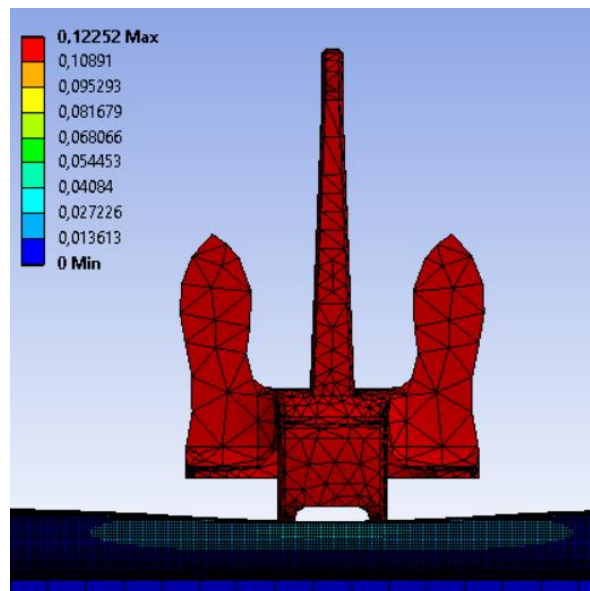




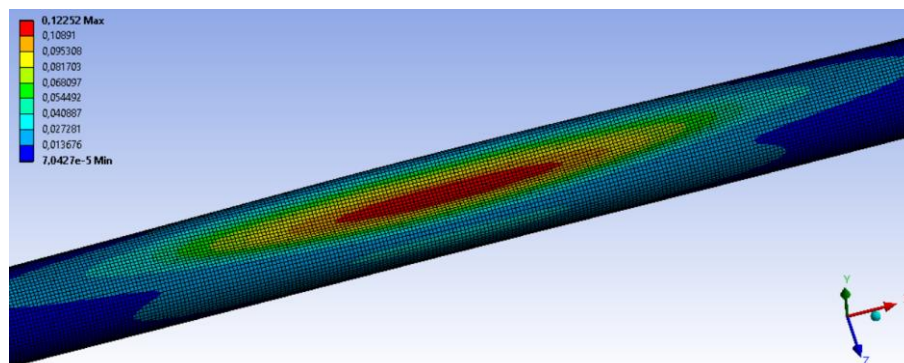
- **Concrete and Pipeline Deformation**



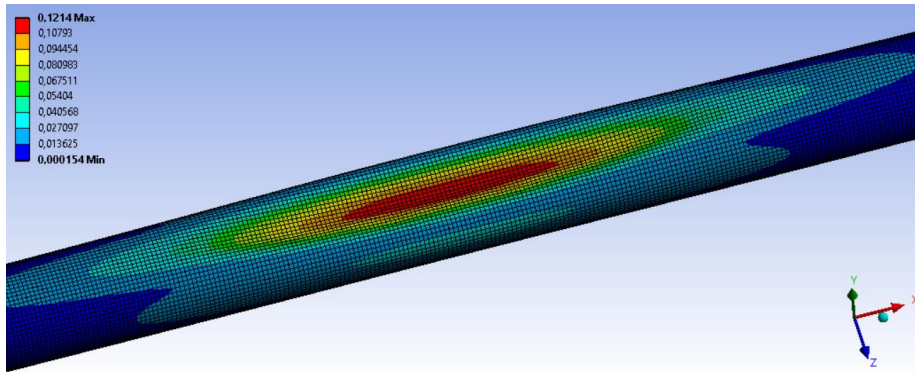
**4. Container**



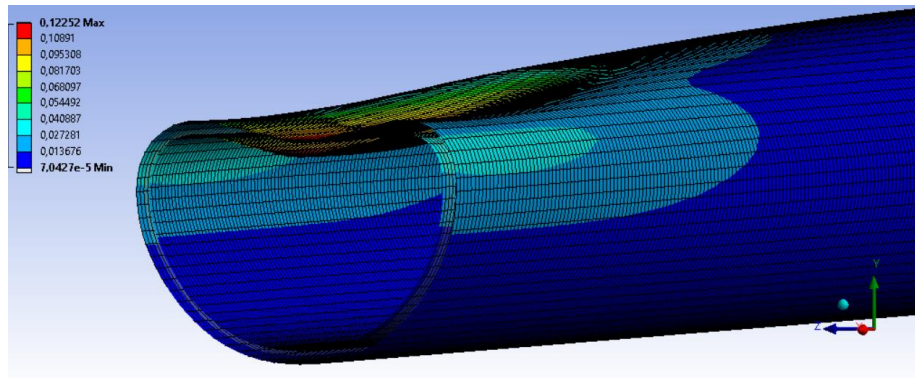
- **Pipeline Deformation**



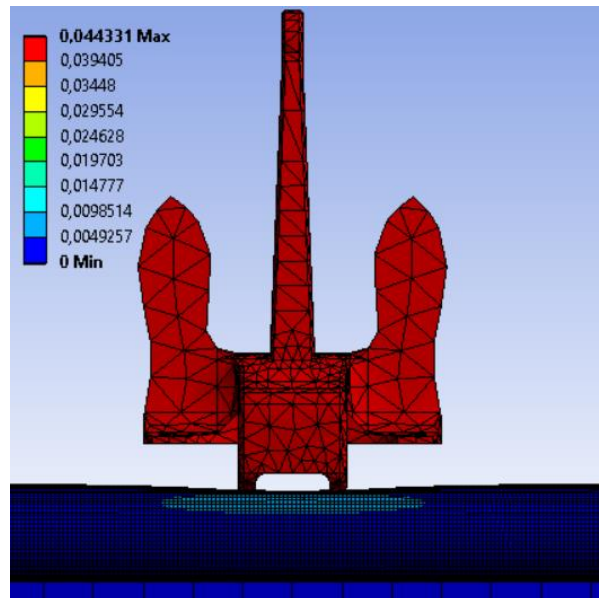
- **Concrete Deformation**



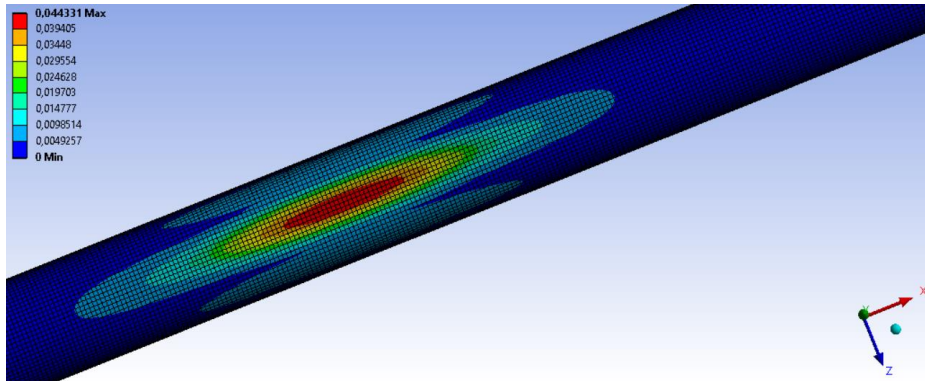
- **Concrete and Pipeline Deformation**



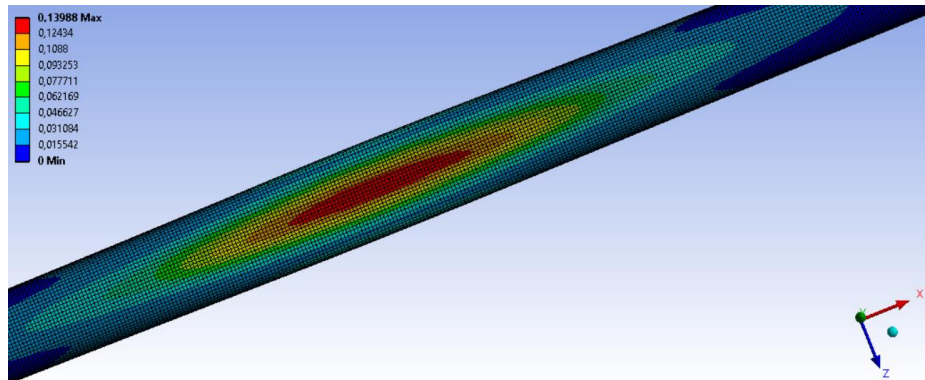
5. **Tug**



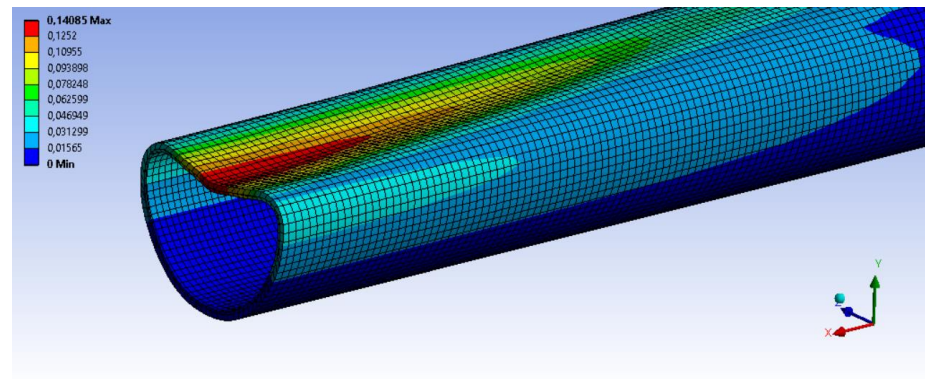
- Pipeline Deformation



- Concrete Deformation



- Concrete and Pipeline Deformation



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## **LAMPIRAN 5**

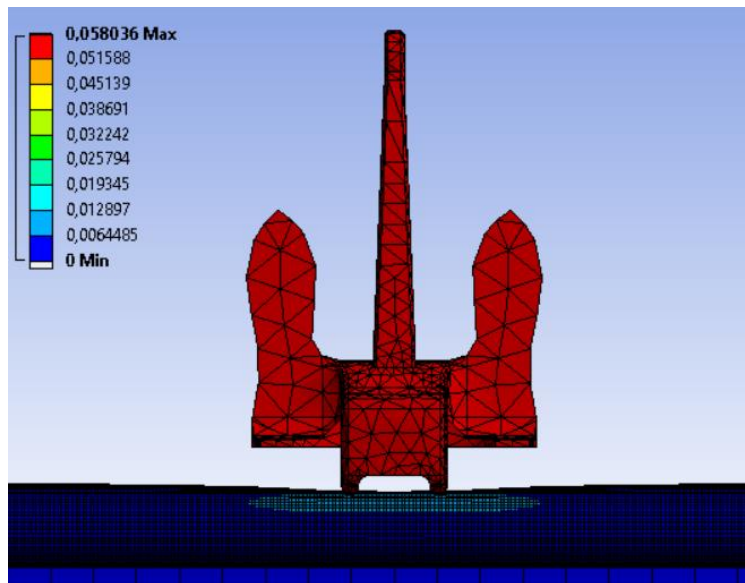
### **HASIL SIMULASI FEM VARIASI LUASAN AREA**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

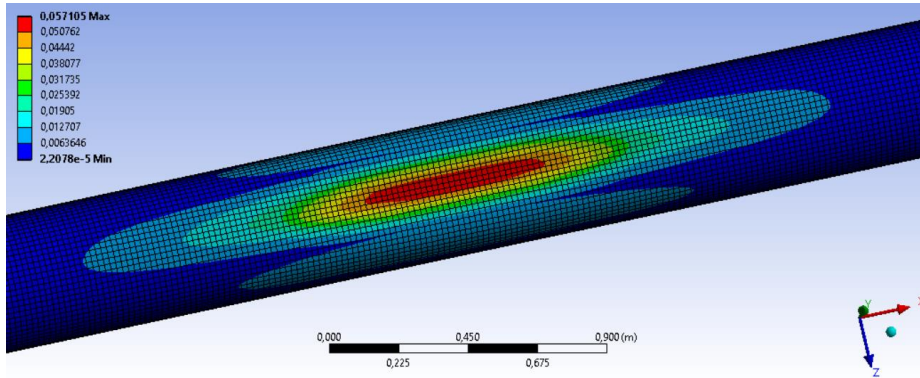
# Hasil Simulasi FEM: Luasan Area

Variation	Perhitungan				FEM			
	Total Impact	Dent	Dent/Diameter	Rank	Total Impact	Dent	Dent/Diameter	Rank
Variation 1	46.157	64.61	15.90%	4	45.853	58.036	14.28%	3
Variation 2	46.157	77.416	19.05%	4	46.149	79.519	19.57%	4
Variation 3	46.157	67.89	16.71%	4	45.361	61.171	15.05%	4

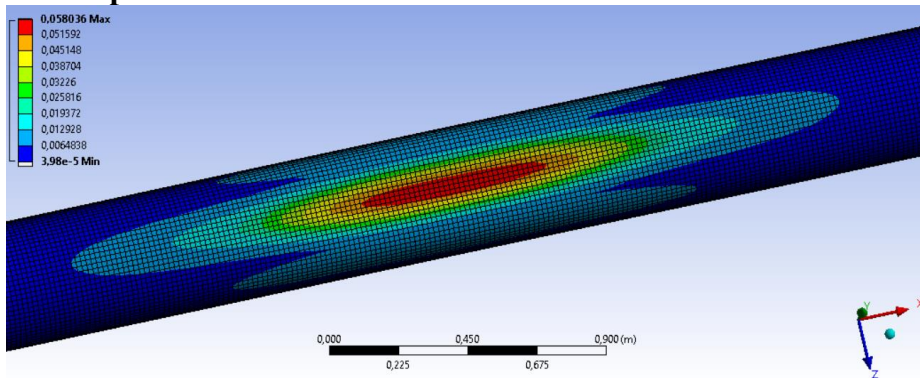
## 1. Variasi 1



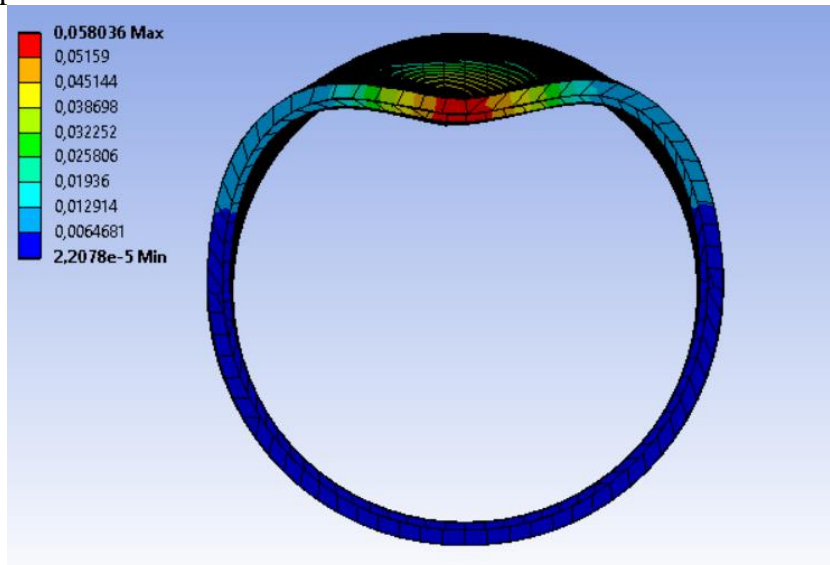
- **Concrete Deformation**



- **Pipeline Deformation**

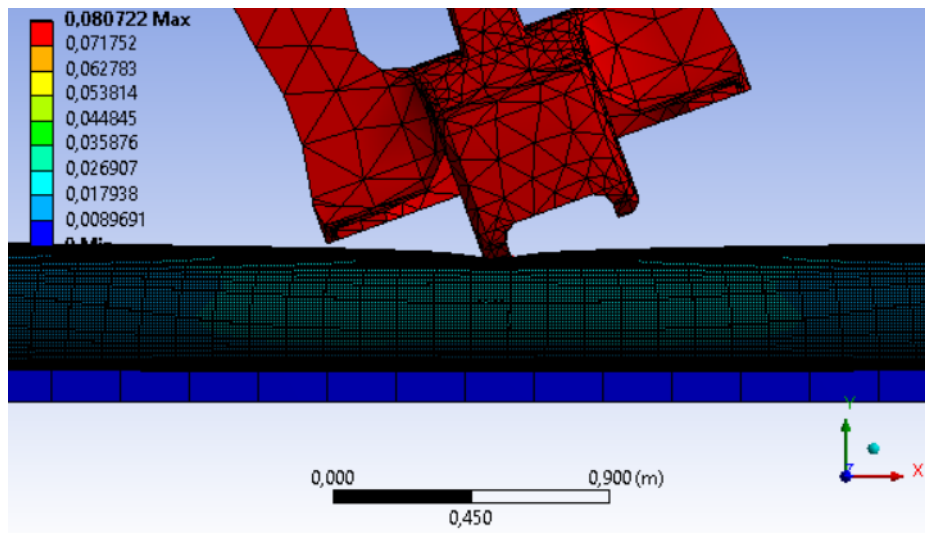
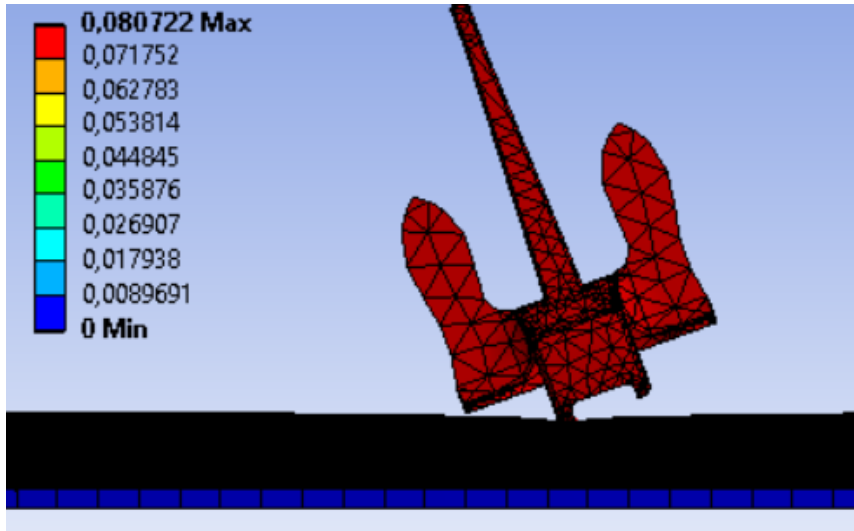


- **Pipeline and Concrete Deformation**

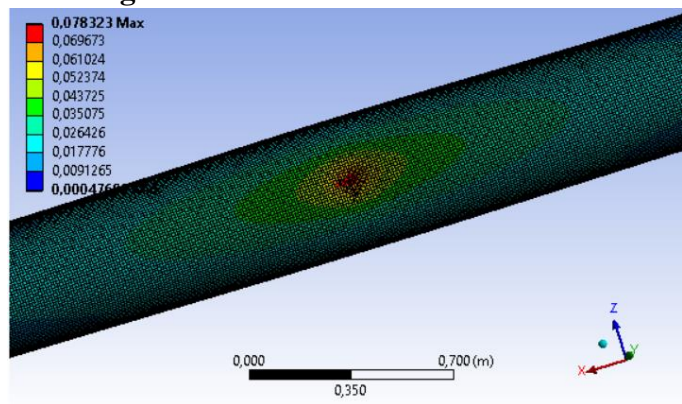


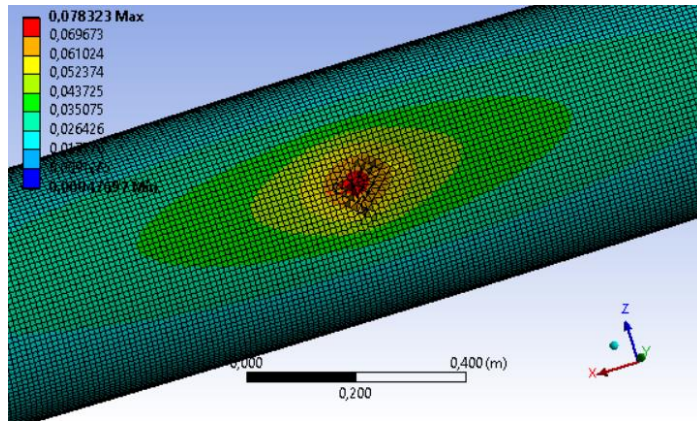


## 2. Variasi 2

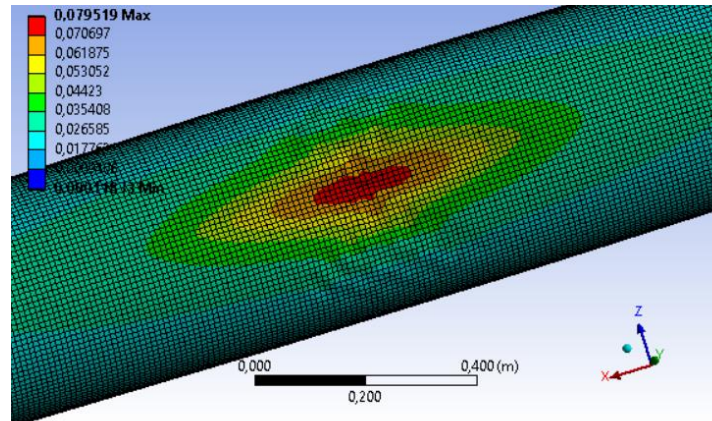
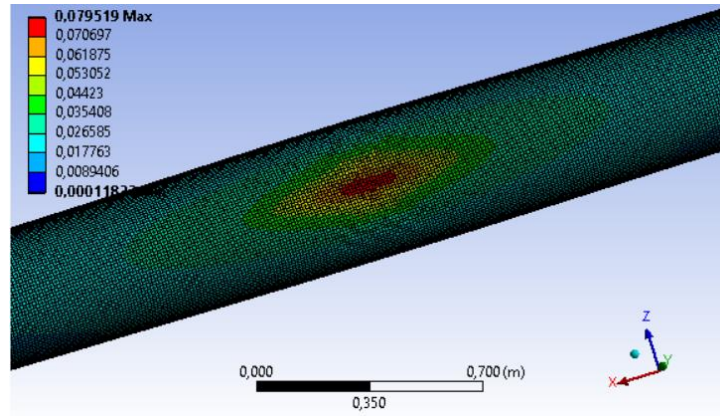


- **Concrete Coating Deformation**

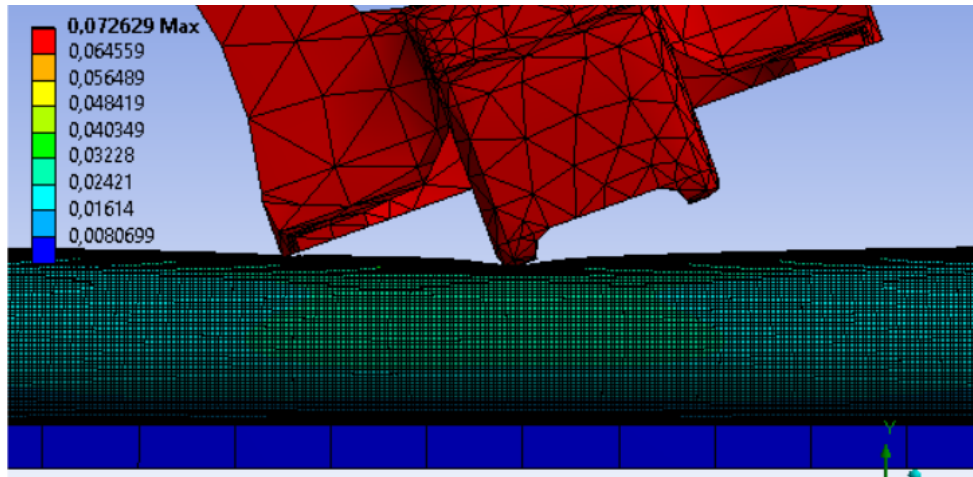
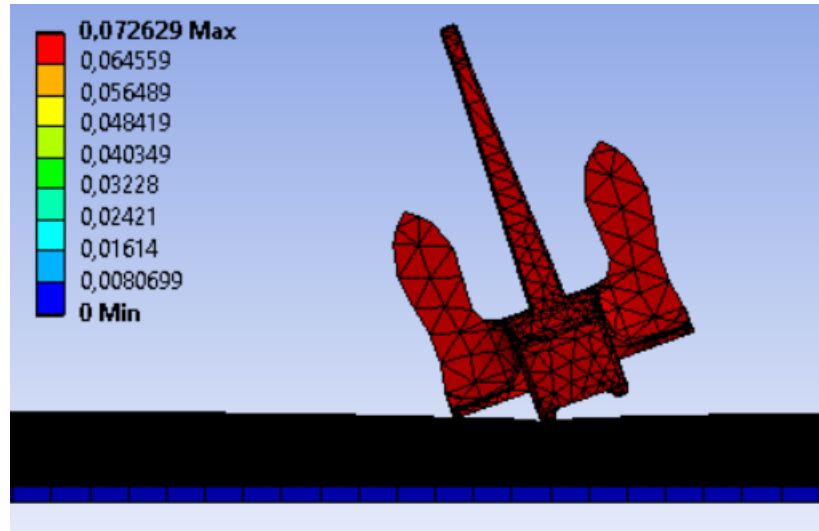




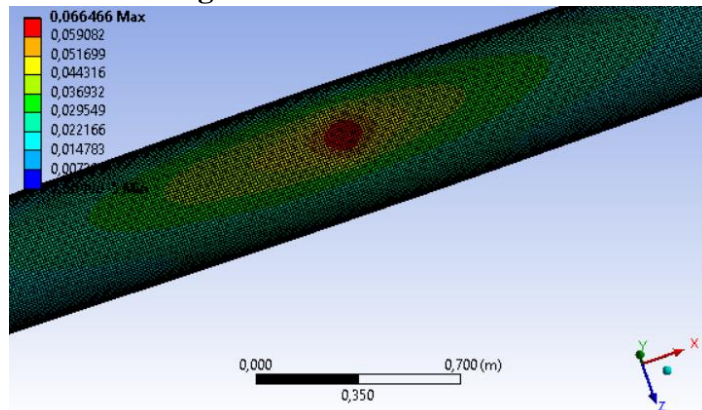
- Pipeline Deformation

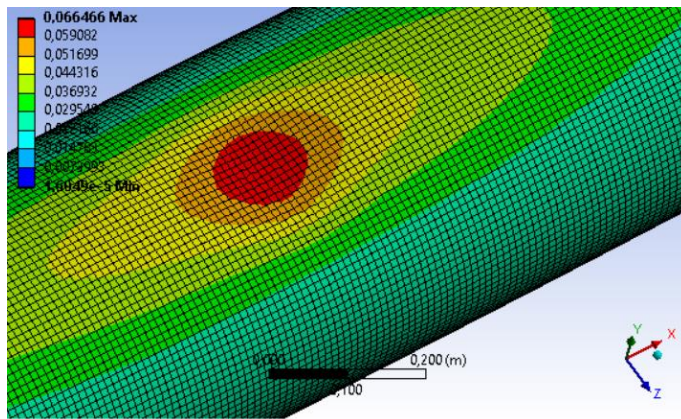


### 3. Variasi 3



- Concrete Coating





- Pipeline Deformation

