

Penilaian Resiko Kerusakan Pipa Bawah Laut Milik PT. Perusahaan Gas Negara di Labuhan Maringgai-Muara Bekasi Akibat Kejatuhan Jangkar Menggunakan Metode *Monte Carlo*

Jadidah Fihriz Nanda, Wimala Lalitya Dhanistha, dan Silvianita
Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: wimala.danistha@gmail.com

Abstrak—Kebutuhan akan produksi minyak dan gas bumi semakin hari semakin tinggi. Untuk itu dalam memenuhi permintaan tersebut perlu adanya alat transmisi minyak dan gas bumi yang memadai serta aman agar proses distribusi berjalan dengan lancar. Pipa bawah laut adalah faktor penting dalam proses transmisi migas. Namun dalam prosesnya banyak sekali resiko kecelakaan yang bisa terjadi terhadap pipa bawah laut seperti contohnya terkena jatuhnya jangkar atau *drop anchor*. Pada tugas akhir ini dilakukan analisis resiko kerusakan terhadap pipa bawah laut milik PT. Perusahaan Gas Negara yang diakibatkan oleh penurunan jangkar. Lokasi pipa ini ialah di labuhan maringgai-muara Bekasi. Untuk mendapatkan besarnya konsekuensi resiko yang bisa terjadi pada pipa digunakan *software* ANSYS dan simulasi monte carlo. Dari perhitungan yang telah dilakukan maka didapatkan bahwa jangkar dengan berat 1140 Kg, 1200 Kg dan 1290 Kg masing-masing memiliki gaya sebesar 31950 N, 35480 N dan 41103 N. Setelah dilakukan simulasi dari berat jangkar tersebut maka didapatkan hasil bahwa ketika jangkar dengan berat 1140 Kg dan 1200 Kg jatuh dan mengenai badan pipa, maka pipa tersebut berada di zona ALARP. Sedangkan jangkar dengan berat 1290 Kg ketika jatuh dan mengenai badan pipa, maka pipa tersebut berada di zona *Unacceptable risk*.

Kata Kunci—Pipa bawah laut, *Drop Anchor*, *Ansys*, *Monte Carlo*, Analisis Resiko.

I. PENDAHULUAN

GAS alam merupakan hidrokarbon yang saat ini kebutuhan dunia banyak bergantung pada ketersediannya. OMC / Oil and Gas Management Center (2017) menulis, gas alam memiliki banyak sekali kelebihan yang menjadikannya sumber energi yang efisien, ekonomis atau biaya relative rendah dan juga bersih. Indonesia merupakan negara yang mempunyai banyak titik sumber minyak dan gas. Banyak proses yang harus dilalui dalam pengolahan migas. Secara garis besar proses penemuan migas meliputi 3 hal yaitu eksplorasi, eksploitasi dan produksi. Dalam kegiatan eksplorasi dan produksi tentunya dibutuhkan sebuah alat yang dapat mendistribusikan aliran minyak dan gas dari satu titik ke titik yang lain. Pipa merupakan alat yang cocok untuk menyalurkan migas baik dalam hal eksplorasi, produksi hingga ke tangan konsumen.

Produksi minyak dan gas, design pipa sangat diperhatikan karena untuk menjamin keamanan selama proses distribusi agar tidak terjadi kebocoran yang nantinya akan menimbulkan dampak mulai dari kerusakan lingkungan hingga kerugian pada company terkait. Pada saat proses penyaluran migas, pipa yang terbentang dari titik satu ke titik yang lain memiliki banyak konsekuensi dan resiko kerusakan

yang bisa terjadi. Contohnya, pada saat pipa tersebut berada pada Kawasan marine traffic dan fairway [1]. Banyak kemungkinan yang bisa menimbulkan kerusakan fatal pada pipa seperti anchor drag, kapal tenggelam, jaring atau pukut dan factor lainnya.

Untuk itu perlu adanya mitigasi sebagai upaya menghindari kegagalan. Langkah yang tepat untuk menghindari serta meminimalisir terjadinya kegagalan dan kerugian ialah dengan melakukan analisis resiko [2]. Dalam tugas akhir ini, akan dilakukan analisis pipa bawah laut yang posisinya terletak dijalur pelayaran khususnya pipa yang tidak terbenam (*unburied*). Jalur pipa ini adalah milik PT. PGN yang mengangkut fluida berupa gas bumi, jalur pipa yang terletak di Labuhan Maringgai-Muara Bekasi ini berlokasi di jalur pelayaran kapal sehingga perlu dilakukan kajian-kajian mengenai resiko yang bisa mengganggu aktivitas transmisi gas agar tidak membahayakan lingkungan dan manusia. Salah satu ancaman yang bisa menyebabkan pipa mengalami kegagalan ialah kejatuhan jangkar [3]. Aktifitas jangkar yang kemudian memungkinkan untuk merusak pipa perlu dilakukan analisis kekuatan dan penilaian risikonya. Salah satu kerusakan yang dapat terjadi pada pipa adalah pipa bisa penyok atau pipa mengalami kebocoran. Pipa yang akan dianalisa keagalannya pada tugas akhir ini mempunyai diameter sebesar 812,8 mm atau 32" dengan ketebalan pipa 15,875 mm. sedangkan untuk jangkar yang digunakan pada tugas akhir ini adalah jangkar kapal jenis supply vessel. Analisis resiko pada tugas akhir ini menggunakan simulasi monte carlo. Dibawah ini adalah peta lokasi dari tugas akhir ini.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pembelajaran agar memahami dan mengerti semua sumber yang menjadi acuan dan referensi terkait permasalahan yang akan dianalisa sehingga memudahkan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Selain itu pada tahap ini juga mempelajari penggunaan *software* ANSYS yang kemudian akan digunakan untuk menganalisa tegangan pada pipa ketika terkena jatuhnya jangkar.

B. Pengumpulan Data

Data yang diperlukan dalam tugas akhir ini ialah data pipa bawah laut di lokasi yang akan menjadi objek penelitian, data kapal yang sering melintasi area pipa bawah laut yang akan diamati, data jangkar data mengenai frekuensi kapal yang melintas per minggu.

Tabel 1.
Data Pipa.

Spesifikasi	
Length	= 142.737 km
Outside Diameter	= 812.8 mm
Material	= Carbon Steel
Pressure Design	= 1150 psig
Internal Pressure	= 1000 psia
Material Grade	= SAWL 450 11-F-D & SAWL 485 11-FUD
Corrosion Allowance	= 1.5 mm
Service	= Dry Gas
Internal Coating	= 80 µm
External Coating	= 2.5 mm
SMYS	= 485 MPa
SMTS	= 565 MPa
Density	= 7850 Kg/m ²
Elastisitas Pipa	= 207000 x N/m ²
Poisson Ratio	= 0.3
Thickness	= 15.875 mm

Tabel 2.
Data Umum Kapal.

Supply Vessel Small	
Annual Frequency melewati Lokasi pipa	= 3650 kali
DWT	= 1000
Anchor Weight	= 1.29 ton
Max Draught	= 5 m
Engine Power	= 1960 kW
Standard Jangkar	= Stockless

Tabel 3.
Kondisi Perairan.

Data Lingkungan	
Max Depth	Max Depth
Min Depth	Min Depth
Hs	Hs
Ts	Ts
Current Speed	Current Speed

C. Menghitung Frekuensi

Menghitung besarnya frekuensi kejadian saat kapal menurunkan jangkar di daerah tersebut selama satu tahun.

D. Menghitung Konsekuensi

Menghitung konsekuensi kegagalan yang terjadi pada pipa yang diakibatkan oleh tarikan jangkar menurut .DNV RPF-107 [4].

1. Menghitung gaya total yang diberikan jangkar apabila terjatuh diatas pipa dengan rumus:

$$E_T = \frac{m \cdot g}{C_D \cdot A} \left(\frac{m}{\rho_{water}} - V \right) \tag{1}$$

Dimana:

- E_t = Energi Kinetik Terminal (Joule)
- m = Berat Jangkar (kg)
- g = Kecepatan gravitasi (m/s²)
- V = Volume Jangkar (m³)
- ρ_{water} = Berat jenis air laut (1025kg/m³)
- C_D = Koefisien drag jangkar
- A = Proyeksi luasan jangkar (m²)
- V_t = Kecepatan Jatuh Jangkar

Setelah E_T diperoleh maka selanjutnya mencari nilai kecepatan jangkar jatuh atau V_T dengan rumus:

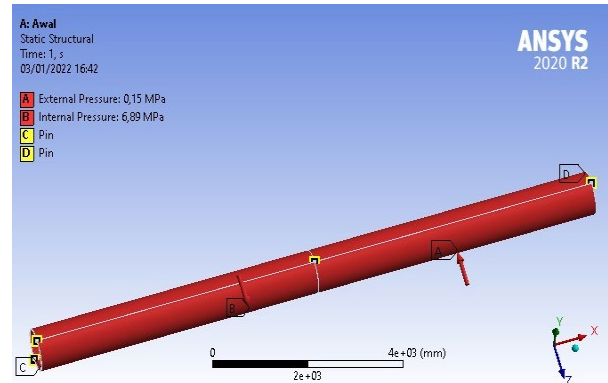
$$V_t = \sqrt{\frac{2 \cdot x \cdot E_T}{m}} \tag{2}$$

Tabel 4.
Data Jangkar.

Spesifikasi		
Anchor Density	7850	kg/m ³
Anchor Volume	0.1643	m ³
Project Area of Object	0.675	m ²
Density Of Sea Water	1025	kg/m ³
Drag Coefficient	0.7	-

Tabel 5.
Perhitungan Setiap Variasi Berat Jangkar.

Berat jangkar (Kg)	Impact Energy (KJ)
1290	33.77
1200	29.15
1140	26.25



Gambar 1. Kondisi batas pipa awal sebelum terkena jangkar.

Dimana:

- V_t = Kecepatan jatuhnya jangkar (m/s)
- E_t = Energi kinetik terminal (Joule)
- M = berat jangkar (Kg)

Setelah kecepatan jatuhnya jangkar diketahui, maka selanjutnya ialah mencari nilai *added mass* guna mendapatkan impact energi dengan rumus:

$$m_{anchor} = V_{anchor} \times \rho_{air laut} \tag{3}$$

Dimana:

- m_{anchor} = Berat jangkar (kg)
- V_{anchor} = Volume anchor (m³)
- $\rho_{air laut}$ = Berat jenis air laut (1025 kg/m³)

Maka dari itu, setelah nilai *added mass* diketahui, maka nilai *impact energy* dapat diperoleh dengan persamaan:

$$E_T = 1/2 (m + m_a) \times V_T^2 \tag{4}$$

2. Menghitung besarnya gaya yang disebabkan oleh jatuhnya jangkar dengan pengaruh variasi berat yang akan dipakai.
3. Melakukan pemodelan pipa di software ANSYS dengan variasi berat jangkar yang akan digunakan.
4. Melakukan simulasi monte calo dengan mode kegagalan menggunakan acuan DNV *Submarine Pipeline System*[4]. Dengan mode kegagalan sebagai berikut:

$$g(x) = \sigma_{ys} - \sigma_e \tag{5}$$

Keterangan:

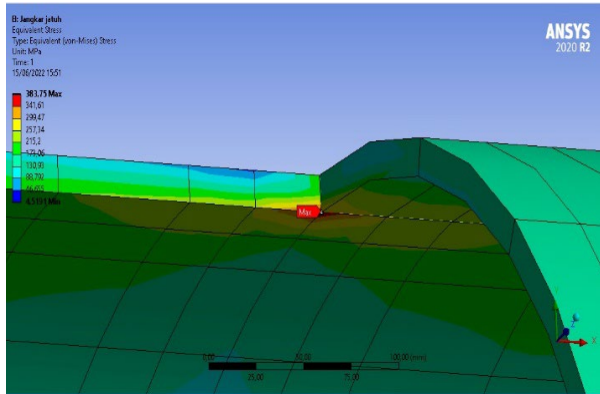
- $g(x)$ = Fungsi limit
- σ_{ys} = *Yields Strength* (MPa)
- σ_e = *Equivalent stres* (MPa)

Tabel 6.
Hasil *Equivalent Stress*.

Berat Jangkar	Impact Energy (KJ)	Impact Energy (N)	σ_e (MPa)
1290 kg	33.77	41103	383.75

Tabel 7.
Simulasi Monte Carlo.

Berat Jangkar	Simulasi	Berhasil	Gagal	PoF	Keandalan
1140	1000	1000	0	0%	100%
1200	1000	998	2	0%	100%
1290	1000	958	42	4%	96%



Gambar 2. Pipa setelah terkena jangkar dengan berat 1290 kg.

E. Membuat Matriks Resiko

Mengelompokkan peluang kejadian tarikan jangkar beserta konsekuensinya kedalam matriks resiko berdasarkan rankingnya.

F. Penilaian Resiko

Melakukan penilaian resiko dengan cara mengevaluasi hasil pemetaan peluang tarikan jangkar dan konsekuensi dalam matriks resiko. Setelah melakukan penilaian resiko, maka dapatkan ditentukan resiko dapat diterima atau tidak[5].

G. Kesimpulan

Kesimpulan sebagai langkah terakhir penulisan penelitian ini akan ditampilkan masing-masing berat jangkar beserta konsekuensi kerusakan yang akan terjadi pada pipa.

III. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada tugas akhir kali ini digunakan data pipa, kapal dan lingkungan sesuai dengan studi case pada offshore pipeline Labuhan Maringgai-Muara Bekasi milik PT Perusahaan Gas Negara (PGN).

A. Data Pipa

Data pipa yang digunakan ialah sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1. Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa panjang pipa sebenarnya adalah 142.737 km. Namun pada tugas akhir kali ini dilakukan asumsi Panjang pipa sepanjang 12,192 m. Asumsi ini didasarkan pada beberapa referensi perhitungan pipa dimana untuk Panjang pipa yang di Analisa sepanjang 150D.

B. Data Kapal

Data kapal yang digunakan pada tugas akhir kali ini adalah kapal yang mempunyai frekuensi tahunan terbesar ketika melewati perairan tersebut.

Tabel 8.
Ranking Konsekuensi.

Berat Jangkar (Kg)	Peluang Kejadian Gagal (%)	Ranking
1140	0%	1
1200	0%	1
1290	4%	3

Tabel 9.
Ranking Frekuensi.

Frekuensi	Annual Frequency	Ranking
1.31×10^{-1}	$<10^{-2}$	5

Tabel 10.
Matriks Resiko.

Frequency	Consequences				
	1	2	3	4	5
5	1140 dan 1200		1290		
4					
3					
2					
1					

Data kapal tersebut terdapat pada Tabel 2. Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa kapal jenis supply vessel small melewati lokasi pipa sebanyak 3650 kali tiap tahunnya. Pada tugas akhir kali ini juga dilakukan variasi berat jangkar sebesar 1.14 ton, 1.20 ton dan 1.29 ton. Variasi ini didasarkan pada data kapal sejenis yang juga melewati jalur pipa tersebut setiap tahunnya.

C. Data Lingkungan

Data lingkungan pada perairan terdapat pada Tabel 3. Pada Table 3 dapat dilihat bahwa perairan di sekitar pipa yang dianalisis memiliki minimal kedalaman 15 m, dimana pada tugas akhir dipakai dalam perhitungan dalam menentukan tekanan eksternal pipa akibat pengaruh lingkungan.

D. Perhitungan Konsekuensi Akibat Jatuhnya Jangkar

Dalam tugas akhir ini untuk menghitung konsekuensi, penulis menggunakan table ranking konsekuensi dari IPC (International Pipeline Conference) seperti yang ditunjukkan pada Table 2.2. yaitu dengan menghitung besarnya gaya dari jangkar terlebih dahulu. Berdasarkan data yang sudah ada, kapal pada lokasi tersebut dikelompokkan berdasarkan jenis dan berat jangkarnya. Anchor kapal pada studi case di labuhan Maringgai-Muara Bekasi ini salah satunya memiliki berat sebesar 1.29 ton.

Tabel 4 menunjukkan data jangkar dengan berat 1.29 ton. Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa jangkar memiliki *project Area of Object* 0.675 m² dan *Anchor Volume* 0.1643 m³ yang kemudian akan digunakan dalam perhitungan untuk menentukan energi total yang diberikan jangkar terhadap badan pipa.

E. Pembahasan

Langkah pertama setelah semua data terkumpul ialah dengan menghitung besarnya energi terminal untuk masing-masing berat jangkar. Perhitungan ini diperlukan karena ada pengaruh gaya gravitasi dan tekanan ketika jangkar berada didalam air, kemudian dilanjutkan dengan melakukan pemodelan pada ANSYS untuk mendapatkan ekuivalen stress dan dilanjutkan dengan melakukan simulasi monte carlo.

1) Perhitungan Energi Kinetik Terminal untuk Setiap Berat Jangkar

Perhitungan dimulai dengan menghitung kecepatan terminal jangkar, kemudian dilanjutkan dengan menghitung massa tambahan jangkar ketika didalam air dan dilanjutkan dengan menghitung energi kinetik terminal.

Hasil perhitungan untuk setiap berat jangkar pada Tabel 5. Dapat dilihat bahwa jangkar dengan energi kinetik terminal terbesar adalah jangkar dengan beban terbesar yaitu jangkar dengan berat 1290 kg.

2) Pemodelan pada ANSYS

Pemodelan pada ANSYS dilakukan yaitu untuk mengetahui besarnya tegangan yang terjadi pada pipa ketika terkena jatuhnya jangkar. Pada tugas akhir ini, penggunaan software ANSYS hanya sebatas mengetahui tegangan ekuivalen pada pipa saat terkena jatuhnya jangkar tanpa melihat deformasi yang terjadi. Dalam melakukan analisis menggunakan software ANSYS 20 untuk mendapatkan nilai *Equivalent Stress* pipa ketika terkena jatuhnya jangkar, hal pertama yang harus kita ketahui adalah besarnya nilai P_i *Internal Pressure* dan P_e *Eksternal Pressure* yang bekerja pada pipa tersebut sebagai input awal pada ANSYS. Pada tugas akhir kali ini, pipa yang di Analisa sepanjang 12,192 m dengan nilai P_i sesuai dengan Tabel 1 sebesar 1000 psia atau sama dengan 6,89 MPa sedangkan nilai P_e sebesar 0,15 MPa berdasarkan persamaan dari *Qiang Bai and Yong Bai, 2014* [6] sebagai berikut ini.

$$\begin{aligned} P_e &= \rho_{water} \times g \times d_{min} & (6) \\ &= 1025 \times 10 \times 15 \\ &= 153,750 \text{ N/m}^2 \\ &= 0,15 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Setelah nilai P_i dan P_e di input, maka langkah selanjutnya ialah melakukan analisis pada software ANSYS pada setiap variasi berat jangkar. Variasi berat jangkar yang diberikan ialah 1140 kg, 1200 kg dan 1290 kg. Pada tugas akhir ini model ANSYS pipa dilakukan pada dua kondisi pipa yaitu ketika pipa dalam kondisi keadaan normal atau tidak terkena beban jangkar artinya tekanan yang bekerja pada badan pipa hanyalah tekanan internal dari fluida yang mengalir didalam pipa dan tekanan eksternal yang berasal dari luar badan pipa dan kondisi ketika pipa terkena pengaruh beban jangkar. Pada kondisi pertama, beban yang bekerja pada pipa hanyalah beban tekanan internal pipa sendiri, beban eksternal pada lingkungan tersebut dan beban akibat pengaruh tumpuan pada pipa tersebut. Sedangkan untuk kondisi kedua, besar gaya akibat terjatuhnya jangkar diinput dalam bentuk *remote force* pada ANSYS. Sebelum menginput beban-beban yang akan di analisa, hal pertama yang dilakukan adalah membuat geometri sesuai dengan data pipa yang ada. Gambar 1 merupakan gambar kondisi batas awal pada pipa.

Dari kondisi batas diatas, P_i dan P_e adalah tekanan awal yang dimiliki oleh pipa sebelum terkena jangkar, adapun P_i ditunjukkan pada titik B, dan P_e ditunjukkan pada titik A. Selain beban internal dan eksternal, beban yang kemudian akan diinputkan kedalam ANSYS ialah beban dari jangkar yang jatuh mengenai pipa, sehingga pemilihan tumpuan yang tepat

diperlukan agar mendapatkan hasil yang akurat dan bisa mewakili kondisi nyata apabila terjadi kecelakaan tersebut. Pada kondisi batas awal pipa pada ANSYS, tumpuan jenis Pin-pin menjadi input untuk analisis tugas akhir ini. Pemilihan jenis pin-pin dikarenakan ketika pipa terkena jatuhnya jangkar dari atas, gerak yang memungkinkan terjadi pada pipa ialah gerak rotasi. Sehingga tumpuan pin-pin lebih mewakili untuk pipa ketika bending terjadi akibat kejatuhan jangkar. Pada Gambar 1, tumpuan tersebut ditunjukkan oleh huruf C dan D. setelah melakukan analisis pada ANSYS diperoleh hasil bahwa *equivalent stress* terbesar muncul ketika pipa terkena beban jangkar 1.29 ton. Tabel 6 merupakan tabel *equivalent stress* untuk pipa dengan berat jangkar 1.29 ton.

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa energi yang dihasilkan oleh jangkar dengan berat 1290kg merupakan energi terbesar dan menghasilkan tegangan ekuivalen terbesar juga. Tegangan ekuivalen pada gambar simulasi ANSYS dapat diketahui dari legend di sebelah kiri gambar.

3) Simulasi Monte Carlo

Moda kegagalan yang digunakan pada tugas akhir ini ialah mengacu pada DNV OS F101 *Submarine Pipeline System*. Berikut adalah moda kegagalan yang di pakai:

$$g(x) = \sigma_{ys} - \sigma_e$$

$$g(x) = 0,9 \text{ SMYS} - \sigma_e$$

Sesuai dengan persamaan moda kegagalan yang telah ditetapkan, apabila nilai dari *Equivalent Stress* lebih besar dari 0.9SMYS, maka pipa mengalami kegagalan. Untuk mendapatkan nilai dengan validasi yang tinggi, pengulangan yang dilakukan ialah sebanyak 1000 kali[7]. Setelah dilakukan simulasi sebanyak 1000 kali dengan memasukan *Equivalent Stress*, moda kegagalannya dan random number menggunakan bantuan software Excel, maka didapatkan nilai keandalan untuk setiap variasi berat jangkar sebagaimana ditampikan pada Tabel 7.

Dari hasil simulasi yang dilakukan sebanyak 1000 kali, didapatkan hasil bahwa ketika jangkar dengan berat 1140 kg dan 1200 kg mengenai pipa dengan SMYS sesuai data, maka pipa tersebut mempunyai keandalan sebesar 100% karena *probability of failure* atau probabilitas kegagalan yang ditimbulkannya sebesar 0%. sedangkan pipa ketika terkena pengaruh beban jangkar dengan berat 1290 kg, keandalannya sebesar 96% dengan *probability of failure* atau probabilitas kegagalan sebesar 4% atau juga dapat diartikan bahwa pipa tersebut memiliki peluang kegagalan sebesar 4% dari jumlah kejadian yang disimulasikan. Dari hasil tersebut diketahui bahwa semakin berat beban jangkar yang mengenai pipa, tegangan yang ditimbulkan juga semakin besar sehingga memungkinkan pipa untuk mengalami kegagalan. Hasil dari simulasi ini menjadi data pendukung untuk selanjutnya dilakukan analisis resiko pada pipa tersebut khususnya pada perhitungan konsekuensi.

4) Perhitungan Frekuensi

Dalam menghitung besarnya frekuensi kegagalan pipa yang diakibatkan oleh jatuhnya jangkar diperlukan untuk mengetahui:

1. *annual frequency* kapal tersebut melewati daerah jalur

pipa. dari data yang didapatkan diketahui bahwa kapal dengan jenis supply vessel melewati lokasi pipa sebanyak 3650 kali.

2. Langkah selanjutnya untuk mengetahui besarnya peluang kapal melewati jalur pipa adalah menentukan besar peluang kapal menjatuhkan *emergency anchor*. Dalam tugas akhir ini untuk menentukan besarnya peluang kapal menjatuhkan *emergency anchor* mengacu pada jurnal penelitian yang dilakukan oleh Mulyadi (2014) [8], yaitu sebesar 3.6×10^{-5} .

Setelah diketahui frekuensi kapal melewati daerah pipa tersebut dan besar peluang kapal menjatuhkan jangkar, maka dapat dihitung frekuensi pertahun kapal menjatuhkan jangkar di lokasi pipa sebesar:

$$Frekuensi = 3,6 \times 10^{-5} \times (3650) \quad (7)$$

$$Frekuensi = 1,31 \times 10^{-1}$$

5) Menentukan Ranking Konsekuensi Kegagalan

Menentukan besarnya konsekuensi kegagalan dilakukan yaitu untuk mengurutkan tingkat konsekuensi kegagalan yang bisa terjadi pada pipa dari tertinggi hingga terendah akibat pengaruh besarnya tegangan pada badan pipa yang disebabkan oleh beban jangkar mengacu pada standard yang dipakai. Besarnya Konsekuensi kegagalan pipa akibat jatuhnya jangkar yang sudah diperoleh dari simulasi Monte Carlo, maka selanjutnya akan dibuat *Ranking* berdasarkan Tabel 7. yaitu mengacu pada IPC (*International Pipelien Conference*) [9]. Hasil per-*ranking*-an untuk setiap variasi berat jangkar yang mengenai pipa menunjukkan seberapa besar tingkat keparahan yang mungkin bisa ditimbulkan pada pipa. Hasil tersebut adalah sebagaimana ditampilkan pada Tabel 8.

Dari hasil pada Tabel 8, menunjukkan bahwa jangkar dengan berat 1290 ialah jangkar dengan ranking konsekuensi kegagalan tertinggi. Artinya apabila jangkar dengan berat demikian mengenai badan pipa, maka tingkat kerusakan yang bisa ditimbulkan juga semakin parah.

6) Menentukan Ranking Frekuensi Kegagalan

Besarnya frekuensi kegagalan pipa akibat tarikan jangkar yang sudah diperoleh dari perhitungan sebelumnya selanjutnya akan dibuat *ranking* berdasarkan Tabel 8. Sehingga hasil *Ranking* frekuensi untuk semua variasi berat jangkar ditunjukkan pada Tabel 9.

Dari *ranking* tersebut, dapat diketahui bahwa frekuensi peristiwa yang diperkirakan bisa terjadi yaitu lebih dari satu kali selama masa pakai atau lifetime pipa. Pada *perankingan* diatas menunjukkan bahwa frekuensi kejadian sangat besar, artinya kejadian pipa bisa terkena kejatuhan jangkar dalam setiap tahunnya juga sangat besar. Sehingga apabila frekuensi peristiwa ini tidak dikurangi, maka bisa menimbulkan ancaman terhadap keselamatan dan keandalan pipa khususnya ketahanan material badan pipa dalam menahan beban berulang yang diberikan.

7) Penyusunan Matriks Resiko

Dari hasil penyusunan *ranking* konsekuensi dan frekuensi yang telah dilakukan, selanjutnya ialah membuat matriks resiko untuk setiap variasi berat jangkar. Matriks resiko pada tugas akhir ini menggunakan acuan dari DNV RP F107. Maka diperoleh matriks resiko seperti pada Tabel 10.

Dari hasil penyusunan matriks resiko tersebut, dapat diketahui bahwa jangkar dengan berat 1140 Kg dan 1200 Kg berada pada zona ALARP (*As Low As Reasonably Practical*) artinya resiko harus dikendalikan hingga resiko residualnya seminimal mungkin. Pada kondisi ini, kerusakan yang terjadi pada pipa masih dapat diterima namun harus dikendalikan contohnya ialah berupa penyok pada badan pipa. Sedangkan jangkar dengan berat 1290 Kg berada pada zona *Unacceptable*, artinya resiko kegagalannya tidak bisa diterima sehingga diperlukan tindakan mitigasi. Jadi pada kondisi ini kerusakan pipa sudah sangat parah sehingga diperlukan tindakan untuk menghindarinya yaitu bisa berupa pengurangan frekuensinya atau pengurangan pada besarnya konsekuensinya. Contoh kerusakan pada kondisi *unacceptable* ialah pipa mengalami kebocoran yang membuat fluida didalamnya keluar.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil analisis perhitungan resiko kerusakan pipa yang diakibatkan penurunan jangkar berdasarkan rumusan masalah pada tugas akhir ini ialah sebagai berikut: (1) Setelah dilakukan simulasi monte carlo, dapat diketahui bahwa peluang kegagalan pipa ketika terkena penurunan jangkar ialah sebagai berikut: (1a) Jangkar dengan variasi berat 1140 Kg dan 1200 Kg memiliki peluang kegagalan sebesar 0%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ketika badan pipa terkena jangkar dengan berat 1140 dan 1200 Kg, kondisi pipa tidak terjadi kegagalan atau kerusakan. (1b) Jangkar dengan variasi berat 1290 Kg, memiliki peluang kegagalan sebesar 4%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ada konsekuensi kegagalan yang akan terjadi pada pipa ketika badan pipa terkena jatuhnya jangkar dengan berat 1290 Kg. (2) Konsekuensi yang dapat terjadi pada pipa ketika terkena penurunan jangkar berdasarkan variasi dari berat jangkar tersebut ialah mengacu pada perankingan yang telah dilakukan: (2a) Jangkar dengan berat 1140 dan 1200 Kg berada di ranking 1 ($P_{fail} \leq 0.1\%$), artinya kondisi pipa ketika terkena berat jangkar tersebut masih aman dan tidak terjadi kegagalan sehingga tidak menimbulkan konsekuensi yang mengakibatkan kerusakan yang parah dan kerugian. Pada kondisi ini kerusakan yang bisa terjadi pada badan pipa yaitu berupa penyok namun masih layak dan bisa beroperasi dengan baik. (2b) Jangkar dengan berat 1290 Kg berada di ranking 3 ($1\% < P_{fail} \leq 10\%$), artinya kondisi pipa ketika terkena berat jangkar tersebut sudah termasuk kondisi dimana pipa bisa mengalami kegagalan yang dapat menimbulkan konsekuensi dan mengakibatkan kerusakan yang parah serta kerugian. Konsekuensi yang bisa terjadi ialah berupa badan pipa mengalami kebocoran atau patah sehingga tidak bisa beroperasi untuk mengalirkan fluida. (3) Dari penilaian matriks resiko yang telah dilakukan, dapat diketahui posisi pipa pada matriks berdasarkan tingkat resiko kegagalan yang dapat terjadi untuk setiap variasi berat jangkarnya sebagai berikut: (3a) *Acceptable* / Dapat diterima. (3b) ALARP (*As Low As Reasonably Practical*) Jangkar dengan berat 1140 Kg dan 1200 Kg. Pada tingkat resiko ini keadaan pipa masih bisa digunakan dan kerusakan yang ditimbulkan masih bisa diterima namun harus mengurangi resiko residualnya. (3c) *Unacceptable* / Tidak dapat diterima: Jangkar dengan berat 1290 Kg. Pada keadaan ini, kerusakan

yang terjadi pada pipa sudah sangat parah dan tidak bisa diterima lagi sehingga diperlukan tindakan preventif maupun mitigasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. P. Devi, I. G. N. R. Usadha, I. L. Wibowo, and I. Mukhlas, "Penilaian resiko pipa bawah laut oleh factor kapal menggunakan pendekatan bayesian network," *Journal Math. and Its Appl.*, vol. 14, no. 1, pp. 61–71, May 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.12962/limits.v14i1.2250>.
- [2] B. Muhammad Drehem, "Analisa Resiko pada Kebocoran Pipa Bawah Laut dengan Metode Hybrid Risk Analysis," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [3] M. Martaningtyas and H. D. Ariesyady, "Identifikasi bahaya dan analisis risiko pada jaringan pipa transmisi crude oil di PT. X," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 24, no. 2, pp. 12–22, Oct. 2018.
- [4] Det Norske Veritas, *DNV-RP-F107 Risk Assessment of Pipeline Protection*, 2010th ed. Norwegia: Det Norske Veritas, 2010.
- [5] W. Abdullah, D. M. Rosyid, and W. Citrosiswoyo, "Analisa resiko dan langkah mitigasi pada offshore pipeline," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 1, no. 1, pp. 280–285, Sep. 2012, doi: [10.12962/j23373539.v1i1.2022](https://doi.org/10.12962/j23373539.v1i1.2022).
- [6] Q. Bai and Y. Bai, *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. Houston: Gulf Professional Publishing, 2014.
- [7] A. Alijoyo, B. Wijaya, I. Jacob, and A. F. M. S. Fisabilillah, *Monte Carlo Simulation*. Jakarta: Centre for Risk Management & Sustainability, 2019.
- [8] Y. Mulyadi, E. Kobayashi, N. Wakabayashi, T. Pitana, Wahyudi, and E. Prasetyo, "Estimation method for dragged anchor accident frequency on subsea pipelines in busy port areas," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, vol. 20, pp. 173–183, Jan. 2014, doi: [10.2534/JJASNAOE.20.173](https://doi.org/10.2534/JJASNAOE.20.173).
- [9] B. Guo, S. Song, Ali, Ghalambor, and T. R. Lin, *Offshore Pipelines: Design, Installation, and Maintenance*, 2nd ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2013.