

ANALISIS RESIKO PIPA BAWAH LAUT AKIBAT TUMBUKAN JANGKAR

Fitri Arieshanida¹ dan Dr. Paramashanti, ST., MT.²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10 Bandung 40132

[1fitriarieshanida@yahoo.com](mailto:¹fitriarieshanida@yahoo.com) dan [2parama@ocean.itb.ac.id](mailto:²parama@ocean.itb.ac.id)

Kata Kunci: Resiko, Pipa Bawah Laut, Tumbukan Jangkar, Frekuensi, Konsekuensi.

Abstrak: Selama masa layannya, pipa memiliki resiko mengalami kegagalan akibat beberapa hal, salah satunya adalah resiko akibat terkena tumbukan jangkar. Pada studi ini, analisis resiko kegagalan pipa terhadap tumbukan jangkar akan dilakukan secara general untuk seluruh pipa bawah laut yang berada di kawasan pelabuhan Tanjung Priok. Data pelayaran kapal yang digunakan merupakan data pelayaran kapal Tanjung Priok, sementara data pipa yang digunakan merupakan data seluruh diameter, tebal pipa, serta SMYS yang diambil dari standar API Specification 5L, Edisi 42, Januari 2000. Data angin yang digunakan merupakan data angin pada tahun 1999-2008 dan probabilitasnya akan didekati dengan menggunakan fungsi distribusi.

Metode analisis yang digunakan pada studi ini adalah metode matriks resiko. Konsekuensi yang dibahas berupa *dent* pada pipa yang dihitung berdasarkan DNV RP 107, sedangkan frekuensi atau probabilitas yang digunakan adalah probabilitas jangkar mengenai pipa. Studi ini dilakukan untuk melihat apakah resiko pipa masih berada dalam batas *Acceptable*, *ALARP* (*As Low As Reasonably Practicable*), atau *Not Acceptable*. Apabila resiko pipa berada dalam batas *ALARP* atau *Not Acceptable*, maka dilakukan analisis untuk mengurangi resiko, khususnya untuk mengurangi konsekuensi yang terjadi.

Hasil analisis dari studi ini memperlihatkan bahwa resiko pipa terkena tumbukan jangkar yang terjadi di wilayah Tanjung Priok ini berada pada wilayah *Acceptable* dan *ALARP*. Salah satu langkah mitigasi yang dapat dilakukan untuk mengurangi resiko adalah dengan melapisi pipa dengan beton.

PENDAHULUAN

Resiko merupakan perkalian antara frekuensi kegagalan dengan konsekuensi kejadian. Konsekuensi pada kasus jatuhnya jangkar pada pipa berupa *dent* yang besarnya bergantung pada diameter pipa, tebal pipa, SMYS pipa, dan energi tumbukan jangkar. Energi tumbukan jangkar dipengaruhi oleh kecepatan jatuh jangkar dan massa jangkar. Sementara itu frekuensi kegagalan pada kasus jatuhnya jangkar pada pipa bergantung pada frekuensi kapal melewati pipa, frekuensi kapal menjatuhkan jangkar, dan frekuensi jangkar jatuh pada area tumbukan. Kejadian-kejadian tersebut merupakan suatu kejadian acak yang frekuensi kejadiannya tidak bisa dihitung secara pasti atau selalu berubah setiap waktunya, sehingga frekuensi kejadiannya hanya bisa didekati dengan menggunakan konsep probabilitas.

Analisis resiko pada kasus ini akan dilakukan dengan menggunakan metode matriks resiko berdasarkan DNV RP 107. Resiko akan dibagi menjadi tiga batasan, yaitu *Acceptable*, *ALARP*(*As Low As Reasonably Practicable*), atau *Not Acceptable*. Apabila resiko pipa berada dalam batas *ALARP* atau *Not Acceptable*, maka dilakukan analisis lanjutan untuk mengurangi resiko, khususnya untuk mengurangi konsekuensi yang terjadi. Salah satu hal yang dilakukan adalah dengan melakukan perhitungan tebal lapisan beton minimum yang diperlukan agar pipa terlindung dari energi tumbukan jangkar.

Dalam studi ini akan dipaparkan mengenai proses analisis resiko pipa bawah laut akibat tumbukan jangkar yang terletak pada daerah pelabuhan Tanjung Priok (**Gambar 1**).



Gambar 1 Lokasi Studi

Sumber : Google Maps2013

METODOLOGI

Metodologi yang dilakukan dalam pengerjaan studi ini dapat dilihat pada **Gambar 2**.

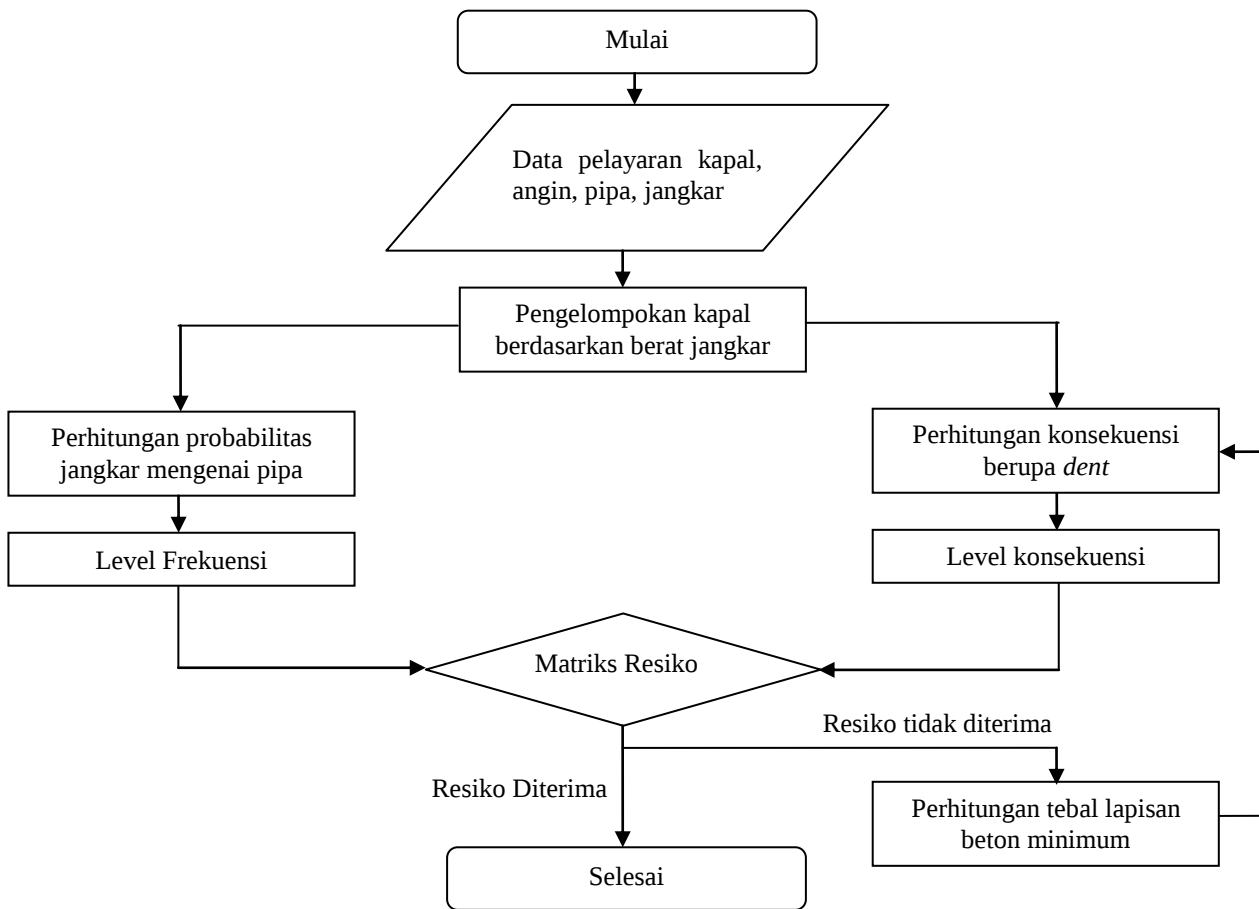
PERHITUNGAN KONSEKUENSI

Konsekuensi yang terjadi pada kasus tumbukan jangkar pada pipa berupa *dent*. Nilai *dent* bergantung pada energi tumbukan jangkar dan properti pipa, sementara energi tumbukan jangkar bergantung pada kecepatan jatuh jangkar dan massa jangkar. Perhitungan *dent* berdasarkan DNV RP 107 dapat dilihat pada persamaan 1. Ilustrasi *dent* dapat dilihat pada **Gambar 3**.

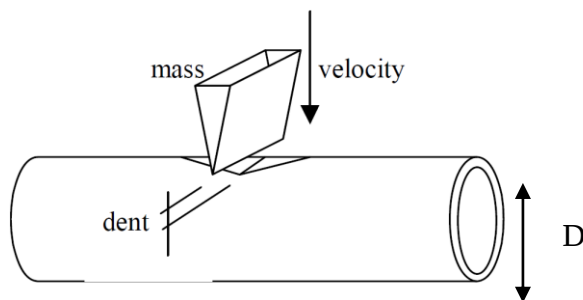
$$\delta = \left(\frac{E \cdot g^{1/2} \cdot t^{1/2}}{16 \cdot (2\pi)^{1/2} \cdot m_p \cdot D^{3/2}} \right)^{2/3} \cdot D \quad (\text{Persamaan 1})$$

dimana:

- δ = Deformasi Pipa, kedalaman *Dent* (mm)
- m_p = Kapasitas Moment Plastik dari Dinding Pipa = $\frac{1}{4} \sigma_y t^2$
- σ_y = Yield Stress (Mpa)
- D = Diameter Luar Pipa (mm)
- t = Tebal Pipa (mm)
- E = Energi Tumbukan Jangkar (Joule)



Gambar 2 Metodologi



Gambar 3 Dent pada pipa

Sumber : Recommended Practice DNV-RP-F107, Oktober 2010 halaman 14

Konsekuensi yang digunakan dalam analisis resiko kasus ini merupakan konsekuensi terbesar yang dapat terjadi pada pipa, hal ini dikarenakan hampir tidak mungkin pipa terkena dua jangkar atau lebih di tempat yang persis sama. Nilai konsekuensi terbesar tersebut akan dicocokkan ke dalam **Tabel 1** untuk mendapatkan level konsekuensi yang nantinya akan dimasukkan ke dalam matriks resiko.

Tabel 1 Level Konsekuensi Kerusakan pada Pipa

Kategori	Dent/ Diameter (%)	Deskripsi Kerusakan
1 (rendah)	< 5	Minor Damage
2	5 – 10	Major Damage Kebocoran dapat diantisipasi
3 (medium)	10 – 15	Major Damage Kebocoran dan <i>rupture</i> dapat diantisipasi
4	15 – 20	Major Damage Kebocoran dan <i>rupture</i> dapat diantisipasi
5 (tinggi)	>20	Rupture

Sumber : Recommended Practice DNV-RP-F107, Oktober 2010 halaman 15

PERHITUNGAN FREKUENSI

Frekuensi yang terjadi pada kasus ini merupakan perkalian antara probabilitas kapal melewati pipa, probabilitas kapal menjatuhkan jangkar, dan probabilitas jangkar jatuh pada area tumbukan (lihat persamaan 2). Frekuensi yang dimasukkan ke dalam matriks resiko merupakan frekuensi total dari seluruh kapal (lihat persamaan 3)

$$P_{hit(x)} = P_{ship\ group(x)} \times P_{passing\ ship(x)} \times P_{drop} \times P_{hit\ area(x)} \quad (\text{Persamaan 2})$$

$$P_{hit\ total} = P_{hit(A)} + P_{hit(B)} + \dots + P_{hit(n)} \quad (\text{Persamaan 3})$$

dimana:

$P_{ship\ group(x)}$	= Probabilitas kelompok kapal (x)
$P_{passing\ ship(x)}$	= Probabilitas kelompok kapal (x) melewati pipa
P_{drop}	= Probabilitas kapal menjatuhkan jangkar
$P_{hit\ area(x)}$	= Probabilitas jangkar jatuh pada area tumbukan untuk kapal (x)
$P_{hit(x)}$	= Probabilitas jangkar mengenai pipa untuk kel. kapal (x)
$P_{hit\ total}$	= Probabilitas total jangkar mengenai pipa
x	= Kelompok kapal = A, B, C = 1, 2, 3

Probabilitas kelompok kapal (x) dapat dihitung menggunakan persamaan 4.

$$P_{ship\ group(x)} = \frac{\text{Jumlah kapal kelompok (x)}}{\text{Jumlah kapal keseluruhan}} \quad (\text{Persamaan 4})$$

Probabilitas kelompok kapal (x) melewati pipa dapat dihitung menggunakan persamaan 5.

$$P_{passing\ ship(x)} = \frac{B_{hit(x)} \times n(x)}{v_s \times t} \quad (\text{Persamaan 5})$$

Probabilitas jangkar jatuh pada area tumbukan untuk kapal (x) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 6. Zona pipa yang akan digunakan dalam perhitungan ini merupakan lebar zona aman yang tercantum pada *Petroleum Act 1987*, yaitu beradius 500 m dari pipa atau berdiameter 1000 meter dari pipa. Pemilihan ini didasarkan pada ruang lingkup DNV RP 107 yang menyatakan bahwa DNV RP 107 menyediakan metodologi perhitungan analisis resiko dalam wilayah zona aman instalasi.

$$P_{hit\ area}(x) = \frac{B_{h(x)}}{B_z} \quad (\text{Persamaan 6})$$

dimana :

$B_{h(n)}$ = Lebar area tumbukan (m) = $L + D$
 B_z = Lebar zona pipa yang ditinjau (m)
 $L_{(n)}$ = Panjang jangkar (m)
 D = Diameter Pipa (m)

Probabilitas kapal menjatuhkan jangkar dihitung berdasarkan asumsi bahwa kapal akan mencari tempat berlindung dan menjatuhkan jangkar apabila angin berada pada kondisi minimal *Force* 8 dalam *Beaufort Scale* atau kecepatan angin minimal 17.2 m/s. Probabilitas terjadinya angin ≤ 17.2 m/s ini bisa didapat dengan menggunakan fungsi distribusi. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dengan menggunakan metode Kolmogorov-Smirnoff terhadap distribusi normal, log normal, Rayleigh, dan Weibull, distribusi yang paling sesuai untuk angin adalah distribusi Weibull. Maka, besar probabilitas terjadinya angin ≤ 17.2 m/s dapat dicari dengan menggunakan CDF distribusi Weibull yang dapat dilihat pada persamaan 7.

$$Fx(x) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\alpha}\right)^2\right) \quad 0 \leq x < \infty, \alpha \geq 0 \quad (\text{Persamaan 7})$$

Frekuensi yang digunakan dalam analisis resiko kasus ini merupakan frekuensi total dari seluruh kapal. Nilai frekuensi total tersebut akan dicocokkan ke dalam **Tabel 2** untuk mendapatkan level frekuensi yang nantinya akan dimasukkan ke dalam matriks resiko.

Tabel 2 Level Frekuensi

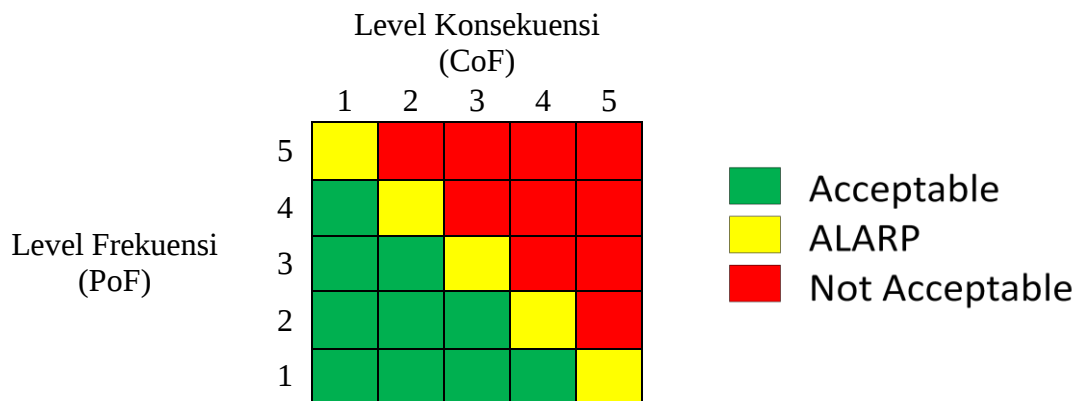
Kategori	Penjelasan	Frekuensi Tahunan
1 (rendah)	Frekuensi kejadian sangat rendah sehingga bisa diabaikan	$< 10^{-5}$
2	Kejadian sangat jarang terjadi	$10^{-4} - 10^{-5}$
3 (medium)	Jika kejadian hanya dilihat pada satu kasus pipa, kejadian diperkirakan tidak akan terjadi. Namun, ketika seluruh kasus digabung menjadi satu, kejadian diperkirakan dapat terjadi setahun sekali	$10^{-3} - 10^{-4}$
4	Pada satu kasus pipa kejadian diperkirakan dapat terjadi selama masa layan pipa tersebut	$10^{-2} - 10^{-3}$
5 (tinggi)	Pada satu kasus pipa kejadian diperkirakan dapat terjadi lebih dari sekali selama masa layan pipa	$> 10^{-2}$

Sumber : *Recommended Practice DNV-RP-F107, Oktober 2010 halaman 31*

MATRIKS RESIKO

Matriks resiko dibuat berdasarkan level frekuensi dan level konsekuensi dari setiap kejadian. Pada kasus jatuhnya jangkar di atas pipa, frekuensi yang digunakan merupakan frekuensi total dari seluruh kapal yang melewati pipa, sedangkan konsekuensi yang digunakan merupakan konsekuensi terbesar yang dapat dialami pipa. Matriks resiko dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Secara umum *Risk Matrix* terbagi menjadi tiga daerah sesuai dengan hasil perkalian antara level frekuensi dengan level konsekuensinya, yaitu *Acceptable* yang artinya resiko masih dapat diterima, *ALARP* (*As Low As Reasonably Practicable*) yang artinya resiko yang terjadi pada daerah ini sebetulnya masih memenuhi syarat, namun syarat tersebut berada diambang batas sehingga kegagalan dapat terjadi sewaktu-waktu sehingga diperlukan mitigasi untuk mengurangi resiko, dan *Not Acceptable* yang artinya resiko yang terjadi sudah tidak dapat diterima sehingga harus dilakukan penanggulangan sesegera mungkin.



Gambar 4 Risk matriks

LAPISAN BETON

Salah satu cara untuk melindungi pipa dari tumbukan jangkar adalah melapisi pipa dengan lapisan beton. Energi yang dapat diterima oleh lapisan beton merupakan fungsi dari volume penetrasi tumbukan dan kekuatan atau daya hancur beton (Y). Besar daya hancur beton berkisar antara 3 sampai 5 kali kekuatan kubus untuk beton yang memiliki massa jenis normal, dan berkisar antara 5 sampai 7 kali kekuatan kubus pada beton ringan (Jensen, 1978, 1983). Kekuatan kubus yang dimaksud berkisar antara 35 sampai 45 Mpa. Fungsi tersebut dapat dilihat pada persamaan 8.

$$E_k = Y \cdot b \cdot \frac{4}{3} \sqrt{D \cdot x_0^3} \quad (\text{Persamaan 8})$$

dimana:

- E_k = Energi yang diserap oleh lapisan beton (Joule)
- Y = Kekuatan penghancur jangkar (Pa)
- b = Lebar jangkar (m)
- D = Diameter pipa (m)
- x_0 = Tebal lapisan beton (m)

Jika tidak ada informasi yang dapat digunakan terkait perhitungan energi yang dapat diserap oleh beton, maka DNV RP 107 memberikan asumsi bahwa lapisan beton berdensitas normal dengan ketebalan 45 mm dapat menyerap energi sebesar 40 kJ dari tumbukan benda yang memiliki lebar 30 mm.

HASIL PERHITUNGAN

Data yang digunakan pada studi kasus ini merupakan data seluruh diameter, tebal pipa, dan SMYS yang terdapat pada standar API Specification 5L, Edisi 42, Januari 2000. Hasil yang akan ditampilkan pada paper ini hanyalah hasil dengan data-data berikut ini, hasil lainnya dapat dilihat

pada laporan tugas akhir Analisis Resiko Pipa Bawah Laut Akibat Tumbukan Jangkar oleh Fitri Arieshanida.

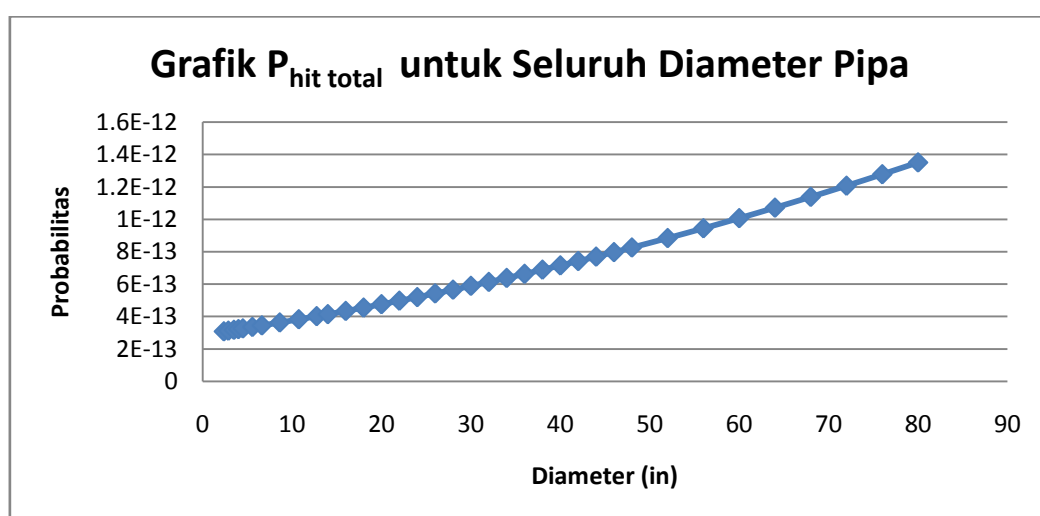
Kelompok Kapal	= Q
Massa jangkar	= 12900 kg
Massa Jenis Besi	= 7850 kg/m ³
Koefisien Drag	= 1
Koefisien Massa Tambahan	= 2
SMYS	= 414000000 Pa
Panjang Jangkar	= 2.697 m
Lebar Jangkar	= 1.162 m
Diameter Pipa	= 32'' = 0.8128 m
Tebal Pipa	= 1'' = 0.0254 m
Kekuatan Penghancur Jangkar	= 105000000 Pa

Pemilihan ini dikarenakan kelompok kapal Q dengan berat jangkar 12900 kg merupakan kelompok kapal yang menghasilkan konsekuensi terbesar pada pipa.

Hasil perhitungan probabilitas kasus tumbukan jangkar pada pipa untuk diameter 32'' dapat dilihat pada **Tabel 3**, sedangkan hasil perhitungan $P_{hit\ total}$ untuk seluruh diameter dapat dilihat pada **Gambar 5**. Pada perhitungan ini, data angin yang digunakan merupakan data angin 6 jam-an pada tahun 1999-2008 yang diambil dari situs NOAA yang berlokasi di perairan dekat pelabuhan Tanjung Priok. Dengan menggunakan distribusi Weibull, didapat probabilitas kapal menjatuhkan jangkar atau probabilitas terjadinya angin ≤ 17.2 m/s adalah sebesar 1.0234×10^{-5} .

Hasil perhitungan konsekuensi tumbukan jangkar pada pipa untuk data-data yang telah diberikan sebelumnya dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Matriks resiko untuk contoh kasus ini dapat dilihat pada **Gambar 6**.



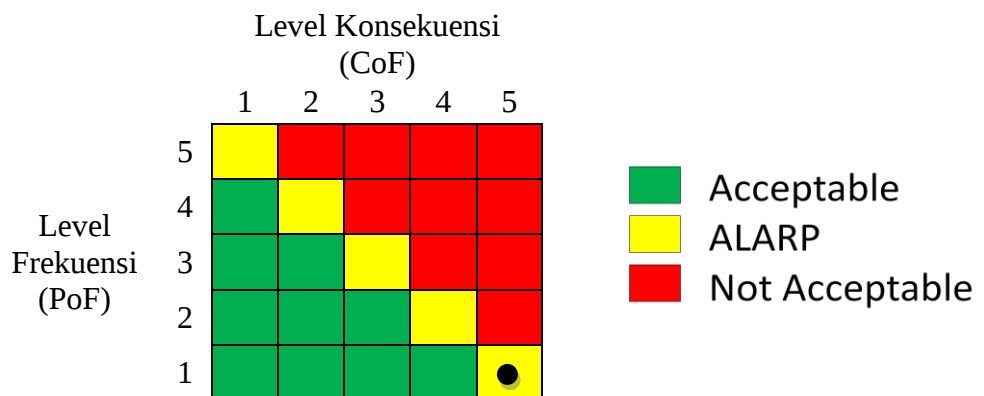
Gambar 5 Grafik $P_{hit\ total}$ untuk semua diameter pipa

Tabel 3 Hasil Perhitungan Probabilitas Jangkar Mengenai Pipa

Satuan						in m				
Diameter						32 0.8128				
No	Kel. Kapal	Jml. Kapal	L (m)	Speed (m/s)	P ship group	B hit	P hit area	Ppassing ship	Phit	PoF
1	A	2587	0.9	3.60	0.1602	1.71	0.00171	3.9E-05	1.1E-13	1
2	B	696	0.95	5.14	0.0431	1.76	0.00176	7.56E-06	5.88E-15	1
3	C	40	1.06	6.69	0.0025	1.87	0.00187	3.55E-07	1.69E-17	1
4	D	407	1.16	7.20	0.0252	1.97	0.00197	3.54E-06	1.8E-15	1
5	E	95	1.2	7.20	0.0059	2.01	0.00201	8.42E-07	1.02E-16	1
6	F	610	1.34	6.43	0.0378	2.15	0.00215	6.48E-06	5.39E-15	1
7	G	452	1.38	8.74	0.0280	2.19	0.00219	3.59E-06	2.26E-15	1
8	H	2452	1.43	6.94	0.1519	2.24	0.00224	2.51E-05	8.75E-14	1
9	I	16	1.55	6.94	0.0010	2.36	0.00236	1.73E-07	4.14E-18	1
10	J	359	1.63	5.66	0.0222	2.44	0.00244	4.91E-06	2.73E-15	1
11	K	3336	2.04	9.83	0.2066	2.85	0.00285	3.07E-05	1.85E-13	1
12	L	155	2.09	7.72	0.0096	2.90	0.0029	1.85E-06	5.27E-16	1
13	M	597	2.14	10.29	0.0370	2.95	0.00295	5.43E-06	6.07E-15	1
14	N	2340	2.47	7.72	0.1449	3.28	0.00328	3.16E-05	1.54E-13	1
15	O	189	2.52	7.41	0.0117	3.33	0.00333	2.7E-06	1.08E-15	1
16	P	292	2.565	11.57	0.0181	3.38	0.00338	2.7E-06	1.69E-15	1
17	Q	1522	2.697	11.57	0.0943	3.51	0.00351	1.46E-05	4.96E-14	1
Probabilitas Jangkar Mengenai Pipa untuk seluruh Kapal						6.13 x 10 ⁻¹³				
Level Frekuensi						1				

Tabel 4 Hasil Perhitungan Konsekuensi Tumbukan Jangkar pada Pipa

Kelompok Kapal	Berat Jangkar (kg)	Volume (m3)	Luas Proyeksi (m2)	Kecepatan Jatuh Jangkar (m/s)	Energi Tumbukan Jangkar (Joule)	Dent (m)	Dent / Diameter	Level Konsekuensi
Q	12900	1.643	3.13	8.27	556664	0.215	26%	5



Gambar 6 Matriks Resiko

Dari matriks resiko dapat dilihat bahwa resiko untuk contoh kasus pipa yang diberikan berada pada kawasan ALARP, artinya resiko masih dapat diterima, namun mitigasi tetap harus dilakukan agar pipa tetap aman.

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, resiko tumbukan jangkar terhadap pipa di wilayah Tanjung Priok untuk seluruh property pipa, berada pada wilayah *Acceptable* dan *ALARP*. Karena terdapat resiko pipa yang berada pada wilayah ALARP, maka mitigasi perlu dilakukan. Salah satu contoh mitigasi yang dapat dilakukan adalah dengan melindungi pipa menggunakan lapisan beton. Hasil perhitungan lapisan beton minimum yang diperlukan untuk melindungi pipa dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Tebal Minimum Lapisan Beton

D (in)	D (m)	Tebal Lapisan Beton Minimum (mm)	D (in)	D (m)	Tebal Lapisan Beton Minimum (mm)
2.375	0.060	57.9	30	0.762	24.9
2.875	0.073	54.3	32	0.813	24.3
3.5	0.089	50.9	34	0.864	23.8
4	0.102	48.7	36	0.914	23.4
4.5	0.114	46.8	38	0.965	23.0
5.563	0.141	43.6	40	1.016	22.6
6.625	0.168	41.1	42	1.067	22.2
8.625	0.219	37.7	44	1.118	21.9
10.75	0.273	35.0	46	1.168	21.6
12.75	0.324	33.1	48	1.219	21.3
14	0.356	32.1	52	1.321	20.7
16	0.406	30.7	56	1.422	20.2
18	0.457	29.5	60	1.524	19.7
20	0.508	28.5	64	1.626	19.3
22	0.559	27.6	68	1.727	18.9
24	0.610	26.8	72	1.829	18.6
26	0.660	26.1	76	1.930	18.2
28	0.711	25.4	80	2.032	17.9

KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil uji K-S, distribusi yang paling baik digunakan untuk data angin adalah distribusi Weibull.
2. Probabilitas total jangkar mengenai pipa di daerah Tanjung Priok termasuk ke dalam level frekuensi 1 untuk semua diameter pipa.
3. Konsekuensi maksimum berupa *dent* yang diakibatkan oleh tumbukan jangkar pada pipa didapat dari kapal Q dengan berat jangkar 12900 ton. Besarnya konsekuensi bervariasi bergantung pada diameter pipa, tebal pipa, dan nilai SMYS pipa. Pada studi ini besarnya konsekuensi bervariasi dari level 1 hingga level 5.

4. Resiko yang terjadi pada kasus tumbukan jangkar pada pipa di daerah Tanjung Priok untuk semua parameter pipa berada pada wilayah *ALARP* dan *Acceptable*.
5. Tebal minimum beton yang diperlukan untuk mengurangi level konsekuensi menjadi level 1 bervariasi tergantung pada diameter pipa. Semakin besar pipanya, maka tebal minimum beton yang diperlukan semakin kecil. Contohnya, diameter pipa 2.375" memerlukan tebal lapisan beton minimum 57.9 mm agar level konsekuensinya menjadi 1, sedang diameter pipa 80" memerlukan tebal lapisan beton minimum 17.9 mm agar level konsekuensinya menjadi 1.

REFERENSI

- Ang, A. H., & Tang, W. H. 1975. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume 1 Basic Principles*. New York: John Wiley and Sons
- American Institut Petroleum. 2000. *API Specification 5L - Specification for Line Pipe*. Washington DC: American Institut Petroleum.
- Arieshanida, F. 2013. *Analisis Resiko Pipa Bawah Laut Akibat Tumbukan Jangkar*. Bandung: ITB.
- Artana, K. B. 2009. *Penilaian Resiko Pipa Gas Bawah Lat Ujung Pangkah-Gresik Dengan Standar DNV RP F107*.
- Det Norske Veritas. 2010. *DNV RP F107 Risk Assessment of Pipeline Protection*. Norwegia: Det Norske Veritas.
- Jensen, J. a. 1983. *Impact of dropped objects on Lightweight Concrete*.
- Jensen, J. 1978. *Impact Strength of Concrete Coating on Pipelines*. SINTEF.
- Johnson, N. L., Kotz, S., & Balakrishnan, N. 1994. *Continuous Univariate Distributions Vol.1*. New York: John Wiley & Sons.
- Maulana, I. 2009. *Analisis Kerusakan Pipa Bawah Laut Akibat Tumbukan Jangkar*. Bandung: ITB.
- Met Office. *National Meteorological Library and Archieve Fact Sheet 6 - The Beaufort Scale*. diakses 31 Juli 2013, dari www.metoffice.gov.uk
- National Oceanic and Atmospheric Administration*. Diakses Agustus 2013, dari www.noaa.gov
- The National Archieves. *Petroleum Act 1987*. Diakses Agustus 2013, dari Legislation.gov.uk: www.legislation.gov.uk