

Offshore Riser Risk Analysis Caused By Ship Collision

Ahmad Fauzan Iskandar¹, Dani Rusirawan¹ Ahmad Taufik²,

¹Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung

²Institut Teknologi Bandung

Email: fauzan.iskandar99@mhs.itenas.ac.id

Received DD MM YYYY | *Revised* DD MM YYYY | *Accepted* DD MM YYYY

ABSTRAK

Sistem perpipaan pada industri gas yang berfungsi untuk menghubungkan pipa yang terletak dari dasar laut menuju permukaan adalah riser. Tingginya aktivitas kapal di sekitar riser menjadi perhatian utama dalam hal keselamatan kerja dan menjadi tujuan dari penelitian ini. Kajian analisa resiko dilakukan berdasarkan DNV-RP-F107, dari probabilitas kegagalan kejadian ship collision kemudian dihitung frekuensi kecelakaan, didapatkan dengan nilai 10^{-2} hingga 10^{-3} kejadian pertahun dengan kategori 3-5 untuk empat jenis kapal. Selanjutnya kajian konsekuensi dikaji dari faktor ekonomi berdasarkan shutdown period dan resiko yang dihitung dari hasil frekuensi yang dikalikan dengan konsekuensi dengan hasil penilaian kelas A-C. Hasil penilaian frekuensi dan resiko di plot ke dalam risk matrix dan dihasilkan memiliki resiko yang tinggi, dan worst case scenario pada kejadian ini yaitu kebakaran dan ledakan api memiliki radius termal sebesar 133 meter. Terakhir, pada kejadian dengan resiko tinggi ini disusun pilihan-pilihan mitigasi untuk mengurangi resiko hingga mencapai kejadian dengan kategori acceptable.

Kata kunci: DNV-RP-F107, Frekuensi Kegagalan, Konsekuensi Kegagalan, Risk Matrix, Risk Reducing Measure.

ABSTRACT

One of the main components of pipeline in natural gas industry, connecting pipe from bottom into surface of the sea is riser. High ships activity around platform provoke concern of safety. Therefore this research is conducted based on standard DNV-RP-F107, from probability of failure to calculate failure frequency from four types of vessels. The results are ranged 10^{-2} to 10^{-3} occasions in a year with class of category 3 to 5. Next is consequences of failure which is defined in economical perspectives based on shutdown period. Risks are calculated by multiplying failure frequency with consequence of failure. The results are rated class of A to C. Data from failure frequency and risk evaluation are plotted into risk matrix. The results are high risk with worst case scenario of fire and explosion occasion with thermal radius of 133 meters. By the result, series of mitigations are arranged as risk reducing measure.

Keywords: DNV-RP-F107, Frequency Failure, Consequence of Failure Risk Matrix, Risk Reducing Measure.

1. PENDAHULUAN

Industri gas bumi merupakan salah satu industri yang esensial di dunia saat ini, yang salah satunya yang terletak di lepas pantai. Sistem perpipaan dalam industri gas bumi menjadi sangat penting karena dapat membawa dan mengalirkan hasil dari suatu proses menuju proses lainnya. Salah satu komponen pada sistem perpipaan di lepas pantai ini adalah adanya *riser* yang berfungsi untuk membawa pipa yang terletak pada dasar laut naik menuju permukaan laut. *Riser* yang tersambung pada pipa dasar laut menuju permukaan laut ini ditopang oleh *platform*. Disekitar *platform* ini terdapat banyak jenis kapal yang berlayar maupun siaga. Oleh karena itu, hal ini akan menjadi resiko terjadinya kecelakaan.

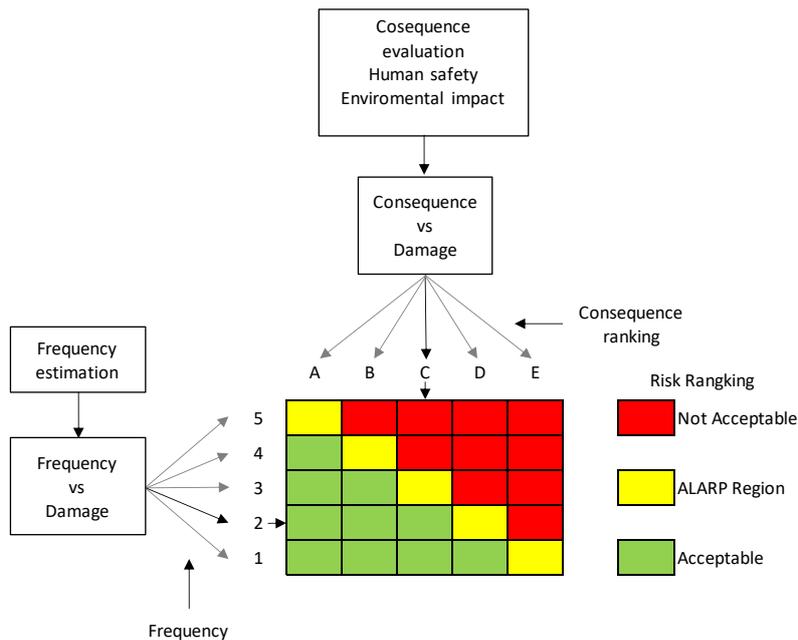
Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana cara menghitung dan menilai frekuensi dan konsekuensi kegagalan, pilihan-pilihan mitigasi untuk menurunkan resiko, dan apakah mitigasi yang disusun dapat menurunkan resiko. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan nilai dan penilaian frekuensi kegagalan, mendapatkan nilai resiko dan penilaian konsekuensi, dan mendapatkan pilihan mitigasi pada kejadian ship collision berdasarkan frekuensi dan konsekuensi. Ruang lingkup penelitian pada kajian ini adalah analisa penilaian resiko diinjau dari aktivitas kapal dan berdasarkan data dan standar yang digunakan. Analisa resiko dilakukan berdasarkan konsekuensi yang dibatasi dengan perhitungan kerugian ekonomi, juga langkah mitigasi yang diambil mempertimbangkan faktor ekonomi maupun teknis yang dibutuhkan untuk mengurangi resiko.

2. METODOLOGI

2.1. DNV & Risk Assessment

DNV (*Det Norske Veritas*) yang menjadi acuan dalam laporan ini adalah DNV-RP-F107 "Risk Assessment of Pipeline Protection". DNV-RP-F107 adalah salah satu panduan yang dijadikan standar untuk melakukan penilaian risiko pada pipa gas bawah laut terhadap beban eksternal yang tidak disengaja. Berdasarkan DNV-RP-F107, penilaian risiko terdiri dari frekuensi kejadian dan konsekuensi kejadian. Dalam standar DNV – RP – F107 kejadian akhir diklasifikasikan ke dalam kategori kerusakan yang berbeda yaitu kerusakan ringan kelas frekuensi dan ranking konsekuensi harus ditetapkan untuk setiap kategori kerusakan yang relevan, sehingga memberikan risiko untuk setiap kategori kerusakan.

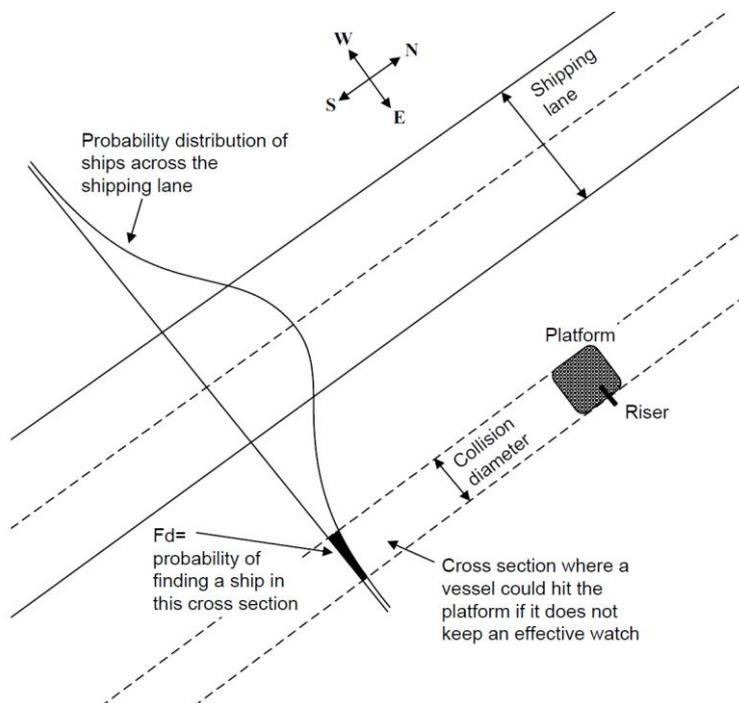
Resiko tersebut kemudian dievaluasi dengan memplot frekuensi dan konsekuensi yang ditetapkan dalam risk matrix sehingga akan diketahui letak kondisi dari objeknya, apakah letak kondisinya di daerah *acceptable* atau *not acceptable*. Jika tidak maka harus dilakukan mitigasi untuk mengurangi dampak resiko dan memberikan proteksi lebih. Mitigasi dilakukan sampai letak kondisi risiko akhirnya berada di daerah bawah *not acceptable*. Skematik dari proses risk assessment diperlihatkan pada "Gambar 1". **(DNV, 2010)**



Gambar 1. Risk Matrix (DNV, 2010)

2.2. Failure Frequency

Failure Frequency digunakan untuk menggambarkan kemungkinan terjadinya peristiwa per satuan waktu. Penilaian terhadap frekuensi adalah proses perhitungan berdasarkan data dari lapangan contohnya seperti data lalu lintas kapal seperti yang ditunjukkan oleh "Gambar 2", data operasional, jenis dan tipe kapal. Selain data yang dimiliki, penilaian frekuensi juga bisa dilakukan dengan observasi secara langsung dan perkiraan atau prediksi dengan berdasar data kejadian. Penilaian frekuensi ini menggunakan fungsi waktu untuk mengetahui kemungkinan terjadinya resiko yang berpotensi. (DNV, 2010)



Gambar 2. Risk Matrix (DNV, 2010)

Berdasarkan DNV-RP-F107 untuk setiap jenis kapal yang melewati setiap platform, memiliki probabilitas dan *failure frequency* yang berbeda-beda. Secara umum, rumus yang digunakan untuk memperkirakan frekuensi tabrakan:

$$F_{Coll_riser} = N \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_{riser} \quad (1)$$

Dimana;

F_{coll_riser} = Estimasi frekuensi tabrakan [kejadian/tahun]

N = Jumlah kapal

P_1 = Probabilitas terjadinya tabrakan per lintasan kapal yang melewati jalur. P_1 sering disebut "probabilitas tumbukan geometris".

$$P_1 = D \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\delta}\right)^2} \quad (2)$$

Dimana D adalah diameter tubrukan yang terjadi pada kapal.

P_2 = Probabilitas kehilangan kendali atau kesalahan navigasi pada kapal (2×10^{-4})

P_3 = Probabilitas kegagalan untuk memperingatkan atau mengalihkan kapan di jalur tabrakan. P_3 biasanya diatur ke 1,0 tanpa kehadiran kapal siaga dan 0,14 dengan kehadiran kapal siaga. Jika RACON dipasang, P_3 akan menjadi 0,9 tanpa kehadiran kapal siaga. Jika RACON dan kapal siaga hadir, probabilitasnya adalah 0,13. **(DNV, 2010)**

P_{riser_i} probabilitas memukul *riser* yang terkena pukulan pada *platform*.

$$P_{riser_i} = \frac{(L+B) \cdot \alpha}{W_a+B} \quad (3)$$

Dimana :

i = arah jalur [arah mata angin]

L = Lebar *riser* yang terlihat [m]

W_a = Lebar *platform* [m]

α = faktor reduksi dari struktur penunjang dari gangguan.

B = Lebar kapal [m]

Setelah menemukan *failure frequency*, nilai tersebut akan di cocokan dengan ranking yang sesuai. *Ranking frequency* digunakan untuk menggambarkan frekuensi suatu kejadian. Frekuensi diurutkan dari 1 (yaitu frekuensi rendah) hingga 5 (yaitu frekuensi tinggi). Pada DNV – RP – F107 ditunjukkan bahwa untuk merklasifikasikan ranking perkiraan frekuensi dapat diperlihatkan pada "Tabel 1". **(DNV, 2010)**

Tabel 1. Ranking Frequency (DNV, 2010)

Ranking	Deskripsi	Frekuensi Tahunan
1 (low)	Frekuensi sangat rendah dimana kejadian dapat diabaikan	$< 10^{-5}$
2	Kejadian diperkirakan jarang terjadi.	$10^{-4} > 10^{-5}$
3 (medium)	Kejadian secara individu tidak diperkirakan terjadi, tapi ketika diringkaskan melebihi jumlah yang besar dari saluran pipa dipercayakan terjadi sekali dalam setahun.	$10^{-3} > 10^{-4}$
4	Kejadian secara individu mungkin diperkirakan terjadi sekali selama usia saluran pipa.	$10^{-2} > 10^{-3}$
5 (high)	Kejadian secara individu mungkin diperkirakan terjadi lebih dari sekali selama usia saluran pipa.	$> 10^{-2}$

2.3. Consequence of Failure

Consequence menggambarkan hasil dari suatu kejadian yang tidak disengaja. Konsekuensi biasanya dievaluasi untuk keselamatan manusia, dampak lingkungan dan kerugian ekonomi. Konsekuensi yang pasti terjadi ketika terjadi tabrakan dari kapal pada *riser* yang ditopang oleh *platform*, dilihat dari sisi ekonomi kerugian yang ditanggung oleh perusahaan pengelola. Pada "Tabel 2" diberikan contoh bagaimana kerugian ini di kategorikan berdasarkan lamanya periode penghentian (*shutdown period*) untuk mengerjakan kerusakan yang dialami.

Tabel 2. Contoh Resiko Perusahaan Jika Ada Kejadian Kegagalan Pipeline

Shutdown Period (Days)	CoF (USD)	Risk Associated with Downtime (USD) = PoF x CoF		
		Dropped Anchor	Dragged Anchor	Sink Vessel
		7.37E-05	7.73E-05	4.89E-04
1	4,921,743	363	381	2,409
7	27,252,204	2,009	2,107	13,338
15	57,026,152	4,205	4,409	27,909
30	112,852,303	8,321	8,726	55,231
45	168,678,455	12,437	13,042	82,553

Risk associated with downtime adalah nilai yang didapatkan dari perkalian frekuensi kegagalan dengan dengan konsekuensi (CoF). Nilai yang dihasilkan adalah dalam bentuk kerugian secara ekonomi yang kemudian dinilai oleh *ranking consequence*. Konsekuensi diberi peringkat dari 1 (yaitu rendah, konsekuensi tidak kritis) hingga 5 (yaitu tinggi, konsekuensi parah). Pada "Tabel 3" ditunjukkan tabel melakukan penilaian konsekuensi.

Tabel 3. Ranking Consequence

Class of Risk Associated with Downtime	Ranking Consequence of Failure
< \$10,000	A
\$10,000 – \$100,000	B
\$100,000 – \$1,000,000,000	C
\$1,000,000,000 – \$10,000,000,000	D
> \$10,000,000,000	E

2.4. Analisa Fire Explosion dan Radius Thermal

Skenario terburuk kegagalan pipa, selain gas yang tidak bisa terjual adalah terjadinya *fire and explosion occasion*, sebagai *worst case scenario*. Ledakan dan kebakaran api ini memiliki radius ledakan sebesar R yang dapat menjangkau hingga keseluruhan *platform* bahkan kapal-kapal yang banyak berlayar disekitaran *platform*. Untuk mengetahui radius menggunakan rumus berikut;

$$R = 0,685 \times (\sqrt{P \times D^2}) \quad (4)$$

Dimana :

R = Radius [ft]

P = Tekanan operasi maksimal pipa [psi]

D = Diameter luar pipa [inch]

Luas dari kejadian kebakaran dan ledakan dihitung menggunakan rumus berikut :

$$A = \pi R^2 \quad (5)$$

Dimana:

A = Luas fire explosion [ft²]

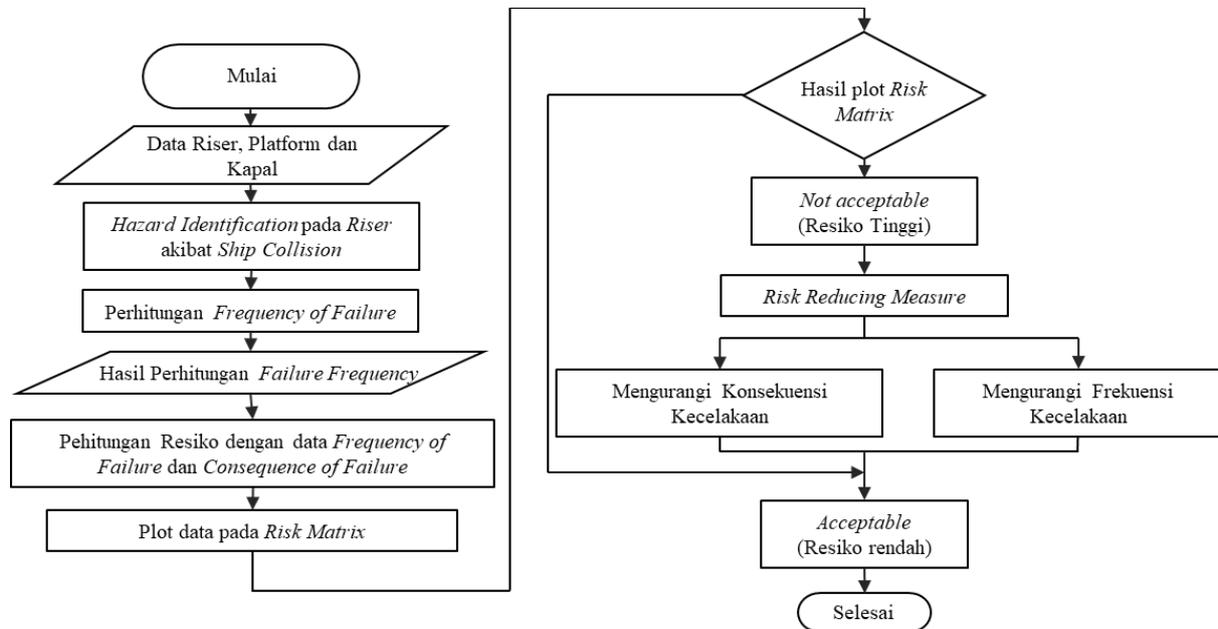
2.5. Risk Reducing Measure

Risk reducing measures adalah suatu tindakan untuk mengurangi resiko yang akan terjadi. Jika resiko yang diperkirakan berada di atas kriteria penerimaan yang relevan, maka pengurangan resiko dapat dicapai dengan; mengurangi frekuensi dari peristiwa, mengurangi konsekuensi dari peristiwa, atau kombinasi dari keduanya.

Dalam setiap peristiwa, resiko harus dijaga serendah mungkin. Ini berarti bahwa beberapa tindakan pengurangan resiko berbiaya rendah harus diperkenalkan bahkan jika resikonya dianggap dapat diterima. Tindakan pengurangan frekuensi harus diprioritaskan sebelum tindakan pengurangan konsekuensi. **(DNV, 2010)**

2.6. Diagram Alir Penelitian

Penilaian resiko yang dilakukan pada penelitian ini, memiliki alir seperti yang ditampilkan pada "Gambar 3" dimana diawali dengan data-data yang didapatkan kemudian diakhiri oleh hasil *risk reducing measure* yang berkategori *acceptable*.



Gambar 3. Diagram Alir Khusus Metodologi Penelitian

3. ISI (HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS)

Data yang dikumpulkan untuk penelitian ini membutuhkan data pipeline, platform, riser, dan empat jenis kapal yang dijadikan kajian.

3.1. Data Pipeline, Platform dan Riser

Wa (lebar *platform*) = 21 meter
 L (lebar *riser* terlihat) = 3 meter
 P (Tekanan operasi maksimum pipa) = 63 barg / 913,7 psi
 D (diameter luar pipa) = 21 inch

3.2. Data Kapal

Passing Vessel, adalah *Barge* yang memiliki ukuran;

P_{pv} (panjang *passing vessel*) = 90 meter
 B_{pv} (lebar *passing vessel*) = 30 meter
 D (diameter daerah kecelakaan) = $W_a + B_{pv} = 21 \text{ m} + 30 = 51 \text{ m}$
 Kapal divariasikan dalam jumlah 100-3500 kapal per tahun.

Random Distributed Vessel, adalah kapal nelayan yang memiliki dimensi;

P_{rv} (panjang *random vessel*) = 16,5 meter
 B_{rv} (lebar *random vessel*) = 2,8 meter
 D (diameter daerah kecelakaan) = 1 KM
 ρ (jumlah kapal per KM persegi) = 0,01
 Kecepatan kapal-kapal nelayan ini divariasikan dari kecepatan 1 knot – 9 knot.

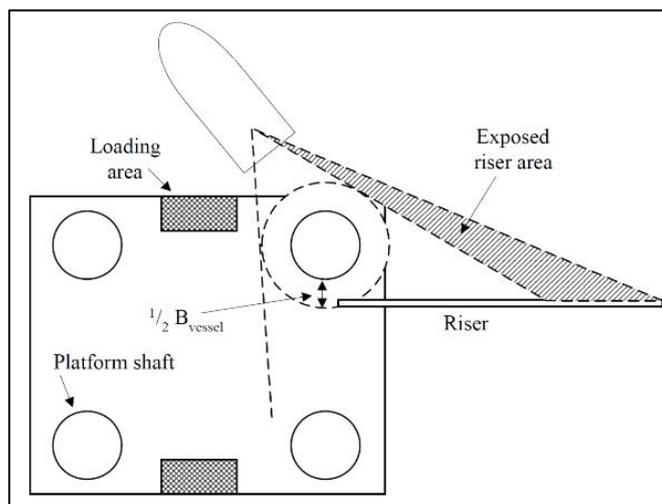
Standby Vessel, memiliki dimensi;

P_{bv} (panjang *standby vessel*) = 25 meter
 B_{bv} (lebar *standby vessel*) = 10 meter
 D (diameter daerah kecelakaan) = $W_a + \frac{1}{2}(P_{bv} + L_{bv}) = 21 + \frac{1}{2}(25 + 10) = 38,5\text{m}$

Supply Vessel, adalah kapal terbesar yang selalu melakukan kegiatan pada *riser* untuk mengalirkan hidrokarbon menuju daratan. Jumlah kapal ini divariasikan dengan jumlah 42-58 kapal per tahun. Dimensi kapal ini adalah;

P_{sv} (panjang *supply vessel*) = 292,651 meter
 L_{sv} (lebar *supply vessel*) = 43,4 meter

Pada "Gambar 4" diilustrasikan kondisi riser yang ditopang oleh riser dengan kegiatan kapal di sekitarnya.



Gambar 4. Ilustrasi riser, platform dan kapal (DNV, 2010)

3.3. Hasil Perhitungan

Jenis kapal *passing vessel* menggunakan perhitungan menggunakan rumus:

$$F_{Coll_Riser} = N \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_{riser}$$

Hasil perhitungan berdasarkan rumus dengan berbagai data parameter nilai probabilitas berdasarkan jenis kapalnya, diperlihatkan pada "Tabel 4" hasil penilaian kategori frekuensi dan kelas resiko, dan juga hasil *risk matrix* untuk jenis kapal *passing vessel*.

Tabel 4. Hasil Penilaian dan Risk Matrix Passing Vessel

Type of Vessel	Frequency of Collosion	Category of Frequency	Class of Consequences	Passing Vessel Risk Matrix					
					A	B	C	D	E
Passing Vessel	1.21E-03	4	A-C	5			X	X	
	2.43E-03	4	B-C	4	X	X	X		
	6.07E-03	4	C						
	1.21E-02	5	C-D	3					
	1.82E-02	5	C-D						
	2.43E-02	5	C-D	2					
	3.04E-02	5	C-D						
	3.64E-02	5	C-D	1					
4.25E-02	5	C-D							

Jenis kapal *random distributed vessel* menggunakan perhitungan menggunakan rumus:

$$F_{coll,riser} = (365 \cdot 24 \cdot V \cdot D \cdot \rho) \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_{riser}$$

Hasil perhitungan berdasarkan rumus dengan berbagai data parameter nilai probabilitas berdasarkan jenis kapalnya, diperlihatkan pada "Tabel 5" hasil penilaian kategori frekuensi dan kelas resiko, dan juga hasil *risk matrix* untuk jenis kapal *random distributed vessel*.

Tabel 5. Hasil Penilaian dan Risk Matrix Random Distributed Vessel

Type of Vessel	Frequency of Collosion	Category of Frequency	Class of Consequences	Random Distributed Vessel					
					A	B	C	D	E
Random Distributed Vessel	9.96E-04	3	A-C	5					
	1.99E-03	4	A-C	4		X	X	X	
	2.99E-03	4	B-C						
	3.99E-03	4	B-C	3	X	X	X		
	4.98E-03	4	B-C						
	5.98E-03	4	B-D	2					
	6.97E-03	4	B-D						
	7.97E-03	4	B-D	1					
8.97E-03	4	B-D							

Jenis kapal *standby vessel* menggunakan perhitungan menggunakan rumus:

$$F_{coll,riser} = N \cdot P_1 \cdot (P_2 \cdot t) \cdot P_3 \cdot P_{riser}$$

Hasil perhitungan berdasarkan rumus dengan berbagai data parameter nilai probabilitas berdasarkan jenis kapalnya, diperlihatkan pada "Tabel 6" hasil penilaian kategori frekuensi dan kelas resiko, dan juga hasil *risk matrix* untuk jenis kapal *standby vessel*.

Tabel 6. Hasil Penilaian dan Risk Matrix Standby Vessel

Type of Vessel	Frequency of Collosion	Category of Frequency	Class of Consequences	Standby Vessel Risk Matrix					
					A	B	C	D	E
Standby Vessel	2.80E-03	4	B-C	5					
	2.80E-03	4	B-C	4		X	X		
	2.80E-03	4	B-C						
	2.80E-03	4	B-C	3					
	2.80E-03	4	B-C						
	2.80E-03	4	B-C	2					
	2.80E-03	4	B-C						
	2.80E-03	4	B-C	1					
2.80E-03	4	B-C							

Jenis kapal *supply vessel* menggunakan perhitungan menggunakan rumus:

$$F_{Coll-Riser} = N \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_{riser}$$

Hasil perhitungan berdasarkan rumus dengan berbagai data parameter nilai probabilitas berdasarkan jenis kapalnya, diperlihatkan pada "Tabel 7" hasil penilaian kategori frekuensi dan kelas resiko, dan juga hasil *risk matrix* untuk jenis kapal *standby vessel*.

Tabel 7. Hasil Penilaian dan Risk Matrix Supply Vessel

Type of Vessel	Frequency of Collosion	Category of Frequency	Class of Consequences	Supply Vessel Risk Matrix					
				A	B	C	D	E	
Supply Vessel	6.47E-02	5	C-E	5	Yellow	Red	X	X	X
	6.78E-02	5	C-E	4	Green	Yellow	Red	Red	Red
	7.08E-02	5	C-E	3	Green	Green	Yellow	Red	Red
	7.39E-02	5	C-E	2	Green	Green	Green	Yellow	Red
	7.70E-02	5	C-E	1	Green	Green	Green	Green	Yellow
	8.01E-02	5	C-E						
	8.32E-02	5	C-E						
	8.62E-02	5	C-E						
	8.93E-02	5	C-E						

Skenario terburuk yang mungkin terjadi pada kejadian *ship collision* adalah terjadinya ledakan dan kebakaran api (*Fire Explosion* dan Radius Termal). Dihasilkan ledakan api memiliki radius termal;

$$R = 0,685 \times (\sqrt{P \times D^2})$$

$$R = 0,685 \times (\sqrt{913,7 \text{ psi} \times (21\text{inch})^2}) = 434,82217 \text{ ft} = 132,5338 \text{ meter}$$

$$A = \pi R^2$$

$$A = \pi \times (132,5338 \text{ meter})^2 = 55189,88173 \text{ m}^2$$

3.4. Risk Reducing Measure

Risk Reducing Measure dilakukan untuk menurunkan resiko yang dapat terjadi pada kejadian *ship collision* terhadap *riser* yang ditopang oleh *platform* dengan jenis kapal yang berbeda-beda; Untuk *Passing Vessel*, mengurangi jumlah kapal tongkang (*barge*) yang lewat, mengambil keputusan untuk *Shutdown Period* selama kurang dari 15 hari.

Untuk *Random Distibuted Vessel* memberikan batasan untuk mengurangi dan mengendalikan dengan baik kecepatan kapal-kapal bebas yang biasa beroperasi disekitar *platform*, meningkatkan keamanan lokasi zona aman *platform* agar menurunkan densitas kegiatan kapal nelayan disekitar *platform*, mengambil keputusan untuk *Shutdown Period* selama kurang dari 7 hari.

Untuk *Standby Vessel*, mengurangi lama waktu *standby vessel* untuk standby di lokasi, dan mengambil keputusan untuk *Shutdown Period* selama kurang dari 7 hari.

Untuk *Supply Vessel*, mengurangi nilai probabilitas P2 atau faktor manusia ini adalah dengan memastikan kru dan awak kapal memiliki kapasitas yang baik dalam mengendalikan kapal, menambahkan *Tug Boat* pada kapal *supply vessel*, dan meningkatkan *Vessel Maintenance*.

Selain itu juga untuk mengurangi resiko, dapat dilakukan penambahan pelindung atau proteksi disekitar *riser* sehingga dapat menurunkan konsekuensi. Melakukan penambahan *buoy* atau pelampung seperti yang ditunjukkan pada "Gambar 5" untuk mengurangi resiko

terjadinya tabrakan, juga menjadi pilihan mitigasi. Hal ini dilakukan agar meningkatnya kewaspadaan kapal akan adanya sistem perpipaan yang ditandai dengan adanya *buoy*.



Gambar 5. Buoy (Babicz, 2008)

Dengan pilihan-pilihan mitigasi yang dilakukan dengan *risk reducing measure* diatas, ditampilkan pada "Tabel 8" didapatkan hasil *risk matrix* yang memiliki hasil penilaian resiko yang lebih rendah.

Tabel 8. Hasil Risk Reducing Measure

		<u>Passing Vessel</u>							<u>Standby Vessel</u>				
		A	B	C	D	E			A	B	C	D	E
5							5						
4		X	X				4		X				
3		X	X	X			3						
2							2						
1							1						
		<u>Random Distributed Vessel</u>							<u>Supply Vessel</u>				
		A	B	C	D	E			A	B	C	D	E
5							5						
4		X	X				4						
3		X	X	X			3	X	X	X			
2							2						
1							1						

4. KESIMPULAN

Perhitungan dan penilaian frekuensi dan konsekuensi dilakukan dengan membedakan jenis kapal yang akan terjadi *collision* dengan *riser* yang ditopang oleh *platform*. Berdasarkan data *riser*, *platform*, dan kapal yang didapatkan dari lapangan, didapatkan tingginya hasil perhitungan frekuensi dengan nilai 10^{-2} hingga 10^{-3} kejadian pertahun dengan kategori 3-5 untuk empat jenis kapal dan juga tingginya resiko kegagalan dengan hasil penilaian kelas A-C pada kejadian *ship collision*. Dari hasil perhitungan frekuensi dan resiko pada kejadian *ship collision* tersebut, dilakukan penilaian menggunakan *risk matrix*. Hasil penilaian dari *risk matrix* pada zona merah (*not acceptable*). Radius ledakan dan kebakaran api yang merupakan skenario terburuk adalah 132,5338 meter.

Dari hasil dengan resiko tinggi tersebut, disusunlah pilihan-pilihan mitigasi *risk reducing measure*. Didapatkan *risk matrix* yang sesuai dengan semua kemungkinan kejadian *collision* berada pada zona hijau (*acceptable*) dan zona jingga ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) sehingga menjadi tidak adanya *collision* pada zona merah (*not acceptable*) *risk matrix*.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah perlu dilakukan penelitian yang lebih dalam untuk menghitung bagaimana kebakaran dan ledakan dari pipa yang berada pada kedalaman laut.

DAFTAR PUSTAKA

- Babicz, J. (2008). *Encyclopedia of Marine and Energy Technology*. Helsinki: Wartsila, Corp.
- DNV. (2010). *Recommended Practice DNV-RP-F107*. Norway: Det Norske Veritas.