

Analisis Risiko Kerusakan Pipa Bawah Laut Menggunakan Metode Kuantitatif Berdasarkan Data Lalu Lintas Maritim

Garindra Muhammad Maro*¹, Yanto²

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51 Jakarta 12930

²Program Studi Teknik Industri, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya Jalan Raya Cisauk-Lapan No. 10, Sampora, Cisauk, Tangerang, Banten 15345

Article Info	Abstract
<i>Article history:</i> Received 20 February 2025 Accepted 31 July 2026 <i>Keywords:</i> Risk, maritime, ship, pipe, quantitative risk analysis	<i>Indonesia has a rich store of natural resources, mostly oil and gas reserves. To exploit these resources requires offshore drilling activities. The transport of gas and oil between offshore facilities is done through subsea pipelines, which possess different sets of hazards compared to onshore pipelines. This study focuses on sinking ships and dropped anchors impacting the pipe as the main hazards against subsea pipelines. Maritime traffic data was obtained from Global Maritime Traffic Data Service. The risk calculated is sinking ship and dropped anchor that strike the pipeline and cause damage. Event Tree Analysis is done to determine the frequency of scenario happening. Impact energy is calculated for both scenarios and then compared to the impact energy capacity of the pipe. Using Conditional Probability table, a range of possible pipe damage levels is found. This probability range is then summed up to obtain the final risk frequency for the pipeline in both scenarios, summing up to 4,59E-08 for dropped anchor and 7,18E-11 for sinking ship. From these values, it can be determined that the risk posed by the sinking ship and dropped anchor scenarios to be within negligible category, and thus no further risk mitigation is required.</i>

Info Artikel	Abstrak
<i>Histori Artikel:</i> Diterima: 20 Februari 2025 Disetujui: 31 Juli 2026 <i>Kata Kunci:</i> Risiko, maritim, kapal, pipa, analisis risiko kuantitatif	Indonesia memiliki kekayaan sumber daya alam, utamanya minyak dan gas bumi. Untuk mengeksplorasi sumber daya ini diperlukan aktivitas penggalan offshore. Pemindahan gas dan minyak antara fasilitas offshore memerlukan penggunaan pipa bawah laut, yang memiliki risiko berbeda dengan pipa di darat. Ancaman yang dijadikan fokus pada studi ini adalah kapal karam dan jangkar jatuh menimpa pipa. Data lalu lintas kapal dikumpulkan dari sumber Global Maritime Traffic Data Service. Risiko yang dihitung adalah kapal karam dan jangkar jatuh menimpa pipa dan menyebabkan kerusakan. Dibuat Event Tree Analysis untuk menentukan frekuensi terjadinya skenario. Impact energy dihitung untuk kedua skenario dan dibandingkan dengan kapasitas impact energy dari pipa. Menggunakan tabel Conditional Probability, ditemukan rentang kemungkinan kerusakan pada pipa. Rentang probabilitas ini kemudian dijumlahkan untuk menemukan nilai total risiko terhadap pipa. Didapat bahwa nilai risiko untuk jangkar jatuh sebesar 4,59E-08 dan kapal karam sebesar 7,18E-11. Dari nilai ini, diketahui bahwa risiko skenario kapal karam dan jangkar jatuh berada dalam kategori bisa diterima (<i>negligible</i>), maka tidak ada rekomendasi mitigasi risiko spesifik yang diberikan.

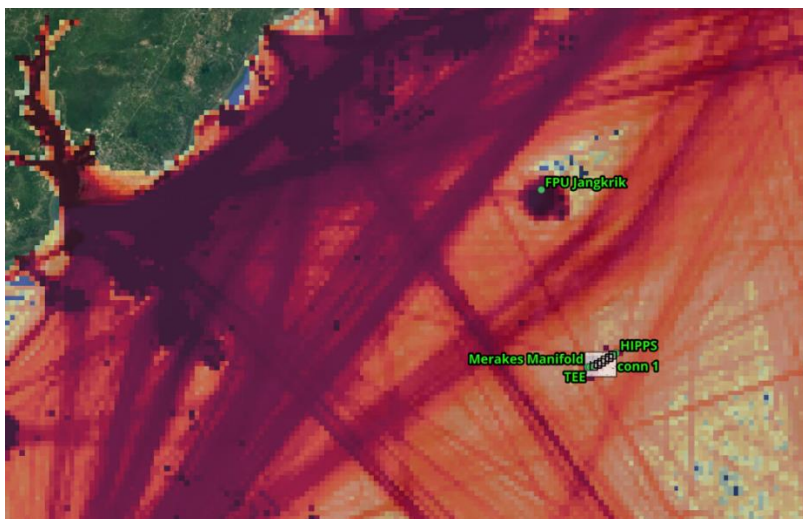
*Corresponding author. Garindra Muhammad Maro
Email address: garindra@multitek-inspeksi.com

1. PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi merupakan salah satu sektor strategis dalam perkembangan ekonomi setiap negara. Dalam pengelolaannya perlu adanya sinergi antara semua stake holder dalam industri ini agar minyak dan gas bumi dapat dikelola secara efektif dan juga aman. Selain itu minyak dan gas bumi merupakan substansi yang termasuk kategori berbahaya karena mudah terbakar dan mudah meledak. Tidak sedikit insiden terkait pengelolaan minyak dan gas bumi mulai dari hulu hingga hilir.

Sebagai negara maritim, Indonesia mencakup daerah lautan yang sangat luas. Di bawah lautan ini terdapat cadangan sumber daya yang melimpah, antara lain gas alam dan minyak bumi. Diperlukan metode dan peralatan khusus untuk melakukan eksploitasi sumber daya di bawah laut. Pipa bawah laut merupakan metode yang paling efisien dalam memindahkan fluida ketimbang alternatif seperti kapal tanker (Lepikhin *et al.*, 2020), namun metode ini memiliki risikonya tersendiri. Mekanisme kerusakan yang mengancam pipa mencakup korosi, retakan, longsor, gempa, dan sebagainya. Ditambah lagi, pipa penyalur cenderung memiliki laju kegagalan yang paling tinggi dikarenakan ia umumnya merupakan bagian instalasi yang terbesar (Mcintosh, 2009).

Analisis berikut dilakukan untuk fasilitas pipa penyalur yang terletak di lapangan Merakes East, cekungan Kutai, Kalimantan Timur. Cekungan Kutai merupakan salah satu cekungan yang paling lama dieksploitasi di dunia, dimulai dari penemuan lapangan minyak Sanga pada tahun 1896, lebih dari 850 sumur telah digali, baik onshore maupun offshore (Meciani dan Orsi, 2018). Pipa penyalur ini membentang dari alat High-integrity Pressure Protection System (HIPPS) Merakes East hingga Manifold pipa yang mengarah ke Floating Production Unit (FPU) Jangkrik. Material pipa berupa flexible (non-metallic) dengan diameter 10 inch dan panjang 6182 meter. Fluida yang dialirkan berupa lean gas dan condensate. Sebelumnya sudah ada beberapa studi yang meneliti risiko yang terjadi pada pipa bawah laut, seperti di Selat Berhala (Waskito *et al.*, 2020) dan Laut Natuna (Adyani *et al.*, 2025). Sebagai prasyarat untuk mengajukan Persyaratan Layak Operasi, dilakukan Analisis Risiko untuk mengkaji risiko yang dapat ditimbulkan pada pipa fleksibel. Risiko didefinisikan sebagai hasil dari frekuensi kegagalan dan dampak (consequence) kegagalan (API, 2016)



Gambar 1.

Peta Lalu Lintas Maritim beserta lokasi instalasi

2. METODE PELAKSANAAN

Skenario bahaya untuk pipa penyalur bawah laut dapat berasal dari berbagai sumber. Beberapa contohnya adalah kerusakan akibat aktivitas pemboran, kegagalan mekanik pada pipa, atau ancaman cuaca ekstrem. Adapun tabulasi bahaya-bahaya dapat dilihat pada tabel berikut ini yang diatur berdasarkan DNV RP-F107, yang merupakan standar industri untuk pengelolaan risiko dalam operasi pipa bawah laut (DNV, 2020).

Tabel 1.

Kemungkinan Bahaya Eksternal

Operation/activity	Hazard	Possible consequence to pipeline
Installation of pipeline	Dropped and dragged anchor/anchor chain from pipe lay vessel	Impact damage
	Vessel collision during laying leading to dropped object, etc.	Impact damage
	Loss of tension, drop of pipe end, etc.	Damage to pipe/umbilical being laid or other pipes/umbilicals already installed
	Damage during trenching, gravel dumping, installation of protection cover, etc.	Impact damage
	Damage during crossing construction.	Impact damage
Installation of risers, modules, etc. (i.e heavy lifts)	Dropped objects	Impact damage
Anchor handling (Rig and lay vessel operations)	Dropped anchor, breakage of anchor chain, etc.	Impact damage
	Dragged anchor	Hooking (and impact) damage
	Dragged anchor chain	Pull-over and abrasion damage
Lifting activities (Rig or Platform operations)	Drop of objects into the sea	Impact damage
Subsea operations (simultaneous operations)	ROV impact	Impact damage
	Manoeuvring failure during equipment installation/removal	Impact damage
Trawling activities	Trawl board impact, pull-over or hooking	Impact and pull-over damage
Tanker, supply vessel and commercial ship traffic	Collision (either powered or drifting)	Impact damage
	Emergency anchoring	Impact and/or hooking damage
	Sunken ship (e.g. after collision with platform or other ships)	Impact damage

Dalam studi ini skenario yang digunakan adalah skenario tertimpa jangkar dan kapal karam dimana apabila terkena pipa penyalur dapat mengakibatkan kegagalan. Dikarenakan pipa berada di daerah laut dalam dan peralatan bersifat otomatis, maka potensi konsekuensi terhadap personel dan masyarakat tidak ada. Risiko yang dihitung adalah potensi kerusakan pipa fleksibel. Kondisi operasi pipa fleksible disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2.Kondisi operasi *flexible flowline*

Parameter	Design	Operating (Min/Max)
Flowrate (MMSCFD)	90	27,2 s/d 90
Pressure (psig) / (kg/cm ² .g)	5714,3 / 401,7553	783,01 - 1203,62 / 55,05 -84,62
Temperature (°C)	-41 s/d 121	30 s/d 62,1

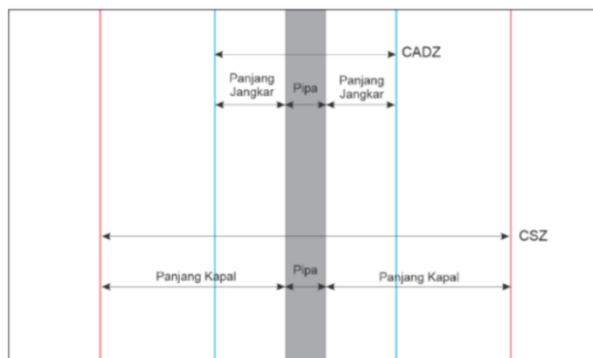
Data lalu lintas maritim didapat dari website Global Maritime Traffic Density Service (GMTDS). Website ini menyediakan data kepadatan lalu lintas yang dikategorikan sesuai dengan jenis kapal. Data ini dikategorisasikan sesuai Tabel 3.

Tabel 1.

Data lalu lintas maritim

Kode	Kategori Kapal	DWT	Panjang (m)	Lebar (M)	Berat Anchor (Ton)	Kecepatan (Knots)
		ton	m	m	ton	knot
A	Cargo ship	18000	149	21,8	3	14
B	Tanker	25000	148,7	21,8	4,65	10
C	Passenger Ship	6500	101	15,9	10	22
D	Service ship	1000	56,3	9,2	0,05	13
E	Non-commercial ship	1000	56,3	9,2	15	20

Area kritis pipa penyalur merupakan area di sekitar pipa penyalur yang apabila terjadi bahaya, dapat berdampak langsung ke pipa penyalur. Area kritis pipa penyalur terdiri atas dua jenis, yaitu *Critical Sinking Zone* (CSZ) dan *Critical Anchor Damage Zone* (CADZ) yang dapat dilihat pada Gambar 2.

**Gambar 2.**

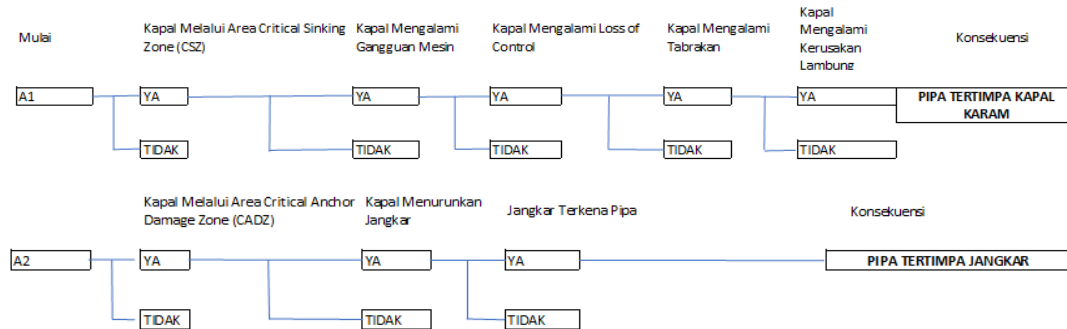
Perhitungan CSZ

Formula CAZ dan CADZ adalah sebagai berikut:

CAZ : Diameter pipa + 2 x Panjang Kapal

CADZ : Diameter pipa + 2 x Panjang Jangkar

Dari scenario bahaya yang telah ditentukan kemudian dilakukan penentuan Event Tree Analysis (ETA) sehingga probabilitas pipa penyalur mengalami scenario bahaya dapat dihitung dengan lebih logis dan sesuai kaidah keteknikan yang baik. Event Tree Analysis menunjukkan susunan kejadian yang dapat menyebabkan terjadinya skenario pipa tertimpa oleh kapal karam atau jangkar. Alur kerja ETA dapat dilihat pada skema Gambar 3.

**Gambar 3.**

Skema Event Tree Analysis

Satu pixel pada peta GMTDS melambangkan daerah sebesar 1 x 1 km². Dikarenakan panjang pipa adalah 6182 meter, maka pipa dipisah menjadi delapan bagian sesuai dengan pipeline connector, seperti Tabel 4.

Tabel 4.Pembagian pipa *flexible flowline*

Area	Panjang (m)
HIPPS - Conn 1	884
Conn 1 - Conn 2	883
Conn 2 - Conn 3	883
Conn 3 - Conn 4	883
Conn 4 - Conn 5	883
Conn 5 - Conn 6	883
Conn 6 - Tee	883
Tee - Manifold	473

Angka yang didapat merupakan lama kapal-kapal berada di daerah tersebut dalam kurun waktu satu bulan. Untuk mendapatkan jumlah kapal per tahun, dibutuhkan konversi seperti berikut:

$$\frac{\text{ship}}{\text{month}} = \text{average annual density} * 12 * \text{average speed}$$

Hasil dari perhitungan ini bisa ditabulasikan seperti pada Tabel 5. Kategorisasi frekuensi didasarkan pada DNV RP-F107 (Tabel 6).

Tabel 5.

Kalkulasi Event Tree Analysis

Kode	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	Category	Remark
A1	148,7	7,201646091	0	0	297,654	61,97944	14,134464	876,04618	2,7779E-05	1,05126E-11	Kategori 1	Kapal karam
A2	148,7	7,201646091	0,254	0	4,254	21,23876	14,134464	300,198424	9,5192E-06	3,80769E-08	Kategori 1	Tertimpa Jangkar
B1	148,7	5,144032922	0,254	0	297,654	86,77122	26,757696	2321,79786	7,3624E-05	2,78616E-11	Kategori 1	Kapal karam
B2	148,7	5,144032922	0,254	0	4,254	29,73426	26,757696	795,620226	2,5229E-05	1,00916E-07	Kategori 1	Tertimpa Jangkar
C1	101	11,31687243	0,254	0	202,254	26,79663	47,1326592	1262,99625	4,0049E-05	1,5156E-11	Kategori 1	Kapal karam
C2	101	11,31687243	0,254	0	4,254	9,300626	47,1326592	438,363244	1,39E-05	5,56016E-08	Kategori 1	Tertimpa Jangkar
D1	56,3	6,687242798	0,254	0	112,854	25,29503	44,347992	1121,78374	3,5572E-05	1,34614E-11	Kategori 1	Kapal karam
D2	56,3	6,687242798	0,254	0	4,254	9,055152	44,347992	401,577808	1,2734E-05	5,09358E-08	Kategori 1	Tertimpa Jangkar
E1	56,3	10,28806584	0,254	0	112,854	16,44177	2873,6521	47247,9234	0,00149822	5,66975E-10	Kategori 1	Kapal karam
E2	56,3	10,28806584	0,254	0	4,254	5,885849	2873,6521	16913,8817	0,00053634	2,14534E-06	Kategori 1	Tertimpa Jangkar

Dimana: a adalah Panjang Kapal (meter), b adalah Kecepatan Kapal (m/s), c adalah Diameter Pipa (meter), d adalah Tebal concrete coating (meter), e adalah Panjang CADZ / CSZ (meter), f adalah Durasi kapal melewati CADZ / CSZ (detik), g adalah Frekuensi kapal melintas tiap tahun (kapal/tahun), h adalah Total durasi kapal melewati CADZ / CSZ (detik), i adalah Probabilitas kapal berada di atas CADZ / CSZ dalam 1 tahun, dan j adalah probabilitas kapal mengakibatkan bahaya terhadap pipa.

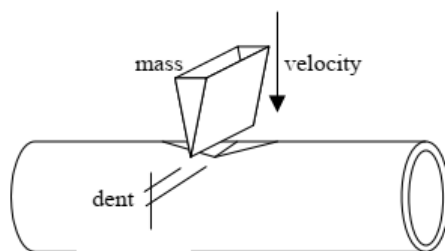
Tabel 2.
DNV RP-F107 Frequency Categorization

Category	Description	Annual frequency
1 (low)	So low frequency that event considered negligible	$<10^{-5}$
2	Event rarely expected to occur	$10^{-4} > 10^{-5}$
3 (medium)	Event individually not expected to happen, but when summarised over a large number of pipelines have the credibility to happen once a year	$10^{-3} > 10^{-4}$
4	Event individually may be expected to occur during the lifetime of the pipeline. (Typically a 100 year storm)	$10^{-2} > 10^{-3}$
5 (high)	Event individually may be expected to occur more than once during lifetime	$> 10^{-2}$

Dalam analisis risiko ini konsekuensi dari bahaya didasarkan pada seberapa besar kerusakan yang terjadi pada pipa penyalur, hal ini dikarenakan pipa penyalur berada di laut sehingga tidak relevan bila risiko dikorelasikan ke paparan terhadap manusia. Tabulasi kategori konsekuensi juga mengadopsi dari DNV RP-F107 disajikan pada Tabel 7.

Tabel 3.
DNV RP-F107 Consequence Categorization

Dent/Diameter (%)	Damage Description	Conditional Probability					
		D1	D2	D3	R0	R1	R2
< 5	Minor damage	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
	Major damage						
	Leakage anticipated	0,1	0,8	0,1	0,9	0,1	0,0
	Major damage						
	Leakage and rupture anticipated	0,0	0,75	0,25	0,75	0,2	0,05
	Major damage						
> 20	Leakage and rupture anticipated	0,0	0,25	0,75	0,25	0,5	0,25
	Major damage						
	Rupture	0,0	0,10	0,9	0,1	0,2	0,7



Gambar 2.
Dent model (Sumber: DNV, 2019)

Adapun formula yang digunakan untuk kapasitas *impact energy* pipa adalah:

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

dimana:

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

δ = pipe deformation, dent depth

t = wall thickness (nominal)

σ_y = yield stress

D = steel outer diameter

Rumus tersebut menentukan kapasitas impact energy untuk lapisan *concreten* (disajikan Tabel 8). Dengan dikombinasikan dengan tabel konsekuensi maka didapat hasil perhitungan untuk kapasitas *impact energy* pipa dengan konsekuensi (Tabel 9).

Tabel 8.

Data pipa dan hasil perhitungan impact energy

D	δ	SMYS	t	E
m	%	n/m2	m	joule
0,254	5%	3,6,E+08	0,00818	1274
0,254	10%	3,6,E+08	0,00818	3602
0,254	15%	3,6,E+08	0,00818	6618
0,254	20%	3,6,E+08	0,00818	10189

Tabel 4.

Hasil perhitungan untuk kapasitas impact energy pipa dengan konsekuensi

Dent	Impact Energy		
%	Joule		
< 5	0	<	1.274
45787	1.274	-	3602
45945	3602	-	6618
15 - 20	6618	-	10189
> 20	-	>	10189

Dikarenakan pipa bersifat mengambang (*free-floating*), maka tidak ada lapisan concrete yang melindungi pipa. Impact energy yang dihasilkan jangkar dan kapal karam dihitung dengan formula berikut ini:

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

- m = mass of the object (kg)
- g = Gravitation acceleration (9.81 m/s²)
- V = volume of the object (the volume of the displaced water) (m³)
- ρ_{water} = density of water (i.e. 1025 kg/m³)
- C_D = drag-coefficient of the object
- A = projected area of the object in the flow-direction (m²)
- v_T = terminal velocity through the water (m/s)

Energi kinetik benda, E_T , pada kecepatan terminal adalah:

$$E_T = \frac{1}{2} m \cdot v_T^2$$

Menggabungkan ini ke persamaan memberikan ekspresi berikut untuk energi terminal:

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

Selain energi terminal, energi kinetik efektif dalam dampak, EE , termasuk energi tambahan massa hidrodinamik, EA . Massa yang ditambahkan bisa menjadi signifikan untuk objek volume besar sebagai wadah. Energi tumbukan efektif menjadi:

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

Koefisien drag dan koefisien massa tambahan tergantung pada geometri objek. Koefisien drag mempengaruhi kecepatan terminal objek, sedangkan koefisien massa hanya mempengaruhi objek ketika terkena benturan dan berhenti. Nilai-nilai tipikal dapat ditemukan pada table yang disediakan (Tabel 10). Alternatifnya apabila data yang dimiliki tidak begitu banyak maka perhitungan energi diambil dari tabel probabilitas kondisional sebagaimana disajikan pada Tabel 11.

Tabel 5.

Drag coefficients

Description	C_d	C_a
Slender shape	0,7 - 1,5	0,1 - 1,0
Box shaped	1,2 - 1,3	0,6 - 1,5
Misc. shapes (spherical to complex)	0,6 - 2,0	1,0 - 2,0

Tabel 6.*Conditional probabilities of impact energies*

Description		Energy band (kJ)					
		< 50	50 - 100	100 - 200	12	400 - 800	> 800
Flat/long shaped	< 2 tonnes	30%	18%	14%	12%	11%	15%
	2 - 8 tonnes	5%	8%	15%	19%	25%	28%
	> 8 tonnes	-	-	1-%	15%	30%	45%
Box/round shaped	< 2 tonnes	50%	30%	20%	-	-	-
	2 - 8 tonnes	-	20%	30%	40%	10%	-
	> 8 tonnes	-	-	-	-	70%	30%
Box/round shaped	>> 8 tonnes	-	-	-	-	30%	70%

Dari tabulasi di atas maka berdasarkan *scenario actual table* probabilitas kondisional menghasilkan tabulasi sesuai Tabel 12 dan Tabel 13. Tabel 12 menyajikan tabulasi conditional probability of impact energy tertimpa jangkar. Sementara itu, Tabel 13 menyajikan *conditional probability of impact energy* kapal karam.

Tabel 7.Tabulasi *conditional probability of impact energy* tertimpa jangkar

No	Kode	DWT (ton)	Berat Anchor (Ton)	Kategori	Energy band (kJ)					
					<50	50-100	100-200	200-400	400-800	>800
1	A	18000	3	Box/round shaped	0%	20%	30%	40%	10%	0%
2	B	18000	4,65	Box/round shaped	0%	20%	30%	40%	10%	0%
3	C	6500	10	Box/round shaped	0%	0%	0%	0%	30%	70%
4	D	1000	0,05	Box/round shaped	50%	30%	20%	0%	0%	0%
5	E	1000	15	Box/round shaped	0%	0%	0%	0%	30%	70%

Tabel 8.Tabulasi *conditional probability of impact energy* kapal karam

No	Kode	DWT (ton)	Berat Anchor (Ton)	Kategori	Energy band (kJ)					
					<50	50-100	100-200	200-400	400-800	>800
1	A	18000	3	Box/round shaped	0%	0%	0%	0%	30%	70%
2	B	18000	4,65	Box/round shaped	0%	0%	0%	0%	30%	70%
3	C	6500	10	Box/round shaped	0%	0%	0%	0%	30%	70%
4	D	1000	0,05	Box/round shaped	0%	0%	0%	0%	30%	70%
5	E	1000	15	Box/round shaped	0%	0%	0%	0%	30%	70%

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari perhitungan frekuensi dan probabilitas selanjutnya mengkombinasikan keduanya menjadi sebuah analisis risiko yang utuh. Dengan mengambil contoh *flexible line* antara HIPPS dan CONN 1, tabulasi frekuensi dan energy level disajikan Tabel 14 dan Tabel 15. Tabel 16 menyajikan tabulasi frekuensi pada *energy level*. Kemudian energi dan frekuensi dikombinasikan dengan conditional probability (Tabel 17 dan Tabel 18).

Tabel 14.

Tabulasi Frekuensi dan Energy Level Dropped Tertimpa Jangkar

No	Kode	DWT (ton)	Berat Anchor (Ton)	Kategori	Energy band (kJ)						Kategori
					<50	50-100	100-200	200-400	400-800	>800	
1	A	18000	4	Box/round shaped	0	9,18E-09	1,38E-08	1,84E-08	4,59E-09	0	4,59E-08
2	B	18000	16,9	Box/round shaped	0	0	0	0	0	0	0
3	C	6500	2,46	Box/round shaped	0	0	0	0	0	0	0
4	D	1000	4,05	Box/round shaped	0	0	0	0	0	0	0
5	E	1000	1,14	Box/round shaped	0	0	0	0	0	0	0
Total					0	9,18E-09	1,38E-08	1,84E-08	4,59E-09	0	

Tabel 9.

Tabulasi Frekuensi dan Energy Level Kapal Karam

No	Kode	DWT (ton)	Berat Anchor (Ton)	Kategori	Energy band (kJ)						Kategori
					<50	50-100	100-200	200-400	400-800	>800	
1	A	18000	4	Box/round shaped	0	9,18E-09	1,38E-08	1,84E-08	4,59E-09	0	4,59E-08
2	B	18000	16,9	Box/round shaped	0	0	0	0	0	0	0
3	C	6500	2,46	Box/round shaped	0	0	0	0	0	0	0
4	D	1000	4,05	Box/round shaped	0	0	0	0	0	0	0
5	E	1000	1,14	Box/round shaped	0	0	0	0	0	0	0
Total					0	9,18E-09	1,38E-08	1,84E-08	4,59E-09	0	

Tabel 10.

Tabulasi frekuensi pada energy level

No	Energy Level (kJ)					
	>0	>50	>100	>200	>400	>800
Dropped Anchor	4,59E-08	4,59E-08	3,67E-08	2,29E-08	4,58899E-09	0
Kapal Karam	1,27E-11	1,27E-11	1,27E-11	1,26696E-11	1,26696E-11	8,87E-12

Tabel 11.

Tabulasi damage vs. frekuensi tertimpa jangkar

Dent	Impact Energy						Frequency	Damage		
	Steel			Steel + Concrete Coating				D1	D2	D3
	%	Joule		Joule						
< 5	0,00	<	1273,67	0,00	<	1273,67	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5 - 10	1273,67	-	3602,48	1273,67	-	3602,48	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10 - 15	3602,48	-	6618,18	3602,48	-	6618,18	-7,96E-09	0,00E+00	-5,97E-09	-1,99E-09
15 - 20	6618,18	-	10189,35	6618,18	-	10189,35	6,56E-10	0,00E+00	1,64E-10	4,92E-10
> 20	-	>	10189,35		>	10189,35	5,32E-08	0,00E+00	5,32E-09	4,79E-08
Total							0,00E+00	-4,89E-10	4,64E-08	
D2+D3							4,59E-08			

Tabel 12.

Tabulasi damage vs. frekuensi kapal karam

Dent	Impact Energy						Frequency	Damage		
	Steel			Steel + Concrete Coating				D1	D2	D3
	%	Joule		Joule						
< 5	0,00	<	1273,67	0,00	<	1273,67	3,23E-13	3,23E-13	0,00E+00	0,00E+00
5 - 10	1273,67	-	3602,48	1273,67	-	3602,48	5,90E-13	5,90E-14	4,72E-13	5,90E-14
10 - 15	3602,48	-	6618,18	3602,48	-	6618,18	7,64E-13	0,00E+00	5,73E-13	1,91E-13
15 - 20	6618,18	-	10189,35	6618,18	-	10189,35	9,05E-13	0,00E+00	2,26E-13	6,79E-13
> 20	-	>	10189,35		>	10189,35	6,96E-11	0,00E+00	6,96E-12	6,27E-11
Total							3,82E-13	8,23E-12	6,36E-11	
D2+D3							7,18E-11			

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Telah dilakukan analisis risiko terhadap pipa flexible free-floating bawah laut. Risiko yang dijadikan subjek analisis adalah bahaya pipa tertimpa kapal karam dan jangkar jatuh yang merusak pipa. Berdasarkan kriteria penerimaan risiko yang telah diberikan oleh Kementerian ESDM, risiko yang ditimbulkan terhadap pipa berada pada kategori dapat diabaikan (*negligible*), dikarenakan bernilai dibawah $1E-06$. Sesuai kategori ini, tidak diperlukan perlakuan tambahan untuk mengurangi risiko dikarenakan pipa terletak pada lokasi yang jarang dilewati lalu-lintas maritim. Disarankan untuk melakukan pengecekan rutin untuk selubung luar pipa fleksibel untuk mencegah terjadinya kebocoran pipa dari faktor lain, seperti korosi dan material fatigue. Sebagai sumber data, GMTDS memiliki beberapa kekurangan. Data lalu lintas yang didapat berupa densitas pada jangka waktu tertentu, bukan jumlah kapal yang melintasi suatu daerah, sehingga perlu dilakukan estimasi menggunakan kecepatan rata-rata kapal. Data kapal juga dipisah berdasarkan kategori yang umum yang memiliki variasi tinggi; kapal kargo dapat memiliki kisaran DWT dari 15000 ton hingga 120000 ton, dengan kecepatan antara 16 – 22 knot. Disarankan untuk studi berikutnya untuk menggunakan data lalu lintas dan kapal yang lebih spesifik untuk meningkatkan ketepatan analisis.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Adyani, L. P., Siregar, H. A., Putri, D. L., Nurawati, Wirawan, M. K., (2025). Risk Analysis of Dropped Anchor Impact on Subsea Pipelines in Natuna. *Zona Laut: Journal of Ocean Science and Technology Innovation*. 6(1): 129-135.
2. API. (2026). *API RP 581 - Risk-based Inspection Methodology*. USA: America Petroleum Institute.
3. DNV. (2020). *RP-F107. Risk assessment of pipeline protection*. Oslo: Det Norske Veritas.
4. Lepikhin, A., Leschenko, V., Makhutov, N. (2020). Defects Assessment in Subsea Pipelines by Risk Criteria. Dalam Rosato, V. & Pietro, A. D. (Ed.) *Issues on Risk Analysis for Critical Infrastructure Protection*. London: IntechOpen.
5. McIntosh, G., (2009). Risk Management in the Operations of a Subsea Pipeline. *SYPOSIUM Series No. 155*. Institution of Chemical Engineers (IChemE).
6. Meciani, L., & Orsi, M. (2018). Creative Exploration in a Mature Basin: Jangkrik and Merakes Discoveries (Kutei Basin, Indonesia). *Oral Presentation*. PESGB SEAPEX Asia Pacific E&P Conference. London.
7. Waskito, R., Buda Artana, K., Pratiwi, E. (2020). Risk Assessment of Subsea pipeline using standard DNVGL-RP-F107. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 557(1):012069