

# PENILAIAN RISIKO PIPA BAWAH LAUT OLEH FAKTOR KAPAL MENGUNAKAN PENDEKATAN BAYESIAN NETWORK

**Firda Puspita Devi<sup>1</sup>, I Gst Ngr Rai Usadha<sup>2</sup>, Inu Laksito Wibowo<sup>3</sup>,  
Imam Mukhlash<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

<sup>4</sup>[imammukhlash@matematika.its.ac.id](mailto:imammukhlash@matematika.its.ac.id)

## Abstrak

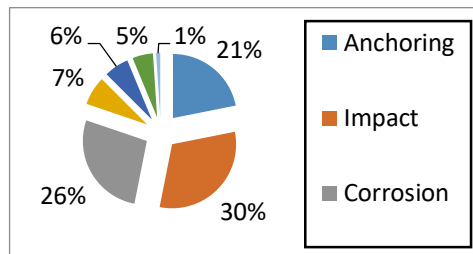
Penyaluran minyak dan gas bumi dengan pipa bawah laut diklaim sangat efisien karena memerlukan biaya yang minimal. Namun, seiring padatnya aktivitas maritim oleh lalu lintas kapal akan berdampak kerusakan pada jaringan pipa bawah laut. Penyebab kerusakan tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain: jatuhnya jangkar kapal (*anchor drop*), kapal tenggelam akibat gagal mesin, jaring atau pukat (*trawl*), dan faktor lainnya. Oleh karena itu, penilaian risiko untuk kapal yang melewati jaringan pipa bawah laut sangat diperlukan. Pada penelitian ini, metode *Bayesian Network* (BN) digunakan untuk memodelkan penyebab kecelakaan pipa bawah laut oleh faktor kapal dan menghitung probabilitas kerusakan yang ditimbulkannya. Adapun standar DNV RP F107 digunakan untuk mengklasifikasi tingkat risiko berdasarkan nilai probabilitas yang didapat. Hasil pengujian program ini menunjukkan bahwa sebesar 58.4% pipa tidak rusak akibat jangkar, 13.83% kerusakan yang ditimbulkan kecil, 15.14% kerusakan yang ditimbulkan menengah, dan 12.59% kerusakan yang ditimbulkan besar.

**Kata kunci:** *Pipa Bawah laut, Penilaian Risiko, Probabilitas, Bayesian Network, DNV RP F107.*

## 1 Pendahuluan

Minyak dan gas bumi merupakan sumber daya alam yang menjadikan Indonesia sebagai negara dengan kapasitas produksi migas tertinggi di Asia Tenggara. Maka diperlukan mode transportasi untuk mengirimkan minyak dan gas bumi dari sumur produksi di laut ke pengolah di daratan. Demikian

pula dari unit pengolah ke unit-unit distribusi. Penyaluran minyak dan gas bumi dengan pipa bawah laut diklaim sangat efisien karena memerlukan biaya yang minimal [1]. Akibatnya, pipa gas bawah laut menjadi pilihan utama untuk penyaluran minyak gas bumi di laut. Saat ini, Indonesia telah memiliki total panjang pipa bawah laut 9.340,72 km. Namun, dengan dicanangkannya tol laut oleh pemerintah Indonesia maka lalu lintas kapal akan semakin padat di atas pipa bawah laut. Dengan demikian terdapat bahaya atau *hazard* yang dapat ditimbulkan oleh faktor kapal (kapal tenggelam atau menjatuhkan jangkar pada saat *emergency*) yang berpotensi mengakibatkan kegagalan pengoperasian pipa gas bawah laut, yaitu kebocoran, pecah, atau bahkan ledakan. Hal ini dapat mengakibatkan gangguan transportasi, kerusakan pada lingkungan, dan bahkan gangguan kesehatan pada manusia. Data historis pada Gambar 1 menunjukkan bahwa sebagian besar kecelakaan pada pipa gas bawah laut disebabkan oleh dampak kecelakaan, korosi, dan jangkar kapal.



**Gambar 1.** Penyebab Kecelakaan Pada Pipa Lepas Pantai [1]

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa mayoritas kerusakan pipa gas bawah laut disebabkan oleh jangkar kapal dan dampak kecelakaan dari faktor kapal. Oleh karena itu, penilaian risiko untuk kapal yang melewati jaringan pipa gas bawah laut sangat diperlukan. Beberapa metode seperti algoritma *scoring-type* dan beberapa metode kualitatif atau semi kuantitatif, yaitu AHP, logika fuzzy, dan *neural network* telah digunakan dalam model penilaian risiko pada jaringan pipa gas bawah laut [2,3]. Model penelitian risiko dengan menggunakan metode tersebut di atas memberikan hasil penelitian relatif yang mendukung penentuan tingkat risiko, namun belum dapat diterima oleh masyarakat. Saat ini penelitian telah bergeser dari sistem kualitatif menjadi kuantitatif probabilitas [4].

Metode *Fault Tree* (FT) telah terbukti efektif dalam menganalisis probabilitas kegagalan dan digunakan dalam teknik perpipaan [5,6]. Analisis FT adalah metode terbaik untuk memodelkan sistem sederhana yang statis. Namun, untuk sistem yang kompleks perlu menggunakan prosedur lainnya, seperti: *Bayesian Network*. *Bayesian Network* (BN) mempunyai struktur yang jauh lebih fleksibel dan sesuai dengan berbagai macam kecelakaan daripada FT, sehingga dapat digunakan untuk menganalisis prosedur yang kompleks. Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis ingin mengangkat topik tugas akhir dan diberi judul “Aplikasi *Bayesian Network* Untuk Perhitungan Probabilitas Pada Penilaian Risiko Pipa Bawah Laut Oleh Faktor Kapal”.

Penelitian ini mengacu pada salah satu standar, yaitu DNV RP-F107 (*Risk Assessment of Pipelines Protection*). Standar DNV RP-F107 menyatakan bahwa bahaya (*hazard*) yang mungkin terjadi pada pipa gas bawah laut adalah bahaya-bahaya yang disebabkan oleh kejatuhan jangkar kapal (*anchor drop*), terseret jangkar (*anchor drag*), dan tertimpa kapal (*Ship Shinking*) [7]. Standar ini menyajikan pendekatan berbasis risiko atas kecelakaan akibat beban eksternal, merekomendasikan tindakan perlindungan, dan memberikan penilaian frekuensi dan konsekuensi untuk pipa gas bawah laut. Standar inilah yang nantinya menjadi tolok ukur pengambilan keputusan dalam penilaian risiko. Berdasarkan Standard DNV RP-F107, risiko didefinisikan sebagai  $R = P \times C$ , dengan R adalah nilai risiko, P adalah peluang/probabilitas timbulnya bahaya, dan C adalah konsekuensi dari bahaya tersebut. Bagian tersulit dari penilaian resiko adalah mengestimasi besarnya peluang bahaya yang akan muncul yang biasanya diperoleh dengan pemodelan atau simulasi. Pada tugas akhir ini akan dibangun suatu perangkat lunak yang mampu menghitung probabilitas kerusakan pada pipa gas bawah laut akibat faktor kapal yang lewat.

## 2 Preliminaries

### 2.1 Identifikasi Bahaya

Bahaya atau *hazard* merupakan sumber potensi kerusakan atau situasi yang berpotensi menimbulkan kerugian. *Hazard Identification* adalah proses pengenalan terhadap bahaya yang mungkin terjadi, tanpa melihat besar dan kecilnya risiko yang diakibatkan dari suatu bahaya. Pengklasifikasian kategori bahaya yang mungkin terjadi pada pipa bawah laut digolongkan menjadi tiga kategori, yaitu [7]:

1. *Hazard* yang terjadi selama periode konstruksi
2. *Hazard* yang terjadi setelah jalur pipa terpasang di dasar laut
3. *Hazard* yang terjadi baik dari proses instalasi maupun dari proses operasi

*Hazard Identification* harus dapat melindungi semua kemungkinan terjadinya bahaya yang terjadi pada pipa gas bawah laut. Standard DNV RP F-107 telah memberikan contoh *hazard* yang mungkin dapat membahayakan jalur pipa gas bawah laut.

### 2.2 Bayesian Network (BN)

*Bayesian Network* merupakan salah satu *Probabilistic Graphical Model* (PGM) sederhana yang dibangun dari teori probabilitas dan teori graf. Struktur graf *Bayesian Network* disebut dengan *Directed Acyclic Graph* (DAG). DAG terdiri dari *node* dan *edge*. *Node* merepresentasikan variabel acak dan *edge* merepresentasikan adanya hubungan ketergantungan langsung dan dapat juga diinterpretasikan sebagai pengaruh (sebab-akibat) antara variabel yang dihubungkannya. Adapun rumus dasar dari Theorema Bayes, yaitu:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

### 2.3 Standar (DNV) RP-F107

Dari beberapa standar penilaian risiko terhadap pipa gas bawah laut, DNV RP F107 (*Risk Assessment of Pipeline Protection*) adalah salah satu standar yang paling sering digunakan. Standar ini hanya dapat diaplikasikan untuk pendekatan yang digunakan dalam melakukan penilaian risiko pada pipa gas bawah laut terhadap beban-beban eksternal, termasuk di dalamnya, antara lain: *risers, pipelines, umbilicals*, dan proteksi yang perlu diberikan.

Untuk membandingkan probabilitas kerusakan dan risiko dari bahaya yang berkaitan dengan pipa gas bawah laut, maka masing-masing peristiwa diberi peringkat dari 1 (probabilitasnya sangat rendah) sampai dengan 5 (probabilitasnya sangat tinggi) [7]. Sebagaimana disampaikan di atas, DNV RP F-107 membagi frekuensi menjadi lima tingkatan seperti Tabel 1.

**TABEL 1** Ranking Frekuensi DNV RP F-107

Ranking	Deskripsi	Frekuensi Tahunan
1 (sangat rendah)	Frekuensi sangat rendah sehingga kejadian diabaikan	$< 1E-05$
2 (rendah)	Kejadian diperkirakan jarang terjadi	$1E-04 > 1E-05$
3 (medium)	Kejadian secara individu, diperkirakan tidak terjadi, tetapi dilihat dari numerik yang besar, kejadian dipercaya terjadi 1 kali selama setahun	$1E-03 > 1E-04$
4 (tinggi)	Kejadian secara individu mungkin terjadi satu kali selama usia pengoperasian pipa	$1E-02 > 1E-03$
5 (sangat tinggi)	Kejadian secara individu diperkirakan terjadi lebih dari satu kali selama usia pengoperasian pipa	$> 1E-02$

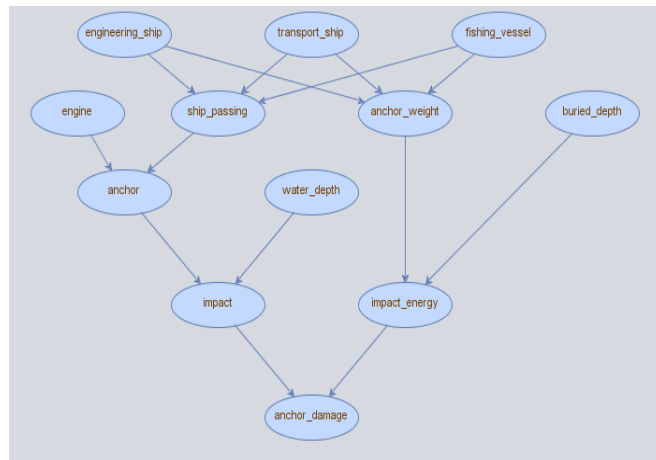
## 3 Hasil Penelitian

### 3.1 Graf Kerusakan Akibat Jangkar dan Pukat

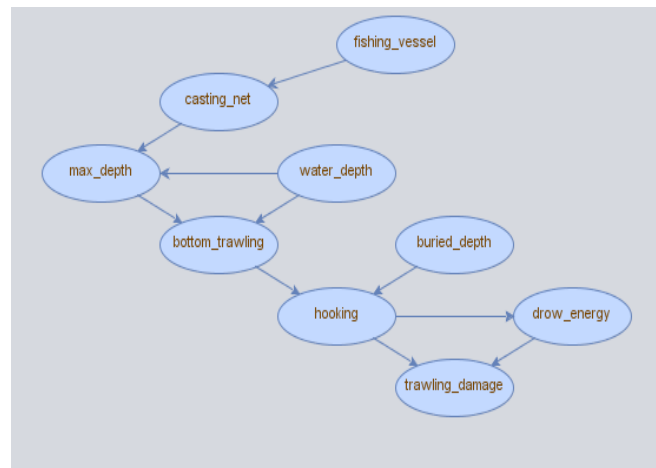
Seperti yang telah ditampilkan pada Gambar 2, kerusakan oleh jangkar didefinisikan sebagai faktor terjadinya kerusakan pada pipa bawah laut, dimana akibat dari jangkar terjadi ketika kapal lewat tepat diatas tepat diatas jalur pipa bawah laut, gagal mesin pada kapal, dan sebuah jangkar yang dijatuhkan dalam kondisi darurat. Dua faktor utama yang mengakibatkan efek dari energi adalah kedalaman air yang memberikan dampak sangat besar terhadap probabilitas dari jangkar dan lapisan pipa yang mampu mengurangi benturan terhadap pipa. Kedua dampak probabilitas dan dampak energi diintegrasikan untuk menentukan kerusakan yang diakibatkan jangkar terhadap pipa.

Seperti pada Gambar 3, dampak jaring terhadap kerusakan pipa secara garis besar disebabkan oleh jaring yang menyangkut pada pipa. Kapal ikan mengeluarkan jaring sampai ke dasar laut, kemudian jaring tersebut tersangkut pada pipa bawah laut. Jaring yang tersangkut tersebut tetap ditarik oleh kapal sehingga tarikan tersebut akan merusak lapisan pada pipa. Tarikan

dari jaring terhadap pipa merupakan sebuah fungsi dari *net-casting depth*, *water depth* dan *the pipeline coating*



**Gambar 2.** Graf Kerusakan oleh Jangkar



**Gambar 3.** Graf Kerusakan oleh Pukat

### 3.2 Mendapatkan *Marginal Probability Table (MPT)* dan *Conditional Probability Table (CPT)*

MPT dan CPT merupakan permasalahan yang cukup kompleks dan memerlukan pertimbangan yang cukup besar untuk secara penuh menghitung dan membentuk hubungan dalam bentuk model *Bayesian Network*. Dalam penelitian ini terdapat 3 langkah untuk mendapatkan CPT dan MPT.

Tabel 2 mengilustrasikan konversi dari operasi *boolean* ke dalam CPT, yang diterapkan dalam bentuk binari, dengan 2 kondisi yaitu 0 dan 1. Proses konversi tersebut dimulai dengan membandingkan *fault tree* dengan BN. Tabel 3 menunjukkan contoh data dari CPT terhadap kerusakan oleh jangkar.

**TABEL 2.** CPT untuk *Ship Passing* dan *Anchor* [4]

Operasi Boolean								
$ship\ passing = engineering\ ship \vee transport\ ship \vee fishing\ vessel$								
<i>Engineering ship</i>	<i>Passing</i>				<i>No</i>			
<i>Transport ship</i>	<i>passing</i>		<i>no</i>		<i>passing</i>		<i>No</i>	
<i>Fishing vessel</i>	<i>passing</i>	<i>no</i>	<i>Passing</i>	<i>no</i>	<i>passing</i>	<i>no</i>	<i>passing</i>	<i>no</i>
<i>Ship passing</i>	1	1	1	1	1	1	1	0
<i>Passing=1, no=0</i>	0	0	0	0	0	0	0	1
Operasi Boolean								
$anchor = ship\ passing \wedge engine$								
<i>Ship passing</i>	<i>passing</i>				<i>No</i>			
<i>Engine</i>	<i>Fail</i>		<i>Work</i>		<i>Fail</i>		<i>Work</i>	
<i>Anchor</i>	1		0		0		0	
<i>Anchor=1, no=0</i>	0		1		1		1	

**TABEL 3.** CPT Akibat Kerusakan Jangkar [4]

		no		low		Medium	
<i>Impact energy</i>		0 kJ		<2.5 kJ		2.5 – 10 kJ	
<i>Impact</i>		<i>imp act</i>	<i>No</i>	<i>Impact</i>	<i>No</i>	<i>Impact</i>	<i>No</i>
<i>Damage</i>	<i>No</i>	1	1	0	1	0	1
	<i>Minor</i>	0	0	1	0	0	0
	<i>Moderate</i>	0	0	0	0	0.5	0
	<i>Major</i>	0	0	0	0	0.5	0

		High		tremendous	
<i>Impact energy</i>		10 – 20 kJ		>20 kJ	
<i>Impact</i>		<i>Impact</i>	<i>No</i>	<i>Impact</i>	<i>No</i>
<i>Damage</i>	0	1	0	1	1
	0	0	0	0	0
	0.25	0	0.25	0	0
	0.75	0	0.75	0	0

Keterangan :

- Minor Damage* : Kerusakan tidak memerlukan perbaikan atau mengakibatkan setiap pelepasan hidrokarbon.
- Moderate Damage* : Kerusakan yang membutuhkan perbaikan, tetapi tidak mengarah untuk melepaskan hidrokarbon.
- Major Damage* : Kerusakan yang mengarah untuk pelepasan hidrokarbon, air, dll

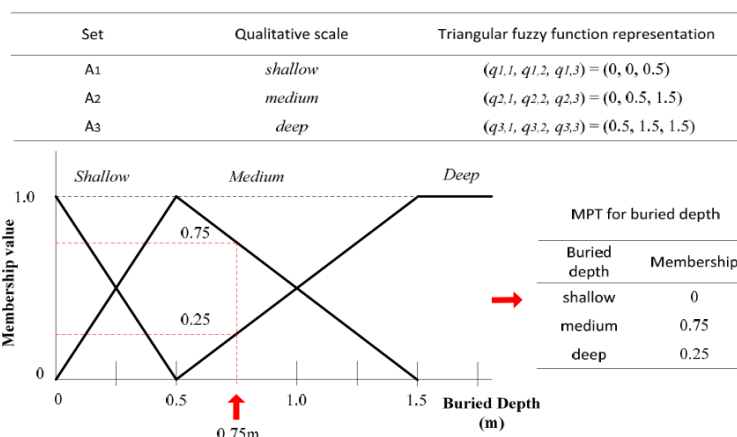
Akhirnya, penilaian ahli sangat penting untuk mendapatkan MPT dan CPT. Namun, para ahli biasanya lebih memilih untuk keputusan linguistik dari deskripsi probabilistik, seperti *safe* dan *unsafe*. Integrasi teori himpunan fuzzy dapat membantu domain expert untuk memperoleh MPT dan CPT dengan cara yang efisien. Misalnya, dalam tulisan ini kita mendefinisikan kedalaman terkubur dari pipa lepas pantai menggunakan tiga bilangan fuzzy.  $A_i$  didefinisikan dengan melalui semesta dimana setiap bagian mewakili kedalaman poin,  $A_1 = shallow$ ,  $A_2 = medium$ ,  $A_3 = deep$ . Menurut pendapat

para ahli, fungsi keanggotaan segitiga untuk setiap bilangan fuzzy diwakili oleh persamaan berikut.

$$\mu_{A_i}(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq q_{i,1} \\ \frac{x-q_{i,1}}{q_{i,2}-q_{i,1}}, & q_{i,1} \leq x \leq q_{i,2} \\ \frac{q_{i,3}-x}{q_{i,3}-q_{i,2}}, & q_{i,1} \leq x \leq q_{i,2} \\ 0, & x \geq q_{i,3} \end{cases} \quad (2)$$

X merupakan kedalaman yang akan dihitung nilai keanggotaannya.  $\mu_{A_i}(x)$  adalah nilai keanggotaan dari x terhadap  $A_i$ .  $q_{i,1}$  adalah kuartil atas dari  $A_i$ .  $q_{i,2}$  adalah kuartil tengah dari  $A_i$ . Dan  $q_{i,3}$  adalah kuartil bawah dari  $A_i$ .

Misalkan akan dihitung nilai keanggotaan pipa dengan kedalaman 0,75 meter, maka didapatkan bahwa  $\mu_{A_1}(x) = 0$ ,  $\mu_{A_2}(x) = 0.75$ , dan  $\mu_{A_3}(x) = 0.25$ . Himpunan fuzzy mewakili kedalaman terkubur dapat ditulis sebagai MPT, seperti ditunjukkan pada Gambar 4 [4].



**Gambar 4.** MPT dari kedalaman menggunakan Fuzzy

Dengan menggunakan grafik pada Gambar 4, kita dapat menentukan secara langsung nilai keanggotaan dari suatu kedalaman pipa. Seperti pada Gambar 4, dengan mengambil kedalaman 0.75 meter, dapat diambil bahwa nilai keanggotaan untuk kedalaman *medium* adalah 0.75, dan nilai keanggotaan untuk kedalaman *deep* adalah 0.25. Sedangkan nilai keanggotaan untuk kedalaman *shallow* adalah nol dikarenakan dengan kedalaman 0.75 meter, garis yang merepresentasikan *shallow* tidak memiliki nilai.

### 3.3 Probabilitas Prediksi untuk Segmen Jalur Pipa

Prosedur untuk memperkirakan probabilitas kerusakan jangkar  $P^a$  digambarkan oleh persamaan :

$$P^a = \sum_{i=1}^n N_i \cdot P_i^a \quad (3)$$

Pada persamaan (3),  $i(1, \dots, n)$  adalah tipe kapal ke - i.  $N_i$  merupakan frekuensi tipe kapal ke - i yang melaluinya setiap tahun. Kemudian  $P_i^a$

dihitung dengan model BN menggambarkan probabilitas kerusakan jangkar sekali satu jenis kapal ke – i lewat.

Pada Tugas Akhir ini, penulis hanya mempertimbangkan kapal teknik, kapal transportasi dan kapal nelayan. Adapun probabilitas kerusakan akibat jaring, sebagai berikut:

$$P^t = N_{fv} \cdot P_{fv}^t \quad (4)$$

di mana  $P^t$  adalah frekuensi kapal nelayan lewat tepat melalui jalur pipa lepas pantai per tahun, yang kemudian mempunyai kemungkinan kerusakan akibat pukut oleh salah satu kapal penangkap ikan.

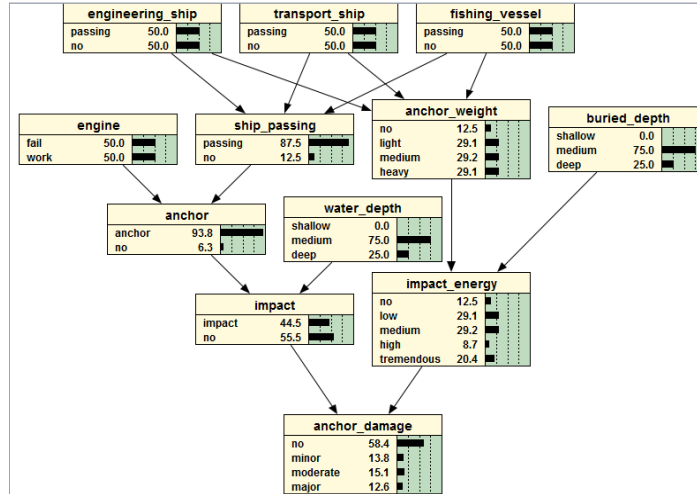
### 3.4 Analisa Permasalahan pada Kerusakan Jangkar

Pada subbab sebelumnya telah dibahas mengenai perhitungan untuk mendapatkan nilai MPT dan CPT. Dari subbab tersebut, kita dapat menentukan data *prior* kemudian akan diperoleh data *posterior*. Dengan menggunakan tools yang penulis buat, diinputkan data *prior* seperti Gambar 4. Beberapa faktor yang mempengaruhi kerusakan jangkar diantaranya *engineering\_ship*, *transport\_ship*, *fishing\_vessel*, *ship\_passing*, *anchor\_weight*, *engine*, *buried\_depth*, *anchor*, *water\_depth*, *impact*, *impact\_energy*, *anchor\_damage*. Beberapa faktor tersebut akan didefinisikan pada Tabel 4.

**TABEL 4.** Definisi Variabel Kerusakan Akibat Jangkar

Variabel	Definisi
<i>Engineering_ship</i>	Kapal Mesin
<i>Transport_ship</i>	Kapal penumpang
<i>Fishing_vessel</i>	Kapal penangkap ikan
<i>Ship_passing</i>	Kapal melalui daerah pipa gas bawah laut
<i>Anchor_weight</i>	Massa jangkar
<i>engine</i>	Mesin kapal
<i>Buried_depth</i>	Kedalaman pipa gas ditanam
<i>Anchor</i>	Jangkar kapal
<i>Water_depth</i>	Kedalaman air
<i>Impact</i>	Dampak secara keseluruhan
<i>Impact_energy</i>	Dampak dari segi energy yang dilepaskan
<i>Anchor_damage</i>	Dampak dari kerusakan akibat jangkar kapal yang jatuh





Gambar 5. CPT Anchor Damage

Berdasarkan CPT yang diperoleh dari Gambar 4 maka akan dilakukan inferensi sehingga nantinya dapat diperoleh data *posterior*. Hasil dari inferensi kemudian ditampilkan pada Gambar 5. Pada saat proses inferensi, kita dapat melakukan proses uji coba sehingga dapat diketahui seberapa besar faktor yang mempengaruhi kerusakan pada pipa gas.

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut diperoleh kemungkinan kapal lewat akan mempengaruhi kerusakan pada pipa bawah laut adalah sebesar 87.5%. Kerusakan yang disebabkan oleh jangkar adalah 87.5%, massa jangkar yang sangat mempengaruhi adalah massa jangkar menengah / *medium* dengan probabilitas sebesar 29.2%, peluang dari dampak kerusakannya adalah 44.5%, dari kerusakan tersebut memiliki dampak energi yang harus dilepaskan adalah berkisar 2.5kJ – 10kJ dengan probabilitas sebesar 29.24% dan dampak kerusakan akibat jangkar adalah dalam cakupan menengah / *moderate*.

**Ship Passing**

Engineering Ship  passing  no  don't know

Transport Ship  passing  no  don't know

Fishing Vessel  passing  no  don't know

**Engine Fail**

fail  work  don't know

**Water Depth**

shallow  medium  deep  don't know

**Pipe Buried Depth**

shallow  medium  deep  don't know

Submit Reset

**Ship Passing Probability**

Passing : 87,50%

Not passing : 12,50%

**Impact Probability**

Impact : 44,53125%

No : 55,46875%

**Anchor Damage Probability**

No : 58,437496%

Minor : 13,834375%

Moderate : 15,138844%

Major : 12,589282%

**Anchoring Probability**

Anchoring : 93,75%

Not anchoring : 6,25%

**Anchor Weight Probability**

No anchor : 12,50%

Light anchor : 29,124999%

Medium anchor : 29,249999%

Heavy anchor : 29,124999%

**Impact Energy Probability**

0 kJ : 12,50%

< 2.5 kJ : 29,124999%

2.5 - 10 kJ : 29,249999%

10 - 20 kJ : 8,7375%

> 20 kJ : 20,387501%

Gambar 6. Hasil Inferensi Data Prior Anchor Damage

### 3.5 Analisa Permasalahan pada Kerusakan Jaring

Pada subbab sebelumnya, sudah dijelaskan mengenai permasalahan kerusakan yang disebabkan oleh jangkar. Oleh karena itu, subbab ini hanya akan menjelaskan mengenai faktor apa saja yang mempengaruhi kerusakan akibat pukot terhadap pipa gas. Beberapa faktor yang mempengaruhi diantaranya, *fishing\_vessel*, *casting\_net*, *max\_depth*, *water\_depth*, *bottom\_trawling*, *buried\_depth*, *hooking*, *drow\_energy* dan *trawling\_damage*. Beberapa faktor tersebut akan didefinisikan pada Tabel 4.

**Tabel 5.** Definisi Variabel Kerusakan Akibat Pukat

Variabel	Definisi
<i>Fishing_vessel</i>	Kapal penangkap ikan
<i>Casting_net</i>	Jala
<i>Max_depth</i>	Kedalaman maximum
<i>Water_depth</i>	Kedalaman air
<i>Bottom_trawling</i>	Pukat bagian dasar
<i>Buried_depth</i>	Kedalaman penanaman pipa gas
<i>hooking</i>	Pengait
<i>Drow_energy</i>	Energi untuk menenggelamkan
<i>Trawling_damage</i>	Kerusakan yang diakibatkan pukat

### 3.6 Mitigasi Risiko

Dari hasil pengujian di atas, maka perlu dilakukan langkah mitigasi yang bertujuan untuk mengurangi risiko yang ada. Karena pada studi kasus ini tidak mempertimbangkan masalah biaya, maka beberapa hal yang perlu dilakukan adalah:

1. Memberikan proteksi tambahan pada pipa jika mungkin terjadi bahaya kejatuhan jangkar dan tersangkut pukat. Proteksi tambahan yang mungkin dapat dilakukan adalah dengan menambahkan *box culvert* di sepanjang jalur pipa yang dilewati oleh jalur pelur pelayaran kapal.
2. Hal yang mungkin dilakukan pada pipa bawah laut adalah dengan menanam pipa dengan kedalaman tertentu di dasar laut. Kedalaman yang diperlukan untuk mengetahui tingkat keamanan pipa jika mungkin terjadi skenario bahaya kejatuhan jangkar dan terseret pukat, perlu dilakukan analisa dan perhitungan lebih lanjut.
3. Hal yang mungkin juga dilakukan adalah dengan mengurangi intensitas operasi kapal yang melewati jalur pipa bawah laut pada saat kondisi cuaca sedang buruk. Hal ini berfungsi untuk mengurangi frekuensi kemungkinan kapal menjatuhkan jangkar dalam situasi darurat.
4. Memberikan tanda di daerah jalur pipa tersebut yang menunjukkan informasi bahwa di daerah tersebut terdapat jalur pipa bawah laut, sehingga awak kapal akan mengerti bahwa ada jalur pipa yang membentang yang sedang dilewati oleh kapal.

## 4 Kesimpulan

Berdasarkan analisis terhadap hasil pengujian program, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil pengujian berdasarkan nilai *prior*/parameter yang telah ditentukan oleh para ahli, menunjukkan bahwa perangkat lunak yang dibangun memberikan hasil nilai probabilitas beserta tingkat risiko kecelakaan pada pipa sebesar 87.5% untuk kapal yang lewat, 93.75% untuk jangkar kapal, 29.2% untuk massa jangkar yang berada pada tingkat medium, 44.5% untuk dampak kerusakan, 29.24% untuk dampak energi yang dilepaskan berkisar 2,5kJ – 10kJ, dan 15% untuk kerusakan akibat jangkar.
2. Dari kesimpulan yang di atas, maka perlu dilakukan langkah mitigasi, antara lain: memberikan proteksi tambahan pada pipa, menanam pipa dengan kedalaman tertentu, mengurangi intensitas operasi kapal yang melewati jalur pipa bawah laut pada saat kondisi cuaca seang buruk, dan memberi tanda di daerah jalur pipa.

## 5 Pustaka

- [1] Liu, Y. T., H. Hu, dan Y. B. Song, (2011), “**Pipeline Integrity Management System Based on Dynamic Risk Assessment**”, Journal of Shanghai Jiaotong University, *Vol.45, No.5*, (pp 687-690).
- [2] Muhlbauer, W. K, (2003), **Pipeline Risk Assessment Manual (Third Edition)**, Publication PARLOC 2001, Mott MacDonald Ltd., Offshore Operators Association, U.K. and the Institute of Petroleum,
- [3] Doremami, N., A. Afshar, A. D. Mohammadi, (2010), “**Hierarchical Risk Assessment in Gas Pipelines Based on Fuzzy Aggregation**”, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Reliability, Safety & Hazard.
- [4] Liu, Yutao, (2013), “**Probability Analysis of Damage to Offshore Pipeline by Ship Factors**”, Transportation Research Board 92<sup>th</sup> Annual Meeting.
- [5] **Risk Assessment of Pipelines Protection**, (2010), Norway, Publication DNV-RP-F107, Det Norske Veritas (DNV).
- [6] Mouselli, AH, (1981), “**Offshore Pipelines Design, Analysis and Methods**”, Oklahoma, PennWellBooks.
- [7] Sun, D, J., L, (2010), Elefteriadou, “**Research and implementation of lane-changing model based on driver behavior**”, In Journal of Transportation Research Board: Transportation Research Record 2161. (pp. 1-10).