



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Frekuensi Tubrukan Kapal Menggunakan *Causation Probability* Berdasarkan Metode *Bayesian Network* : Studi Kasus Alur Pelayaran Barat Surabaya

Heslina Fifani Maharani¹⁾, Hartono Yudo¹⁾, Eko Sasmito Hadi¹⁾

¹⁾Laboratorium Teknologi Sistem dan Permesinan Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*}e-mail : heslinafifani@students.undip.ac.id, hartono.yudo@yahoo.com, ekosasmitohadi@lecturer.undip.ac.id

Abstrak

Tubrukan kapal menjadi salah satu kecelakaan yang memiliki nilai presentasi terbesar. Menurut laporan investigasi KNKT dan laporan hasil sidang putusan mahkamah pelayaran, kecelakaan tubrukan kapal menjadi salah satu ancaman yang serius baik untuk dua kapal atau lebih yang terlibat. Hal itu akan menimbulkan kerugian ada nya korban jiwa dan kerugian material. Penelitian ini melakukan pemodelan bertujuan mengetahui faktor penyebab yang berkontribusi besar pada probabilitas tubrukan kapal, mengetahui nilai *causation probability* di tiga tipe tubrukan kapal diperairan Indonesia, dimana *causation probability* didefinisikan sebagai probabilitas terjadinya kegagalan untuk menghindari ketika kapal berada dijalur tubrukan. Dalam penelitian ini metode yang digunakan ialah metode bayesian network untuk pemodelan nya. Hasil yang didapat yaitu probabilitas kapal mengalami tubrukan adalah 64%. Nilai *causation probability* tipe tubrukan kapal Head-on yaitu $5,69 \times 10^{-5}$, Tubrukan kapal Crossing yaitu $4,23 \times 10^{-5}$, dan Tubrukan Kapal Overtaking yaitu $0,96 \times 10^{-5}$. Nilai *causation probability* tersebut diaplikasikan ke dalam frekuensi tubrukan kapal di alur pelayaran barat surabaya menghasilkan frekuensi tubrukan kapal berturut turut. Head-on sebesar 0,17, crossing sebesar 0,00009 dan overtaking sebesar 0,008. Berdasarkan pemodelan bayesian network yang telah dibuat, didapatkan node factor yang memiliki pengaruh besar yaitu "Technical Failure", "Crew Competence", dan "Preventive Timing".

Kata Kunci : Tubrukan Kapal, *Causation Probability*, *Bayesian Network*, Perairan Indonesia, Frekuensi Tubrukan

1. PENDAHULUAN

Kapal menjadi moda transportasi pilihan masyarakat karena dinilai lebih efisien untuk pilihan perjalanan lintas pulau. Salah satu faktor yang membuat Indonesia menjadi poros maritim dunia karena sebanyak 40% jalur perdagangan dunia melewati wilayah laut Indonesia, salah satunya adalah Alur Pelayaran Barat Surabaya. Alur Pelayaran Barat Surabaya termasuk bagian dari Alur Laut Kepulauan Indonesia II (ALKI II) bersamaan dengan Selat Lombok. ALKI merupakan alur yang ditetapkan sebagai alur yang terbuka untuk perdagangan internasional kapal asing berdasarkan hasil konvensi Hukum laut internasional [1]. Perkembangan zaman membuat aktivitas diatas melalui jalur laut semakin

meningkat sehingga menyebabkan lalu lintas kapal semakin padat.

Tubrukan kapal merupakan benturan antara dua kapal yang bergerak dan dapat menimbulkan bahaya [2]. Kecelakaan tersebut menjadi salah satu ancaman yang serius, yang mengakibatkan korban jiwa, cedera, serta kerusakan kapal dan lingkungan [3]. Menurut KNKT Indonesia kecelakaan tubrukan kapal memiliki presentasi kejadian yang tinggi. KNKT melakukan investigasi pada kecelakaan tubrukan kapal tersebut untuk mengetahui faktor atau potensi apa saja yang berpengaruh dalam kejadian kecelakaan, dengan tujuan investigasi yang dilakukan dapat memperbaiki sistem dan meningkatkan keselamatan di masa mendatang dalam penggunaan transportasi jalur laut ini. Memastikan keselamatan navigasi dan menerapkan organisasi

lalu lintas yang efektif sangat penting untuk mendorong pertumbuhan perekonomian dan transportasi air [4]. Hal ini difasilitasi melalui pendekatan selanjutnya dapat digunakan untuk memberikan kesadaran situasi yang lebih baik kepada para navigator dan kapal otonom di masa depan, sehingga dapat membantu penghindaran tabrakan secara proaktif [5].

Model yang digunakan pada analisis tubrukan kapal menggunakan metode *bayesian network*. Bayesian network adalah model grafik untuk merepresentasikan interaksi antar variabel, dimana metode ini dibangun dari teori *probabilistic* yang berhubungan langsung dengan data dan teori graf yang berhubungan dengan bentuk representasi yang ingin didapatkan [6]. Metode ini banyak diterapkan di berbagai bidang seperti analisis resiko, diagnostic medis, pengenalan pola dan pengambilan keputusan. Estimasi untuk frekuensi kecelakaan tubrukan menggunakan pemodelan *causation probability*. *Causation probability* didefinisikan sebagai probabilitas terjadinya kegagalan untuk menghindari ketika kapal berada di jalur tubrukan [7]. Berikut model perhitungan frekuensi kecelakaan kapal yang diberikan oleh Fujii [8] :

$$\lambda_{col} = NG \times Pc \quad (1)$$

Dimana:

λ_{col} : Frekuensi Tubrukan
 NG : Geometric Probability
 Pc : Causation Probability

Persamaan tersebut mendefinisikan frekuensi tubrukan kapal menjadi dua jenis yaitu Geometric Probability (NG) dan Causation Probability (Pc) [9]. Banyaknya kandidat kapal yang berpotensi mengalami tubrukan adalah pengertian dari *geometric probability*, sedangkan *causation probability* adalah probabilitas kejadian gagalannya kapal untuk menghindari tubrukan saat kapal berada di jalur tabrakan. Dari pengetahuan tersebut maka ada beberapa macam faktor yang mempengaruhi *causation probability* sebagai node-nodenya, seperti *human error*, kondisi cuaca, kegagalan teknis, dan lain lain [10].

Berdasarkan konsepnya, nilai *causation probability* berbeda disetiap wilayah perairannya. Merujuk pada penelitian yang pernah dilaksanakan sebelumnya. Beberapa penelitian resiko tubrukan terdahulu melakukan analisis resiko tubrukan kapal dengan nilai Pc default di selat jepang yaitu selat Akashi menghasilkan nilai Pc $0,49 \times 10^{-4}$ untuk *head-on*, $1,23 \times 10^{-4}$ untuk *crossing* dan $1,1 \times 10^{-4}$ untuk *overtaking*[8], diselat Dover pada tahun 1974 menganalisis di selat dover menghasilkan nilai $5,18 \times 10^{-4}$ untuk *head-on* dan $1,11 \times 10^{-4}$

untuk *crossing*, dari penelitian tersebut digeneralisir digunakan di seluruh perairan dunia [11]. Penelitian berjudul “*Evaluation Study on Surabaya Vessel Traffic Service (VTS) in Reducing the Risk of Ship Collision in Surabaya West Access Channel*” menggunakan metode *numerical* yang menggunakan nilai *causation probability default* dan menghasilkan nilai frekuensi 3 tipe tubrukan sebesar $1,5 \times 10^{-1}$ untuk *head-on collision*, $4,27 \times 10^{-2}$ untuk *overtaking collision* dan $1,12 \times 10^{-4}$ untuk *crossing collision* [12]. Penelitian “*Risk Assessment of Ship Collision on FSO Abherka and Oil Spill Modelling Due to Structural Damage*” menggunakan Metode CRASH dan FTA dan menggunakan nilai pc analisis , namun penentuan faktor dan peluang masing-masing faktor berdasarkan referensi [13].

Pada penelitian ini, akan dilakukan analisis frekuensi tubrukan kapal menggunakan nilai *causation probability* yang dihasilkan dari perhitungan data historis diperairan Indonesia dengan 3 tipe tubrukan kapal yaitu *head-on*, *crossing* dan *overtaking*. *Head-on collision* didefinisikan sebagai jenis tubrukan kapal yang terjadi ketika dua kapal mendekat dengan posisi saling berhadapan dalam arah berlawanan [7]. *Crossing collision* didefinisikan sebagai jenis tubrukan kapal yang terjadi ketika dua kapal bergerak ke arah yang saling bersimpangan dan salah satu kapal menubruk kapal lain di bagian *midship*-nya dan *overtaking collision* didefinisikan sebagai jenis tubrukan kapal yang terjadi ketika dua kapal bergerak ke arah yang sama namun salah satu kapal mendahului namun dengan kondisi yang tidak memungkinkan sehingga tubrukan terjadi [7]. Analisis pemodelan dilakukan hingga akar penyebab masalah yang dirangkai sebagai suatu jaringan node-node penyebab tubrukan kapal terjadi. Penelitian ini akan memberikan keluaran nilai Pc khusus untuk perairan Indonesia yang lebih akurat dan melakukan pembaharuan analisis terkait estimasi nilai Pc di APBS dengan pemodelan bayesian network berupa jaringan node yang lebih dikembangkan hingga akar penyebab masalah yang menyebabkan kecelakaan tubrukan kapal dan melakukan validasi nilai Pc.

2. METODE

2.1. Pengumpulan Data

Tahapan ini dilakukan dengan cara mengumpulkan data-data yang mendukung proses penelitian ini. Data-data yang dikumpulkan dalam penelitian, antara lain:

- a. Data kecelakaan tubrukan kapal serta kronologi kecelakaan yang tercantum pada

laporan investigasi KNKT, hasil sidang putusan mahkamah pelayaran, dan KSOP Surabaya.

- b. Data-data pendukung lain untuk melengkapi data yang diperoleh meliputi: jurnal penelitian, buku pedoman, artikel, dan penelitian sebelumnya.

2.2. Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data dalam proses analisis penelitian ini, antara lain adalah melakukan rekapitulasi data kecelakaan tubrukan kapal dari tahun 2007-2023 menggunakan *software microsoft Excel*. Selanjutnya dari rekap data kecelakaan tersebut dikelompokkan menjadi tiga tipe tubrukan (*Head-on*, *Crossing*, dan *Overtaking*) dan melakukan analisis faktor apa saja yang menjadi pengaruh penyebab kecelakaan tubrukan kapal. Kemudian menentukan faktor *prior node*, *child node* dan *predecessor* disetiap faktornya. Kemudian membentuk jaringan node yang akan dijadikan model menggunakan *software GeNIe academic 4.1*. Langkah awal setelah model terbentuk yaitu melakukan perhitungan probabilitas setiap node yang akan dilanjutkan dengan perhitungan *joint probability* menggunakan bayes theory. Perhitungan tersebut akan menghasilkan nilai *causation Probability*, nilai ini akan di validasi dan digunakan untuk mencari nilai frekuensi tubrukan kapal di alur pelayaran barat Surabaya. Untuk mendapatkan nilai frekuensi, dilakukan perhitungan *geometric probability* berdasarkan *IWRAP theory*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Rekapitulasi Data

Pada penelitian ini, rekapitulasi data menggunakan *software microsoft excel*. Rekapitulasi data berisi : nama kapal, tahun terjadinya kecelakaan, lokasi dan kronologi yang disederhanakan untuk penentuan *node faktor*. Proses rekapitulasi ini dilakukan pada 46 kasus kejadian kecelakaan tubrukan kapal dan dari data tersebut ditentukan beberapa faktor yang memengaruhi terjadinya tubrukan kapal.

3.2. Analisis Bayesian Network

Bayesian network adalah model grafik untuk merepresentasikan interaksi antar variabel, dimana metode ini dibangun dari teori *probabilistic* yang berhubungan langsung dengan data dan teori graf yang berhubungan dengan bentuk representasi yang ingin didapatkan [6]. Pendekatan Bayesian

Network (BN) telah menjadi salah satu perhatian utama dalam penilaian risiko maritim [14]. Metode *Bayesian network* atau Jaringan bayesian merupakan salah satu metode pemodelan yang tepat dalam perhitungan *causation probability*, di buktikan pada studi literatur bahwa *bayesian network* adalah metode terbaik dalam mengestimasi nilai *causation probability* karena metode ini memodelkan hubungan antarvariabel yang relevan dan untuk melakukan analisis yang lebih terperinci.

3.2.1 Penentuan Node Factor

Tahap ini dilakukan setelah rekapitulasi data selesai dengan proses melakukan identifikasi faktor-faktor yang memengaruhi atau berpotensi menyebabkan kecelakaan sesuai kondisi dan situasi dari kronologi data kecelakaan. Penentuan *node faktor* ini juga dimodifikasi dari penelitian sebelumnya yang hanya menganalisis faktor secara umum seperti kesalahan teknis, cuaca dan kesalahan management. Berikut adalah deskripsi *node factor* yang digunakan sebagai model :

Tabel 1. Faktor-Faktor Penyebab Tubrukan Kapal

Node Factor	Deskripsi
Master	Posisi nahkoda dianjung kapal.
	Yes : Nahkoda berada dianjung kapal No : Nahkoda Tidak merada dianjung kapal
Daylight	Waktu
	Day : Pagi Night : Malam
Visual Observation	Deteksi visual terhadap objek
	Good : Deteksi visual baik Bad : Deteksi visual tidak baik
Navcom Equipment	Kelengkapan alat navigasi yang wajib dipasang di kapal
	Proper : Kelengkapan alat navigasi lengkap Unproper : Kelengkapan alat navigasi tidak lengkap
Navcom Utilized	Penggunaan alat navigasi oleh crew kapal
	Yes :Alat navigasi dimanfaatkan dengan baik No : Alat navigasi tidak dimanfaatkan dengan baik
Number of Crew	Jumlah crew sesuai standart yang berlaku
	Proper : Jumlah crew sesuai standart Unproper : Jumlah crew tidak sesuai standart
Dual Task	Beban tugas yang di emban petugas jaga
	Yes : Beban tugas petugas jaga >1 No : Beban tugas petugas jaga <1
Fatigue	Kondisi Mental Petugas jaga
	Yes : Kondisi petugas jaga bertugas >14 jam

	No : Kondisi petugas jaga bertugas <14 jam
Crew Health	Kondisi kesehatan petugas jaga Fit : Kondisi kesehatan baik Unfit : Kondisi kesehatan tidak baik
Inexperience	Pengalaman/ masa jabat petugas jaga pda jabatan yang sama Yes : Pengalaman <1 tahun No : Pengalaman >1 tahun
Understanding of Ship Characteristic	Pemahaman petugas jaga terkait kemampuan tindakan olah gerak kapal Good : Petugas jaga paham Bad : Petugas jaga tidak paham
Understanding of Water	Pemahaman petugas jaga terkait kondisi perairan yang dilalui Good : Petugas jaga paham kondisi perairan Bad : Petugas jaga paham kondisi perairan
Uncertain	Tindakan ragu-ragu petugas jaga saat mengambil keputusan Yes : Petugas jaga ragu-ragu No : Petugas jaga tidak ragu-ragu
Pilot	Ketersediaan pandu Available : Pandu tersedia Charlie : Pandu dianjungan kapal Not Available: Pandu tidak tersedia Not Required : Pandu tidak wajib ada
Ship Communication	Upaya pencegahan yang dilakukan oleh petugas jaga Good : Petugas jaga melakukan upaya Bad : Petugas jaga tidak melakukan upaya
Good Seamanship	Perilaku crew berdasarkan regulasi yang berlaku Yes : Perilaku crew sesuai No : Perilaku crew tidak sesuai
Situational Awarness	Kesadaran petugas terkait kondisi bahaya Good : Petugas jaga sadar bahaya Bad : Petugas jaga tidak sadar bahaya
Decision Making	Pengambilan keputusan yang diambil petugas jaga Good : Keputusan yang diambil mampu menghindari tubrukan Bad : Keputusan yang diambil menyebabkan tubrukan
Understanding of Navcom Sign	Pemahaman petugas jaga terkait kode navigasi dari kapal disekitarnya Good : Petugas jaga paham kode Bad : Petugas jaga tidak paham kode
Preventive Timing	Ketepatan waktu melakukan pencegahan tubrukan kapal Good : Tepat dalam melakukan pencegahan Bad : Tidak tepat dalam melakukan pencegahan
Maneuverability	Olah gerak kapal yang dilakukan Good : Olah gerak kapal baik Limited : Olah gerak kapal tidak baik
Technical Failure	Kondisi kegagalan teknis pada kapal Yes : Terjadi kegagalan teknis dikapal No : Tidak terjadi kegagalan teknis dikapal
Collision	Kondisi kapal mengalami tubrukan Collision : Terjadi tubrukan kapal

No Collision : Tidak terjadi tubrukan kapal

Tabel 2. Deskripsi *Node Factor*

<i>Node Factor</i>	Simbol	Kategori	Simbol kategori
Master	M	Available	MA
		Not Available	MN
Daylight	D	Day	DD
		Night	DN
Visual Observation	V	Good	VG
		Bad	VB
Navcom Equipment	NE	Proper	NEP
		Unproper	NEU
Navcom Utilized	NU	Yes	NUY
		No	NUN
Number of Crew	NC	Proper	NCP
		Unproper	NCU
Dual Task	DT	Yes	DTY
		No	DTN
Fatigue	F	Yes	FY
		No	FN
Crew Health	CH	Fit	CHF
		Unfit	CHU
Crew Competence	CC	Proper	CCP
		Unproper	CCU
Inexperience	I	Yes	IY
		No	IN
Understanding of Ship Characteristic	US	Good	USG
		Bad	USB
Understanding of Water	UW	Good	UWG
		Bad	UWB
Uncertain	U	Yes	UY
		No	UN
Pilot	P	Available	PA
		Charlie	PC
		Not Available	PNA
Ship Communication	SC	Good	SCG
		Bad	SCB
		Required	PNR
Good Seamanship	GS	Yes	GSY
		No	GSN
Situational Awarness	SA	Good	SAG
		Bad	SAB
Decision Making	DM	Good	DMG
		Bad	DMB
Understanding of Navcom Sign	UN	Good	UNG
		Bad	UNB
Preventive Timing	PT	Good	PTG
		Bad	PTB
Maneuverability	M	Good	MG
		Limited	ML
Technical Failure	T	Yes	TY
		No	TN
Collision	C	Collision	CC
		No Collision	CN

3.2.2 Pembentukan Model *Bayesian Network*

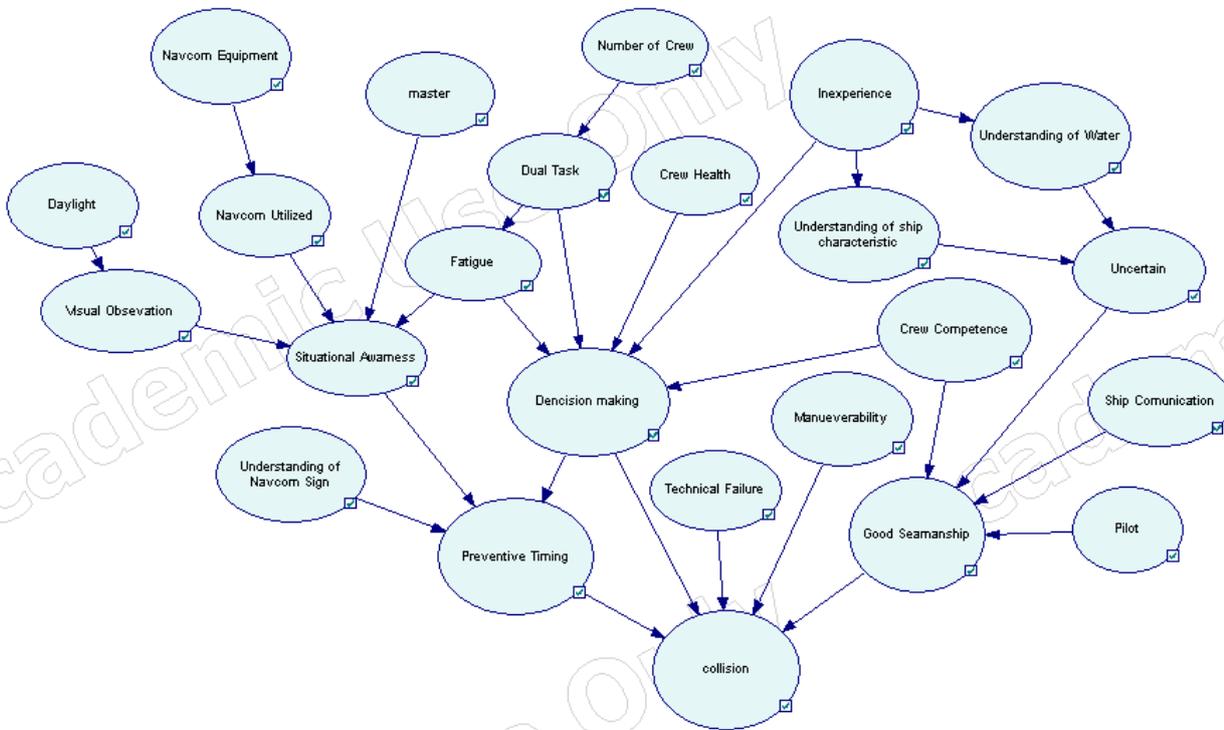
Pembentukan model dilakukan dari pengolahan data rekapitulasi kecelakaan kapal berdasarkan faktor yang memengaruhi, peluang setiap faktor dan hubungan antara satu faktor dengan faktor yang lain. Model disetiap tipe tubrukan akan dimodelkan dengan *node factor* yang sama, namun peluang dari setiap faktor disesuaikan dengan data historis yang ada.

3.3 Perhitungan Probabilitas

Pada tahap ini dilakukan perhitungan peluang setiap node, baik *prior node* maupun *child node* menggunakan *bayes theory*. Pada model ini terdapat data rekapitulasi sebagai sebagai berikut :

3.3.1 Perhitungan Probabilitas *Prior Node*

Prior Node adalah node factor yang tidak dipengaruhi oleh faktor lain sehingga memiliki sifat independent. Node yang menjadi node pendahulu sebagai model tanpa dipengaruhi oleh Berdasarkan *node factor* yang telah ditentukan, prior node pada pemodelan ini berjumlah 12 yaitu “*Crew competence*”, “*Daylight*”, “*Manueverability*”, “*Navcom Equipment*”, “*Ship communication*”, “*Master*”, “*Understanding of Navcom Sign*”, “*Crew health*”, “*Pilot*”, “*Inexperience*”, “*Technical failure*”, “*Number of crew*”. Dalam perhitungan ini menggunakan formula yang sederhana, yaitu:



Gambar 1. Gambar Model Bayesian Network Tubrukan Kapal

Tabel 3. Jumlah Kapal yang Terlibat

Type Tubrukan	Collision	No Collision	Total
Head-On	40	24	64
Crossing	31	9	40
Overtaking	5	4	9
Total	76	37	113

Pada tabel 3 menunjukkan data jumlah kapal yang terlibat di setiap tipe tubrukannya. Tipe *head-on collision* memiliki 40 kapal yang tercatat mengalami tubrukan, *Crossing collision* aad 31 kapal dan *overtaking collision* sebanyak 5 kapal.

$$P(A) = \frac{n}{N} \quad (2)$$

dimana :

P(A) : peluang suatu kejadian A terjadi

n : banyaknya kejadian A terjadi

N : banyaknya seluruh kejadian A terjadi

Untuk representasi untuk perhitungan *prior node* lainnya, faktor “*Inexperience*”(I) memiliki dua probabilitas yaitu Yes (IY) dan No (IN) . Berikut contoh perhitungan “*Inexperience*” :

Tabel 4. Data Kondisi Kapal pada Faktor *Inexperience*

Inexperience		
Yes	No	Total
17	59	76

Tabel 4 menunjukkan data pada faktor *inexperience*, dari 76 kapal ada 17 kapal yang mengalami faktor *inexperience yes* dan 59 *inexperience no*.

- Yes

$$P(IY) = \frac{nY}{N}$$

- No

$$P(IN) = \frac{nN}{N}$$

Tabel 5. Hasil Nilai Probabilitas Faktor *Inexperience*

P(IY)	P(IN)
0,224	0,776

Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan probabilitas faktor *inexperience* sebesar 0,224 untuk *inexperience yes* dan 0,776 untuk *inexperience no*.

3.3.2 Perhitungan Probabilitas *Child Node*

Node yang dipengaruhi oleh faktor lain seperti prior node sehingga *child node* memiliki sifat dependent. Berdasarkan *node factor* yang sudah ditentukan, *child node* pada pemodelan ini berjumlah 11. Dalam perhitungan ini menggunakan formula :

$$P(A | B) = \frac{P(A, B)}{P(B)} \quad (3)$$

Dimana :

$P(A | B)$: Peluang A terjadi apabila B telah

terjadi.

$P(A, B)$: Peluang A dan B terjadi

$P(B)$: Peluang B terjadi.

Untuk representasi untuk perhitungan *child node* lainnya, faktor “*Understanding of Water*”(UW) dipengaruhi oleh “*Inexperience*” dan memiliki 2 probabilitas yaitu good (UWG) dan bad (UWB) .

Berikut contoh perhitungan *undersanding of water*:

Tabel 6. Data Kondisi Kapal pada Faktor *Understanding of Water* yang dipengaruhi oleh faktor *Inexperience*

Inexperience (I)	Understanding of Water (UW)		Total
	Bad	Good	
No	9	50	59
Yes	5	12	17
Total	14	62	76

Tabel 6 menunjukkan data faktor *understanding of water* yang dipengaruhi oleh faktor *inexperience*, dimana kapal yang mengalami *understanding of water bad inexperience no* sebanyak 9, *understanding of water bad inexperience yes* 5, *understanding of water good inexperience no* 50 dan *understanding of water good inexperience yes* 12.

- *Understanding of Water Good* ketika *Inexperience Yes*

$$P(UWG | IY) = \frac{P(UWG, IY)}{P(IY)}$$

- *Understanding of Water Good* ketika *Inexperience No*

$$P(UWG | IN) = \frac{P(UWG, IN)}{P(IN)}$$

Setelah dilakukan perhitungan tersebut, nilai masing-masing probabilitas dicantumkan ke dalam tabel CPT seperti berikut :

Tabel 7. CPT *Understanding of Water*

Inexperience (I)	Understanding of Water (UW)	
	Good	Bad
Yes	0,706	0,294
No	0,847	0,153

Tabel 7 menunjukkan hasil perhitungan probabilitas *child node understanding of water*, dimana *understanding of water bad inexperience no* memiliki nilai 0,153, *understanding of water bad inexperience yes* 0,294, *understanding of water good inexperience no* 0,847 dan *understanding of water good inexperience yes* 0,706.

Contoh lain :

Tabel 8. Data Kondisi Kapal pada Faktor *Situational Awareness* yang dipengaruhi Faktor *Master, Fatigue, Visual Observation, dan Navcom Utilized*

Situational Awareness (SA)						
Master (M)	Fatigue (F)	Visual Observation (V)	Navcom Utilized (NU)	Good	Bad	
Available	Yes	Good	Yes	46	12	58
			No	2	2	4
			Bad	1	1	2
		Bad	No	1	1	2
			Yes	1	1	2
			No	44	10	54
	No	Good	Yes	42	9	51
			No	32	5	37
			Bad	10	4	14
		Bad	Yes	2	1	3
			No	1	0	1
			No	1	1	2
Not Available	Yes	Good	Yes	9	9	18
			No	0	1	1
			Bad	0	1	1
		Bad	No	0	1	1
			Yes	9	8	17
			No	8	5	13
	No	Good	Yes	6	2	8
			No	2	3	5
			Bad	1	3	4
		Bad	Yes	1	3	4
			No	1	3	4
			No	55	21	76

Tabel 8 menunjukkan data faktor situational awareness yang dipengaruhi oleh 4 faktor sebelumnya, diantaranya *master, fatigue, visual observation, dan navcom utilized*. Perhitungan data tabel 8 menghasilkan nilai probabilitas *child node* yang tercantum pada tabel CPT sebagai berikut :

Tabel 9. Hasil Perhitungan Nilai Probabilitas Faktor *Situational Awareness* yang dipengaruhi oleh 4 *Parent Node*

Situational Awareness (SA)					
Master (M)	Fatigue (F)	Visual Observation (V)	Navcom Utilized (NU)	Good	Bad
Available	Yes	Good	Yes	0	1
			No	0,5	0,5
			Bad	0,865	0,135
		Bad	No	0,714	0,286
			Yes	1	0
			No	0,5	0,5

Yes	Good	No	0	1
Not Available	Good	Yes	0,75	0,25
		No	0,4	0,6
		Bad	0,25	0,75

3.3.3 Perhitungan *Joint Probability*

Setelah semua *node factor* dihitung probabilitasnya, maka akan dilanjutkan perhitungan *joint probability* dengan software GeNIe academic 4.1. Perhitungan ini akan menghasilkan probabilitas gabungan dari seluruh probabilitas hingga menghasilkan nilai probabilitas *node factor* tujuan. Berikut adalah perhitungan salah satu *joint probability*:

Tabel 10. Nilai Probabilitas Faktor *Inexperience*

Inexperience (I)	
Yes	No
0,224	0,776

Tabel 10 merupakan data nilai probabilitas faktor *inexperience*, dimana *inexperience yes* sebesar 0,224 dan *inexperience no* 0,776.

Tabel 11. Nilai Probabilitas *Child Node* Faktor *Understanding of Water* yang dipengaruhi Faktor *Inexperience*

Inexperience (I)	Understanding of Water (UW)	
	Good	Bad
Yes	0,706	0,294
No	0,847	0,153

Tabel 11 menunjukkan hasil perhitungan probabilitas *child node understanding of water*, dimana *understanding of water bad inexperience no* memiliki nilai 0,153, *understanding of water bad inexperience yes* 0,294, *understanding of water good inexperience no* 0,847 dan *understanding of water good inexperience yes* 0,706.

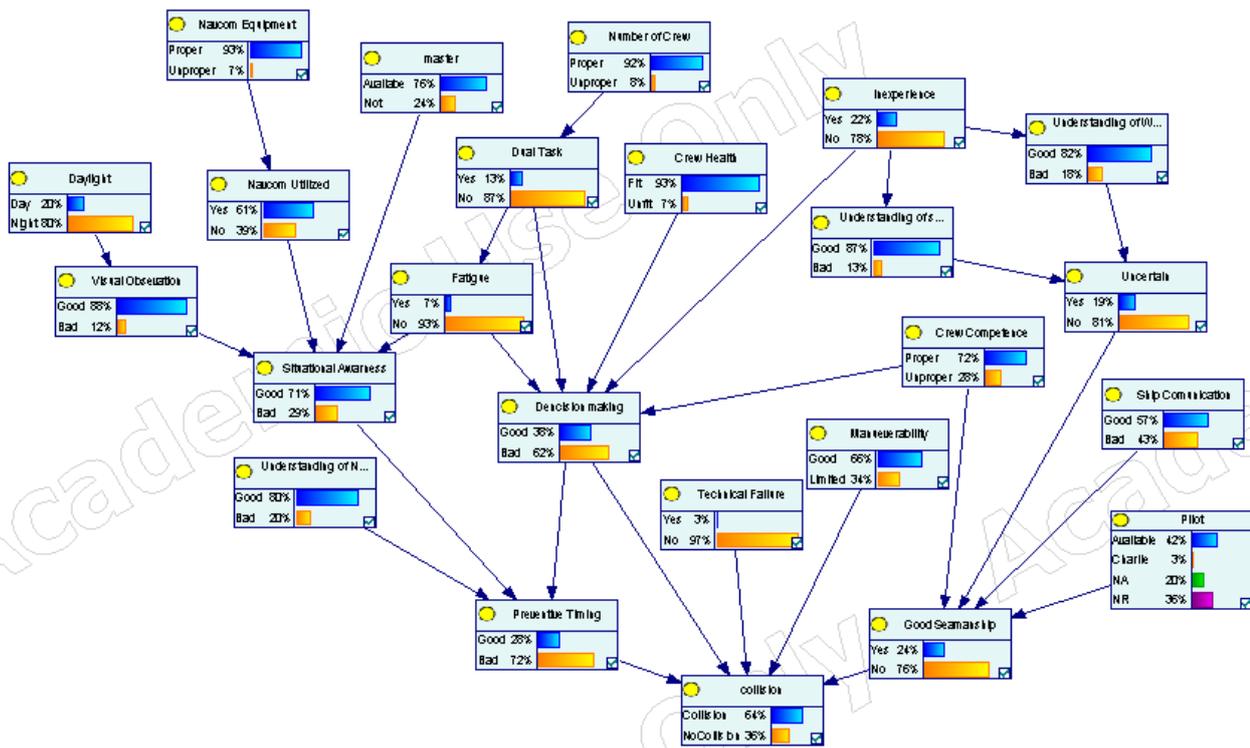
- *Understanding of Water*

$$P(UWG) = P(UWG | IY) \cdot P(IY) + P(UWG | IN) \cdot P(IN)$$

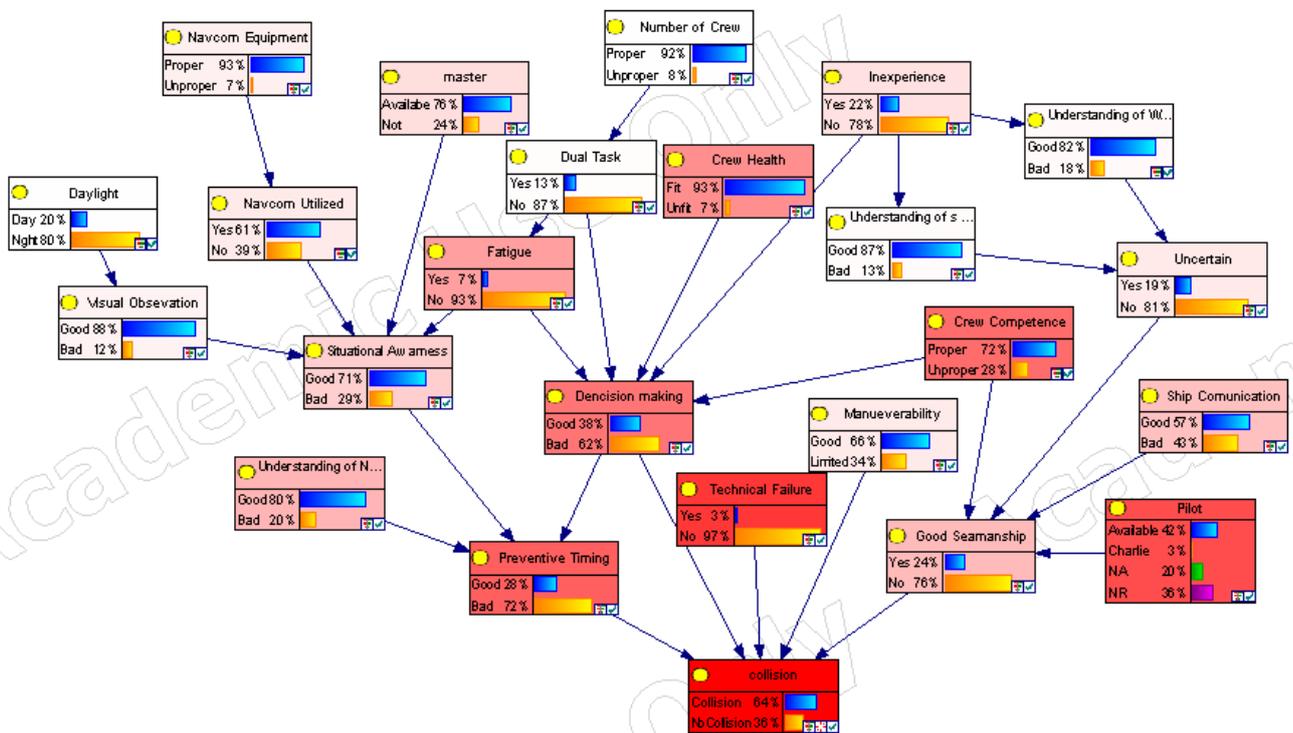
$$P(UWG) = (0,706 \times 0,224) + (0,847 \times 0,776)$$

$$P(UWG) = 0,816$$

$$P(UWB) = 0,184$$



Gambar 2. Model Causation Probability Tubrukan Kapal



Gambar 3. Analisis Sensitivitas pada Model Bayesian Network

Gambar 3 menunjukkan faktor-faktor yang memengaruhi tubrukan kapal. Menurut gambar tersebut, warna yang paling gelap menandakan faktor yang paling mempengaruhi menjadi

penyebab tubrukan kapal. Faktor-faktor tersebut adalah *technical failure*, *crew competence* dan *preventing timing*.

Contoh lain:

Tabel 12. Nilai Probabilitas Faktor *Understanding of Ship*

Understanding of Ship (US)	
Yes	No
0,868	0,132

Tabel 12 merupakan data nilai probabilitas faktor *understanding of ship*, dimana *understanding of ship yes* sebesar 0,868 dan *understanding of ship no* 0,132.

Tabel 13. Nilai Probabilitas Faktor *Understanding of Water*

Understanding of Water (UW)	
Yes	No
0,816	0,184

Tabel 13 merupakan data nilai probabilitas faktor *understanding of water*, dimana *understanding of water yes* sebesar 0,816 dan *understanding of water no* 0,184.

Tabel 14. Nilai Probabilitas *Child Node* Faktor *Uncertain* yang dipengaruhi Faktor *Understanding of Ship* dan *Understanding of Water*

Uncertain (U)			
Understanding of Ship (US)	Understanding of Water (UW)	Yes	No
Good	Good	0,237	0,763
Good	Bad	0	1
Bad	Good	0	1
Bad	Bad	0,429	0,571

Tabel 14 menunjukkan hasil perhitungan *probability child node uncertain* yang dipengaruhi dua faktor yaitu *understanding of ship* dan *understanding of water*.

- *Uncertain*

$$P(UY) = P(UG | USG, UWG).P(USG).P(UWG) + P(UG | USG, UWB).P(USG).P(UWB) + P(UG | USB, UWG).P(USB).P(UWG) + P(UG | USB | UWB).P(USB).P(UWB)$$

$$P(UY) = (0,237 \times 0,868 \times 0,816) + (0 \times 0,868 \times 0,814) + (0 \times 0,132 \times 0,816) + (0,429 \times 0,132 \times 0,184)$$

$$P(UY) = 0,186$$

Dilakukan perhitungan yang sama untuk setiap *child node* dan disetiap tipe tubrukan kapal. Setelah semua perhitungan dilakukan, didapatkan nilai *causation probability* pada node "Collision".

3.4. Validasi Model

Validasi model dilakukan menggunakan metode *hold-out*, metode ini digunakan untuk memvalidasi data. data rekapitulasi akan dibagi menjadi dua bagian menjadi data testing dan data training, data testing didefinisikan sebagai data yang digunakan untuk menguji sedangkan data training didefinisikan sebagai data untuk proses pelatihan model. Pemisahan data ini dilakukan secara acak, variasi pembagian yang sering digunakan sebelumnya yaitu 70%- 30% dan 80%-20%. Dalam penelitian ini pemisahan data menggunakan variasi 70% training data dan 30% testing data. Hasil yang ditampilkan dari validasi model memiliki nilai akurasi 93%, hasil tersebut dinilai tinggi.

3.5. Analisis Frekuensi

Pada penelitian ini, pengaplikasian nilai *Pc* dilakukan untuk analisa frekuensi tubrukan di alur pelayaran barat Surabaya. Data AIS berupa pergerakan kapal di Alur Pelayaran Barat Surabaya pada tahun 2022 digunakan untuk analisa ini. Perhitungan *geometric Probability* didapatkan dengan formula dari *IWRAP theory*. Berikut merupakan hasil yang didapatkan untuk nilai frekuensi tubrukan kapal pada setiap tipe tubrukan:

Tabel 15. Hasil Analisis Frekuensi Tubrukan Kapal

Tipe Tubrukan	Pc Default [10 ⁻⁵]	Pc Analisis [10 ⁻⁵]	Frekuensi (Pc Default)	Frekuensi (Pc Analisis)
Head-on	4,9	5,69	1,5 x 10 ⁻¹	1,7 x 10 ⁻¹
Crossing	12,3	4,23	0,2 x 10 ⁻³	0,9 x 10 ⁻⁴
Overtaking	11	0,96	0,9 x 10 ⁻¹	0,8 x 10 ⁻²

IF	Frekuensi	Definisi	F (per ship year)
1	Sangat Jarang	Kemungkinan terjadi sekali seumur hidup (20 tahun) armada dunia yang terdiri dari 5000 kapal	0.00001
2	Jarang	Kemungkinan terjadi setahun sekali dalam armada 10000 kapal	0.0001
3	Kemungkinan Kecil	Kemungkinan terjadi setahun sekali dalam armada 1000 kapal	0.001
4	Kemungkinan Sedang	Kemungkinan terjadi sekali per-tahun dalam armada 100 kapal, kemungkinan terjadi beberapa kali selama kapal beroperasi	0.01
5	Kemungkinan Besar	Kemungkinan terjadi sekali per-tahun dalam armada 10 kapal, kemungkinan terjadi beberapa kali selama kapal beroperasi	0.1
6	Sering	Kemungkinan terjadi satu kali pada satu kapal dalam satu tahun	1
7	Sangat Sering	Kemungkinan terjadi satu kali pada satu kapal dalam satu bulan	10

Gambar 4. Indeks Frekuensi BKI 2023 [15]

Tabel 15 merupakan hasil perbandingan nilai dari penelitian sebelumnya dengan nilai analisis pada penelitian ini. Nilai frekuensi tipe tubrukan *head-on* memiliki nilai 0,17 yang dibulatkan

menjadi 0,1 dimana menurut penilaian resiko kapal domestik oleh biro klasifikasi Indonesia termasuk dalam kategori kemungkinan besar. Nilai frekuensi tipe tubrukan *crossing* memiliki nilai 0,00009 yang dibulatkan menjadi 0,0001 dimana menurut penilaian resiko kapal domestik oleh biro klasifikasi Indonesia termasuk kategori jarang dan nilai frekuensi tipe tubrukan *overtaking* memiliki nilai 0,008 yang dibulatkan menjadi 0,01 dimana menurut penilaian resiko kapal domestik oleh biro klasifikasi Indonesia termasuk kategori kemungkinan sedang.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada penelitian ini dapat disimpulkan berdasarkan perhitungan probabilitas dari model *bayesian network* tubrukan kapal, didapatkan nilai probabilitas potensi kapal yang mengalami tubrukan adalah 64% dengan akurasi nilai 93%. Nilai causation probability yang didapatkan adalah $5,69 \times 10^{-5}$, $4,23 \times 10^{-5}$, dan $0,96 \times 10^{-5}$ (*Head-on, crossing dan overtaking*). Nilai frekuensi tubrukan kapal pada setiap tipe tubrukan pada Alur Pelayaran Barat Surabaya dengan data AIS tahun 2022 yaitu sebesar 0,17 tubrukan/tahun menurut penilaian resiko kapal domestik oleh biro klasifikasi Indonesia termasuk dalam kategori kemungkinan besar untuk *head-on collision*, 0,00009 tubrukan/tahun menurut penilaian resiko kapal domestik oleh biro klasifikasi Indonesia termasuk kategori jarang untuk *crossing collision*, dan 0,008 tubrukan/tahun menurut penilaian resiko kapal domestik oleh biro klasifikasi Indonesia termasuk kategori kemungkinan sedang untuk *overtaking collision*. *Node factor* yang memengaruhi terjadinya tubrukan kapal yaitu faktor *number of crew, inexperience, crew competence, ship communication, understanding of Navcom Sign, daylight, master, navigational equipment, Pilot, , Fatigue, Understanding of Ship Characteristic, Understanding of Water Condition, uncertain, situational awareness, Crew Health, Navcom utilized, dual task, decision making, good seamanship, preventive timing, manuevrability, dan technical failure*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Di akhir tulisan ini, Penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada Laboratorium Teknologi Sistem dan Permesinan Kapal yang telah mendukung penulis dalam penyusunan tugas akhir ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Universitas

Diponegoro dan lembaga terkait seperti Komite Nasional Keselamatan Transportasi yang membantu penulis dalam kebutuhan informasi yang dibutuhkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, “Empat Puluh Persen Jalur Perdagangan Dunia Melewati Indonesia,” Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- [2] D. W. H. Kemas Arie Setiawan, “Analisis Frekuensi Tubrukan Kapal Pada Area Rawan Kecelakaan Di Selat Singapura,” *Skripsi Dep. Tek. Sist. Perkapalan*, 2018.
- [3] E. Uflaz, E. Akyuz, O. Arslan, P. Gardoni, O. Turan, and M. Aydin, “Analysing human error contribution to ship collision risk in congested waters under the evidential reasoning SPAR-H extended fault tree analysis,” *Ocean Eng.*, vol. 287, no. P1, p. 115758, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115758.
- [4] J. Ma, Q. Hu, T. Liu, Z. Zhu, and Y. Zhou, “Research on Ship Collision Risk Calculation in Port Navigation Waters Based on Ising Model and AIS Data,” *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part A Civ. Eng.*, vol. 10, no. 2, 2024, doi: 10.1061/AJRUA6.RUENG-1190.
- [5] B. Murray and L. P. Perera, “Ship behavior prediction via trajectory extraction-based clustering for maritime situation awareness,” *J. Ocean Eng. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1016/j.joes.2021.03.001.
- [6] H. Liu S. Cui, S. Li, N. Wang. Q. Shi, Y. Cai, L. Zhang and D. Liu., “A Bayesian Network Structure Learning Algorithm Based on Probabilistic Incremental Analysis and Constraint,” *IEEE Access, Vol 10, Pp 130719-130732*, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3229128.
- [7] M. A. A. Mas’ud, “Formal Safety Assessment (Fsa) Untuk Tubrukan Kapal Di Perairan Sungai Musi,” *Skripsi Dep. Tek. Sist. Perkapalan*, 2023.
- [8] Y. Fujii, “Integrated Study on Marine Traffic Accidents,” *IABSE Colloq. Sh. Collis. with Bridg. Offshore Struct. Copenhagen*, pp. 42:91-98, 1983.
- [9] S. Kristiansen, *Maritime Transportation Safety Management and Risk Analysis*, 1st ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [10] H. Ugurlu and I. Cicek, “Analysis and

assessment of ship collision accidents using Fault Tree and Multiple Correspondence Analysis,” *Ocean Eng.*, vol. 245, no. September 2021, p. 110514, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110514.

- [11] T. Macduff, “Probability of Vessel Collision,” *Ocean Ind.*, vol. 9, no. 9, pp. 144–148, 1974.
- [12] T. M. Rofifah, “Evaluation Study on Surabaya Vessel Traffic Service (VTS) in Reducing the Risk of Ship Collision in Surabaya West Access Channel,” *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. x(x), no. x, 2022.
- [13] R. A. Sukma, D. W. Handani, T. F. Nugroho, and W. Tyasayumranani, “Risk Assessment of Ship Collision on FSO Abherka and Oil Spill Modelling Due to Structural Damage,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1081, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1081/1/012029.
- [14] S. I. Sezer, B. O. Ceylan, E. Akyuz, and O. Arslan, “D-S evidence based FMECA approach to assess potential risks in ballast water system (BWS) on-board tanker ship,” *J. Ocean Eng. Sci.*, no. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.joes.2022.06.040.
- [15] Biro Klasifikasi Indonesia. Petunjuk Penilaian Kapal Domestik, 2023