



JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Evakuasi Pada Kapal KM. Kirana IX 9168 GT Menggunakan Metode *Agent Based Modelling Simulation* Dalam Kondisi Kebakaran

M Jamal Gilang Perdana¹⁾, Imam Pujo Mulyatno, Ari Wibawa Budi Santosa

¹⁾Laboratorium Desain Kapal Kecil dibantu Komputer

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

^{*}e-mail : muhammadjamalgilangp@students.undip.ac.id,
imampujomulyatno@lecturer.undip.ac.id,
ariwibawabudisantosa@lecturer.undip.ac.id

Abstrak

Data dari KNKT sebanyak 120 kecelakaan terjadi di Perairan Indonesia dimana 89% diantaranya terjadi pada kapal motor dengan 44 kejadian akibat kebakaran selama tahun 2003 hingga 2019. Penelitian ini membahas waktu evakuasi pada kondisi kebakaran dengan menerapkan ketentuan dari IMO MSC.1/Circ. 1238. Penelitian ini dilakukan pada kapal penumpang 9168 GT yang diasumsikan terjadi kebakaran pada salah satu truck di tengah geladak kendaraan. Software yang digunakan pada penelitian ini meliputi Pathfinder dan Pyrosim. Dari hasil simulasi memberikan dampak dari kebakaran yaitu menimbulkan gas beracun, jarak pandang yang minim, dan nilai heat release rate pada kisaran 1000 kW. Dengan kondisi tersebut dihasilkan waktu evakuasi pada kasus 1; 51,40 menit, kasus 2; 49,90 menit, kasus 3; 51,61 menit dan kasus 4; 50,31 menit dengan error pada setiap kasusnya kurang dari 5%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penelitian ini menghasilkan waktu evakuasi di setiap kasusnya kurang dari 60 menit sesuai dengan standard performance IMO MSC. 1/Circ. 1533.

Kata Kunci : Evakuasi Kapal, Pathfinder, Pyrosim, IMO MSC.1/Circ.1533

1. Pendahuluan

Terkait dengan evakuasi dan keselamatan penumpang juga sudah seharusnya menjadi fokus utama dari kita untuk selalu terus mengevaluasi agar alat transportasi laut khususnya menjadi lebih nyaman dan aman untuk digunakan. Pada penyelenggaraannya terkadang tidak selalu berjalan dengan baik, bahaya tetap selalu mengancam para Anak Buah Kapal (ABK) maupun penumpang. Lembaga independent di lingkungan Kementerian Perhubungan yaitu Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) yang bertugas melakukan investigasi sebab terjadinya kecelakaan. Sebanyak 120 kali telah terjadi kecelakaan Sepanjang tahun 2003

hingga 2019, dengan korban paling banyak 354 jiwa pada tahun 2009. KNKT juga memberikan informasi bahwa dalam kurun waktu yang sama jenis kecelakaan terjadi paling banyak yaitu kebakaran dengan angka presentase 37 % dengan jumlah kejadian 44 kecelakaan. Dimana 89% kecelakaan dalam ini terjadi pada kategori kapal motor (kapal curah, kargo, penumpang, dan kapal feri dan *ro-ro* feri) [1].

Seperti pada jurnal penelitian Analisa Waktu Evakuasi Dengan Metode Advance Pada Kapal Perintis 1200 GT Dari hasil simulasi yang dilakukan waktu embarkasi penumpang adalah 348.03 detik, sedangkan total waktu evakuasi penumpang adalah 2010.03 detik atau sekitar 33.5 menit [2].

IMO MSC.1/Circ.1238 memberikan standar yang diperlukan dalam melakukan evaluasi proses evakuasi. Penggunaan standar tersebut dapat digunakan untuk kapal yang berlayar di Indonesia, hal ini dibuktikan melalui penelitian yang berjudul *Observation Study the Walking Speed and Distribution of Ship's Passenger as Basis for Passenger Evacuation Simulation*. Penelitian ini memberikan hasil bahwa kecepatan penumpang pada IMO MSC.1/Circ.1238 dapat merepresentasikan keadaan sebenarnya di kapal-kapal yang berlayar di Indonesia [3].

Pada penelitian sebelumnya mengenai Analisis Efektivitas Tata Letak *Inflatable Liferaft* Terhadap Proses Evakuasi Kapal Penumpang Berdasarkan IMO MSC.1/Circ.1533. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan durasi evakuasi total antara tata letak eksisting dengan tata letak yang diubah sesuai saran penulis. Pada kondisi kebakaran terdapat selisih 1 menit 18 detik pada kasus 1, 1 menit 16 detik pada kasus 2, 1 menit 38 detik pada kasus 3, dan 22 detik pada kasus 4. Pada kondisi tumit terdapat selisih 1 menit 19 detik pada kasus 1 dan 1 menit 25 detik pada kasus 2. Hasil pemodelan simulasi evakuasi dengan *layout liferaft* pada deck navigasi yang telah dimodifikasi sesuai saran penulis pada semua kasus mendapatkan nilai $n \leq 60$ menit dan juga telah mematuhi IMO MSC.1/Circ.1533 peraturan[4].

Selain itu terdapat juga penelitian berjudul Analisis Waktu Evakuasi berdasarkan Simulasi Tanggap Darurat, Perhitungan SFPE, dan Simulasi Pathfinder. Penelitian ini bertujuan mendapatkan waktu evakuasi dari simulasi para penumpang dan ABK saat keadaan darurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa berdasarkan simulasi ini dihasilkan waktu evakuasi sebesar 7,91 menit, sedangkan untuk perhitungan sistematis didapatkan waktu evakuasi sebesar 8,01 menit dan berdasarkan *software* pathfinder menghasilkan waktu evakuasi sebesar 8,13 menit [5].

Lalu pada penelitian yang dilakukan pada kapal penyeberangan Indonesia, yang bertujuan untuk evaluasi serta pemberian rekomendasi pada proses evakuasi kapal. Penelitian ini menghasilkan bahwa waktu evakuasi pada siang hari pada kisaran 32-48 menit, sedangkan untuk malam hari berada pada durasi 35-48 menit [6].

Dari kajian mengenai kecelakaan kapal di Indonesia dari Tahun 2003-2019,

menghasilkan bahwa kecelakaan laut yang sering terjadi yaitu kebakaran. Lokasi kecelakaan yang sering terjadi di perairan Jawa dengan waktu kecelakaan pada pukul 12.00-17.59 [7].

Kebakaran sebagai kasus yang sering terjadi pada kecelakaan kapal dapat dilakukan simulasi. Penggunaan metode *Fire Dynamic Simulator* (FDS) sangatlah dapat mewakili kenyataannya. Seperti pada penelitian oleh Rinnie dkk. Menyatakan bahwa FDS dapat memodelkan simulasi konsentrasi asap CO, CO₂ dan O₂ di beberapa kasus dengan baik [8]. Hal tersebut didukung oleh kajian yang merekonstruksi kebakaran pada KM Saliva. Kajian ini menunjukkan bahwa penggunaan FDS dapat merekonstruksi kebakaran yang terjadi pada kapal KM Saliva [9]. Pada kasus kebakaran yang sering terjadi, semakin besar konsentrasi asap yang dihasilkan dari proses kebakaran mengakibatkan semakin lambat kecepatan berjalan seseorang dikarenakan perilaku yang dihasilkan seperti berjalan dengan zigzag dan berjalan dengan lambat di dekat dinding [10].

Dari beberapa penelitian tersebut memiliki kesamaan yaitu fokus penelitian pada analisis evakuasi dengan penggunaan *software* untuk simulasi evakuasi dan untuk simulasi kebakaran pada kapal passenger 9168 GT lintas Surabaya-Banjarmasin. Penelitian ini bertujuan Mengetahui pengaruh bahaya yang disebabkan oleh kebakaran kapal terhadap evakuasi penumpang, Mengetahui cara menyimulasi dengan relevan untuk proses evakuasi saat terjadi bahaya yang mengancam dengan pemodelan tertentu, Mengetahui kecepatan laju pelepasan panas pada kondisi kebakaran, Mengetahui perbandingan data hasil simulasi, waktu yang tersedia dalam keadaan darurat serta standar yang digunakan.

2. Metode

2.1 *Agent Based Model Simulation* (ABMS)

Agent Based Modelling Simulation (ABMS) merupakan percobaan dengan menggunakan konsep *agent* dan interaksi dalam mendapatkan fenomena dan perilaku baru [11]. Simulasi ini memiliki keuntungan seperti dapat menganalisis dan mempelajari dari perilaku pergerakan agen yang memiliki sifat perilakunya sendiri-sendiri hingga dinamika sistem ketika proses evakuasi. Hal ini juga dapat memberikan jawaban ketika terdapat

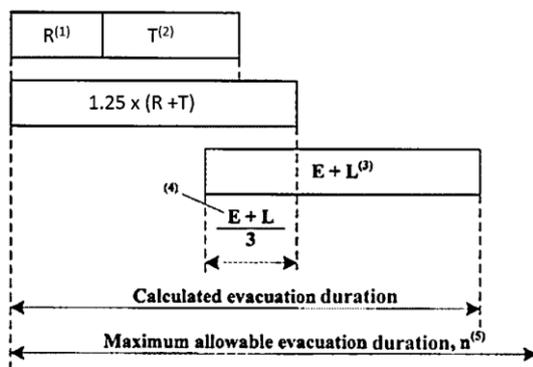
berbagai strategi dalam mengendalikan evakuasi pada bermacam model karena hasil dari simulasi ini dipengaruhi oleh semua interaksi agen.

2.2 Fire Dynamic Simulator (FDS)

Fire Dynamic Simulator (FDS) merupakan sebuah metode yang dikembangkan oleh National Institute of Standards and Technology (NIST) dalam menyimulasikan kebakaran. FDS menyimulasikan kebakaran dengan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dengan pengomptimalan aliran berkecepatan rendah yang digerakan secara termal [12]. Pendekatan ini dapat digunakan pada saat menyimulasikan kebakaran mulai dari yang sederhana hingga tingkat lanjut.

2.3 Peraturan IMO

International Maritime Organization (IMO) sebagai organisasi kemaritiman dunia telah mengeluarkan standar aturan dalam dunia maritim untuk skala internasional. Seperti dalam menganalisis suatu proses evakuasi pada kapal terhadap penumpang dan kru, IMO telah mengeluarkan data kecepatan berjalan dan presentase jumlah penumpang pada IMO MSC.1/Circ.1533.



Gambar 1. Standar Performa [13]

Gambar 1 merupakan standar performa dari IMO MSC.1/ Circ. 1533 yang di sederhanakan menjadi persamaan 1.

$$1,25(R+T) + 2/3(E+L) \leq n \quad (1)$$

Dimana:

R = *Response Duration*

T = *Travel Time*

E = *embarkation time,*

L = *launching time.*

Dengan catatan :

- (1) Pada kasus 1 dan 3 memiliki waktu 10 menit, kasus 2 dan 4 memiliki waktu 5 menit,
- (2) T diambil dari hasil waktu evakuasi software pathfinder
- (3) Pada kasus ini memiliki waktu maksimal 30 menit,
- (4) Overlap time yaitu $2/3 (E+L)$,
- (5) $n = 60$ waktu yang diperbolehkan untuk evakuasi.

2.4 Objek Penelitian

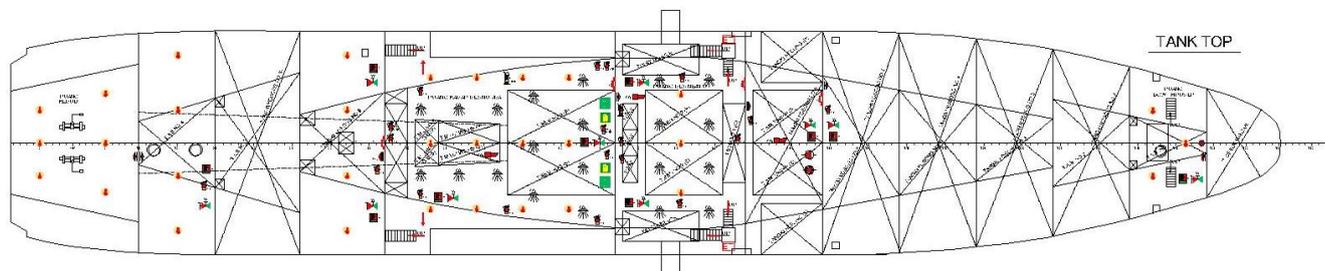
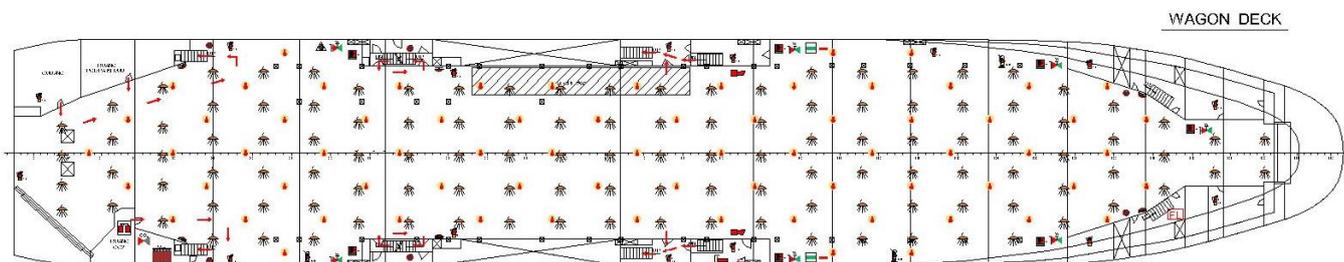
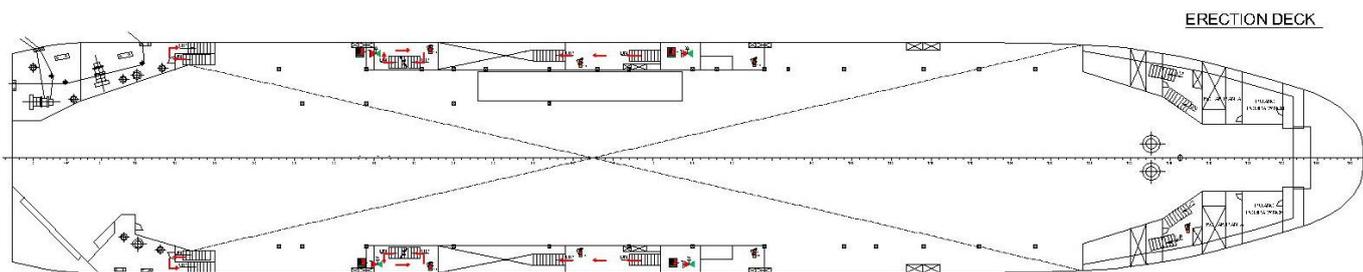
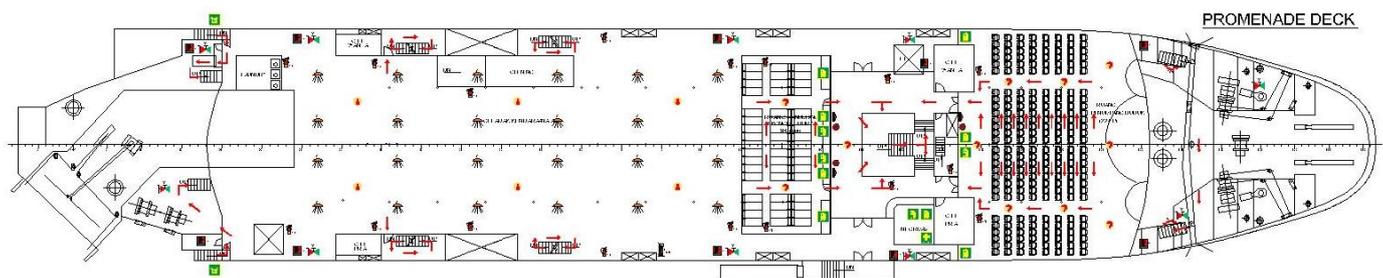
Kapal yang digunakan sebagai studi kasus pada penelitian ini yaitu kapal penumpang KM. Kirana IX milik PT. Dharma Lautan Utama. Kapal penyeberangan penumpang 9168 GT ini dibuat untuk melayani rute penyeberangan Surabaya-Banjarmasin, Indonesia bagian tengah.

kapal penumpang memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- LOA : 119 m.
- LPP : 110 m.
- B : 20,4 m.
- T : 5,2 m.
- H : 7,2 m.
- V_s : 9,6 knot.
- *Main Engine* : 2 x 6750 HP, 520 rpm.
- *Auxiliary Engine* : 3 x 1200 BHP
- ABK : 20 Orang.
- Penumpang : 596 orang
- Kendaraan Truck : 38 Unit.
- Kendaraan Medium Truck : 5 Unit.
- Kendaraan Mobil : 40 Unit

Kapal tersebut memiliki perlengkapan keselamatan sebagai berikut

- *Lifeboat* 2 unit.
- *Liferaft* 64 unit.
- Pelampung Dewasa 700 buah.
- Pelampung Anak 70 buah.



Gambar 2. Safety Plan

Pada gambar 2, *safety plan* sebagai sebuah rencana keselamatan praktis yang dapat membantu penumpang dan ABK dalam menghindari potensi bahaya dan dapat mengendalikannya dengan cara yang terbaik ketika dalam kondisi berbahaya ketika terjadi kecelakaan pada kapal. terdapat juga *escape route* yang membantu para penumpang dan ABK merencanakan jalur evakuasi tercepat dari posisi awal berada menuju *muster point* atau tempat yang digunakan bagi penumpang dan ABK untuk berkumpul setelah proses evakuasi.

Apabila pada saat terjadi evakuasi dalam kondisi kebakaran pada deck kendaraan dan posisi awal penumpang berada di promenade deck, maka pemilihan rute pelarian yang diberikan symbol panah berwarna merah atau *escape route* tercepat pada *safety plan* pada gambar 2, yaitu dengan memilih tangga terdekat yang ditunjukkan oleh *safety plan* menuju *muster point* yang berada di *upper bridge deck*.

2.5 Kondisi Penumpang

Pada simulasi ini kondisi penumpang diatur sesuai dengan anjuran dari IMO MSC.1/Circ.1533. Dimana terdapat empat kondisi dalam kebakaran, dengan perincian kondisi normal siang dan malam serta kondisi salah satu tangga evakuasi di matikan siang dan malam.

Tabel 1. Persentase Jumlah Penumpang dan ABK

Population Groups - Passengers	Passengers %
<i>Females younger than 30 years</i>	7
<i>Females 30-50 years old</i>	7
<i>Females older than 50 years</i>	16
<i>Females older than 50, mobility impaired (1)</i>	10
<i>Females older than 50, mobility impaired (2)</i>	10
<i>Males younger than 30 years</i>	7
<i>Males 30-50 years old</i>	7
<i>Males older than 50 years</i>	16
<i>Males older than 50, mobility impaired (1)</i>	10
<i>Males older than 50, mobility impaired (2)</i>	10
<i>Crew Females</i>	50
<i>Crew Males</i>	50

Selain itu pada IMO MSC.1/Circ. 1533 untuk presentase jumlah penumpang di bagi menjadi beberapa kelompok rentang umur dengan perincian pada tabel 2.

Tabel 2. Kecepatan Berjalan

Population groups - passengers	Walking speed on flat terrain (e.g., corridors)	
	Minimum (m/s)	Maximum (m/s)
Female youngers than 30 years	0.93	1.55
Female 30-5- years old	0.71	1.19
Females older than 50 years	0.56	0.94
Females older than 50, mobility impaired (1)	0.43	0.71
Females older than 50, mobility impaired (2)	0.37	0.61
Males younger than 30 years	1.11	1.85
Males 30-50 years old	0.97	1.62
Males older than 50 years	0.84	1.4
Males older than 50, mobility impaired (1)	0.64	1.06
Males older than 50, mobility impaired (2)	0.55	0.91
Crew females	0.93	1.55
Crew males	1.11	1.85

Lalu untuk kecepatan berjalan sesuai dengan IMO MSC.1/Circ. 1533 memberikan pedoman seperti yang di tuliskan pada tabel 3.

2.6 Skenario Kecelakaan

Penelitian ini menerapkan 4 skenario kasus yang harus dipertimbangkan berdasarkan pedoman IMO dengan skenario kondisi bahaya berupa kebakaran pada deck kendaraan. Keempat kasus tersebut memiliki perbedaan dalam hal persebaran penumpang dan ABK. Berikut merupakan persebaran untuk masing-masing kasus:

1. Kasus 1 (Evakuasi Primer, Malam Hari)
Pada kasus ini seluruh penumpang dan 2/3 ABK diasumsikan berada pada kabin atau tempat istirahat masing-masing. Artinya sebanyak 596 penumpang dan 14 ABK berada pada kabin. Sedangkan 1/3 ABK

lainnya akan didistribusikan sebagai berikut:

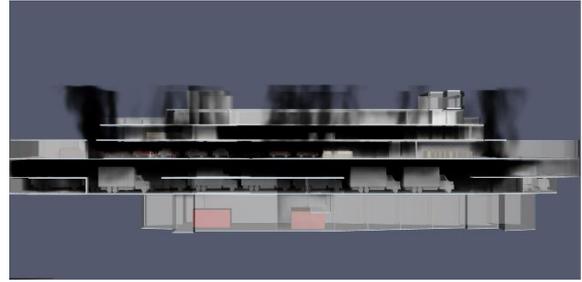
- 50% dari 1/3 ABK awal atau sebanyak 3 ABK berada pada lokasi kerja masing-masing.
 - 3 ABK lainnya tersebar pada setiap dek.
2. Kasus 2 (Evakuasi Primer, Siang Hari)
Persebaran untuk kasus 2 yaitu sebanyak 75% penumpang atau 447 penumpang berada pada *public space* atau tempat umum. Sedangkan untuk ABK akan didistribusikan sebagai berikut:
- 1/3 atau sebanyak 7 ABK berada pada kabin.
 - 1/3 atau sebanyak 7 ABK lainnya berada pada tempat umum.
 - 1/3 lainnya berada pada lokasi kerja masing-masing.
3. Kasus 3 (Evakuasi Sekunder, Malam Hari) dan Kasus 4 (Evakuasi Sekunder, Siang Hari)
Kasus-kasus ini menggunakan demografi populasi yang sama dengan kasus evakuasi primer atau kasus 1 dan 2. Namun, dalam kasus ini salah satu tangga penghubung antar geladak dari simulasi pada kasus 1 dan 2, dianggap tidak dapat digunakan dalam proses simulasi kasus 3 dan 4.

2.7 Simulasi Pyrosim

Pemodelan simulasi kebakaran ini digunakan untuk memberikan visualisasi terjadinya kebakaran pada kapal. Pembuatan model ini sesuai dengan rencana umum kapal penyeberangan 9168 GT. Pada pemodelan ini juga dilakukan pemilihan material pada bagian-bagian kapal yang dimodelkan seperti pada alas, dinding, dan perabotan kapal.

Untuk memodelkan api menggunakan asumsi kebakaran terjadi pada salah satu kendaraan. Sehingga dimasukkan *Heat Release Per Unit Area* (HRPUA) sebesar 260 kW/m^2 [14]. Kebakaran ini menggunakan reaksi *polyurethane*, dimana reaksi tersebut banyak terkandung dalam bahan material pada kendaraan seperti peralatan pada *dashboard* mobil, dan keypad suara pada mobil [15].

Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan waktu kebakaran 970 detik. Hal ini berdasar pada uji coba simulasi evakuasi menggunakan pathfinder.



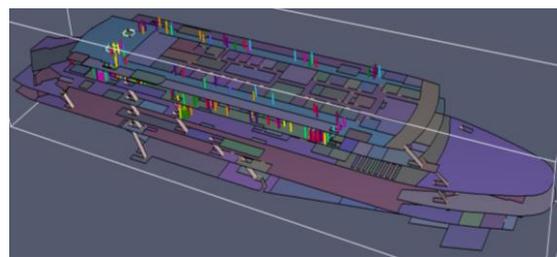
Gambar 3. kondisi asap pada tiap deck

Pada gambar 3 juga memperlihatkan dinding kapal dengan *opacity* yang rendah dengan maksud untuk memperlihatkan kondisi asap pada dalam ruangan.

2.8 Simulasi Pathfinder

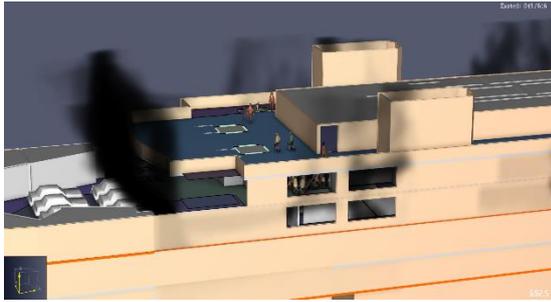
Dalam evakuasi perhitungan waktu evakuasi menjadi salah satu tolak ukur proses evakuasi yang baik. Melalui simulasi ini diharapkan dapat menghitung *traveling time* dengan mewakili keadaan sebenarnya untuk diolah menjadi *evacuation time*. Pembuatan model ini mengacu pada rencana umum dari kapal penyeberangan 9168 GT.

Simulasi penelitian ini menggunakan parameter SFPE. Parameter yang dimaksud yaitu perilaku dari setiap *agent* sesuai dengan kasus kebakaran. Sistem SFPE merupakan sistem perilaku yang dijelaskan pada SFPE *Handbook of Fire Protection Engineering* [16]. Pada system ini parameter mengontrol aliran dan antrian pada pintu.



Gambar 4. Penggambaran Final Model

Pada gambar 4 terlihat final model gambar. Pada gambar tersebut dek pada kapal diisi oleh bentuk pilar yang merupakan gambaran *agent* (ABK dan Penumpang) sebelum model di running. Hasil simulasi pada Pathfinder nantinya akan diintegrasikan dengan simulasi kebakaran yang dihasilkan pada Pyrosim.



Gambar 5. cuplikan simulasi evakuasi

Pada gambar 5 memperlihatkan cuplikan simulasi evakuasi kebakaran dimana para agen menuju *exit point* yang terletak pada geladak terbuka pada kasus 1.

2.9 Validasi

Validasi dilakukan untuk membuktikan apakah *traveling time* yang dihasilkan oleh simulasi pada *software pathfinder* memiliki hasil sesuai dengan perhitungan pada IMO. Validasi dilakukan menggunakan metode *simplified* yang dikeluarkan oleh IMO sesuai dengan *FSS Code* untuk empat kasus yang disimulasikan pada Pathfinder.

Tabel 3 Nilai *Specific Flow* Dan *Speed* Sebagai Fungsi Dari *Density*

Type	Initial Density	Initial Specific Flow	Initial Speed of Persons
	D (P/m ²)	F _s (p/(ms))	S (m/s)
Corridor	0	0	1,2
	0,5	0,65	1,2
	1,9	1,3	0,67
	3,2	0,65	0,2
	≥ 3,5	0,32	0,1

Tabel 4. Nilai Maksimum *Specific Flow* Dan *Speed* Pada Masing-Masing Tipe Tempat

Type	Initial Specific Flow	Initial Speed of Persons
	F _s (p/(ms))	S (m/s)
Stairs (down)	0	1
	0,54	1
Stairs (up)	1,1	0,55
	0	0,8
Corridor	0,43	0,8
	0,88	0,44
Corridor	0	1,2
	0,65	1,2
	1,3	0,67

Pedoman dalam menentukan *nilai specific flow* dan kecepatan orang saat melakukan evakuasi berdasarkan nilai densitas juga dapat menggunakan tabel 4.

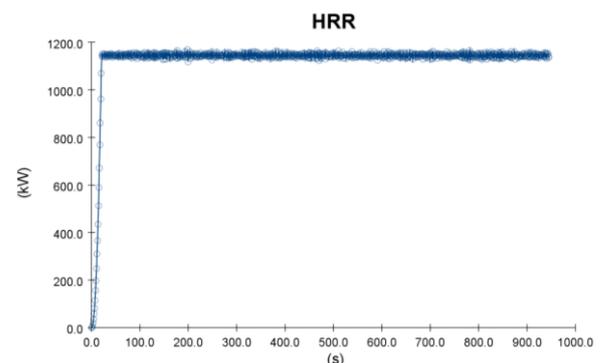
Untuk menghitung *travel time* dilakukan perhitungan melalui beberapa tahap sebagai berikut:

- Mengukur lebar dan panjang akses evakuasi seperti koridor dan tangga.
- Menghitung densitas pada setiap akses evakuasi.
- Menentukan *specific flow* berdasarkan densitas di setiap akses evakuasi menggunakan tabel 3
- Menghitung *calculated flow* di setiap akses evakuasi.
- Menentukan *initial speed* berdasarkan nilai *specific flow* menggunakan tabel 3.
- Menghitung *flow time* pada setiap dek.
- Menentukan *overall time*.
- Pilih *overall time* dari setiap geladak dengan nilai terbesar.

3. Hasil dan Pembahasan

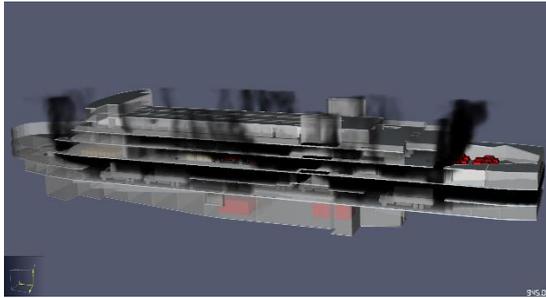
3.1 Simulasi Kebakaran

Hasil dari proses simulasi kebakaran merupakan animasi grafis dari simulasi dengan luaran berupa grafik. Dari animasi dapat diperoleh berupa sebaran asap maupun laju pelepasan panas. efek yang ditimbulkan dari kebakaran di dek kendaraan yaitu api yang tidak cukup besar.



Gambar 6. Grafik *Heat Release Rate*

pada gambar 6 dapat dilihat bahwa rata-rata besaran cepat rambat panas berada pada rata-rata kisaran 1000 kW hingga waktu 970 detik.



Gambar 7. Penampakan Asap

Pada gambar 7 dapat dilihat dari hasil simulasi kebakaran, asap yang dihasilkan cukup pekat terlihat dari warnanya. Dan asap sebagian besar langsung keluar dari kapal karena dek kendaraan pada kapal tersebut sebagian atapnya terbuka serta adanya lubang-lubang jendela yang dibuat memang cukup besar ukurannya. Sehingga tidak terjadi penumpukan asap yang signifikan pada geladak kendaraan. Namun asap masuk ke geladak penumpang dan menutupi tangga evakuasi.

3.2 Simulasi Evakuasi

Dari hasil simulasi untuk empat kasus didapatkan data *traveling time* sebagai berikut:

- Kasus 1 : 15,12 menit.
- Kasus 2 : 13,92 menit.
- Kasus 3 : 15,29 menit.
- Kasus 4 : 14,25 menit.

Setelah mendapat masing-masing *traveling time* pada setiap kasus dilakukan perhitungan untuk mengetahui *evacuation time* menggunakan persamaan 1 dan penentuan waktu E dan L menggunakan persamaan 2 sesuai standar performa yang sudah dikeluarkan oleh IMO.

$$1,25 (R+T) + 2/3 (E+L) \leq n \quad (1)$$

$$(E+L) \leq 30 \text{ Menit} \quad (2)$$

Sebagai contoh dilakukan perhitungan pada kasus satu. Simulasi pada kasus ini menghasilkan *traveling time* sebesar 15,12 menit. Perhitungan total waktu evakuasi sebagai berikut.

$$\begin{aligned} TWE &= 1,25 \times (R+T) + 2/3 \times (E+L) \\ TWE &= 1,25 \times (10+15,12) + 2/3 \times 30 \\ TWE &= 51,40 \text{ menit} \end{aligned}$$

Untuk hasil dari waktu evakuasi pada kasus satu hingga empat akan ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 5. Total Waktu Evakuasi

Kasus	Total Waktu Evakuasi (Menit)
Kasus 1 (Utama, Malam)	51,40
Kasus 2 (Utama, Siang)	49,90
Kasus 3 (Sekunder, Malam)	51,61
Kasus 4 (Sekunder, Siang)	50,31

Pada tabel 5 diberikan nama kasus utama yang berarti kasus tangga evakuasi utama dapat digunakan untuk evakuasi. Sedangkan untuk Sekunder berarti pada kasus tersebut tangga utama evakuasi tidak dapat di gunakan atau diasumsikan rusak. Sehingga total waktu evakuasi pada kasus sekunder membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan kasus utama

Dalam perhitungan waktu evakuasi, IMO membatasi agar waktu untuk melakukan evakuasi. Sehingga empat kasus tersebut memenuhi standar karena tidak melebihi 60 menit.

3.3 Validasi

Dengan mengikuti langkah-langkah pada IMO MSC.1/Circ. 1533, dan membandingkan dengan *output traveling time* pada simulasi pada setiap kasus dengan perhitungan menggunakan metode *simplified* dihasilkan *error* kurang dari lima persen sebagai berikut.

Untuk perhitungan travel time menggunakan rumus berikut:

- Perhitungan t_{deck} pada tiap dek.
 $t_{deck} = \text{Jarak (m)} \times \text{Initial speed (S)}$
- Perhitungan *flow time* (T_f) tiap dek.
 $t_f = N \text{ (Jumlah orang total)} / F_c \text{ (Calculated flow)}$
- Perhitungan T_{stairs} pada tiap dek
 $T_{stairs} = \text{Jarak (m)} \times \text{Initial speed (S)}$
- Perhitungan *overall time*
 $t_i = t_f + t_{deck} + t_{stairs} + t_{assembly}$
- Perhitungan *travel time*
 $T = (\gamma + \delta) \times t_i$

γ adalah faktor koreksi dengan nilai 2 untuk kasus 1 dan 2 dan nilai 1,3 untuk kasus 3 dan 4. δ adalah faktor koreksi arus balik dengan nilai 0,3. dimasukkan ketika nilai t_i adalah waktu tempuh tertinggi yang dinyatakan dalam detik yang dihasilkan dari penerapan prosedur perhitungan IMO.

Sesuai dengan ketentuan IMO MSC. 1/ Circ. 1533, penggunaan t_i diwakilkan menggunakan nilai t_i paling besar diantara dek

kapal untuk nantinya dibandingkan dengan hasil simulasi *software*.

$$\text{Persentase Error} = \frac{t_i - T_{\text{simulasi}}}{T_i} \times 100\% \quad (3)$$

Tabel 6. Total Travel Time Pada Kasus 1

Deck	t _{deck} (s)	t _r (s)	t _{stair} (s)	t _{assem bly} (s)	t _i (s)	T (s)
Kompartemen Alas	0	762,5	8,7	27,8	798,9	1837,6
Wagon Deck	5,4	762,2	3,5	27,8	799,1	1838,01
Erection Deck	4	762,2	3,5	27,8	797,8	1834,9
Promenace Deck	94,4	762,2	40	27,8	924,7	2126,8
Bridge Deck	132	762,5	24	27,8	946,3	2176,4
Upper Bridge Deck	0	762,5	0	278,8	790,3	1817,7
Navigation Deck	0	762,5	1,7	27,8	791,9	1821,4
Aplikasi	907,3					
Error	4,12 %					

$$\text{Persentase Error} = \frac{946,3 - 907,3}{946,3} \times 100\%$$

$$\text{Persentase Error} = 4,12 \%$$

Tabel 7. Total Travel Time Pada Kasus 2

Deck	t _{deck} (s)	t _r (s)	t _{stair} (s)	t _{assem bly} (s)	t _i (s)	T (s)
Kompartemen Alas	0	681,3	8,7	27,8	717,7	14354,3
Wagon Deck	5,4	681,3	3,5	27,8	717,9	14357,7
Erection Deck	4	681,3	3,5	27,8	716,6	14330,6
Promenace Deck	94,4	681,3	40	27,8	843,4	16868,6
Bridge Deck	62	681,3	24	27,8	795,02	15900,6
Upper Bridge Deck	0	681,3	0	27,8	709,02	14180,6
Navigation Deck	0	681,3	1,7	27,8	710,7	14213,6
Aplikasi	835,3					
Error	0,96 %					

$$\text{Persentase Error} = \frac{843,4 - 835,3}{843,4} \times 100\%$$

$$\text{Persentase Error} = 0,96 \%$$

Tabel 8. Total Travel Time Pada Kasus 3

Deck	t _{deck} (s)	t _r (s)	t _{stair} (s)	t _{assem bly} (s)	t _i (s)	T (s)
Kompartemen Alas	0	762,5	8,7	27,8	798,9	1837,6
Wagon Deck	5,4	762,2	3,5	27,8	799,1	1838,01
Erection Deck	4	762,2	3,5	27,8	797,8	1834,9
Promenace Deck	94,4	762,2	40	27,8	924,7	2126,8
Bridge Deck	132	762,5	24	27,8	946,3	2176,4
Upper Bridge Deck	0	762,5	0	278,8	790,3	1817,7
Navigation Deck	0	762,5	1,7	27,8	791,9	1821,4
Aplikasi	917,3					
Error	3,06 %					

$$\text{Persentase Error} = \frac{946,3 - 917,3}{946,3} \times 100\%$$

$$\text{Persentase Error} = 3,06 \%$$

Table 9. Total Travel Time Pada Kasus 4

Deck	t _{deck} (s)	t _r (s)	t _{stair} (s)	t _{assem bly} (s)	t _i (s)	T (s)
Kompartemen Alas	0	681,3	8,7	27,8	717,7	14354,3
Wagon Deck	5,4	681,3	3,5	27,8	717,9	14357,7
Erection Deck	4	681,3	3,5	27,8	716,6	14330,6
Promenace Deck	94,4	681,3	40	27,8	843,4	16868,6
Bridge Deck	62	681,3	24	27,8	795,02	15900,6
Upper Bridge Deck	0	681,3	0	27,8	709,02	14180,6
Navigation Deck	0	681,3	1,7	27,8	710,7	14213,6
Aplikasi	855					
Error	-1,37 %					

$$\text{Persentase Error} = \frac{843,4 - 855}{843,4} \times 100\%$$

$$\text{Persentase Error} = -1,37 \%$$

persentasi eror perbandingan antara hasil simulasi dan perhitungan yang dihasilkan dari setiap kasus menggunakan perhitungan pada persamaan 3, kurang dari 5% dan masih memenuhi standar IMO MSC. 1/ Circ. 1533.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan simulasi *safety plan* yang telah dilakukan pada kapal KM. Kirana IX 9168 GT menggunakan metode *Agent Based Modelling Simulation* dalam kondisi kebakaran menghasilkan kesimpulan bahwa yaitu total waktu evakuasi tidak lebih dari 60 menit yaitu waktu yang diperbolehkan untuk evakuasi pada kapal penumpang dan dibuktikan eror pada setiap kasus dalam perhitungan *traveling time* kurang dari 5% sehingga *safety plan* sudah sesuai dengan IMO MSC. 1/ Circ. 1533.

Perhitungan waktu total simulasi proses evakuasi pada kondisi kebakaran didapatkan perbandingan antara kondisi malam pada kasus satu dan tiga waktu total evakuasi naik sebesar 0,4% dan untuk kondisi siang antara kasus dua dan empat, waktu total evakuasi naik sebesar 0,8%.

maka dapat disimpulkan juga bahwa kebakaran pada kapal dapat mempengaruhi evakuasi penumpang dan ABK melalui kandungan gas beracun seperti karbon monoksida (CO) dan kepekatan asap. Hal ini mengakibatkan kepanikan, kehilangan kesadaran, dan mengurangi kecepatan berjalan bahkan menutup pandangan.

Laju rata-rata pelepasan panas pada kondisi terbakar dimana kebakaran pada kasus ini

merupakan kebakaran yang bersumber dari deck kendaraan, menunjukkan rata-rata besaran *hate release rate* di kisaran 1000 kW.

Daftar Pustaka

- [1] Komite Nasional Keselamatan Transportasi, "Laporan Final-Pelayaran," Jakarta, 2019. <https://knkt.dephub.go.id/post/read/laporan-final---pelayaran>
- [2] K. Priohutomo, and B. R. Yuwana, "Analisa Waktu Evakuasi Dengan Metode Advance Pada Kapal Perintis 1200 GT," *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, vol. 14, no. 2, pp. 47-52, Aug. 2017.
- [3] T. Pitana, B. K. Artana, D. Prasetyawati and N. Siswantor, "Observation Study the Walking Speed and Distribution of Ship's Passenger as Basis for Passenger Evacuation Simulation," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 862, pp. 232-237, 2017.
- [4] I.P. Mulyatno, H. Yudo, S.A. Prasanti, Amiruddin W.: *Analysis of Inflatable Liferaft Layout Effectiveness Towards The Evacuation Process for Passenger Ships Based on IMO MSC.1/Circ. 1533*. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 16, No. 4, doi:10.12716/1001.16.04.03, pp. 625-631, 2022
- [5] T. A. Pradita, M. L. Ashari and L. Handoko, "Analisis Waktu Evakuasi berdasarkan Simulasi Tanggap Darurat, Perhitungan SFPE, dan Simulasi Software Pathfinder," *Seminar K3*, Vol. 5, No. 1, 2021.
- [6] Rudianto, "Pemodelan Evakuasi Penumpang saat keadaan darurat pada Studi Kasus Kapal Penyeberangan Indonesia," *Seminar Sains dan Teknologi Kelautan*, vol.2, no.1, pp. 86-92, 2019.
- [7] A. D. Saputra, "Studi Kecelakaan Kapal di Indonesia dari Tahun 2003-2019 berdasarkan Data Investigasi Komite Nasional Keselamatan Transportasi," *Warta Penelitian Perhubungan*, vol. 2, pp. 87-94, 2021.
- [8] R. Tuomo, J. Hietaniemi and S. Hstikka, "Experimental Validation of the FDS Simulations of Smoke and Toxic Gas Concentrations," *VTT Working Paper*, vol. 66, pp. 3-35, 2007.
- [9] B. H. Adiwibowo, M. A. Santoso, F. A. Nugroho and Y. S. Nugroho, "Simulasi Numerik Rekonstruksi Kebakaran di Kapal," *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*, Banjarmasin, 7-8 Oktober 2015.
- [10] T. Yamada and Y. Akizuki, "Visibility and Human Behavior in Fire Smoke," in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Greenbelt, Springer Science, 2016, pp. 2196-2197.
- [11] J. Bata, "Simulasi Agent Based Modelling (ABM) Menggunakan NetLogo," in *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi 2012 (SENTIKA 2012)*, Kupang, 2012.
- [12] Thunderhead Engineering, "Introduction," in *Pyrosim User Manual*, Thunderhead Engineering, 2019, p. 1.
- [13] International Maritime Organization. (2016). Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships. *MSC. 1/Circ. 1533*.
- [14] C. Hopkin, M. Spearpoint and D. Hopkin, "A Review of Design Values Adopted for Heat Release Rate Per Unit Area," *Fire Technology*, vol. 55, pp. 1599-1618, 2019.
- [15] A. Witkowski, A. A. Stec and T. R. Hull, "Thermal Decomposition of Polymeric Materials," in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Fifth Edition*, Greenbelt, Springer Science, 2002, p. 224.
- [16] M. J. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Engineering*, Greenbelt: Springer Science, 2016.