

**Analisis Dampak Kebakaran terhadap Manusia akibat Kebocoran *Storage Tank*  
Terminal LNG Menggunakan *Fire Dynamics Simulator***

**Analysis of the Fire Impact on Humans Due to Leakage of Storage Tank at LNG  
Terminal Using Fire Dynamics Simulator**

**Muhamad Humam Safi'i<sup>1\*</sup>, Isna Zahrotul Husna<sup>2</sup>, Nita Wahyuni Dwi Puspitasari<sup>3</sup>,  
Farhand Ally Fahmi<sup>4</sup>, Ridemtor Yogi Dwianggada<sup>5</sup> dan Dhimas Widhi Handani<sup>6</sup>**

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo Surabaya  
60111, Indonesia

<sup>1,2,3,4,6</sup>Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh  
Nopember, Surabaya 60111, Indonesia

<sup>5</sup>Teknik Mesin Industri, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember,  
Surabaya 60111, Indonesia

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>Realibility, Availability, Maintainability and Safety Laboratory, Institusi Teknologi  
Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Indonesia

\*Corresponding author, e-mail: humamsaf0@gmail.com

**ABSTRACT**

The increasing demand for Liquefied Natural Gas (LNG) is directly proportional to the risk of LNG facilities commensurate with the construction of LNG facilities starting on a small or large scale. However, the risks that must be faced because of increasing LNG Facility construction are also getting more significant. One of them is the risk of fire due to leakage of the LNG storage tank at the LNG terminal. This study aims to predict the impact of fires on humans due to leaks of LNG Storage tanks using a Fire Dynamic Simulator and predict the probabilities of injury or death due to these accidents using fire impact assessment and probity models. The simulation uses variations in the size of the LNG storage tank, with one of the sizes being primary data obtained from field surveys. The results of the HAZOP analysis found that the cause of the leaking was due to 3 aspects i.e., overpressure, temperature, and corrosion. In addition, the simulation of the results shows 21 deaths due to thermal radiation occurring in a 20000 m<sup>3</sup> storage tank, with a 250 m radius from an LNG storage tank and a radiation dose of 9.787.223 W<sup>4/3</sup>sm<sup>-8/3</sup>. Finally, it is recommended that 1200 m<sup>3</sup> LNG storage tanks have a minimum radius of 80 m from the office or residential meanwhile 7500 m<sup>3</sup> and 20000 m<sup>3</sup> LNG storage tanks should be 185 m and 250 m apart from habitation.

**Keywords:** *Fire Dynamic Simulator, Fire Impact Assessment, Liquefied Natural Gas, Storage Tank*

**ABSTRAK**

Tingginya permintaan *Liquefied Natural Gas* (LNG) di Indonesia membuat pembangunan fasilitas LNG dari skala kecil dan besar juga meningkat. Meningkatnya pembangunan tersebut sebanding dengan risiko yang harus dihadapi pada fasilitas LNG yang juga semakin signifikan. Salah satunya adalah resiko kebakaran akibat kebocoran *storage*

*tank* LNG pada terminal LNG. Riset ini bertujuan untuk memprediksi dampak kebakaran terhadap manusia akibat kebocoran *storage tank* LNG dengan menggunakan *Fire Dynamic Simulator* dan memprediksi jumlah probabilitas cedera atau kematian akibat kebakaran karena aksiden tersebut menggunakan *fire impact assesment* dan *probit model*. Simulasi menggunakan variasi ukuran *storage tank* LNG, dengan salah satu ukuran merupakan data primer yang diperoleh dari survei lapangan. Hasil analisis HAZOP didapatkan penyebab kebocoran *storage tank* LNG karena 3 aspek yakni tekanan berlebih, temperatur berlebih dan korosi. Selain itu, hasil simulasi menunjukkan 21 kematian akibat radiasi termal dari kebocoran *storage tank* LNG 20000 m<sup>3</sup> dengan radius bahaya sejauh 250 m dari *storage tank* LNG dengan *radiation dose* sebesar 9.787.223 W<sup>4/3</sup>sm<sup>-8/3</sup>. Oleh karena itu, *storage tank* LNG 1200 m<sup>3</sup> direkomendasikan memiliki radius minimal 80 m dari kantor atau pemukiman sementara *storage tank* LNG berukuran 7500 m<sup>3</sup> dan 20000 m<sup>3</sup> sejauh 185 m dan 250 m dari pemukiman.

**Kata-kata kunci:** *Fire Dynamic Simulator, Fire Impact Assessment, Liquefied Natural Gas, Storage Tank*

## PENDAHULUAN

Permintaan gas alam akan meningkat dengan pertumbuhan rata-rata 5,6% per tahun dan diperkirakan pada tahun 2030 konsumsi gas alam akan mencapai seperempat dari total konsumsi energi dunia (Sugiyono A., 2016). Gas alam yang dicairkan atau *Liquefied Natural Gas* (LNG) merupakan jenis gas alam yang sedang dikembangkan dan sedang banyak digunakan. Menurut Fadel (2022) LNG adalah gas alam cair yang diproduksi melalui proses pendinginan hingga mencapai suhu -160°C pada tekanan 1 atmosfer dan volumenya menjadi 1/600 dari kondisi semula sebagai gas. LNG bersifat tidak berbau, tidak berwarna, *non-corrosive* dan *non-toxic*, efisien, bersih dan relatif murah (Gao, dkk., 2018). Pembangunan terminal LNG mengalami peningkatan pesat sebanding dengan peningkatan permintaan dan konsumsi LNG. Namun, terminal LNG memiliki resiko kecelakaan tinggi salah satunya seperti kebocoran *storage tank* LNG yang berpotensi terjadi kebakaran. Hal itu bisa merugikan perusahaan, lingkungan hingga manusia.

Bahaya dari kebocoran *storage tank* LNG dapat berupa ledakan dan kebakaran seperti *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (BLEVE), *pool fire*, *flash fire* dan *jet fire* (Yue, C., dkk., 2020). Pada tahun 2012 terjadi kebocoran *storage tank* LNG di Amuay, Venezuela yang menyebabkan kerusakan berat pada lokasi terdekat dan mengakibatkan 47 orang meninggal (Samia, dkk., 2018). Di Terminal LNG Badak, Indonesia pada tahun 2015 terjadi kebocoran kecil pada *storage tank* LNG dan pada Juni 2022, terjadi juga kebocoran *storage tank* yang berakibat produksi gas alam cair dari *storage tank* LNG di LNG Tangguh Train 1 Papua Barat hilang separuhnya (Setiawan, 2022). Penelitian sebelumnya terkait kebocoran *storage tank* LNG pernah dilakukan oleh Baalisampang, T., dkk (2019) berupa riset dampak

kebocoran *storage tank* LNG menggunakan *Fire Dynamic Simulator* (FDS) dengan hasil berupa prediksi jarak *effect fatality*. Li, X., dkk (2021) dalam penelitiannya juga menggunakan FDS untuk mengetahui dampak kebakaran pada *offshore platform* kemudian menghitung peluang luka bakar tingkat 1, 2 dan kematian menggunakan *probit model*.

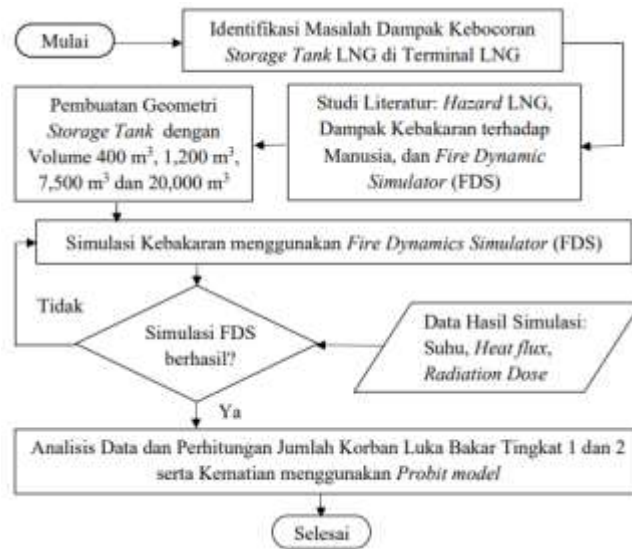
Berdasarkan riset yang pernah dilakukan tersebut, belum ada riset yang menganalisis jumlah kemungkinan resiko manusia yang terdampak saat terjadi kebakaran di terminal LNG karena kebocoran *storage tank* LNG tiap meter persegi. Oleh karena itu, pada riset ini akan dilakukan penilaian resiko potensi kebakaran dengan melakukan *Hazard and Operability* (HAZOP), dilanjutkan dengan menganalisis konsekuensi resiko jumlah kemungkinan manusia yang terkena dampak kebakaran dari kebocoran *storage tank* di terminal LNG menggunakan FDS, menghitung jumlah kemungkinan cedera atau kematian dan membagi jarak aman personil akibat kebocoran *storage tank* di terminal LNG menggunakan *fire impact assessment* dan *probit model* serta memberikan rekomendasi jarak pembangunan *storage tank* di terminal LNG dengan daerah pemukiman atau perkotaan yang aman.

## METODE PENELITIAN

Riset ini dilaksanakan secara luring di laboratorium *Reliability, Availability, Maintainability, and Safety* (RAMS) Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS selama 4 bulan yaitu dari 1 Juni-30 September 2022. Riset ini menggunakan *software* FDS yaitu *FLame ACceleration Simulator V.9* (FLACS V.9) untuk memprediksi dampak kebakaran akibat kebocoran *storage tank* di terminal LNG. FLACS adalah perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk pemodelan dispersi gas yang mudah terbakar atau beracun, ledakan gas serta *jet fire* (Kartikasari, 2022). Persamaan pada FLACS menggunakan persamaan *Navier–Stokes*, persamaan ini menerapkan hukum kekekalan tiga unsur fisika yaitu massa, momentum dan energi yang selanjutnya disederhanakan dengan persamaan *euler*. Selanjutnya melakukan perhitungan menggunakan *fire impact assessment* dan *probit model* untuk mengetahui jumlah manusia yang mengalami luka bakar atau kematian akibat kebocoran *storage tank* di terminal LNG. Tahapan-tahapan riset ini seperti pada gambar 1 berikut.

Pada riset ini, dilakukan identifikasi masalah terhadap kebocoran *storage tank* di terminal LNG. Masalah yang ditemukan diantaranya belum dilakukannya riset lebih lanjut terkait dampak kebocoran *storage tank* di terminal LNG yang menyebabkan kebakaran dan berdampak terhadap manusia seperti memprediksi jumlah orang yang meninggal per meter persegi. Dilakukan pula simulasi pada variasi permodelan hasil studi kasus di terminal LNG

Benoa. Terminal LNG Benoa dipilih sebagai objek pengambilan data primer karena memiliki resiko tinggi yakni berjarak 68 m dari *storage tank* BBM dan 180 m dari dermaga nelayan.



Gambar 1. Diagram Alir Riset

.Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan dasar teori maupun riset-riset sejenis yang pernah dilakukan sebelumnya serta parameter yang digunakan dalam *Fire Dynamic Simulator* (FDS) untuk memprediksi dampak kebakaran terhadap manusia akibat kebocoran *storage tank* LNG pada terminal LNG. Parameter yang akan digunakan dalam simulasi didapat dari Baalisampang, T., Abbassi, R., Garaniya, V., Khan, F., & Dadashzadeh (2019), serta data primer hasil studi lapangan di terminal LNG Benoa seperti pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Parameter yang digunakan pada Simulasi

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Tekanan <i>storage tank</i>	1,01 Bar	Laju aliran massa	10 kg/s
Kecepatan angin (Benoa)	6 m/s <sup>2</sup>	Kecepatan angin	3 m/s <sup>2</sup>
Kepadatan cairan	450 kg/m <sup>3</sup>	Suhu Lingkungan	20°C
Suhu lingkungan (Benoa)	25 °C	Luas lubang kebocoran	0,05 m <sup>2</sup> & 0,1 m <sup>2</sup>

Kebocoran diskenariokan apabila tekanan *storage tank* dan pipa yang menuju *storage tank* melebihi batas sehingga LNG *release* dan tersulut percikan api dari proses *maintenance* ataupun gesekan yang lainnya sehingga terjadi *ignition*. Parameter kebocoran pada simulasi ini seperti pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Parameter Kebocoran pada Simulasi

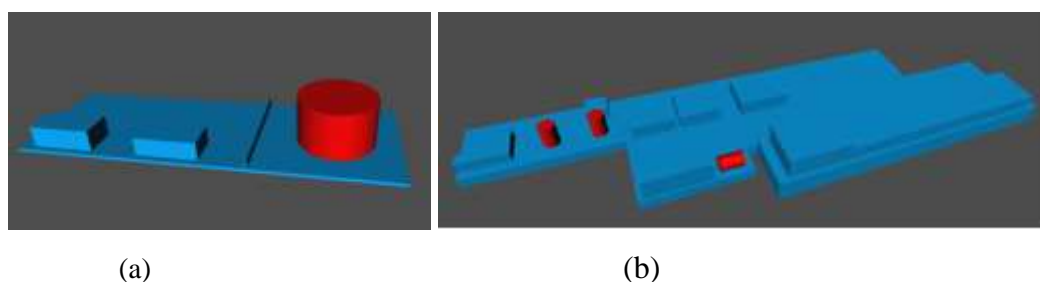
Parameter	Nilai
Tipe Kebocoran	<i>Jet Fire</i>
Arah kebocoran	+X (Horizontal)
Waktu mulai	2 s
Durasi	20 s
<i>Outlet</i>	
a. <i>Relative turbulence intensity</i>	0,02 ( <i>low</i> )
b. <i>Turbulence length scale</i>	0,025 m
c. <i>Temperature</i>	-160°C

Komposisi LNG yang digunakan dalam simulasi yaitu berdasarkan data primer dari Terminal LNG Benoa pada Juli 2022 yaitu 95,9833% metana, 2,9052% etana, 0,7737% propana, 0,1539% butana, 0,0298% pentana dan 0,0001% H<sub>2</sub>O. Titik kebocoran dianggap memiliki luas lubang kebocoran 0,05 m<sup>2</sup> dan 0,1 m<sup>2</sup> selama 20s membentuk kolam. Model kolam dinamis (PM3) dipilih yang berarti kolam menyebar dengan suhu kolam yang tidak seragam, karena pengaruh perpindahan panas dan massa pada masing-masing laju penguapan konstan sebesar 0,14 kg/(m<sup>2</sup>s) (Baalisampang, T., Abbassi, R., Garaniya, V., Khan, F. and Dadashzadeh, M., 2019). Variasi pada simulasi ini seperti pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Variasi Skenario Kebocoran *Storage Tank* LNG

No	Volume (m <sup>3</sup> )	Populas i/m <sup>2</sup>	Luas Kebocoran	No	Volume (m <sup>3</sup> )	Populasi/ m <sup>2</sup>	Luas Kebocoran
1	1200	0,05	0,05 m <sup>2</sup>	8	1200	0,075	0,05 m <sup>2</sup>
2	7500	0,05	0,05 m <sup>2</sup>	9	1200	0,085	0,05 m <sup>2</sup>
3	20000	0,05	0,05 m <sup>2</sup>	10	7500	0,075	0,05 m <sup>2</sup>
4	1200	0,05	0,1 m <sup>2</sup>	11	7500	0,085	0,05 m <sup>2</sup>
5	7500	0,05	0,1 m <sup>2</sup>	12	20000	0,075	0,05 m <sup>2</sup>
6	20000	0,05	0,1 m <sup>2</sup>	13	20000	0,085	0,05 m <sup>2</sup>
7	400	0,05	0,1 m <sup>2</sup>	14	400	0,075	0,05 m <sup>2</sup>

Geometri dibuat menggunakan fitur *Computer Aided Scenario Design* (CASD) yang terdapat pada *software* FLACS. Geometri *storage tank* LNG dibuat dengan 4 ukuran yang berbeda, di mana 3 ukuran *storage tank* LNG sesuai dengan volume data sekunder yaitu 1200 m<sup>3</sup>, 7500 m<sup>3</sup> dan 20000 m<sup>3</sup>. Dan satu ukuran dari data primer di terminal LNG Benoa yaitu *buffer tank* 400 m<sup>3</sup>. Gambar 2 berikut adalah geometri *storage tank* 1200 m<sup>3</sup> dan *buffer tank* 400 m<sup>3</sup>.



Gambar 2. (a) Geometri *Storage Tank* LNG 1200 m<sup>3</sup> dan (b) *Buffer Tank* 400 m<sup>3</sup>

Pemodelan kebakaran dilakukan dengan menggunakan FDS menggunakan *software* FLACS. Permodelan divariasikan sebanyak 14 variasi di mana 7 simulasi untuk melihat dampak perbedaan volume *storage tank* LNG dan ukuran lubang kebocoran serta 7 simulasi lainnya untuk melihat dampak akibat perbedaan jumlah populasi orang di terminal LNG. Pemodelan dimulai dengan *meshing* dan dilanjutkan dengan memasukkan parameter yang dibutuhkan seperti komposisi LNG, suhu dan data-data lainnya seperti pada tabel 1 dan 2 parameter di atas.

Pengambilan data dilakukan berdasarkan hasil dari simulasi menggunakan FDS. Data yang diambil yakni berupa suhu, *heat flux*, dan *thermal radiation dose*. Data tersebut digunakan untuk menganalisis jumlah korban baik yang mengalami cedera/luka hingga meninggal akibat kebocoran *storage tank* LNG menggunakan *probit model* dan *fire impact assesment*. Persamaan *probit model* dan *fire impact assesment* dapat dilihat pada persamaan rumus berikut, persamaan ini dapat digunakan untuk menghitung probabilitas cedera atau kematian karena *thermal radiation dose/D* ( $W^{-4/3} s. m^{-8/3}$ ),

$$P = F_k \frac{1}{2} / 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}}\right) \quad [1]$$

di mana fungsi probit,  $P_r$  (-), diberikan oleh rumus empiris (Li, X., Khan, F., Yang, M., Chen, C., & Chen, G., 2021).

$$P_r = C_1 + C_2 \ln D \quad [2]$$

Dengan nilai  $D$  sama dengan,

$$D = tr \frac{+(x_0 - r)}{U} x(q)^{\frac{4}{3}} \quad [3]$$

Efek keseluruhan dapat dihitung dengan meninjau kepadatan penduduk sekitarnya  $N_0$  (orang/m<sup>2</sup>) dan probabilitas ( $P$ ), jumlah total kematian dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$N = N_0 \times P \quad [4]$$

Dengan menggunakan persamaan rumus *probit model* dan *fire impact assesment* di atas, selanjutnya dilakukan analisis data dan pembahasan untuk menghitung probabilitas luka bakar tingkat 1 dan 2 serta kematian yang diakibatkan oleh aksiden dan untuk mengetahui jarak aman dari area *storage tank* LNG.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

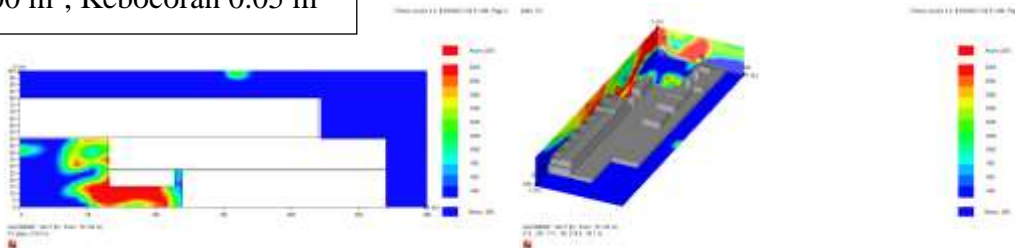
Identifikasi masalah pada riset ini dimulai dengan analisis *Hazard and Operability* (HAZOP) menggunakan standar BS IEC 61882:2001. Analisis HAZOP pada riset ini telah menganalisis sumber bahaya dari aliran LNG dari *buffer tank* hingga pipa *unloading*. Dari analisis yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa terdapat 3 penyebab *storage tank* LNG mengalami kebocoran. Adapun 3 penyebab utama terjadinya kebocoran *storage tank* LNG maupun pipa *unloading* seperti pada tabel 3. berikut.

Tabel 4. Penyebab Utama Kebocoran *Storage Tank* LNG

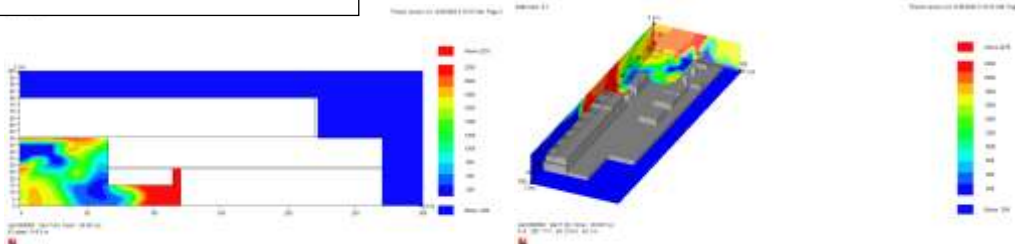
No	Kejadian	Dampak
1	Katup gagal terbuka	Aliran akan terhambat sehingga tekanan naik dan dapat menyebabkan retakan hingga kebocoran.
2	Temperatur yang berlebihan	Naiknya tekanan dikarenakan terjadinya <i>boil of gas</i> menyebabkan tekanan berlebihan yang dapat menyebabkan kebocoran
3	Pipa mengalami korosi	Pipa mengalami korosi sehingga dapat menyebabkan kebocoran

Hasil simulasi dari *software* FLACS V.9 yaitu berupa gambar persebaran area suhu yang aman hingga berbahaya akibat aksiden dan grafik suhu serta grafik *fuel* dan tekanan tiap waktu. Gambar persebaran area suhu yang aman hingga berbahaya akibat aksiden didapatkan bahwa zona yang aman terletak pada area yang berwarna biru dan zona yang paling berbahaya pada area yang berwarna merah seperti pada gambar 3 berikut di mana semakin besar volume *storage tank* LNG maka area yang berbahaya akan semakin luas.

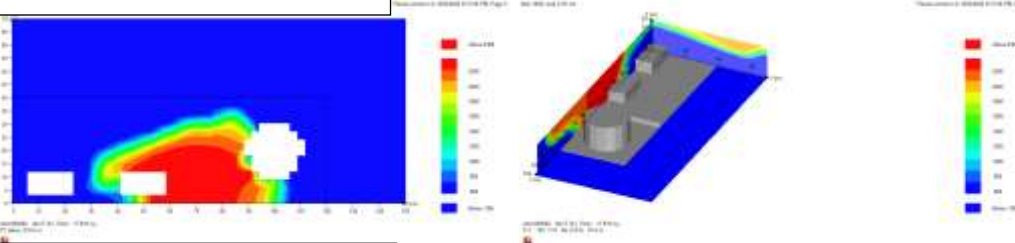
400 m<sup>3</sup>, Kebocoran 0.05 m<sup>2</sup>



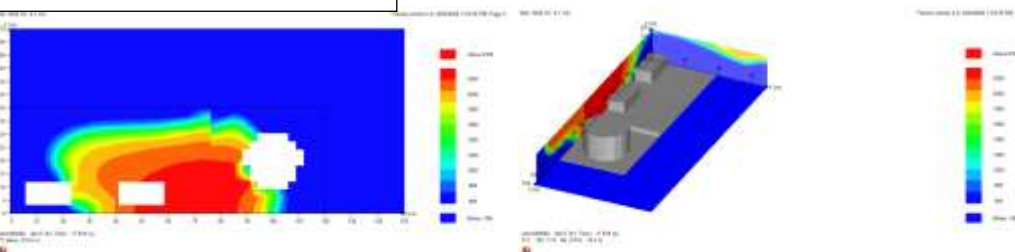
400 m<sup>3</sup>, kebocoran 0,1 m<sup>2</sup>

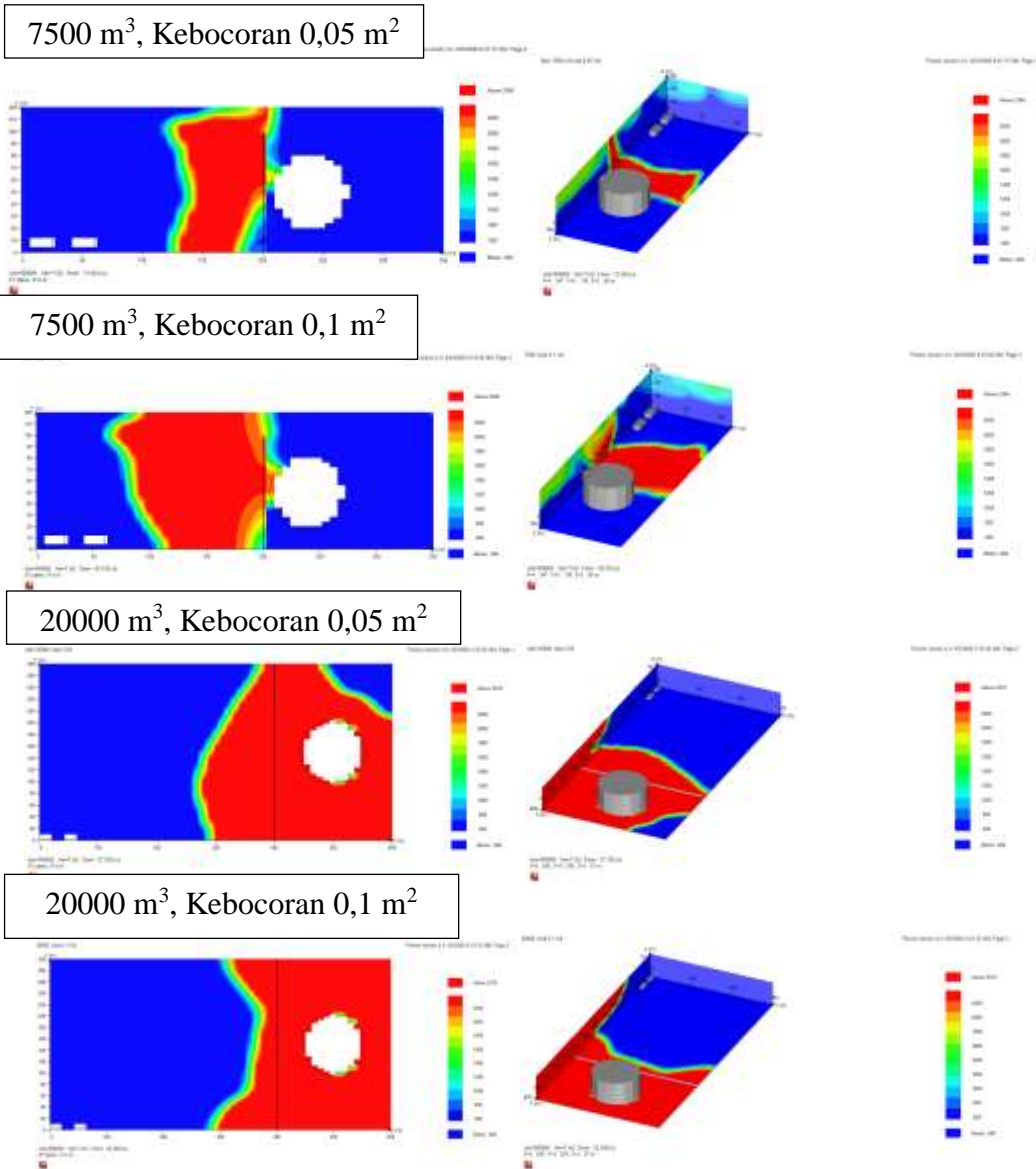


1200 m<sup>3</sup>, Kebocoran 0,05 m<sup>2</sup>



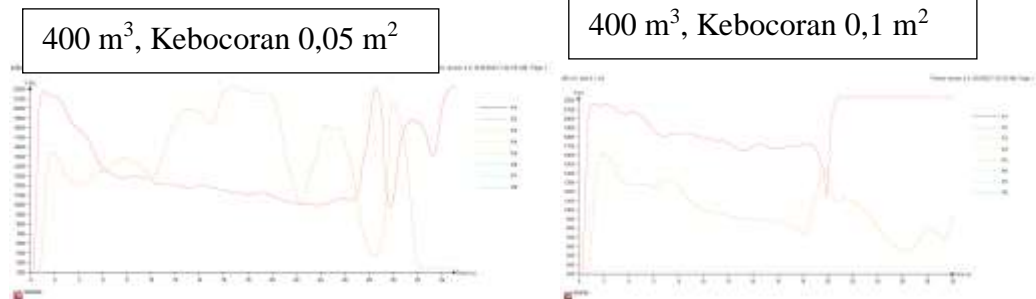
1200 m<sup>3</sup>, Kebocoran 0,1 m<sup>2</sup>



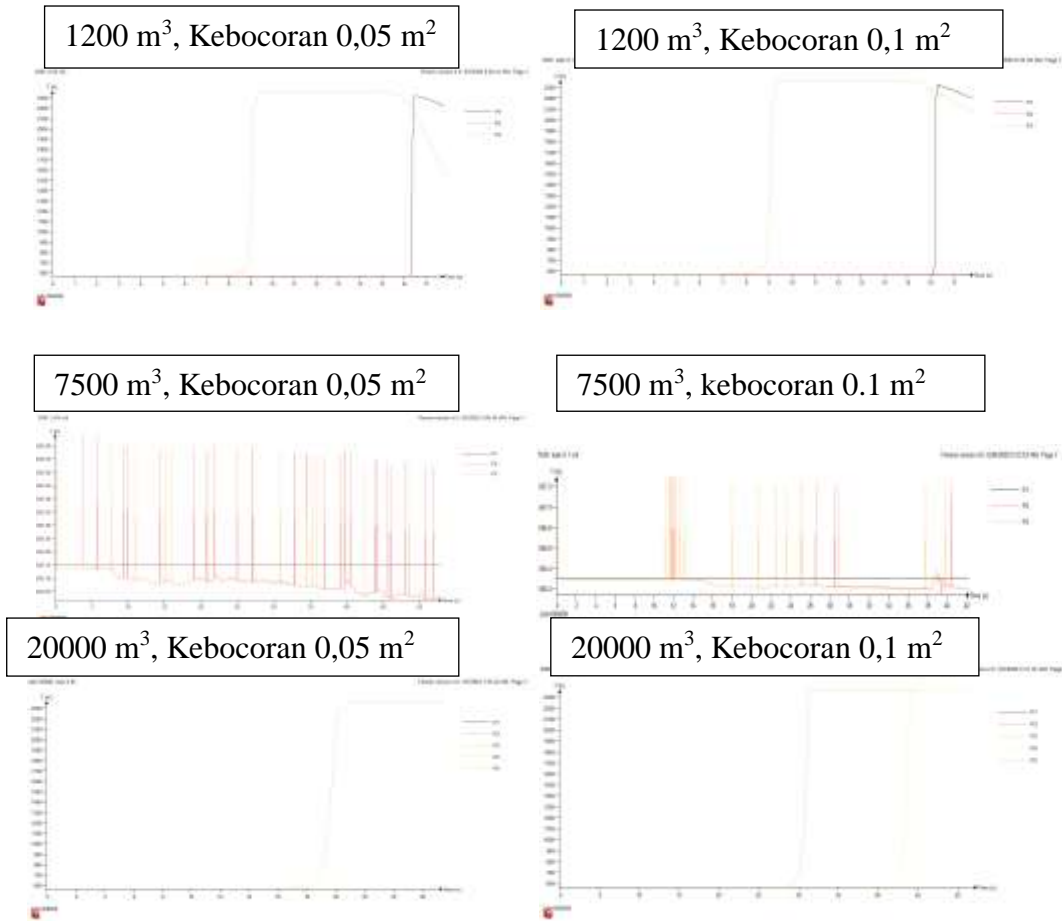


Gambar 3. Persebaran Suhu akibat Aksiden dengan Tampilan 2D dan 3D

Hasil simulasi selanjutnya yaitu berupa grafik suhu, volume *storage tank* LNG yang paling besar jika mengalami kebocoran hingga terjadi kebakaran akan memiliki area yang berbahaya dengan suhu yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan ukuran *storage tank* LNG yang lebih kecil, gambar 4 berikut adalah grafik suhu hasil dari simulasi.

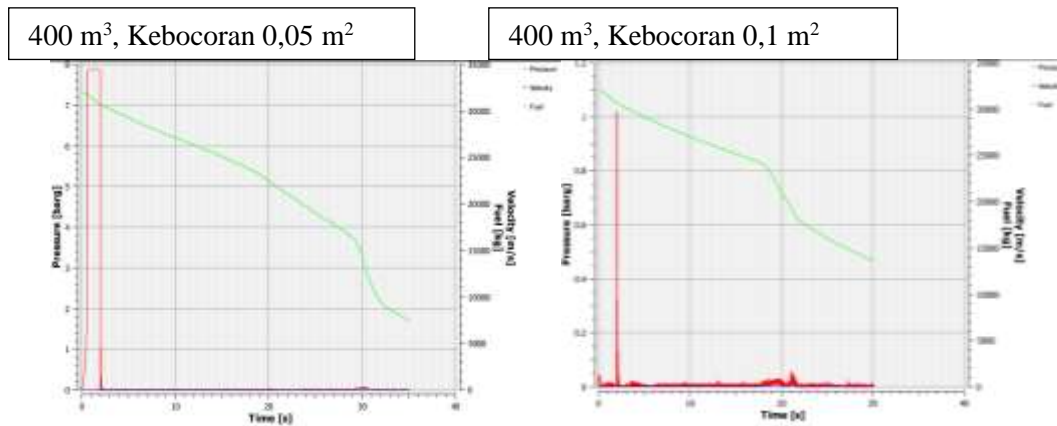




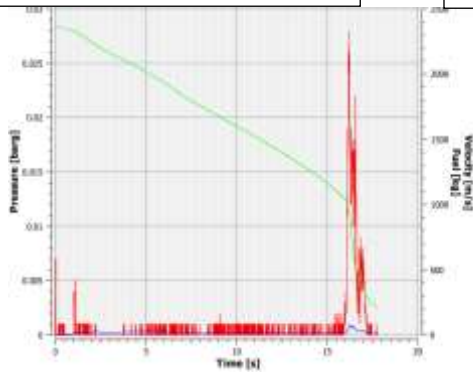


Gambar 4. Grafik Suhu akibat Aksiden

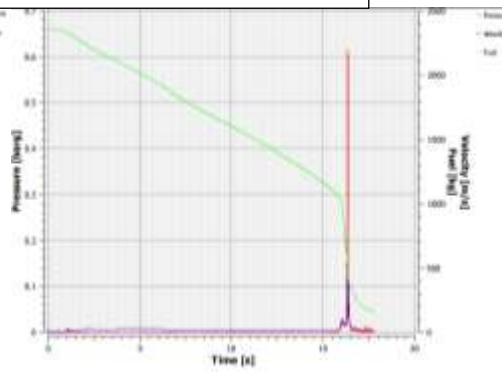
Hasil simulasi selanjutnya yaitu berupa grafik dari fuel dan tekanan tiap waktu, dengan ukuran volume *storage tank* LNG yang semakin besar maka waktu yang dibutuhkan *fuel* hingga habis di *storage tank* LNG juga akan semakin lama. Gambar 5 berikut merupakan grafik dari *fuel* dan tekanan tiap waktu.



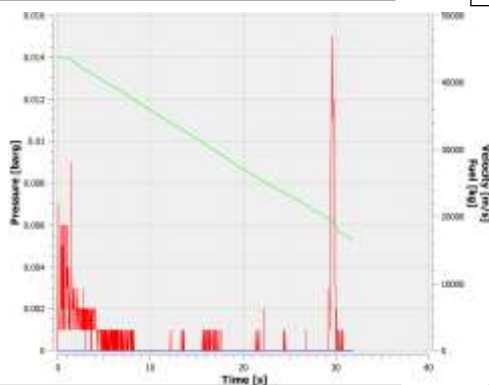
1200 m<sup>3</sup>, Kebocoran 0,05 m<sup>2</sup>



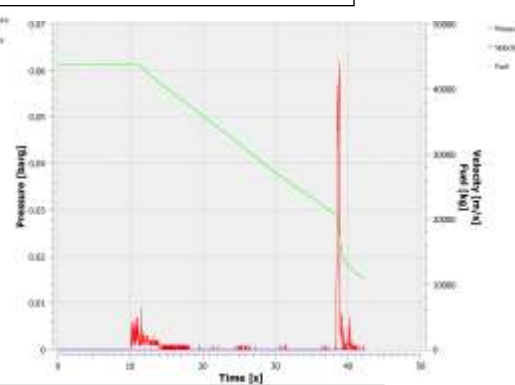
1200 m<sup>3</sup>, Kebocoran 0,1 m<sup>2</sup>



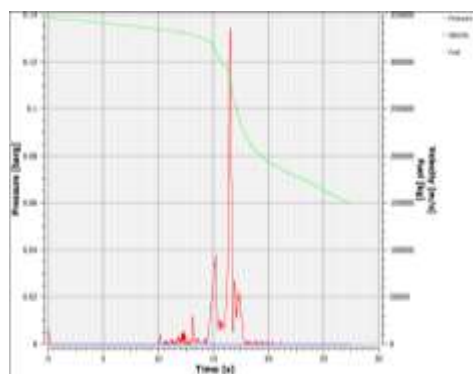
7500 m<sup>3</sup>, Kebocoran 0,05 m<sup>2</sup>



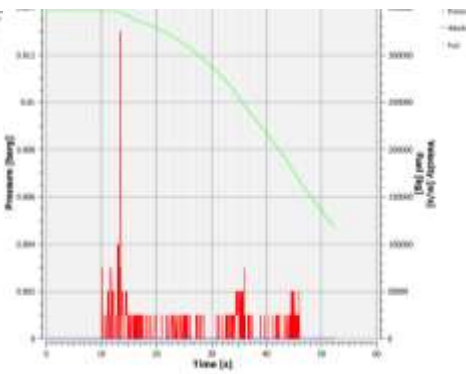
7500 m<sup>3</sup>, Kebocoran 0,1 m<sup>2</sup>



2000 m<sup>3</sup>, Kebocoran 0,05 m<sup>2</sup>

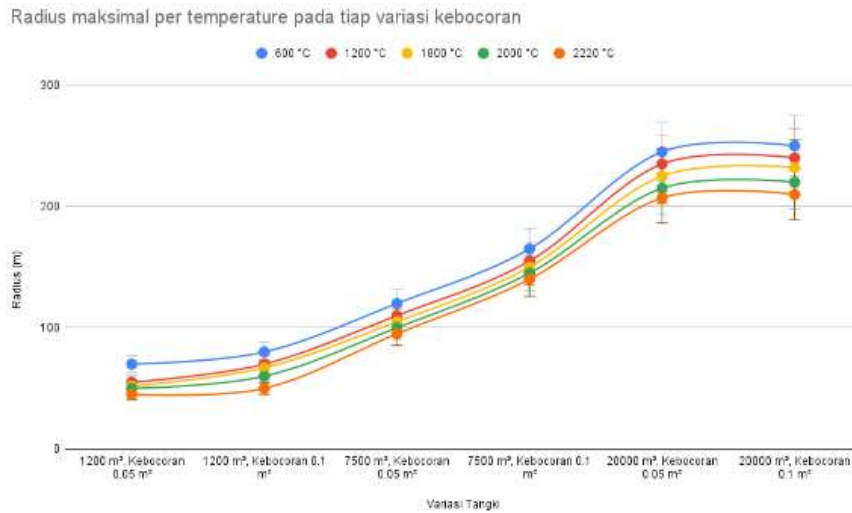


20000 m<sup>3</sup>, Kebocoran 0,1 m<sup>2</sup>



Gambar 5. Grafik Hasil Simulasi dari *Fuel* dan Tekanan tiap Waktu

Berdasarkan hasil simulasi di atas, dampak kebakaran dapat mencapai zona yang sangat berbahaya dengan area yang memiliki suhu di atas 2200°C. Pada kondisi ini, manusia akan mengalami radiasi panas yang tinggi dan dapat menyebabkan kematian. Radius maksimal per setiap suhu pada variasi yang dilakukan dalam riset ini dapat dilihat pada gambar 6 berikut.



Gambar 6. Radius Maksimal tiap Temperatur pada setiap Variasi Kebocoran

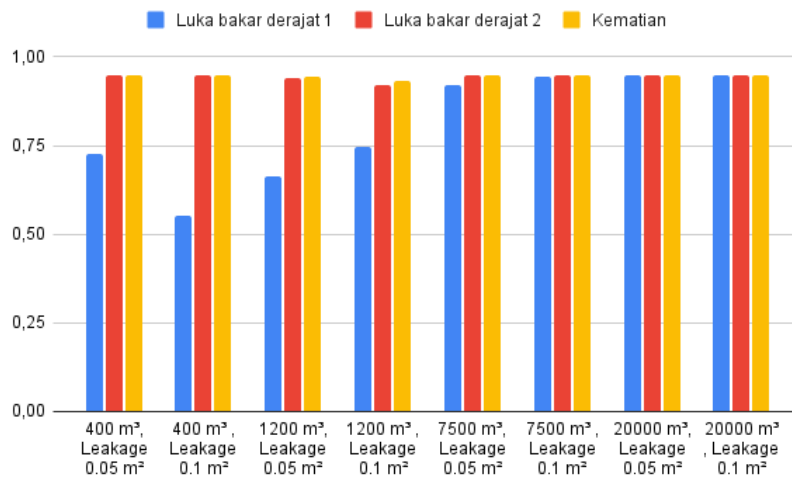
Berdasarkan grafik di atas, zona aman dari setiap variasi berbeda-beda sesuai dari ukuran *storage tank* seperti pada *buffer tank* 400 m<sup>3</sup> berada pada jarak di atas 45 m dan 80 m pada *storage tank* 1200 m<sup>3</sup>, pada *storage tank* 7500 m<sup>3</sup> dengan jarak di atas 165 m dan *storage tank* 20000 m<sup>3</sup> berada pada jarak di atas 250 m. Pada jarak kurang dari zona tersebut, paparan suhu yang tinggi dapat menyebabkan adanya *thermal radiation dose*. *Thermal radiation dose* yang terkena pada manusia dapat dihitung menggunakan persamaan  $D = t_{eff} (q')^{\frac{4}{3}}$ . Berikut merupakan nilai dari *thermal radiation dose* dan radius berbahaya pada setiap variasi skenario kebocoran.

Tabel 5. Nilai *Thermal Radiation Dose* dan Radius Berbahaya

<i>Storage Tank</i>	<i>Thermal Conductivity</i>	<i>Heat Flux</i> (Kw/m <sup>2</sup> )	<i>Radiation Dose</i> (W <sup>4/3</sup> sm <sup>-8/3</sup> )	Radius Berbahaya (m)
400 m <sup>3</sup> , Kebocoran 0,05 m <sup>2</sup>	0,025	5.658	1.562.608	43
400 m <sup>3</sup> , Kebocoran 0,1 m <sup>2</sup>	0,025	5.658	1.739.032	45
1200 m <sup>3</sup> , Kebocoran 0,05 m <sup>2</sup>	0,025	6.787	3.340.950	70
1200 m <sup>3</sup> , Kebocoran 0,1 m <sup>2</sup>	0,025	6.787	3.662.195	80
7500 m <sup>3</sup> , Kebocoran 0,05 m <sup>2</sup>	0,025	7.106	5.259.547	120
7500 m <sup>3</sup> , Kebocoran 0,1 m <sup>2</sup>	0,025	7.106	6.796.427	165
20000 m <sup>3</sup> , Kebocoran 0,05 m <sup>2</sup>	0,025	7.154	7.926.272	245
20000 m <sup>3</sup> , Kebocoran 0,1 m <sup>2</sup>	0,025	7.154	9.787.223	250

Berdasarkan tabel di atas, nilai dari *thermal radiation dose* yang paling rendah bernilai 3.340.950 W<sup>4/3</sup>sm<sup>-8/3</sup> yakni pada variasi *storage tank* 1200 m<sup>3</sup> dengan luas lubang kebocoran 0,05 m<sup>2</sup> dan bernilai paling tinggi pada variasi *storage tank* 1200 m<sup>3</sup> dengan luas lubang kebocoran 0,1 m<sup>2</sup> yakni sebesar 9.787.223 W<sup>4/3</sup>sm<sup>-8/3</sup>. Dengan besaran *thermal radiation dose* yang telah ada. Peluang dampak aksiden terhadap manusia dapat diprediksi dengan

persamaan *probit model* seperti pada persamaan 1. di atas. berikut merupakan peluang dampak aksiden terhadap manusia.



Gambar 7. Peluang Dampak Kebakaran terhadap Manusia pada Setiap Variasi

Berdasarkan peluang dampak kebakaran tersebut, prediksi jumlah korban luka 1 dan 2 serta kematian dapat dihitung dengan menggunakan asumsi jumlah populasi per meter perseginya. Pada riset ini, jumlah populasi per meter persegi di skenarioikan dalam 4 skema yakni sejumlah 0,05, 0,075 dan 0,085 serta 0,1 orang/meter persegi dan dapat dihitung dengan perkalian dari radius berbahaya dan jumlah populasi per meter persegi.. Berikut merupakan jumlah korban pada setiap variasi populasi.

Tabel 6. Jumlah Korban pada Variasi Kebocoran 0,05 m<sup>2</sup>

Variasi Storage Tank	Populasi/m <sup>2</sup>	Jumlah Manusia di Zona Berbahaya	Jumlah Luka Bakar Derajat 1 & 2	Jumlah Kematian	Presentase Kematian
400 m <sup>3</sup>	0,05	3 Orang	1 Orang	2 Orang	66,67%
400 m <sup>3</sup>	0,075	3 Orang	1 Orang	2 Orang	66,67%
400 m <sup>3</sup>	0,085	3 Orang	1 Orang	2 Orang	66,67%
400 m <sup>3</sup>	0,1	3 Orang	1 Orang	2 Orang	66,67%
1200 m <sup>3</sup>	0,05	3 Orang	1 Orang	2 Orang	66,67%
1200 m <sup>3</sup>	0,075	4 Orang	1 Orang	3 Orang	75,00%
1200 m <sup>3</sup>	0,085	4 Orang	1 Orang	3 Orang	75,00%
1200 m <sup>3</sup>	0,1	5 Orang	2 Orang	3 Orang	60,00%
7500 m <sup>3</sup>	0,05	5 Orang	0 Orang	5 Orang	100,00%
7500 m <sup>3</sup>	0,075	8 Orang	1 Orang	7 Orang	87,50%
7500 m <sup>3</sup>	0,085	9 Orang	1 Orang	8 Orang	88,89%
7500 m <sup>3</sup>	0,1	10 Orang	1 Orang	9 Orang	90,00%
20000 m <sup>3</sup>	0,05	11 Orang	1 Orang	10 Orang	90,91%
20000 m <sup>3</sup>	0,075	16 Orang	3 Orang	13 Orang	81,25%
20000 m <sup>3</sup>	0,085	18 Orang	3 Orang	15 Orang	83,33%
20000 m <sup>3</sup>	0,1	21 Orang	3 Orang	18 Orang	85,71%

Tabel 7. Jumlah Korban Pada Variasi Kebocoran 0,1 m<sup>2</sup>

Variasi <i>Storage tank</i>	Populasi/m <sup>2</sup>	Jumlah Manusia di Zona Berbahaya	Jumlah Luka Bakar Derajat 1 & 2	Jumlah Kematian	Presentase Kematian
400 m <sup>3</sup>	0,05	3 Orang	1 Orang	2 Orang	66,67%
400 m <sup>3</sup>	0,075	4 Orang	2 Orang	2 Orang	50,00%
400 m <sup>3</sup>	0,085	5 Orang	3 Orang	2 Orang	40,00%
400 m <sup>3</sup>	0,1	5 Orang	3 Orang	2 Orang	40,00%
1200 m <sup>3</sup>	0,05	3 Orang	0 Orang	3 Orang	100,00%
1200 m <sup>3</sup>	0,075	4 Orang	1 Orang	3 Orang	75,00%
1200 m <sup>3</sup>	0,085	5 Orang	2 Orang	3 Orang	60,00%
1200 m <sup>3</sup>	0,1	5 Orang	2 Orang	3 Orang	60,00%
7500 m <sup>3</sup>	0,05	7 Orang	0 Orang	7 Orang	100,00%
7500 m <sup>3</sup>	0,075	11 Orang	0 Orang	11 Orang	100,00%
7500 m <sup>3</sup>	0,085	12 Orang	0 Orang	12 Orang	100,00%
7500 m <sup>3</sup>	0,1	14 Orang	0 Orang	14 Orang	100,00%
20000 m <sup>3</sup>	0,05	11 Orang	0 Orang	11 Orang	100,00%
20000 m <sup>3</sup>	0,075	16 Orang	0 Orang	16 Orang	100,00%
20000 m <sup>3</sup>	0,085	18 Orang	0 Orang	18 Orang	100,00%
20000 m <sup>3</sup>	0,1	21 Orang	2 Orang	19 Orang	90,48%

Berdasarkan tabel tersebut, luas lubang kebocoran sangat berpengaruh besar terhadap jumlah kematian populasi yang ada pada area terdampak. Semakin besar luas lubang kebocoran maka akan tinggi juga jumlah kematian pada aksiden tersebut. Pada variasi *storage tank* 20000 m<sup>3</sup> terdapat sebanyak 18 orang meninggal pada luas lubang kebocoran 0,05 m<sup>2</sup> sedangkan pada luas lubang kebocoran 0,1 m<sup>2</sup> mencapai 19. Selain itu, semakin besar ukuran *storage tank* maka akan semakin tinggi pula dampak korban manusia akibat aksiden.

### KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi yang sudah dilaksanakan didapatkan hasil bahwa semakin besar volume dan luas kebocoran *storage tank* LNG maka semakin besar pula radius zona berbahaya. Selain itu, waktu yang dibutuhkan sebelum tekanan meningkat yakni antara 15 hingga 30 detik. Pada perhitungan *probit model* menggunakan nilai *heatflux* dari simulasi didapatkan prediksi kematian akibat radiasi termal paling tinggi terjadi pada *storage tank* 20000 m<sup>3</sup> dengan jumlah kematian sebanyak 19 orang dari 21 orang pada radius 250 m dari *storage tank* LNG dengan *radiation dose* sebanyak 9.787.223 W<sup>4/3</sup>sm<sup>-8/3</sup>. Sehingga, pembangunan *storage tank* LNG direkomendasikan memiliki jarak radius minimal 45 m dari kantor atau pemukiman untuk ukuran *buffer tank* 400 m<sup>3</sup>, 80 m untuk ukuran *storage tank*

LNG 1200 m<sup>3</sup> dan 165 m untuk *storage tank* LNG 7500 m<sup>3</sup> serta 250 m untuk *storage tank* LNG 20000 m<sup>3</sup>.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Riset dan Teknologi yang telah mendanai kegiatan riset ini dan juga kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah mendukung dan membantu dalam terlaksananya riset ini dan juga kepada laboratorium *Reliability, Availability, Maintainability, and Safety* (RAMS) Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS yang telah mendukung kegiatan riset ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- Baalisampang, T., Abbassi, R., Garaniya, V., Khan, F. and Dadashzadeh, M. 2019. Modelling an integrated impact of fire, explosion and combustion products during transitional events caused by an aksidental release of LNG. *Process Safety and Environmental Protection*, 128, pp:259-272.
- Baalisampang, T., Khan, F., Abbassi, R., & Garaniya, V. 2019. Methodology to analyse LNG spill on steel structure in congested marine offshore facility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62, pp:103936.
- Betteridge, S., 2018. Modelling large LNG pool fires on water. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56, pp.46-56.
- Dadashzadeh, M., Abbassi, R., Khan, F. and Hawboldt, K., 2013. Explosion modeling and analysis of BP Deepwater Horizon accident. *Safety science*, 57, pp.150-160.
- Fadel, M.H., 2022. *Identifikasi Penyebab Berkurangnya Produksi Submerged Type Fresh Water Generator Di SS Tangguh Batur* (Doctoral dissertation, Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang).
- Gao, C., Su, B., Sun, M., Zhang, X. and Zhang, Z. 2018. Interprovincial transfer of embodied primary energy in China: A complex network approach. *Applied Energy*, 215, pp:792-807.
- Gao, M., Shi, G. and Li, S., 2018. Online prediction of ship behavior with automatic identification system sensor data using bidirectional long short-term memory recurrent neural network. *Sensors*, 18(12), p.4211.
- Kartikasari, P.D., 2022. *Simulasi Dampak Kebakaran Pada Tangki TBBM Menggunakan Software Flacs* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).

- Li, L., Luo, J., Wu, G., Li, X., Ji, N. and Zhu, L. 2021. Impact Assessment of Flammable Gas Dispersion and Fire Hazards from LNG Tank Leak. *Mathematical Problems in Engineering*, vol, pp:1-15.
- Li, X., Khan, F., Yang, M., Chen, C. and Chen, G. 2021. Risk assessment of offshore fire aksidens caused by subsea gas release. *Applied Ocean Research*, 115, pp:102828.
- Markiewicz-Gospodarek, A., Koziół, M., Tobiasz, M., Baj, J., Radzikowska-Büchner, E. and Przekora, A., 2022. Burn Wound Healing: Clinical Complications, Medical Care, Treatment, and Dressing Types: The Current State of Knowledge for Clinical Practice. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), p.1338.
- Samia, C., Hamzi, R. and Chebila, M. 2018. Contribution of the lessons learned from oil refining aksidens to the industrial risks assessment. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. 29 (4), pp.643-665.
- Setiawan, V.N. 2022. *Alami Kebocoran, Separuh Produksi LNG Train 1 di Papua Lenyap*. URL: <https://www.cnbcindonesia.com/news/20220610133454-4-346032/alami-kebocoran-separuh-produksi-lng-train-1-di-papua-lenyap>. Diakses tanggal 11 Juni 2022.
- Sugiyono, A., 2016. Outlook energi Indonesia 2015-2035: Prospek energi baru terbarukan. *J Energi Dan Lingkungan*, 12, pp.87-96.
- Sun, B., Guo, K. and Pareek, V.K. 2017. Hazardous consequence dynamic simulation of LNG spill on water for ship-to-ship bunkering. *Process Safety and Environmental Protection*, 107, pp:402-413.
- Yue, C., Chen, L., Xiang, H., Xu, L., Yang, S., Li, Z., Xia, C. and Fang, Q., 2020. Assessment of cascading accidents of frostbite, fire, and explosion caused by liquefied natural gas leakage. *Advances in Civil Engineering*, 2020.