

Analisis Risiko Kuantitatif Akibat Terjadinya Kebocoran Tangki Penyimpanan Amonia Pabrik PUSRI IIB

Aldillah Herlambang^{1*}, Radevan Agandhi Novendra¹, Didik Supriyadi¹, Andri Saputra², Ferlyn Fachlevi³

¹ Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kab. Lampung Selatan, Lampung 35365

² Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta, Jl. Ateka, Bangunharjo, Kec. Sewon, Kab. Bantul, Yogyakarta, 55187

³ Production Planning and Control, PT Pupuk Sriwidjaja, Jl. Mayor Zen, Palembang, 30118

* Corresponding email: aldillah.herlambang@tk.itera.ac.id

Riwayat Artikel

Diterima
15/05/2023
Disetujui
27/07/2023
Diterbitkan
31/07/2023

Abstrak

Salah satu perusahaan industri kimia di Indonesia yang memproduksi amonia dan telah berdiri pada pertengahan abad ke-20 adalah PT Pupuk Sriwijaya Palembang. Produk amonia dalam industri biasanya disimpan dalam keadaan dingin yang dijaga pada suhu -33°C dengan kondisi cair. Tangki amonia yang berkapasitas 20.000 ton ini, jika mengalami kebocoran dapat menimbulkan kebakaran, ledakan, maupun penyebaran uap gas amonia beracun sehingga memungkinkan pemukiman sekitar wilayah tangki dapat terpapar dampaknya. Penelitian ini bertujuan menganalisis secara kuantitatif risiko atau konsekuensi yang terjadi jika terjadi kebocoran tangki penyimpanan amonia pada musim kemarau dan hujan dengan menggunakan software *Area Location of Hazardous Atmosphere* (ALOHA) versi 5.4.7 dan perhitungan manual menggunakan Gaussian model. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efek akibat kebocoran tangki penyimpanan amonia antara lain *pool fire*, *boiling liquid expanding vapor explosion* (BLEVE), *toxic vapor cloud*, dan *flammable area of vapor cloud*. Efek *pool fire* memaparkan radiasi termal mencapai radius zona bahaya 57 meter pada musim kemarau dan 58 meter pada musim hujan. Paparan radiasi termal efek *pool fire* tidak sampai ke pemukiman penduduk. Sebaliknya, paparan radiasi termal efek BLEVE bisa mencapai pemukiman penduduk hingga radius zona bahaya 2,7 km pada musim kemarau dan musim hujan. Penyebaran gas atau awan uap toksik yang dihasilkan dari kebocoran tangki amonia mencapai radius 2,2 km untuk skenario musim kemarau dan 2,3 km untuk musim hujan. Besar konsentrasi pada sepanjang zona bahaya tersebut mempunyai rentang dari jarak terjauh yaitu 25 ppm hingga lebih dari 1500 ppm. Jumlah konsentrasi amonia yang tersebar ke lingkungan hanya terbatas sekitar 10% (150 ppm) dari konsentrasi *lower explosion limit* (LEL) senyawa amonia.

Kata Kunci: ALOHA, analisis risiko, pusri, tangki amonia

Abstract

One of the chemical industry companies in Indonesia that produces ammonia and has been established in the mid-20th century is PT Pupuk Sriwijaya Palembang. Ammonia products in the industry are usually stored in a cold state which is maintained at a temperature of -33°C with liquid conditions. This ammonia tank, which has a capacity of 20,000 tons, if it leaks, it can cause a fire, explosion, or spread of toxic ammonia gas vapor, allowing settlements around the tank area to be exposed to its effects. This study aims to quantitatively analyze the risks or consequences that occur if there is an ammonia storage tank leak in the dry and rainy seasons using the area location of hazardous atmospheres (ALOHA) software version 5.4.7 and manual calculations using the Gaussian model. The results showed that the effects of ammonia storage tank leakage include pool fire, boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE), toxic vapor cloud, and flammable area of vapor cloud. The pool fire effect exposes thermal radiation reaching a danger zone radius of 57 meters in the dry season and 58 meters in the rainy season. Thermal radiation exposure to the pool fire effect does not reach residential areas. In contrast, the thermal radiation exposure of the BLEVE effect can reach residential areas up to a danger zone radius of 2.7 km in the dry season and

rainy season. The spread of toxic gas or vapor clouds resulting from ammonia tank leakage reaches a radius of 2.2 km for the dry season scenario and 2.3 km for the rainy season. The concentration along the danger zone has a range from the farthest distance of 25 ppm to more than 1500 ppm. The amount of ammonia concentration dispersed to the environment is only limited to about 10% (150 ppm) of the lower explosion limit (LEL) concentration of ammonia compounds.

Keywords: ALOHA, ammonia tank, pusri, risk analysis

1. Pendahuluan

Dalam dunia industri, khususnya industri kimia, pengolahan bahan kimia di industri pada tahap penyimpanan memiliki risiko-risiko terjadinya kebocoran pada instrumen-instrumen pabrik [1]. Produk disimpan pada tangki berukuran besar dan dilengkapi alat pengendali untuk menjaga kondisi produk tetap sesuai yang diinginkan di dalam tangki. Tangki-tangki penyimpanan bahan kimia dapat memungkinkan mengalami kebocoran yang diakibatkan oleh berbagai macam faktor seperti faktor alam seperti bencana alam dan petir. Kebocoran tangki penyimpanan dapat menyebabkan pelepasan bahan kimia yang bisa saja bersifat racun atau berbahaya dalam jumlah yang sangat besar [2].

Salah satu bahan kimia yang berbahaya adalah amonia (NH_3). Produk amonia biasanya disimpan dalam keadaan dingin yang dijaga pada suhu $-33\text{ }^\circ\text{C}$ dengan kondisi cair (*refrigerated storage tank*). Tangki penyimpanan amonia harus dibuat dari bahan konstruksi yang sesuai standar yang baik agar tahan terhadap tekanan yang tinggi dan kebocoran. Tangki juga harus dipasang alat-alat pengendali penyimpanan untuk menjaga tekanan dan suhu penyimpanan produk amonia. Mengingat bahwa NH_3 atau amonia merupakan bahan kimia yang berbahaya dan sangat toksik, alat pengendali harus selalu dalam kondisi baik. Selain dari alat pengendali, kebocoran tangki bisa saja disebabkan oleh kesalahan instalasi, tekanan dan suhu lingkungan, dan juga karena umur tangki (*fatigue*) yang sudah lama dipakai. Efek kebocoran tangki amonia ini dapat menimbulkan ledakan, kebakaran, dan penyebaran gas amonia beracun [3].

Insiden-insiden tangki penyimpanan amonia yang bocor sudah banyak terjadi di berbagai belahan dunia dan mengakibatkan kerugian materi bahkan hingga mengakibatkan korban jiwa. Pada tahun 1989 di Amerika Serikat, amonia sebanyak 22,5 ton lepas dari sebuah pabrik *frozen pizza* yang menyebabkan awan uap sepanjang 24 blok kota hingga 50 lebih penduduk diungsikan ke rumah sakit dengan gangguan pernapasan [4]. Tahun 2013, di Amerika Serikat juga pernah terjadi ledakan pabrik pupuk di bagian barat Texas yang

melepas gas amonia berbahaya sepanjang 80 km yang mengenai pusat penduduk dan sekolah dengan lebih 100 orang mengalami sakit [5]. Pada tahun 2016, di Bangladesh terjadi ledakan tangki amonia yang berkapasitas 500 ton akibat *overpressure* pada sebuah pabrik *Di-ammonium Phosphate Factory Limited (DAP-1)* di tepi selatan Sungai Karnaphuli. Ledakan ini menyebabkan awan uap amonia beracun menyebar hingga beberapa kilometer terbawa angin yang membuat sekitar 250 orang mengalami gangguan pernapasan dan 50 orang mengalami pusing dan iritasi mata [6]. Pada Tahun 2019, di Mesir juga pernah terjadi ledakan dari tangki penyimpanan yang penuh dengan amonia berkapasitas sekitar 400.000 ton pada pabrik pupuk Ain el Shokha. Pada insiden ini dilaporkan 10 pekerja meninggal dan 5 orang dilarikan ke rumah yang kemudian 2 orang darinya meninggal akibat gangguan pernapasan [7].

Di Indonesia juga terdapat beberapa pabrik yang memproduksi amonia. Salah satu perusahaan industri kimia yang memproduksi amonia dan telah berdiri pada pertengahan abad ke-20 adalah PT Pupuk Sriwijaya Palembang yang terletak 6 km dari pusat kota. PT Pusri Palembang adalah pabrik pupuk pertama di Indonesia yang didirikan pada tahun 1959. Produk utama dari PT Pusri Palembang adalah pupuk urea, NPK, dan amonia. Dimana pupuk urea dan NPK merupakan produk retail yang dipasarkan sedangkan amonia merupakan bahan mentah untuk industri kimia. Saat ini PT Pusri Palembang telah membangun sekitar 6 pabrik, dan yang paling terbaru adalah Pabrik Pusri IIB. Pabrik Pusri IIB memiliki produktivitas amonia sebesar 20.000 ton per hari atau sekitar 660.000 ton per tahun [8].

Amonia atau NH_3 merupakan bahan kimia yang menjadi bahan baku pembuatan pupuk khususnya pupuk urea. Kebutuhan bahan baku amonia di Indonesia dari tahun ke tahun mengalami kenaikan menurut data impor amonia oleh Badan Pusat Statistik [9]. Bahan baku amonia digunakan PT Pusri Palembang untuk menghasilkan produk pupuk urea dan NPK. Pada pabrik Pusri IIB, amonia dalam bentuk cair disimpan dalam keadaan

dingin pada tangki penyimpanan berkapasitas 2.000 ton/hari [10]. Amonia juga merupakan bahan kimia yang sangat korosif dan mudah terbakar luas jika bereaksi dengan oksigen dalam bentuk gas. Sehingga amonia dapat dikatakan bahan kimia yang sangat berbahaya bagi manusia dan lingkungan [11].

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk memprediksi skenario terjadinya kebocoran tangki amonia adalah dengan analisis risiko secara kuantitatif (*quantitative risk analysis*). Dalam analisis risiko kuantitatif ini, digunakan perangkat lunak ALOHA sebagai jalan pintas untuk mengkalkulasi hasil dari analisis risiko secara mudah dan cepat dibandingkan dengan menghitung secara *manual*. Perangkat lunak ALOHA ini memungkinkan untuk menunjukkan skenario-skenario terjadinya ledakan, kebocoran, atau kebakaran beserta pola-pola penyebarannya. ALOHA juga dapat menunjukkan jarak dispersi amonia yang lepas ke udara atau lingkungan serta dapat menentukan kadar amonia tiap satuan jarak dari pusat terjadinya kebocoran. ALOHA juga memiliki kemampuan yang mumpuni dibanding dengan *software* sejenisnya seperti *Process Hazard Analysis Software Tools* (PHASt) di bidang tampilannya yang sederhana, konfigurasi yang mudah, memiliki *database* yang cukup akurat, memperhitungkan arah angin, dan paling cocok digunakan untuk simulasi dispersi gas [12]. Walaupun tangki penyimpanan amonia pada pabrik Pusri IIB belum pernah terjadi kebocoran, kewaspadaan terhadap terjadinya kebocoran tangki harus menjadi perhatian. Pabrik Pusri IIB terletak cukup dekat dengan lingkungan masyarakat dan amonia yang disimpan berkapasitas besar, sehingga jika terjadinya kebocoran akan menimbulkan bencana yang besar. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis risiko bahaya yang terjadi saat terjadinya kebocoran pada tangki penyimpanan amonia pada pabrik Pusri IIB.

2. Metodologi

2.1. Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan perangkat komputer yang dilengkapi dengan program/software ALOHA versi 5.4.7. Spesifikasi bahan/input yang diperlukan pada penelitian ini berupa tangki dengan jenis *double wall tank* yang memiliki diameter luar 42,5 m dan tinggi diameter luar 25 m. Tangki tersebut berkapasitas 20000 ton dengan suhu operasi -33°C , tekanan operasi 4,903 kPa, dan *high level liquid* (HLL) 23,2 m.

2.2. Prosedur

Secara garis besar prosedur penelitian ini seperti yang disajikan dalam diagram alir penelitian pada Gambar 1. Penelitian dimulai dengan mengumpulkan data primer (kondisi tangki dan bahan amonia yang terdapat dalam tangki penyimpanan amonia pabrik Pusri IIB) dan data sekunder (suhu, tekanan, arah angin, dan kecepatan angin di lingkungan pabrik). Data tersebut kemudian diolah dan disimulasikan ke dalam ALOHA 5.4.7 menggunakan 4 skenario berbeda (Tabel 1).

Dalam penelitian ini dilakukan analisis kuantitatif risiko atau konsekuensi yang terjadi jika terjadi kebocoran tangki penyimpanan amonia dengan menggunakan perangkat lunak ALOHA dan perhitungan *manual* menggunakan *Gaussian Model*. Analisis risiko kuantitatif ini dilakukan dengan mengolah data-data atmosfer atau iklim wilayah Kota Palembang selama 1 tahun (April 2020-April 2021). Dari 1 tahun tersebut dibagi menjadi 2 musim yaitu musim kemarau (April-Oktober 2020) dan musim hujan (Oktober 2020-April 2021). Skenario-skenario yang dibuat yaitu : musim kemarau dengan kondisi iklim rata-rata (skenario 1), musim kemarau dengan kondisi iklim maksimum (skenario 2), musim hujan dengan kondisi iklim rata-rata (skenario 3), dan musim hujan dengan kondisi iklim maksimum (skenario 4). Data-data atmosfer atau iklim ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data iklim daerah kota Palembang dari april 2020-april 2021

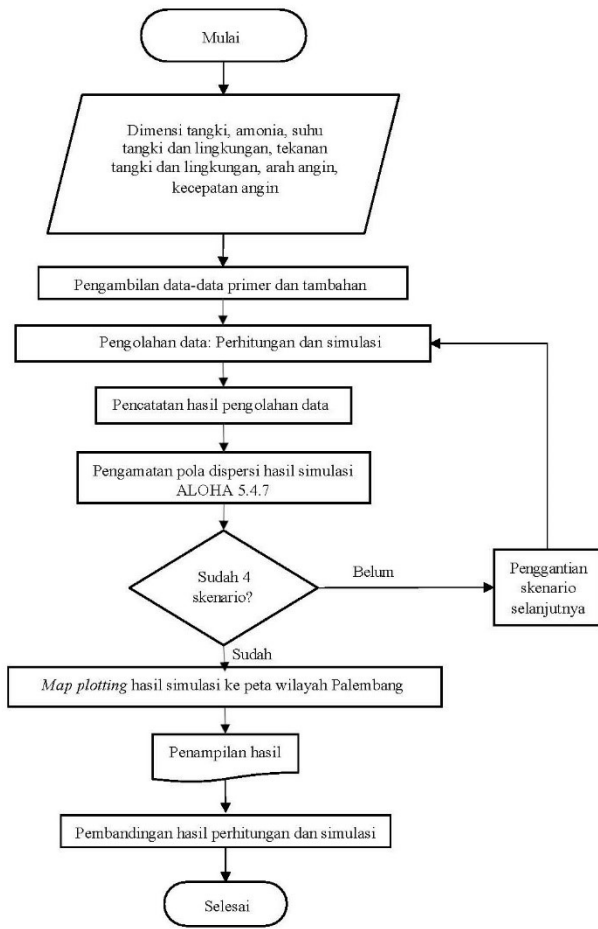
MUSIM	SKENARIO	BULAN	SUHU ($^{\circ}\text{C}$)	KECEPATAN ANGIN (m/s)	KELEMBAPAN (%)	ARAH ANGIN
MUSIM KEMARAU	SKENARIO 1 (RATA- RATA)	APRIL 2020	27,6	1,0	87	Barat
		MEI 2020	28,3	1,0	86	Timur
		JUNI 2020	27,6	2,0	86	Timur
		JULI 2020	27,3	1,5	88	Timur
		AGUSTUS 2020	28,3	2,0	79	Timur
		SEPTEMBER 2020	27,6	1,6	82	Timur
	SKENARIO 2 (MAKSIMUM)	APRIL 2020	32,8	3,0	87	Timur
		MEI 2020	33,1	3,0	86	Timur

MUSIM	SKENARIO	BULAN	SUHU (°C)	KECEPATAN ANGIN (m/s)	KELEMBAPAN (%)	ARAH ANGIN
MUSIM HUJAN		JUNI 2020	32,5	3,0	86	Timur
		JULI 2020	32,3	3,0	88	Timur
		AGUSTUS 2020	33,7	4,0	79	Timur
		SEPTEMBER 2020	33,0	3,5	82	Timur
	SKENARIO 3 (RATA-RATA)	OKTOBER 2020	27,7	1,0	84	Timur
		NOVEMBER 2020	27,6	1,3	85	Barat
		DESEMBER 2020	27,0	1,5	87	Barat
		JANUARI 2021	26,5	2,0	84	Barat daya
		FEBRUARI 2021	26,7	2,0	87	Barat daya
		MARET 2021	27,0	1,5	84	Barat daya
		OKTOBER 2020	32,5	3,0	84	Tenggara
		NOVEMBER 2020	33,0	3,0	85	Barat
		DESEMBER 2020	32,0	3,0	87	Barat
		JANUARI 2021	31,0	3,5	84	Barat
FEBRUARI 2021	31,5	4,0	87	Tenggara		
MARET 2021	32,5	3,0	84	Barat		

Dalam mengolah data penelitian ini ditentukan beberapa asumsi data antara lain sebagai berikut:

- Menurut data dari *OGP Risk Assessment Data Directory*, dalam 30 tahun terakhir ukuran lubang kebocoran tangki penyimpanan amonia berpendingin rata-rata sebesar 3 inci [13]. Maka dalam penelitian ini diasumsikan bahwa diameter lubang kebocoran tangki (*hole size*) sebesar 3 inci.
- Bagian bawah tangki penyimpanan memiliki tekanan yang lebih besar dan mudah korosi sehingga rawan terjadi kebocoran [13]. Oleh karena itu, diasumsikan kebocoran tangki terletak di bagian bawah tangki dengan jarak lubang kebocoran ke permukaan cairan amonia sebesar 23 meter atau 93% *full tank*.
- BLEVE: Bola api (*fireball*) yang terbentuk mengandung 100% massa amonia.

Asumsi perhitungan tersebut dibuat berdasarkan *worst case* yang mungkin terjadi akibat kebocoran tangki penyimpanan amonia.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Tangki penyimpanan amonia di pabrik Pusri IIB beroperasi pada tekanan 4,903 kPa dan suhu -33°C untuk menjaga amonia dalam fasa cair. Letak tangki amonia pabrik Pusri IIB ini berada di sebelah timur Kota Palembang. Peta lokasi tangki amonia ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta lokasi tangki penyimpanan amonia pabrik Pusri IIB

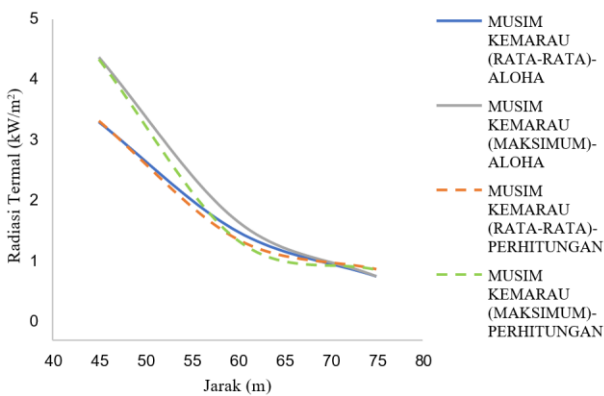
Efek kebocoran tangki penyimpanan amonia atau kecelakaan akibat kebocoran tangki yang memungkinkan terjadi setelah dilakukan simulasi ALOHA yaitu *pool fire*, BLEVE, *toxic vapor cloud*, dan *flammable area of vapor cloud*.

3.1. Pool Fire

Efek kebocoran tangki penyimpanan amonia dapat menyebabkan *pool fire*. *Pool fire* merupakan area kebakaran berupa kolam api yang muncul dengan maksimum diameter 42,5 meter dan tinggi api 25 meter akibat sejumlah senyawa amonia yang bocor dari 3 inci (0,0762 m) lubang kebocoran tangki. Senyawa amonia yang bocor dalam kondisi

yang cukup jika tersulut api dapat menimbulkan kebakaran dan jika kebakaran dibiarkan dalam waktu yang relatif lama yang mungkin dikarenakan kegagalan alat kontrol seperti kerusakan alat pemadam dan control valve dapat menimbulkan kebakaran yang sangat besar seperti pool fire. Hasil analisis efek pool fire pada tangki penyimpanan amonia pabrik Pusri IIB terdapat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Gambar 3 dan Gambar 4 merupakan grafik yang menunjukkan besar paparan radiasi termal dalam tiap jarak tertentu dari sumber emisi atau kebocoran akibat efek *pool fire*. Dari grafik tersebut dapat dianalisis bahwa besar efek yang ditimbulkan akibat *pool fire* pada skenario musim kemarau maupun musim hujan tidak memiliki perbedaan yang signifikan dikarenakan kondisi iklim pada musim hujan dan kemarau tidak memiliki perbedaan yang jauh. Pada jarak 45 meter dari sumber emisi skenario 1 memiliki besar radiasi termal kurang lebih 3,40 kW/m² dan terus menurun seiring bertambahnya jarak paparan dari sumber emisi. Hal ini membuktikan bahwa semakin jauh titik paparan dari sumber emisi maka paparan radiasi termal semakin kecil.



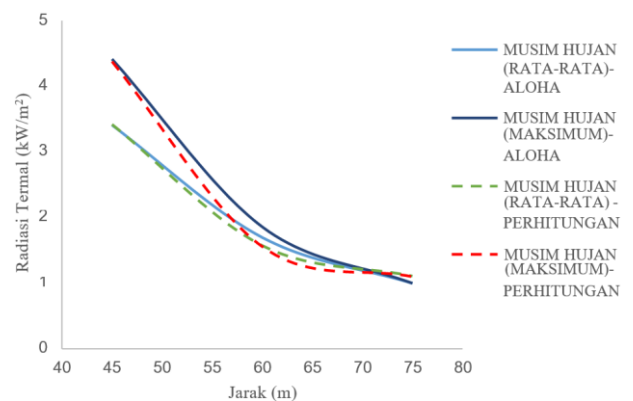
Gambar 3. Grafik paparan radiasi termal pool fire tiap satuan jarak dari sumber kebocoran tangki pada musim kemarau

Perbandingan nilai radiasi termal hasil perhitungan matematis dengan hasil simulasi ALOHA memiliki sedikit perbedaan pada jarak 60 meter. Pada jarak 60 meter hasil perhitungan skenario 1 sebesar 1,57 kW/m² dan skenario 2 sebesar 1,56 kW/m². Sedangkan hasil simulasi ALOHA, skenario 1 sebesar 1,69 kW/m² dan skenario 2 sebesar 1,85 kW/m². Jarak lainnya memiliki nilai radiasi termal yang ditunjukkan relatif sama. Dari rentang nilai radiasi termal akibat pool fire ini dapat diketahui tingkat bahaya tiap jarak dari sumber emisi.

Hasil simulasi ALOHA yang berupa *threat zone* diplotkan ke peta wilayah tangki yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. *Threat zone* musim

kemarau yang dihasilkan memiliki *red zone* sejauh 36 meter dari sumber emisi, *orange zone* sejauh 43 meter, dan *yellow zone* sejauh 57 meter. Sedangkan *threat zone* yang dihasilkan pada musim hujan memiliki *red zone* sejauh 35 meter, *orange zone* sejauh 44 meter, dan *yellow zone* sejauh

58 meter. Dimana *red zone* menunjukkan nilai radiasi termal besarnya >10 kW/m² yang dampak paparannya dapat menimbulkan kematian hanya dalam waktu 1 menit. *Orange zone* menunjukkan nilai radiasi termal sebesar 5-10 kW/m² yang dampak paparannya dapat menyebabkan benda atau tubuh terbakar hanya dalam waktu 1 menit. Sedangkan *yellow zone* menunjukkan nilai radiasi termal sebesar 2-5 kW/m² yang dampak paparannya dapat menyebabkan sakit/panas dalam 1 menit.



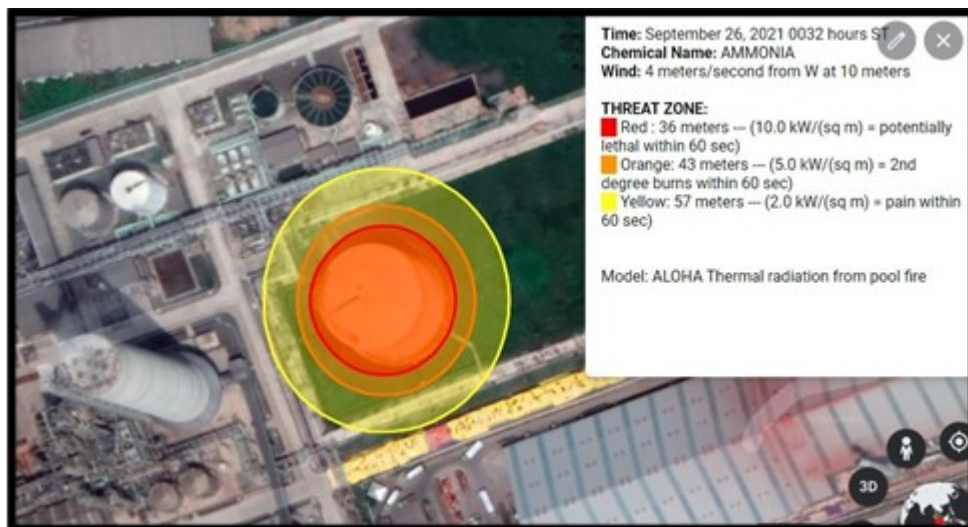
Gambar 4. Grafik paparan radiasi termal pool fire tiap satuan jarak dari sumber kebocoran tangki pada musim hujan

Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan bahwa dampak bahaya yang besar dari *pool fire* hanya terpapar di dalam pabrik sekitar tangki amonia. Walaupun bahaya paparannya tidak sampai mengenai pemukiman penduduk. Jarak pemukiman penduduk dengan tangki amonia PUSRI IIB yaitu (kurang lebih) 1,5 km ke barat, 1,5 km ke selatan, 500 meter ke utara, dan 400 meter ke timur. Dampak kebakaran dan paparannya yang berbahaya terdapat di dalam area pabrik dan ini dapat membahayakan karyawan yang sedang bekerja di pabrik Pusri IIB jika tidak dilakukan tindakan keselamatan atau pengendalian api. Dampak yang mungkin ditimbulkan dari *pool fire* ini yaitu api yang merambat ke unit-unit pabrik lain, luka bakar, asap, dan rusaknya alat-alat sekitar tangki. Merujuk pada penelitian [14] yang menganalisis radiasi termal dari *pool fire* pada tangki penyimpanan isooktana (titik didih 99°C) di Tanjung Priok. Hasil analisis radiasi termal dengan besar >10 kW/m² (*red zone*) mencapai jarak 35 meter dari tangki, >5 kW/m² (*orange zone*) mencapai jarak 46 meter, dan >2 kW/m² mencapai

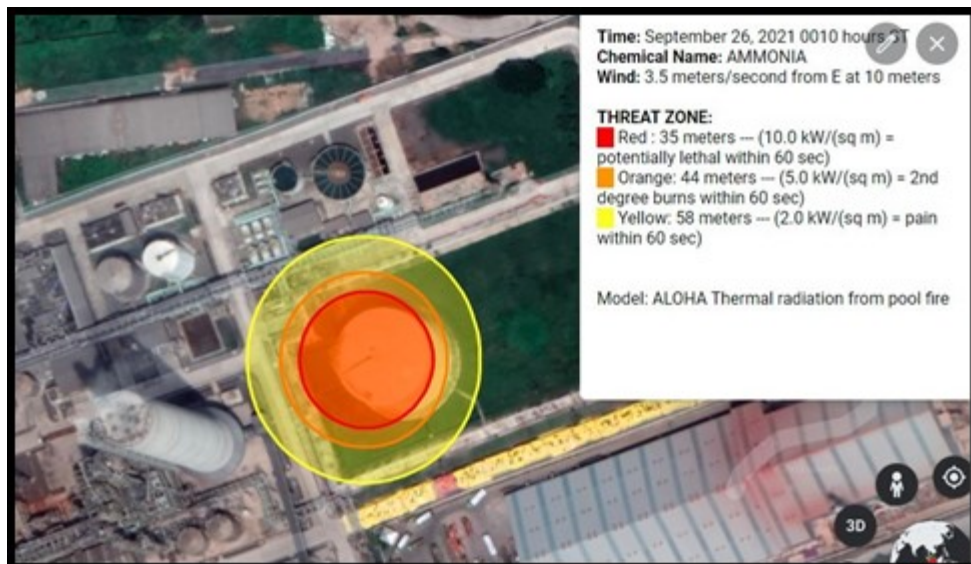
62 meter. Hal ini juga menunjukkan semakin jauh jarak paparan maka nilai radiasi termal semakin berkurang. Disamping itu, dampak yang mungkin terjadi yaitu terbentuknya asap, gas beracun, dan kebakaran di lingkungan sekitar [15].

Mitigasi atau pencegahan terjadinya *pool fire* di tangki penyimpanan amonia ini yang dapat dilakukan yaitu membuat sistem deteksi kebakaran dan *alarm* peringatan terhadap api. Hal ini dilakukan untuk dilakukannya tindakan tanggap darurat jika terdapat sumber api atau kebakaran di tangki amonia sehingga memperkecil risiko terjadinya *pool fire*. Mempersiapkan sistem pemadam api juga diperlukan untuk mencegah api yang membesar dan dapat juga membuat penghalang api atau bahan tahan api agar api untuk mengurangi perambatan api. Dari segi manusianya dapat dilakukan mitigasi seperti tidak merokok di sekitar tangki dan selalu siaga jika

berada di sekitar area tangki amonia. Tangki amonia di pabrik PUSRI IIB sendiri sudah dilengkapi dengan *dike/tanggul* untuk menampung kebocoran amonia dan *water curtain* untuk meminimalisir amonia yang menguap bahkan terjadinya kebakaran atau *pool fire*. *Emergency response plan* (ERP) atau rencana tanggap darurat yang telah dibuat di pabrik Pusri IIB yaitu menyiapkan tim *Fire Fighting Group* (FFG) yang bertugas untuk mengantisipasi kebakaran yang terjadi. Sarana-sarana yang digunakan tim FFG ini yaitu alat pemadam api ringan (APAR) dan hidran. Selain itu di pabrik Pusri IIB juga sudah dilengkapi dengan *fire alarm system* (FAS), detektor asap, detektor panas, dan persediaan air pemadam dari dalam maupun luar pabrik. Pengecekan alat-alat tersebut dilakukan 3 bulan hingga 1 tahun sekali untuk mengantisipasi kerusakan alat pemadam dan *alarm*.



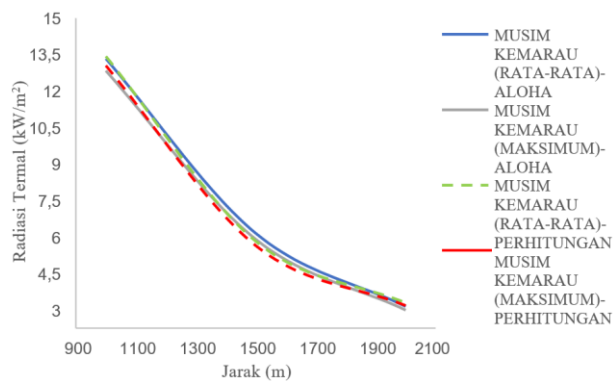
Gambar 5. Hasil *map plotting* dari *threat zone* ALOHA ke wilayah tangki untuk efek *pool fire* pada musim kemarau



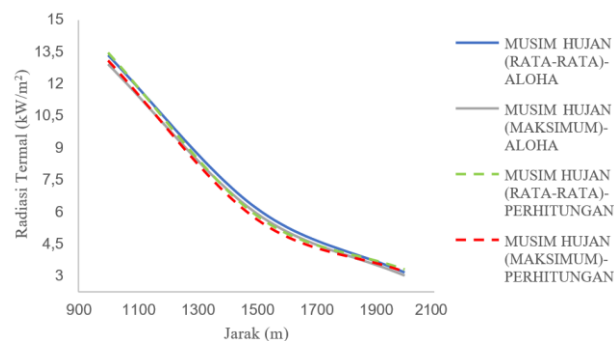
Gambar 6. Hasil *map plotting* dari *threat zone* ALOHA ke wilayah tangki untuk efek *pool fire* pada musim hujan

3.2. BLEVE

BLEVE merupakan ledakan dan kebakaran besar yang dapat disebabkan oleh pecahnya tangki penyimpanan senyawa amonia. Pecah atau retaknya tangki ini dapat disebabkan oleh paparan panas dari dalam maupun luar tangki yang bertekanan, korosi pada tangki karena umur tangki yang sudah lama dan kondisi lingkungan wilayah tangki. Pecahnya tangki juga dapat disebabkan oleh bencana alam yang dapat merusak komponen-komponen tangki. BLEVE dapat menimbulkan ledakan dengan intensitas tinggi dan dapat membentuk bola api besar (*fireball*) dalam waktu beberapa detik. Dimana pada kasus tangki penyimpanan amonia ini bola api yang ditimbulkan memiliki durasi 43 detik. Hasil analisis risiko kuantitatif efek BLEVE pada tangki penyimpanan amonia pabrik Pusri IIB ini disajikan pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Grafik paparan radiasi termal BLEVE tiap satuan jarak dari sumber kebocoran tangki pada musim kemarau



Gambar 8. Grafik paparan radiasi termal BLEVE tiap satuan jarak dari sumber kebocoran tangki pada musim hujan

Gambar 7 dan 8 merupakan grafik hubungan antara paparan radiasi panas atau termal dalam jarak tertentu dari sumber kebocoran. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa BLEVE merupakan ledakan dan kebakaran yang sangat

besar yang terjadi sangat cepat serta membentuk bola api (*fireball*). Dari *fireball* ini dapat memancarkan panas ke lingkungan dengan paparannya yang cukup besar dan berbahaya. Gambar 7 menunjukkan nilai radiasi termal pada jarak 1000 meter dari sumber kebocoran sangat tinggi yaitu 13,4 kW/m². Gambar 8 juga menunjukkan nilai yang sebanding dengan Gambar 7. Hal ini juga dikarenakan perbedaan data iklim rata-rata musim kemarau dan musim hujan tidak signifikan. Kurva yang dihasilkan untuk perhitungan matematis maupun ALOHA menunjukkan kurva linear menurun yang artinya semakin jauh jarak paparan dari sumber kebocoran nilai radiasi termal juga semakin kecil. Pada jarak 2000 meter dari sumber kebocoran menunjukkan nilai 3,7 kW/m² hingga 3,9 kW/m². Hasil perhitungan matematis dan ALOHA memiliki kurva yang mendekati sejajar sehingga dapat dikatakan hasil ALOHA cukup akurat.

Radiasi termal dari tiap jarak paparan memiliki besaran yang berbeda-beda. Tiap rentang nilai radiasi juga memiliki efek bahaya yang berbeda-beda. Untuk mengetahui visualisasi paparan tiap jarak serta efek-efek bahaya yang ditimbulkan dapat dilihat dari hasil *threat zone* dari simulasi ALOHA yang telah dilakukan *map plotting* ke peta wilayah tangki amonia pabrik Pusri IIB. *Threat zone* yang dihasilkan pada musim kemarau maupun musim hujan ditampilkan dalam Gambar 9 dan Gambar 10.

Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan *threat zone* yang dihasilkan dari simulasi ALOHA pada wilayah tangki penyimpanan amonia pabrik Pusri IIB. Gambar 9 dan Gambar 10 memiliki radius zona yang sama yaitu *red zone* (1,2 km) dengan rentang >10 kW/m², *orange zone* (1,7 km) dengan rentang 5-10 kW/m², dan *yellow zone* (2,7 km) dengan rentang 2-5 kW/m². Dampak tiap zona-zona dengan rentang nilai radiasi termal BLEVE sama dengan dampak dari radiasi termal *pool fire*. Radius yang dihasilkan sangat jauh hingga 2,7 km dari sumber kebocoran dikarenakan digunakan asumsi yang telah disebutkan sebelumnya yang menjadi *worst case* dalam kasus BLEVE ini yaitu massa *fireball* yang dihasilkan sebesar 100% massa dari senyawa amonia yaitu 5.000 ton amonia yang terdapat di dalam tangki.

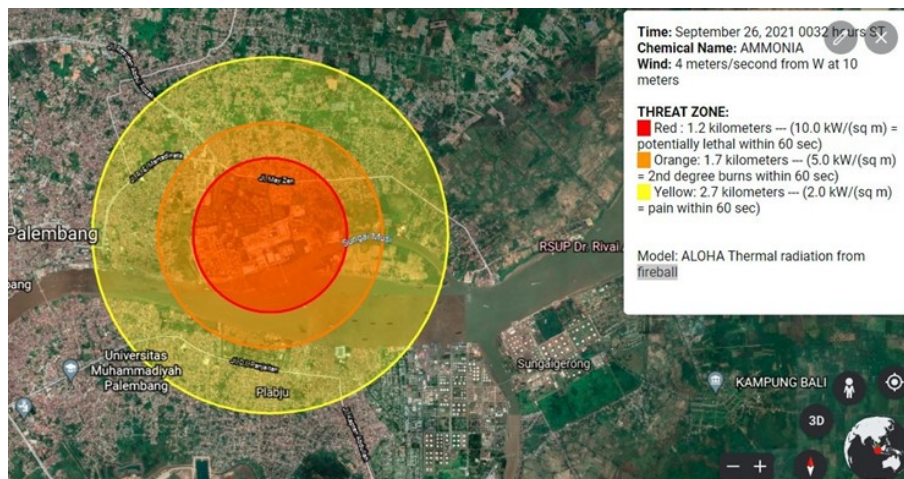
Merujuk pada penelitian [14] yang menganalisis dampak radiasi termal BLEVE tangki isooktan (5.490 kg). Area dengan radiasi termal >10 kW/m² (*red zone*) mencapai 208 meter dari tangki, area >5 kW/m² (*orange zone*) mencapai 293 meter, dan area >2 kW/m² (*yellow zone*) mencapai 457 meter. Dibandingkan dengan hasil radiasi termal BLEVE di tangki amonia pabrik PUSRI IIB, jarak paparan memiliki perbedaan

cukup jauh. Hal ini dikarenakan massa amonia di dalam tangki amonia yang sangat besar. Pada tangki isooktana tersebut massa *fireball* adalah 80% massa isooktana dalam tangki. Menurut analisis dalam penelitian Salsabila (2020), dampak lain yang mungkin dihasilkan dari BLEVE adalah merusak bangunan, melepaskan sejumlah besar senyawa beracun, dan ledakan dapat menimbulkan *vapor cloud explosion* [15].

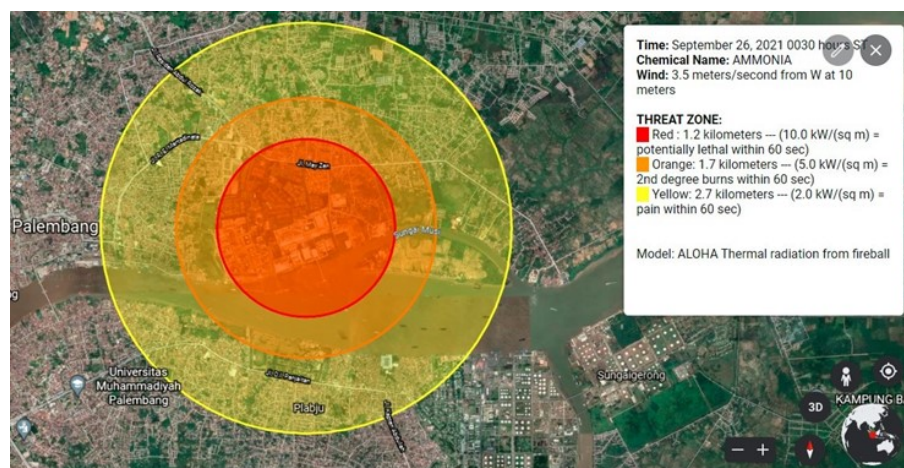
Gambar 9 dan Gambar 10 juga menunjukkan *threat zone* efek BLEVE menyebabkan paparan radiasi termal mencapai pemukiman penduduk di sekitar tangki hingga hampir sampai pusat Kota Palembang di bagian timur pabrik Pusri IIB. Hal ini sangat berbahaya jika mungkin terjadi BLEVE. Potensi bahaya dari BLEVE yang ditimbulkan bagi lingkungan sekitar selain radiasi panas yaitu kepulan asap, abu-abu sisa pembakaran, kebakaran yang sangat besar, gelombang tekanan yang besar hingga merusak bangunan, dan puing-puing berbahaya sisa pembakaran atau ledakan.

Upaya mitigasi perlu dilakukan untuk mencegah terjadinya BLEVE pada tangki. Upaya

mitigasi yang dapat dilakukan untuk menghindari kemungkinan terjadi BLEVE ini yaitu mempersiapkan beberapa penyembur air di atas tangki atau sekitar tangki atau juga sistem pemadam api, menambah *safety valve* untuk menjaga tekanan tangki, dan menyiapkan sistem alarm atau sirine untuk memperingati karyawan dan masyarakat serta dapat melakukan *shutdown* otomatis. ERP yang telah dibuat di pabrik PUSRI IIB untuk mengantisipasi terjadinya ledakan tangki yaitu sama seperti yang telah disebutkan sebelumnya, yaitu mencegah api yang timbul dengan alat-alat pemadam. Kontrol terhadap bahaya gas *explosive* atau kebocoran yang dapat menimbulkan ledakan diantisipasi dengan mencegah timbulnya api di sekitar tangki. Jalur evakuasi dan titik kumpul (*assembly point*) juga sudah dibuat. Dari segi manusianya seperti menghindari kegiatan yang membuang sampah bakar seperti rokok di sekitar tangki dan menerapkan prosedur yang tepat dalam melakukan kegiatan yang berhubungan dengan pemanasan.



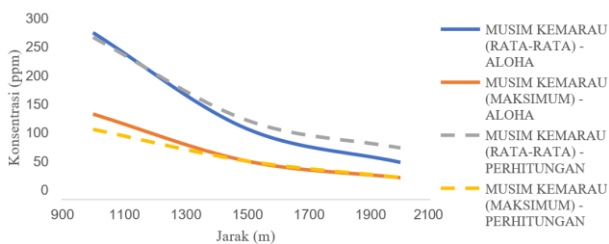
Gambar 9. Hasil *map plotting* dari *threat zone* ALOHA ke wilayah tangki untuk efek BLEVE pada musim kemarau



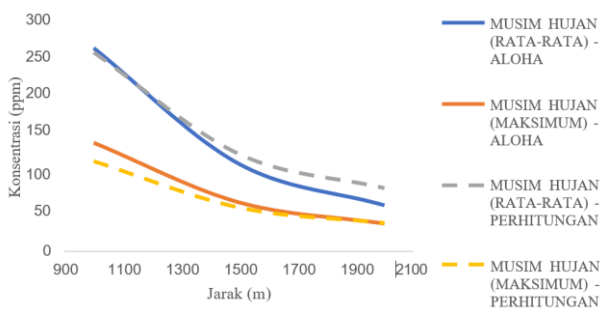
Gambar 10. Hasil *map plotting* dari *threat zone* ALOHA ke wilayah tangki untuk efek BLEVE pada musim hujan

3.3. Toxic Vapor Cloud

Kebocoran tangki penyimpanan amonia dapat menimbulkan ledakan awan uap yang membawa senyawa-senyawa amonia yang menjadi bersifat racun. Senyawa-senyawa amonia yang menjadi uap racun ini akan tersebar ke lingkungan sekitar tangki dan disebut *toxic area of vapor cloud*. Awan uap beracun ini tersebar ke lingkungan mengikuti arah angin dan kecepatan penyebarannya sebanding dengan kecepatan angin wilayah tangki tersebut. Dalam analisis risiko kuantitatif ini, *toxic area* dianalisis dari konsentrasi senyawa amonia yang tersebar pada jarak penyebaran tertentu. Untuk perhitungan dan simulasi menggunakan *Gaussian plume dispersion model* karena diasumsikan kebocoran atau awan uap yang dihasilkan bersifat kontinu. Besarnya konsentrasi amonia yang tersebar pada jarak tertentu dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Grafik konsentrasi amonia yang tersebar tiap satuan jarak dari sumber kebocoran tangki untuk *toxic area* pada musim kemarau



Gambar 12. Grafik konsentrasi amonia yang tersebar tiap satuan jarak dari sumber kebocoran tangki untuk *toxic area* pada musim hujan

Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan konsentrasi amonia yang bersifat beracun tiap satuan jarak dari sumber emisi. Untuk skenario 1 dan skenario 2 dapat dianalisis dari Gambar 11, dimana pada jarak 1000 meter nilai konsentrasi skenario 1 (rata-rata) untuk perhitungan matematis/manual didapatkan sekitar 268 ppm dan untuk hasil ALOHA didapatkan sekitar 276 ppm. Sedangkan untuk skenario 2 (maksimum) pada jarak 1000 meter nilai konsentrasi dengan perhitungan manual didapatkan sekitar 117 ppm

dan hasil ALOHA sekitar 142 ppm. Dari keempat garis kurva pada Gambar 4.10 memiliki jenis kurva yang linear menurun dengan semakin besar nilai jarak. Hal ini menunjukkan bahwa semakin jauh jarak penyebarannya maka konsentrasi amonia terdispersi semakin kecil.

Gambar 12 digunakan untuk analisis hasil perhitungan dan simulasi ALOHA untuk skenario 3 (rata-rata) dan skenario 4 (maksimum). Gambar 12 menunjukkan skenario 3 memiliki nilai konsentrasi amonia pada jarak 1000 meter untuk skenario 3 sekitar 257 ppm (perhitungan manual) dan 262 ppm (ALOHA), sedangkan skenario 4 pada jarak yang sama didapatkan nilai konsentrasi amonia sekitar 117 ppm (perhitungan manual) dan 140 ppm (ALOHA). Dari keempat garis kurva yang terbentuk menunjukkan kurva linear menurun yang menunjukkan semakin jauh jarak penyebarannya maka nilai konsentrasi amonia terdispersi/tersebar semakin kecil.

Dalam analisis *toxic area* ini juga digunakan *map plotting* untuk menunjukkan atau memvisualisasikan hasil simulasi ALOHA mengenai penyebaran gas toksik amonia pada peta wilayah tangki. *Threat zone* yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14.

Pada Gambar 13, dapat diamati jarak atau radius terbesarnya gas toksik amonia dari sumber emisi pada musim kemarau. Pada musim kemarau ini arah angin terbanyak mengarah ke timur dan barat. Dalam analisis ALOHA ini menggunakan parameter *Emergency Response Planning Guidelines* (ERPG). ERPG digunakan untuk mengetahui batas konsentrasi maksimum tiap tingkatan bahaya untuk manusia yang terpapar gas toksik selama 1 jam. ERPG ini dibagi menjadi 3 tingkat yaitu : ERPG-1, ERPG-2, dan ERPG-3. Nilai tingkatan ERPG ini berdasarkan sifat senyawa yang tersebar. Untuk hasil *threat zone* pada Gambar 4.12 ini terdapat radius zona bahaya melohat nilai ERPG yaitu : *red zone* dengan radius 269 meter yang termasuk ERPG-3 (1500 ppm), *orange zone* dengan radius 890 meter yang termasuk dalam ERPG-2 (150 ppm), dan *yellow zone* dengan radius 2,2 km yang termasuk dalam ERPG-1 (25 ppm).

Dari Gambar 13 dapat diketahui bahwa penyebaran gas toksik cukup jauh hingga 2,2 km selama 1 jam. Di bagian timur sekitar sejauh 1 km mengenai pemukiman penduduk dan hampir mendekati pusat Kota Palembang. Sedangkan di bagian barat dapat dilihat penyebaran gas toksik mengenai pemukiman sekitar tepi Sungai Musi. Jika kebocoran tangki ini terjadi sudah pasti sangat berisiko penduduk sekitar terkena efek toksik dari gas amonia yang terdispersi di udara. Sebagian besar pemukiman warga yang terkena dampaknya

termasuk dalam tingkat ERPG-1 yang masih dapat dibuang hanya menimbulkan gejala ringan seperti batuk dan bau tidak menyenangkan. Akan tetapi harus tetap diperhatikan dan waspada dikarenakan jika terus menerus terpapar dapat meningkatkan konsentrasi amonia sehingga dapat memberikan dampak yang lebih bahaya. Lalu dapat diamati di bagian dalam pabrik sendiri termasuk zona *red zone* yang merupakan ERPG-3 dan paling berbahaya yaitu dapat mengalami kematian jika gas toksik terhirup terus menerus dikarenakan konsentrasi di dalam pabrik lebih dari 1500 ppm.

Pada Gambar 14, dapat diamati jarak atau radius tersebarnya gas toksik amonia dari sumber emisi pada musim hujan. Pada musim hujan ini arah angin terbanyak mengarah ke timur, barat,

tenggara, dan barat daya. Untuk hasil *threat zone* pada Gambar 14 yaitu: *red zone* dengan radius 280 meter yang termasuk ERPG-3 (1500 ppm), *orange zone* dengan radius 924 meter yang termasuk dalam ERPG-2 (150 ppm), dan *yellow zone* dengan radius 2,3 km yang termasuk dalam ERPG-1 (25 ppm). Shojaee (2020), dalam penelitiannya menganalisis dampak dari gas toksik (*toxic area of vapor cloud*) dari kebocoran tangki benzena (12 ton). Hasil dari analisisnya yaitu menghasilkan area dengan konsentrasi benzena >4000 ppm (*red zone*) mencapai jarak 100 meter dari tangki, area dengan >800 ppm (*orange zone*) mencapai jarak 250 meter, dan area dengan >52 ppm (*yellow zone*) mencapai 1 km. Arah angin menuju timur (4 m/s) dan kondisi atmosfer pada musim panas (*summer*) [16].



Gambar 13. Hasil *map plotting* dari *threat zone* ALOHA ke wilayah tangki untuk *toxic area of vapor cloud* pada musim kemarau



Gambar 14. Hasil *map plotting* dari *threat zone* ALOHA ke wilayah tangki untuk *toxic area of vapor cloud* pada musim hujan

Gambar 14 menunjukkan penyebaran gas toksik cukup jauh hingga 2,3 km selama 1 jam. Sama seperti musim kemarau, di bagian timur sekitar sejauh 1 km mengenai pemukiman penduduk dan hampir mendekati pusat Kota

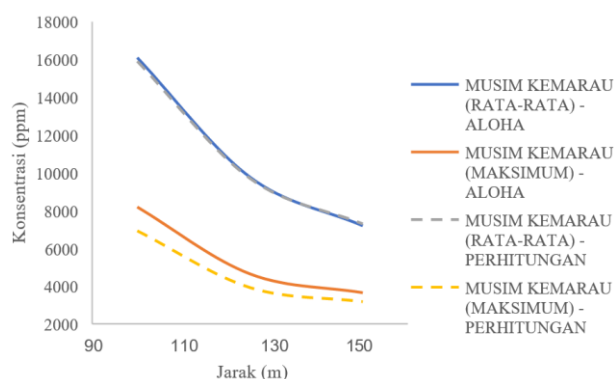
Palembang. Untuk di bagian barat dapat dilihat penyebaran gas toksik mengenai pemukiman sekitar tepi Sungai Musi. Lalu untuk bagian tenggara sedikit mengenai pemukiman di daerah Plaju. Di bagian barat daya belum sampai ke

pemukiman penduduk. Sama seperti pada musim kemarau sebagian besar pemukiman warga yang terkena dampaknya termasuk dalam tingkat ERPG-1 yang masih dapat dibuang hanya menimbulkan gejala ringan seperti batuk dan bau tidak menyenangkan dimana konsentrasi amonia di zona tersebut sekitar 25-150 ppm.

3.4. Flammable Area of Vapor Cloud

Selain menimbulkan penyebaran gas toksik, kebocoran tangki amonia atau awan uap yang dihasilkan ini juga mempunyai sifat mudah terbakar (*flammable*). Besarnya flammabilitas ini dipengaruhi oleh jumlah konsentrasi senyawa amonia yang terkandung di dalam awan uap atau udara. Dalam analisis risiko kuantitatif ini, pada hasil perhitungan matematis dan hasil simulasi ALOHA dengan menghitung konsentrasi amonia tiap satuan jarak dari sumber emisi. Konsentrasi amonia pada awan uap di tiap satuan jarak dapat dilihat pada Gambar 15 dan Gambar 16.

Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan seberapa besar konsentrasi amonia yang tersebar tiap satuan jarak. Dari grafik konsentrasi amonia tersebut nantinya juga dapat dilihat apakah konsentrasi tersebut sudah cukup untuk terjadinya api atau kebakaran. Gambar 15 pada skenario 1 untuk jarak 100 meter dari sumber emisi, nilai konsentrasi sekitar 1600 ppm dari perhitungan matematis maupun ALOHA dan pada jarak 150 meter sekitar 7000 ppm dari perhitungan matematis maupun simulasi ALOHA. Pada skenario 2, untuk jarak 100 meter nilai konsentrasi dengan perhitungan matematis sebesar 7000 ppm sedangkan hasil ALOHA sekitar 8000 ppm. Sedangkan di jarak 150 meter dari perhitungan matematis maupun ALOHA sekitar 3000 ppm.



Gambar 15. Grafik konsentrasi amonia yang tersebar tiap satuan jarak dari sumber kebocoran tangki untuk *flammable area* pada musim kemarau

Gambar 16 pada skenario 3, pada jarak 100 meter nilai konsentrasi dengan perhitungan matematis maupun ALOHA memiliki nilai sama sekitar 1500 ppm dan pada jarak 150 meter sekitar

7000 ppm. Sedangkan untuk skenario 4 pada jarak yang sama 100 meter nilai konsentrasi dengan perhitungan matematis sekitar 7000 ppm dan hasil ALOHA sekitar 8000 ppm. Dilihat dari hasil kedua grafik, tiap kurva garis menunjukkan garis linear menurun sehingga dapat menunjukkan bahwa semakin jauh jarak penyebaran (titik lokasi) maka nilai konsentrasi amonia yang tersebar/terdispersi di awan uap/udara semakin kecil. Dapat diamati juga bahwa hasil perhitungan dan ALOHA tidak memiliki perbedaan secara signifikan.

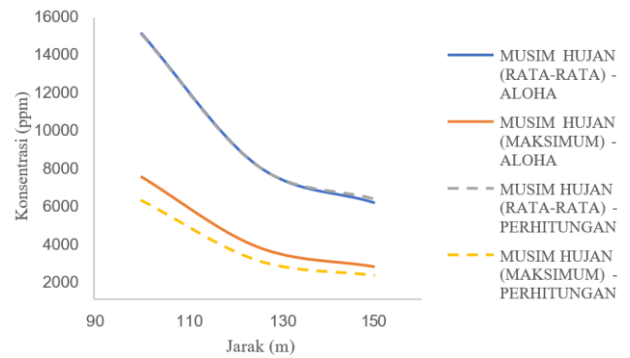
Untuk *flammable area of vapor cloud* ini, *map plotting* untuk hasil simulasi ALOHA berupa *threat zone* digunakan untuk melihat sebaran radius terdampak dari wilayah *flammable* ini. Gambar *threat zone* dari *flammable area* dapat dilihat pada Gambar 17 dan Gambar 18.

Gambar 17 dan Gambar 18 merupakan representasi hasil simulasi ALOHA berupa area atau zona berbahaya pada peta wilayah tangki penyimpanan amonia pabrik Pusri IIB. Dalam menganalisis *threat zone* tersebut parameter untuk menentukan tingkat bahaya adalah menggunakan nilai *lower explosion limit* (LEL) selama 1 jam dari mulai kebocoran tangki. Dimana LEL merupakan batas minimum konsentrasi yang dibutuhkan untuk terjadi pembakaran. Untuk skenario musim kemarau pada Gambar 17, zona bahaya yang dihasilkan hanya *yellow zone* dengan radius 60 meter dan nilai konsentrasi antara 15000 ppm hingga 90000 ppm.

Penyebaran awan uap pada skenario musim kemarau arah angin terbanyak mengarah ke timur dan barat. Sama halnya untuk skenario musim hujan, zona bahaya yang dihasilkan hanya *yellow zone* dengan radius yang sama. Awan uap untuk skenario musim hujan terbanyak mengarah ke arah barat, timur, tenggara, dan barat daya. Sojaee (2020), dalam penelitiannya juga menganalisis area *flammable of vapor cloud* yang terbentuk dari kebocoran tangki benzena. Hasil analisis didapatkan area *flammable* hanya 10% LEL yaitu 1200-7200 ppm, yang dapat dikatakan sangat minim terjadi kebakaran [14].

Rentang bahaya yang dihasilkan pada *yellow zone* hanya berkisar 10% dari data LEL amonia yang dibutuhkan dalam pembakaran. Dan dengan rentang tersebut kebakaran sangat minim dapat terjadi. Dari gambar *threat zone* di atas zona bahaya hanya mencapai di dalam pabrik sehingga tidak mengenai pemukiman warga. Walaupun kebakaran sangat minim kemungkinan terjadi di sekitar tangki namun harus tetap waspada dikarenakan jika konsentrasi amonia secara kontinyu bertambah dapat saja terjadi kebakaran walaupun intensitas yang kecil. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, selain awan uap yang

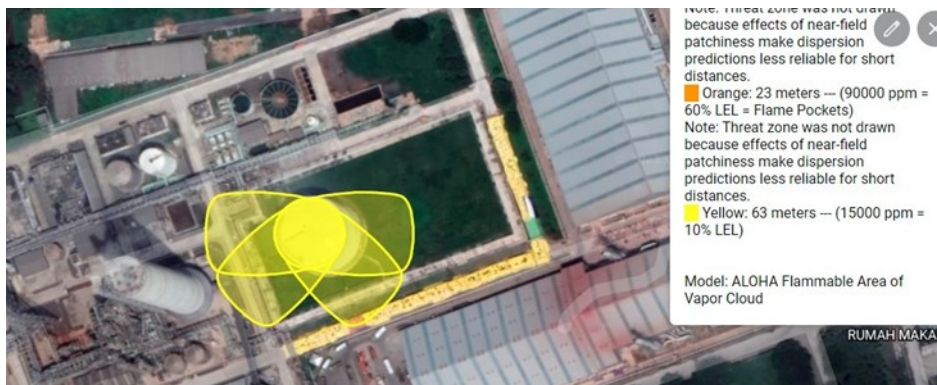
bersifat terbakar, awan uap ini juga mempunyai sifat toksik. Walaupun kemungkinan kebakaran minim, namun tetap waspada dengan tingkat toksisitas awan uap. Oleh karena itu, karyawan pabrik maupun masyarakat jug harus tetap waspada terhadap kemungkinan yang terjadi. Upaya mitigasi juga dapat dilakukan seperti penyediaan alat pemadam atau penyembur air di sekitar tangki dan seperti mitigasi-mitigasi sebelumnya yang mencegah terjadinya kebocoran yang intensif dari amonia dari tangki.



Gambar 16. Grafik konsentrasi amonia yang tersebar tiap satuan jarak dari sumber kebocoran tangki untuk *flammable area* pada musim hujan



Gambar 17. Hasil *map plotting* dari *threat zone* ALOHA ke wilayah tangki untuk *flammable area of vapor cloud* pada musim kemarau



Gambar 18. Hasil *map plotting* dari *threat zone* ALOHA ke wilayah tangki untuk *flammable area of vapor cloud* pada musim hujan

4. Kesimpulan

Efek kebocoran tangki penyimpanan amonia atau kecelakaan akibat kebocoran tangki yang memungkinkan terjadi setelah dilakukan simulasi ALOHA yaitu *pool fire*, BLEVE, *toxic vapor cloud*, dan *flammable area of vapor cloud*. Efek *pool fire* memaparkan radiasi termal mencapai radius zona bahaya 57 meter pada musim kemarau dan 58 meter pada musim hujan. Paparan radiasi termal

efek *pool fire* ini tidak sampai ke pemukiman penduduk. Efek BLEVE memaparkan radiasi termal mencapai radius zona bahaya 2,7 km pada musim kemarau dan musim hujan. Paparan radiasi termal efek BLEVE ini mencapai pemukiman penduduk.

Penyebaran gas/awan uap toksik yang dihasilkan dari kebocoran tangki amonia mencapai radius 2,2 km untuk skenario musim kemarau dan

2,3 km untuk musim hujan. Besar konsentrasi pada sepanjang zona bahaya tersebut mempunyai rentang dari jarak terjauh yaitu 25 ppm hingga lebih dari 1500 ppm.

Jumlah konsentrasi amonia yang tersebar ke lingkungan hanya terbatas sekitar 10% (150 ppm) dari konsentrasi LEL senyawa amonia. Kebakaran akibat awan uap sangat minim dapat terjadi dikarenakan syarat konsentrasi LEL amonia belum terpenuhi.

Daftar Pustaka

- [1] R. T. Widodo and T. Soehartanto, "Perancangan safety instrumented system pada proses loading PT Pertamina (Persero) Refinery Unit VI Balongan," *J. Tek. POMITS*, vol. 2, no. 2, pp. 366–371, 2013.
- [2] Y. Altun, "The dynamic control of water tank process system," presented at the Proceedings of 2016 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX, Romania, 2016, pp. 56–61.
- [3] T. Saboo and E. A. Quadrelli, "Photoproduction of Ammonia," in *Studies in Surface Science and Catalysis*, Elsevier, 2019, pp. 47–63. doi: 10.1016/B978-0-444-64127-4.00003-3.
- [4] United States Environmental Protection Agency, "Chemical Safety Alert: Hazards of Ammonia Releases at Ammonia Refrigeration Facilities (Update): August 2001," *Chemical Safety Alert*, pp. 358–362, 2001.
- [5] K. Than, "Explosion highlights dangers of anhydrous ammonia," *Texas explosion highlights dangers of anhydrous ammonia*, Dec. 13, 2021. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/130418-west-texas-fertilizer-explosion-fire-anhydrous-ammonia-science>
- [6] E. A. Khan, "Dap-1 ammonia tank explosion: Safety and security concerns in chemical process plant in bangladesh," *Int. J. Petrochem. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–11, 2016, doi: 10.15406/ipcse.2016.01.00003.
- [7] Anonim, "Explosion at Egypt fertiliser factory kills ten," *HazardEx - Explosion at Egypt fertiliser factory kills ten*, Dec. 13, 2021. <https://www.hazardexonthenet.net/article/169050/Explosion-at-Egypt-fertiliser-factory-kills-ten.aspx>
- [8] PT Pupuk Sriwidjaja, "Tentang kami - PUSRI," *Tentang kami - PUSRI*, Dec. 13, 2021. <https://www.pusri.co.id/id/about/our-journey>
- [9] Badan Pusat Statistik, "Impor pupuk menurut negara asal utama, 2017-2021," *Ekspor-Impor: Impor Pupuk Menurut Negara Asal Utama*, Dec. 13, 2021. <https://www.bps.go.id/statistictable/2014/09/08/1044/impor-pupuk-menurut-negara-asal-utama-20>
- [10] PT Pupuk Sriwidjaja, "Sekilas Perusahaan - PUSRI," *Tentang kami - PUSRI*, Dec. 13, 2021. [https://www.pusri.co.id/id/about/profile#:~:text=PT%20Pupuk%20Sriwidjaja%20Palembang%20\(Pusri,PT%20Pupuk%20Sriwidjaja%20\(Perse ro\).](https://www.pusri.co.id/id/about/profile#:~:text=PT%20Pupuk%20Sriwidjaja%20Palembang%20(Pusri,PT%20Pupuk%20Sriwidjaja%20(Perse ro).)
- [11] I. Z. Gultom, "Analisis konsekuensi penyebaran amonia pada kebocoran storage tank ammonia 2101-F di PT Pupuk Kujang Cikampek pada tahun 2009," Universitas Indonesia, Jakarta, 2009. [Online]. Available: <https://lib.ui.ac.id/file?file=digital/124321-S-5742-Analisis%20konsekuensi-Pendahuluan.pdf>
- [12] Epa, *ALOHA Instructor Manual*. Washington : Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office, 1999.
- [13] M. Attia and J. Sinha, "Improved quantitative risk model for integrity management of liquefied petroleum gas storage tanks: Mathematical basis, and case study," *Process Saf. Prog.*, vol. 40, no. 3, pp. 63–78, 2021, doi: 10.1002/prs.12217.
- [14] Salsabilla Anisah Rizky et al., "The consequences analysis of fire and explosion scenario using ALOHA software on loading area at Company X in 2020", Public Health Department Universitas Pembangunan Nasional Veteran, Jakarta.
- [15] S. A. Rizky, "The consequences analysis of fire and explosion scenario using ALOHA software on loading area at Company X in 2020," *Health Saf. Environ. J.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [16] S. S. Barjoe, M. Nikbakht, E. Malverdi, S. Z. M. Abadi, and M. R. Naghdi, "Modeling the consequences of benzene leakage from tank using ALOHA in tar refining industrial of Kerman, Iran," *Pollution*, vol. 7, no. 1, pp. 217–230, 2021.