

Received : September 2018

Accepted: Oktober 2018

Published : Oktober 2018

Perencanaan Rute Evakuasi pada Kasus Kebocoran Pipa Gas Alam dengan Simulasi Berbasis *Computational Fluid Dynamic*

Adhi Setiawan^{1*}, Tri Bagus Setiawan², Agung Nugroho², M. Luqman Ashari²
¹Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
²Program Studi Teknik K3, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

*Email: adhistw23@gmail.com

Abstract

Melting of metals generally used the energy source of natural gas which is flowed through a pipeline at high pressure. Production activities in companies that use these gases have high potential hazards because they can cause fires or explosions if not managed properly. This study aims to analyzed natural gas dispersion in the event of gas pipeline leak, determine assembly point and evacuation route map plan for workers in the event of emergency condition. Natural gas dispersion was simulated using Computational Fluid Dynamic Ansys Fluent. Results of simulation showed distribution concentration of natural gas indoors at leakage almost uniform with concentration between 5%-13,17%. At that concentration the mixture of air and natural gas has the potential to explode because it is in the range of natural gas flammability. The maximum natural gas concentration of 13.17% at a height of 12 m above the leak hole. Generated two points Assembly point based on the calculation of blast radius with total area of 58,500 cm² and can accommodate as many as 65 workers.

Keywords : CFD Simulation, Natural Gas Dispersion, Assembly point, Evacuation Rute

Abstrak

Peleburan logam pada umumnya menggunakan sumber energi dari gas alam yang dialirkan melalui pipa yang beroperasi pada tekanan yang tinggi. Kegiatan produksi pada perusahaan yang menggunakan gas tersebut memiliki potensi bahaya tinggi karena dapat menyebabkan kebakaran atau ledakan apabila tidak dikelola dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dispersi gas alam pada saat terjadi kebocoran pipa gas, menentukan assembly point dan rencana evacuation route map bagi pekerja pada saat terjadi kondisi darurat. Simulasi disperse gas alam menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* Ansys Fluent. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi konsentrasi gas alam di dalam ruangan pada saat kebocoran hampir seragam dengan konsentrasi antara 5%-13,17%. Kondisi tersebut berada pada daerah flammability gas alam sehingga berpotensi menimbulkan ledakan. Konsentrasi maksimum gas alam sebesar 13,17% terletak pada ketinggian 12 m di atas lubang kebocoran. Dihasilkan dua titik Assembly point berdasarkan perhitungan radius ledakan dengan luas total area sebesar 58.500 cm² dan dapat menampung sebanyak 65 pekerja.

Kata kunci : Simulasi CFD, Dispersi Gas Alam, Assembly Point, Rute Evakuasi

1. Pendahuluan

Gas alam merupakan sumber bahan bakar fosil yang bersih, efisien, serta ramah lingkungan sehingga seringkali digunakan sebagai bahan bakar dalam bidang industri pembangkit listrik, komersial, maupun bahan bakar bagi penduduk [1]. Distribusi gas alam dilakukan melalui jalur perpipaan dalam rangka mempertahankan ketersediaan pasokan energi nasional. Bencana alam seperti gempa bumi, korosi, serta kerusakan yang disebabkan oleh konstruksi dapat menyebabkan terjadinya pelepasan gas alam sehingga berakibat pada kecelakaan yang menyebabkan pada kerugian aset dan kematian manusia [2]. Berdasarkan data dari European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG) menunjukkan bahwa kecelakaan pelepasan gas alam dibagi menjadi tiga yaitu pelepasan dari lubang kecil (*small hole release*), pelepasan dari lubang yang besar (*large hole release*), dan pelepasan akibat pipa pecah (*ruptured pipeline release*) [3]. Meskipun frekuensi kejadian dari pelepasan gas akibat pipa yang pecah relatif lebih kecil dibandingkan frekuensi kejadian *hole release*. Skenario dispersi yang terkait dengan pelepasan pipa yang pecah jauh lebih besar daripada *hole release* [4].

Gas alam memiliki kandungan utama berupa gas metana yang bersifat *flammable* (mudah terbakar) serta *explosive* (mudah meledak). Jika konsentrasi dari campuran gas (gas alam dan udara) yang telah mencapai batas *flammability* terkontak dengan api, maka dapat menyebabkan gas terignisi dan meledak sehingga menimbulkan kerugian ekonomi yang besar serta korban jiwa. Transmisi gas alam jarak jauh melalui jalur perpipaan dengan desain diameter pipa yang besar dan tekanan gas yang tinggi merupakan cara ekonomis namun meningkatkan risiko kebocoran gas [3]. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang baik tentang karakteristik dispersi gas alam dalam menentukan potensi dan dampak bahaya kebakaran atau ledakan yang disebabkan oleh kebocoran gas alam.

Studi eksperimen pelepasan gas alam dari pipa gas bertekanan tinggi memiliki

risiko yang relatif tinggi serta berbiaya tinggi. Bahkan, secara eksperimen cukup sulit untuk memperoleh data dengan tingkat akurasi yang tinggi. Perkembangan teknik komputasi saat ini telah mendorong simulasi secara numerik untuk menganalisis dispersi pelepasan gas di atmosfer [5,6].

Metode komputasi dispersi pelepasan dari gas alam dapat dikategorikan menjadi tiga antara lain *integral models*, *box* atau *top-hat models*, dan *Navier-Stokes models*. *Integral models* (model PHAST) menggunakan persamaan aljabar untuk menentukan menyelesaikan persamaan dispersi gas dan pada umumnya penggunaannya terbatas pada permukaan yang datar dan satu sumber perpindahan panas (dari permukaan). Model *box* atau *top-hat* (model ALOHA) tergantung pada tingkat kompleksitas persamaan konservasi yang perlu diselesaikan. Model Navier-Stoke merupakan pemodelan tiga dimensi yang tergantung pada waktu, persamaan konservasi massa, momentum, energi, dan perpindahan spesies (*species transport*) [7]. Pemodelan kebocoran dan dispersi gas alam merupakan langkah paling kritis dalam menilai risiko kebakaran dan ledakan di suatu ruang. Beberapa model dan metode tradisional yang digunakan untuk mempelajari dispersi gas berbahaya di atmosfer saat ini umumnya telah diselesaikan dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD).

Metode CFD pada dasarnya dikembangkan berdasarkan prinsip persamaan konservasi massa, momentum, dan energi. Simulasi CFD saat ini telah banyak diaplikasikan dan divalidasi untuk menganalisis dispersi gas di dalam lingkungan terbuka maupun tertutup [8]. Beberapa keunggulan metode simulasi dengan menggunakan CFD dalam menganalisis dispersi gas berbahaya yaitu biaya yang relatif murah, cepat, serta akurat. Beberapa kode CFD yang seringkali digunakan untuk memodelkan aliran kompleks dalam geometri 3D antara lain yaitu Fluent dan CFX. Penggunaan CFD pada umumnya memiliki keterbatasan dalam

menganalisis dispersi gas di atmosfer karena skala turbulensi serta aliran fluida memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi. Intensitas turbulensi di atmosfer jauh lebih besar daripada situasi dalam skala kecil (misalnya kebocoran gas pada pipa di ruang tertutup) yang biasanya ditangani oleh kode tersebut [9].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan simulasi dari disperse gas menggunakan metode CFD. Newton dkk [10] telah memodelkan ventilasi udara di dalam ruangan kapal dengan menggunakan CFD. Hasil simulasi tersebut diaplikasikan untuk mengoptimalkan sistem ventilasi di dalam ruang mesin. Qin [11] menggunakan simulasi CFD Fluent untuk mensimulasikan kebocoran dan pelepasan gas alam dari jaringan pipa yang memiliki elevasi serta menganalisis beberapa faktor yang berpengaruh seperti kecepatan angin, tekanan gas, serta penghalang. Liu dkk [12] mengusulkan model untuk memprediksi laju pelepasan, ekspansi atmosfer serta dispers gas CO₂ dari pipa bertekanan tinggi. Van Hooff dan Blocken [13] melakukan penelitian tentang simulasi CFD dari sistem ventilasi alami pada ruang stadion semi tertutup di daerah perkotaan dengan menggunakan metode peluruhan CO₂. Pemodelan simulasi tersebut menggunakan model *unsteady state Reynolds-averaged Navier Stokes (RANS)* untuk menghitung peluruhan CO₂. Mocellin dkk [14] mensimulasikan tentang *accident* pelepasan gas CO₂ dari pipa serta terkait dengan konsekuensi akibat sublimasi es kering. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat bahaya meningkat seiring dengan penurunan kecepatan rata-rata angin serta suhu lingkungan yang tinggi.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa simulasi CFD hanya terbatas pada sistem ventilasi alami serta dispersi gas CO₂ yang bersifat *non-toxic* serta *non-flammable*. Investigasi tentang disperse gas yang bersifat *flammable* jarang dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Gas alam yang didistribusikan pada tekanan tinggi melalui sistem perpipaan memiliki

potensi risiko bahaya yang tinggi apabila terjadi kebocoran. Gas alam yang terlepas di udara serta mencapai batas *flammability* dapat menimbulkan risiko kebakaran atau ledakan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dispersi gas alam pada saat terjadinya kebocoran pipa gas dengan menggunakan simulasi CFD serta menentukan *assembly point* dan rute evakuasi bagi pekerja di sekitar lokasi kebocoran pipa gas alam saat kondisi darurat terjadi. *Assembly point* tersebut sebagai tempat berkumpul sementara ketika terjadi keadaan darurat. Keberadaan *assembly point* merupakan syarat mutlak bagi pekerja untuk memperoleh tempat yang lebih aman. Oleh karena itu, untuk mempermudah pekerja menuju *assembly point* diperlukan *evacuation route map* sebagai pemandu agar tidak terjadi kepanikan yang menyebabkan kekacauan antar pekerja ketika terjadi keadaan darurat.

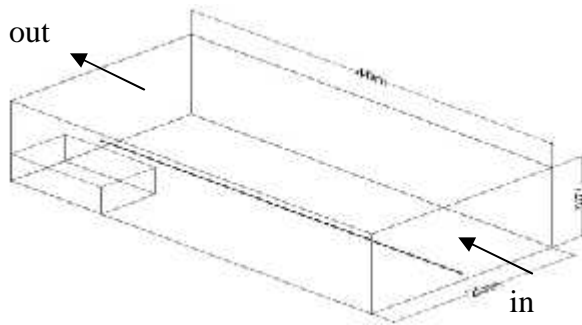
2. Metoda Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terhadap simulasi kebocoran gas alam dilakukan pada salah satu perusahaan yang bergerak di bidang produksi logam baja. Unit LNG di perusahaan tersebut berperan penting dalam memasok kebutuhan energi yang digunakan dalam memproduksi *billet* dan *wire rod*. Distribusi gas alam menuju ke *plant* dilakukan dengan menggunakan sistem perpipaan pada kondisi operasi 25 bar dan 15°C melalui pipa berdiameter dalam 4 inch dengan ketebalan 0,196 inch. Flowrate gas alam yang mengalir di dalam pipa sebesar 500.000 ft³/hari.

Gambar 1 menunjukkan geometri ruangan disertai dengan letak pipa gas alam. Pipa distribusi gas alam tersebut melintasi suatu ruangan yang berukuran panjang 40 m, lebar 20 m, dan tinggi 12 m serta berada pada ketinggian 1 meter di atas permukaan tanah. Letak kebocoran pipa diasumsikan terjadi pada *ball valve* yang terletak pada jarak 10,2 m dari sisi input gas dan udara

pada Gambar 1. Pemilihan letak skenario kebocoran pada ball valve karena memiliki kemungkinan yang besar sebagai penyebab kebocoran pada pipa [15].



Gambar 1. Geometri Ruang Pipa Gas Alam

Penelitian ini difokuskan pada pelepasan gas alam dari pipa gas yang mengalami kebocoran. Pemilihan skenario kebocoran pada penelitian ini didasarkan pada guideline yang dikeluarkan oleh *Center of Chemical Proses Safety* (CCPS) dengan memilih skenario dengan kemungkinan terburuk (*worst case*) dengan diameter kebocoran pipa sebesar diameter pipa (*full bore rupture*) yaitu 4 inch [15]

2.2. Simulasi CFD

Distribusi konsentrasi gas alam di yang terlepas di udara pada saat pipa gas mengalami kebocoran dihitung dengan menggunakan Software Computational Fluid Dynamic (CFD) Ansys Fluent 15.0 yang didasarkan pada metode finite volume dalam domain tiga dimensi (3D) dalam menyelesaikan problem persamaan konservasi massa, momentum, dan energi [16]. Simulasi CFD dengan menggunakan Ansys Fluent telah divalidasi dan terbukti cukup akurat dalam memprediksi dispersi gas berbahaya di udara baik di dalam ruang terbuka maupun ruang tertutup [3].

Tahapan awal simulasi CFD dilakukan dengan membuat geometri ruangan dalam bentuk 3D serta proses *meshing* dengan software design modeler yang telah tersedia pada Ansys Fluent 15.0. Geometri ruangan, dimensi ruang sebagaimana yang telah didefinisikan pada domain *meshing* simulasi berbentuk

tetrahedral yang terdiri dari 111236 *node*. Selanjutnya setelah dilakukan *meshing* maka dilanjutkan dengan tahapan solver.

Turbulensi aliran fluida menggunakan *k-standart* karena model turbulensi tersebut cukup akurat serta memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen sehingga sering digunakan pada simulasi aliran fluida dan perpindahan panas. Kondisi batas yang digunakan antara lain tekanan gas sebesar 25 bar.g dengan suhu 15°C. Kondisi *ambient* diasumsikan bertekanan 1 atm dan suhu udara 30°C. Kondisi batas pada simulasi tersebut yaitu lubang kebocoran pada pipa sebagai input gas alam. Sisi input dan outlet pada Gambar 1 diset sebagai *inflow* dan *outflow* udara. Dinding ruangan bangunan dan dinding pipa di set sebagai *stationary wall*.

2.3. Perhitungan Radius Ledakan

Perhitungan radius ledakan (*blast*) menggunakan perhitungan *Vapour Cloud Explosion* (VCE). Pada perhitungan radius ledakan dilakukan dengan mengkonversi massa bahan bakar ke massa TNT sebagaimana dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$W_{TNT} = \frac{\mu M E_c}{E_{TNT}} \quad (1)$$

W_{TNT} adalah massa TNT (kg). Parameter μ merupakan koefisien empiris dari ledakan. M merupakan massa dari bahan bakar (kg). E_c merupakan energi panas pembakaran metana dan E_{TNT} merupakan energi panas pembakaran TNT (KJ/kg). Nilai koefisien empiris ledakan sebesar 3% dari total panas pembakaran awan bahan bakar atau vapour cloud explosion [15]. Nilai *scaled distance* pada *blast overpressure* dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Z_e = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (2)$$

Dengan Z_e merupakan puncak dari overpressure (Kpa). R merupakan jarak dari titik ledakan (m). *Overpressure* yang terjadi

pada saat terjadi ledakan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_s = \frac{P_o}{P_a} = \frac{1616[1 + (Z_e)^2]}{\sqrt{1 + (\frac{Z_e}{0.048})^2} \sqrt{1 + (\frac{Z_e}{0.32})^2} \sqrt{1 + (\frac{Z_e}{1.35})^2}} \quad (3)$$

Dengan $P_s = \text{scaled overpressure}$, $P_a = \text{tekanan ambient (Pa)}$, $P_o = \text{peak overpressure (Pa)}$.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi CFD pada Gambar 2 menunjukkan bahwa kebocoran pipa gas alam dengan skenario *full bore rupture* di dalam ruangan menyebabkan meningkatnya konsentrasi gas metana di udara. Distribusi konsentrasi gas metana disajikan dalam bentuk kontur fraksi gas pada ketinggian 30 cm serta pada ketinggian 12 meter dari permukaan tanah. Pada ketinggian 12 m di atas permukaan tanah dari lubang kebocoran menunjukkan konsentrasi maksimum gas metana di udara yaitu mencapai 13,17%.

Hal tersebut disebabkan ketika gas alam dilepaskan dengan kecepatan yang tinggi menghasilkan profil berbentuk jet pada arah vertikal hingga mencapai atap bangunan setelah itu mengalami perubahan arah akibat tumbukan dengan dinding atap menuju ke bawah. Pada umumnya konsentrasi gas metana di dekat lubang kebocoran memiliki konsentrasi metana lebih tinggi bila dibandingkan dengan area dispersi gas. Perbedaan densitas gas metana dan udara memberikan kontribusi terhadap kecepatan disperse gas. Gas metana memiliki densitas relatif sebesar 0,554 bila dibandingkan dengan udara. Dengan kondisi tersebut menyebabkan metana lebih ringan daripada udara sehingga proses dispersi gas menjadi lebih cepat [3].

Faktor angin dapat mempengaruhi distribusi konsentrasi gas metana di dalam ruangan. Keberadaan angin menyebabkan turbulensi udara di dalam ruangan meningkat sehingga dapat mempercepat proses dispersi gas di udara. Selain itu, transportasi awan gas dipengaruhi oleh angin yang menyebabkan awan gas bergerak

menuju arah searah terhadap arah angin (outlet udara). Hal ini dapat diamati terdapat zona di dekat inlet udara yang memiliki konsentrasi gas metana yang cukup tinggi yaitu pada range 3%-6%.

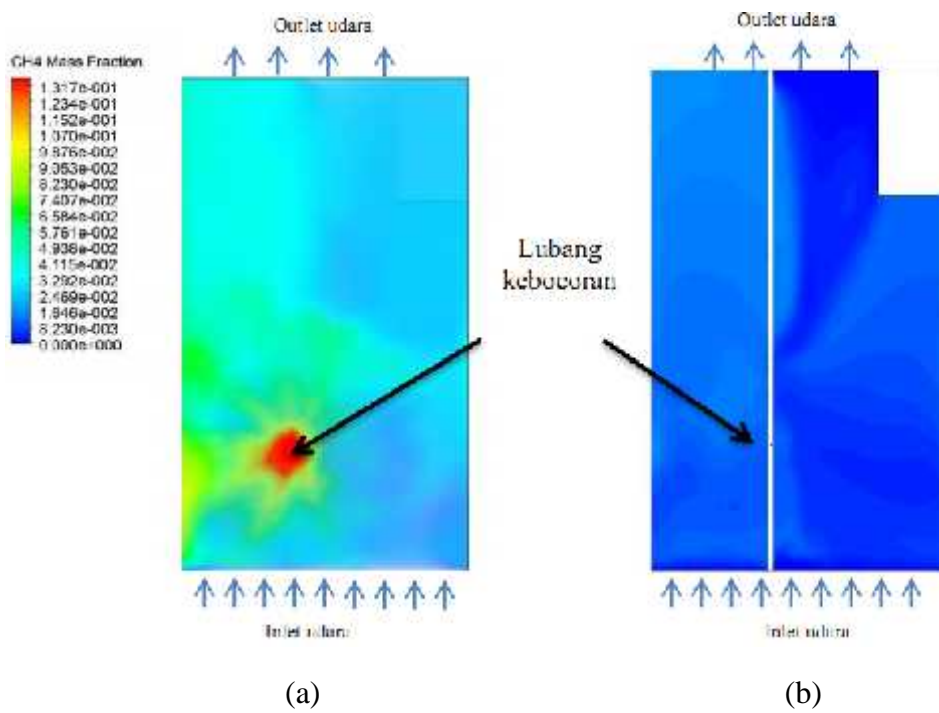
Pada Gambar 2 (b) menunjukkan bahwa pada ketinggian 30 cm di atas permukaan tanah masih memiliki konsentrasi gas metana yang relatif rendah dibandingkan dengan pada daerah dengan ketinggian 12 m di atas permukaan tanah. Hal ini disebabkan gas metana memiliki densitas yang lebih ringan sehingga udara memberikan pengaruh efek *buoyancy* yang menyebabkan konsentrasi metana lebih tinggi pada daerah di atas lubang kebocoran pipa.

Hasil distribusi konsentrasi pada gambar 3 menunjukkan bahwa kondisi udara pada ketinggian 12 m di atas pipa memiliki potensi bahaya kebakaran atau ledakan yang relatif tinggi karena konsentrasi gas alam berada diantara interval LEL dan UEL yaitu sebesar 5%-15%. Konsentrasi gas metana pada daerah tersebut pada umumnya didominasi oleh daerah pada range konsentrasi gas metana yang didominasi antara 5% hingga 13,17%.

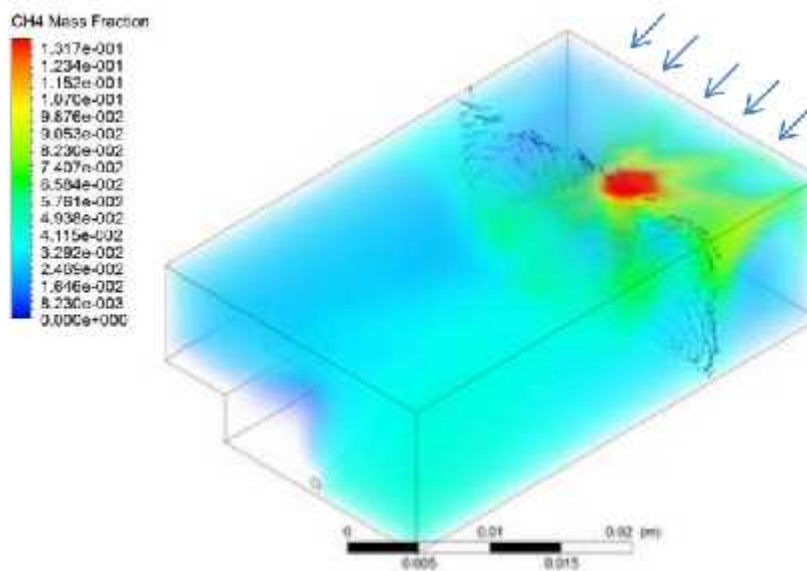
Gambar 2 menunjukkan bahwa semburan gas metana dapat mencapai atap ruang akibat tekanan gas yang relatif tinggi yaitu sekitar 25 bar. Konsentrasi maksimum gas metana terletak tepat di atas lubang kebocoran yang terletak pada ketinggian 12 m dengan konsentrasi sebesar 13,17%. Kondisi dispersi gas metana terlihat hampir merata pada keseluruhan ruangan akibat perbedaan densitas metana dan udara yang cukup signifikan.

Pengaruh *blast overpressure* pada manusia secara umum dikategorikan sebagai hasil perubahan tekanan. Data OGP [17] telah memberikan rekomendasi terhadap tingkat risiko kematian (*lethality*) terhadap kasus ledakan *overpressure*. Pada kasus ledakan yang terjadi pada ruang terbuka yang berdekatan dengan bangunan atau struktur yang tidak terlindungi memiliki tingkat risiko kematian antara lain sebesar 1% pada *overpressure* 25 kpa, 30% pada

overpressure 35 kpa, serta 100% pada overpressure 50 kpa.



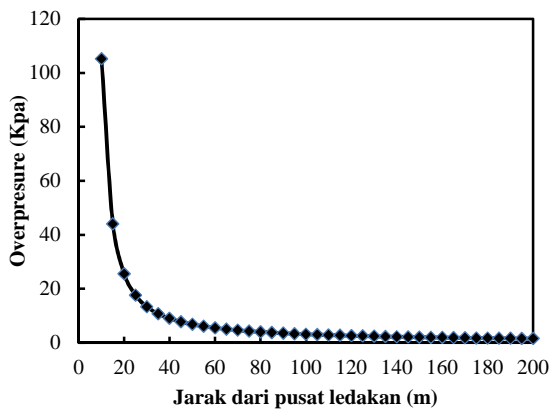
Gambar 2. Profil Konsentrasi Gas Alam (a) pada 12 m di atas Permukaan Tanah (b) pada 0,3 m di atas Permukaan Tanah



Gambar 3. Profil Konsentrasi Gas Alam di dalam Ruang Saat Kebocoran Pipa Gas

Selain itu, *overpressure* lebih rendah dari 21 kpa dapat menyebabkan cedera non-mematikan seperti kerusakan paru-paru dan pecahnya gendang telinga. Pada dasarnya *overpressure* disebabkan oleh pelepasan gas metana yang menyebabkan terbentuknya awan uap (*vapour cloud*).

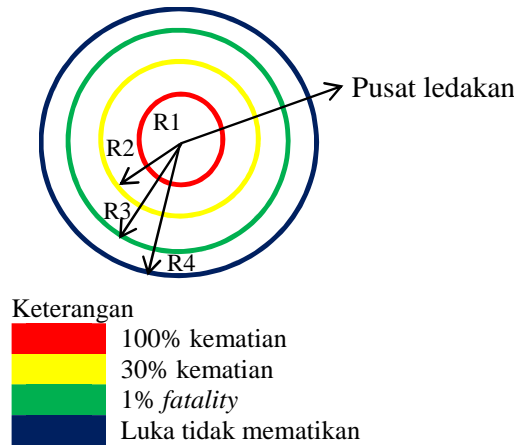
Adanya sumber ignisi pada awan uap tersebut menyebabkan terjadinya *Vapour Cloud Explosion*. *Vapor Cloud Explosion* (VCE) merupakan kumpulan uap gas yang berasal dari pelepasan gas yang mudah terbakar di atmosfer terbuka dimana gas tersebut pada kondisi tertentu akan menyebabkan ledakan. VCE terjadi ketika gas metana yang terlepas dari sistem secara terus menerus membentuk awan gas mudah terbakar. Ledakan menghasilkan puncak *overpressure* yang dapat merusak peralatan proses disekitarnya dan dapat menyebabkan kematian. Gambar 4 menunjukkan bahwa besarnya *overpressure* yang dihasilkan menurun seiring dengan meningkatnya jarak dari pusat ledakan. Hal mengindikasikan bahwa semakin jauh jarak dari pusat ledakan risiko baik kematian maupun kerusakan yang ditimbulkan semakin kecil [15].



Gambar 4. Grafik *Overpressure* pada Saat Terjadinya Ledakan

Berdasarkan grafik pada Gambar 5 menunjukkan bahwa besarnya tingkat risiko 100% kematian dan 30% kematian pada manusia di luar ruangan masing-masing

sebesar 14,1 m dan 16,7 m. Risiko *fatality* sebesar 1% serta luka tidak mematikan diperoleh pada radius masing-masing sebesar 20 m dan 23 m.



Gambar 5. Radius Ledakan Akibat Kebocoran Pipa Gas berdasarkan Tingkat Risikonya

Lokasi *assembly point* yang sesuai dengan Kepmen PU No. 10/KPTS/2000. Lokasi yang dijadikan sebagai lokasi *assembly point* yaitu area belakang pabrik bagian timur (AP1), area sebelah selatan sumber emisi (AP 2) dengan jarak yang telah didapatkan dari hasil perhitungan VCE. Berdasarkan rekomendasi Ma dkk. [18] bahwa besarnya *overpressure* antara 1,5-4,5 kpa merupakan ambang batas kerusakan terkecil dari struktur bangunan yang diperbuat dengan baja atau beton. Oleh karena itu, letak *assembly point* dipilih pada titik yang menimbulkan risiko terkecil baik terhadap kematian maupun kerusakan. Besarnya radius dengan dampak kerusakan terkecil dengan peak *overpressure* sebesar 3 kpa yaitu pada jarak 101 m. Kriteria luas *space* untuk *assembly point* seluas 900 cm²/orang. Masing-masing *assembly point* tersebut memiliki luas AP 1 sebesar 22.500 cm² dan AP2 sebesar 36.000 cm². Total luas area *assembly point* tersebut ialah 58.500 cm² yang dapat menampung jumlah pekerja di area perusahaan di dekat lokasi ledakan sebanyak 65 orang.

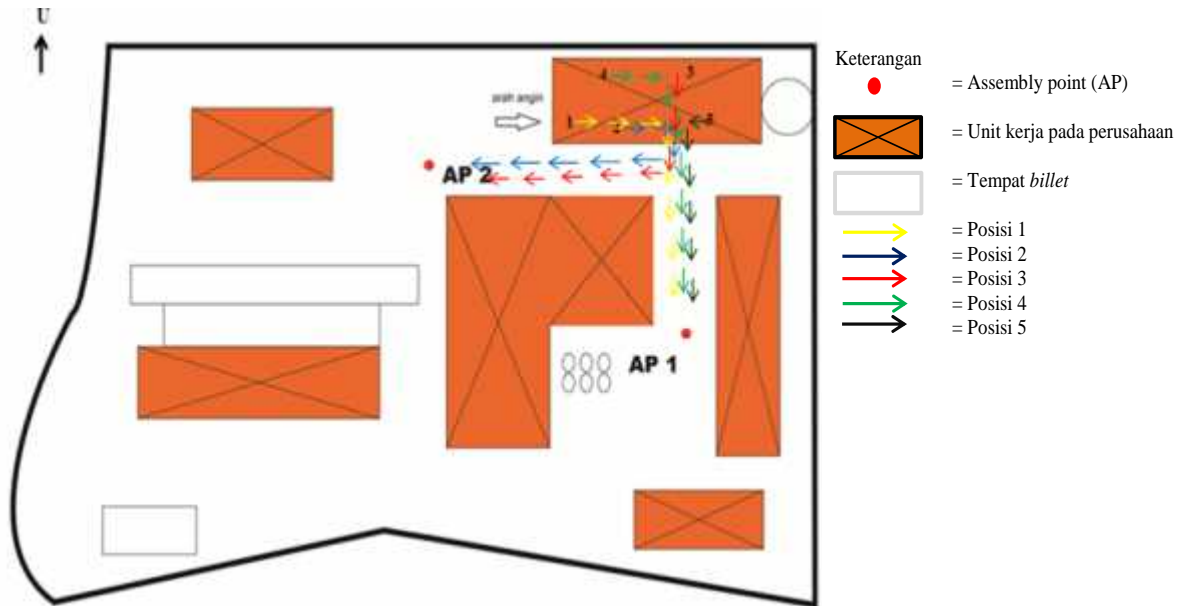
Penentuan peta rute evakuasi yang telah ditentukan ini mempertimbangkan alternatif

jarak terpendek yang dapat ditempuh untuk mencapai *assembly point* terdekat. Data jarak yang ditempuh pekerja yang berada di plant untuk mencapai *assembly point* terdekat disajikan pada Tabel 1. Pada penelitian ini ditetapkan lima titik posisi pekerja yang berada pada *plant*. Posisi tersebut didasarkan pada keadaan keseharian dari pekerja di *plant* tersebut. Posisi serta jalur pekerja menuju ke

assembly point pada kelima titik tersebut digambarkan pada Gambar 6.

Tabel 1. Jarak pekerja terhadap *assembly point* (AP)

Posisi pekerja	Jarak yang ditempuh pada AP 1 (m)	Jarak yang ditempuh pada AP 2 (m)
1	136	181
2	104	102
3	146	139
4	124	127
5	138	140



Gambar 6. Jalur Evakuasi Pekerja dan Letak *Assembly Point* pada *Plant*

Penentuan jalur evakuasi menuju *assembly point* dipertimbangkan berdasarkan jarak tempuh terdekat yang dilalui oleh pekerja pada saat terjadi bahaya ledakan. Berdasarkan data pada Tabel. 1 menunjukkan bahwa posisi pekerja pada titik 1., dan 5 pada saat terjadi bencana direkomendasikan menuju *assembly point* 1 sedangkan pada posisi pekerja pada titik 2 dan 3 direkomendasikan untuk menuju *assembly point* 2.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi CFD dengan software Fluent menunjukkan bahwa kebocoran pipa gas alam berpotensi menimbulkan bahaya kebakaran atau ledakan

yang menimbulkan kerusakan maupun korban jiwa. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa konsentrasi gas alam hampir merata di seluruh ruangan dengan nilai maksimum mencapai 13,17% pada ketinggian 12 m tepat diatas lubang kebocoran pipa. Dengan nilai tersebut maka area tersebut masuk pada katagori berbahaya karena konsentrasi gas alam berada diantara nilai LEL dan UEL sehingga berisiko menyebabkan bahaya ledakan.

Pada penelitian ini dihasilkan lima titik lokasi pekerja dan dua titik lokasi *assembly point* (AP1 dan AP 2) yang mampu menampung karyawan yang bekerja pada area Unit LNG dengan jumlah sebanyak 65 pekerja. Posisi pekerja pada titik 1,4, dan 5 direkomendasikan menuju *assembly point* 1

sedangkan posisi pekerja pada titik 2 dan 3 direkomendasikan menuju *assembly point* 2. Pertimbangan tersebut didasarkan pada jarak tempuh terdekat yang dilalui pekerja menuju *assembly point*.

5. Saran

Diperlukan penelitian lebih lanjut tentang *dispersi* dari kebocoran dengan menggunakan permodelan turbulensi *shear-stress transport* (SST) k- dengan jumlah mesh yang lebih besar sehingga hasil simulasi *dispersi* gas menjadi lebih akurat.

6. Daftar Pustaka

- [1] Y. Guo, W.W. Cao, P. Yan, C.X. Yu, S.Y. Qian, "Application and Research Progress of Heater in Natural Gas Industry," *Heat Transfer Engineering*, vol. 32, no. 11-12, pp. 1003-1008, 2011
- [2] H. Zhu, Z. Mao, Q. Wang, and J. Sun, "The Influences of Key Factors on The Consequences Following The Natural Gas Leakage From Pipeline," in *Procedia Engineering*, 2013, vol. 62, pp. 592-601
- [3] Y. Deng, H. Hu, B. Yu, D. Sun, L. Hou, and Y. Liang, "A Method for Simulating The Release of Natural Gas from The Rupture of High-Pressure Pipelines in Any Terrain," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 342, pp. 418-428, 2018
- [4] G. Dong, L. Xue, Y. Yang, and J. Yang, "Evaluation of Hazard Range for the Natural Gas Jet Released from a High-Pressure Pipeline: A Computational Parametric Study," *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, vol. 23, pp. 522-530, 2010
- [5] X. Liu, A. Godbole, C. Lu, G. Michal, and P. Venton, "Study of the Consequences of CO₂ Released from High-Pressure pipelines", *Atmospheric Environment*, vol 116, pp. 51-64, 2015
- [6] A. Setiawan, D.N. Hanifah, A. Nugroho, and D. Dermawan, Analisis Potensi dan Dampak Kebocoran Gas Hidrogen Pada Hydrogen Plant Di Industri Pelumas, *Journal of Research and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 11-22, 2017
- [7] W.C. Ikealumba, and H. Wu, "Modeling of Liquefied Natural Gas Release and Dispersion: Incorporating a Direct Computational Fluid Dynamics Simulation Method for LNG Spill and Pool Formation," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 55, pp. 1778-1787, 2016
- [8] B. Sun, R.P. Utikar, V.K. Pareek, and K. Guo, "Computational Fluid Dynamics Analysis of Liquefied Natural Gas Dispersion for Risk Assessment Strategies," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, pp. 117-128, 2013
- [9] S. Dharmavaram, and S.R. Hanna, "Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling of Toxic Gas Dispersion in the Vicinity of Complex Buildings, Structures, and Topography," in *ICHEME Symposium Series No. 153* Edinburgh 2007, 2007
- [10] W. Newton, M. Lewis, D. Carswell, N.P. Lavery, B. Evans, D. Bould, and D. Sienz, "Investigating The Thermal Profile of a Marine Vessel Engine Room Through Simulation with Field Measurements," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, pp. 1360-1370, 2014
- [11] Z.X. Qin, "Numerical Simulation of Natural Gas Leakage, Dispersion and Explosion," master thesis", Southwest Petroleum University China, 2007
- [12] X. Liu, A. Godbole, C. Lu, G. Michal, and P. Venton, "Source Strength and Dispersion of CO₂ Releases from High-Pressure Pipelines: CFD Model using Real Gas Equation of State," *Applied Energy*, vol. 126, pp. 56-68, 2014
- [13] T. van Hooff, and B. Blocken, "CFD Evaluation of Natural Ventilation of Indoor Environments by the Concentration Decay Method: CO₂ Gas Dispersion from a Semi-Enclosed Stadium," *Building and Environment*,

- vol. 61, pp. 1-17, 2013
- [14] P. Mocellin, C. Vianello, and G. Maschio, "Carbon Capture and Storage Hazard Investigation: Numerical Analysis of Hazards Related to Dry Ice Bank Sublimation Following Accidental Carbon Dioxide Releases," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 43, pp. 1897-1902, 2015
- [15] Center for Chemical Process Safety (CCPS), "*Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Second Edition*. American Institute of Chemical Engineers, 2000
- [16] W. Widiyastuti, A. Setiawan, S. Winardi, and H. Setyawan, "Particle Formation of Hydroxyapatite Precursor Containing Two Components in a Spray Pyrolysis Process," *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 104-113, 2014
- [17] OGP (International Association of Oil & Gas Producers), Risk Assessment Data Directory: Vulnerability of humans, Report no. 434-14.1, 2010
- [18] L. Ma, L. Cheng, and M. Li, "Quantitative Risk Analysis of Urban Natural Gas Pipeline Networks Using Geographical Information Systems," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, pp. 1183-1192, 2013