



Pemanfaatan LNG sebagai Bahan Bakar Kendaraan Umum di Yogyakarta: Tinjauan Aspek Keselamatan dalam Pengangkutan dan Penyimpanan

Didik Supriyadi^{*1}, Moh. Fahrurrozi¹, Indra Perdana¹

¹ Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jalan Grafika No. 2, Kampus UGM, D.I.Yogyakarta
[*DidikSupriyadi21@gmail.com](mailto:DidikSupriyadi21@gmail.com)

Abstract

Liquefied natural gas (LNG) has economic and technical benefits as an alternative fuel for public transportation and heavy-duty vehicle. It is also safer, more reliable and more secure from domestic energy supply. However, LNG possesses different hazard compared to conventional automotive fuel. This paper aims to discuss about risk analysis on LNG transportation and storage as part of an energy supply system for public transportation in Yogyakarta city. This study was conducted for transportation routes between receiving terminal in Semarang port and storage facility in Yogyakarta. Storage capacity was assumed to serve for 12-day-operation which is equivalent to three storages with a capacity of 53 m³ each. The results of risk analysis show that the causes of LNG release were failure of loading LNG to road tank and unloading to storage facility with frequency of $2,4 \times 10^{-3}$ failures/year and $7,4 \times 10^{-5}$ failures/year respectively. The study also found the most probable outcomes that give significant consequences were pool fire, fire ball, vapor cloud explosion and vapor cloud. These results have led to the conclusion that LNG transportation and storage to support public transportation in Yogyakarta city is safe and reliable as long as a good standard operation procedure is consistently implemented.

Keywords: LNG, risk analysis, failure, transportation

Pendahuluan

Pengangkutan dan penyimpanan bahan kimia atau bahan berbahaya memiliki potensi risiko yang besar terhadap manusia dan lingkungan apabila terjadi kebocoran. Penyebab utama tingginya potensi risiko apabila terjadi kebocoran selama pengangkutan dan penyimpanan disebabkan kenaikan jumlah penduduk dan pemukiman yang tidak terkontrol. Salah satu contoh bahan yang diangkut dan disimpan adalah bahan bakar kendaraan bermotor. LNG merupakan salah satu alternatif bahan bakar yang dapat diterapkan di Indonesia karena cadangan LNG mencapai 103,3 TSCF (BP, 2014). LNG sebagian besar tersusun oleh metana dan disimpan pada suhu kriogenik. Ketika menguap, LNG membentuk campuran dengan udara yang dapat terbakar dengan konsentrasi 5% hingga 15%. LNG merupakan senyawa yang tidak mudah meledak. Energi yang dibutuhkan untuk membakar campuran LNG-udara adalah 0,29 MJ (BP., 2007). LNG memiliki volume 600 kali lebih kecil dibandingkan dengan volume gas alam pada suhu ruang (Vanem, et al., 2008) dimana setiap 1 m³ gas alam hanya menghasilkan 1,67 liter LNG. Penggunaan LNG sebagai bahan bakar kendaraan umum akan mengurangi emisi CO₂, NO_x sebesar 23%, 92% serta tidak menghasilkan senyawa SO_x dan *particulate matter* (Andreola, 2012). LNG memiliki angka oktan yang tinggi yaitu 120+ (U.S. Department of Energy, 2004) dan kandungan energi bruto (HHV) sebesar 25 MJ/l (Kumar dkk., 2011). Jenis kendaraan umum yang cocok menggunakan LNG adalah jenis kendaraan yang pengisian dilakukan setiap hari seperti kendaraan umum. Hal ini disebabkan apabila pengisian tidak dilakukan setiap hari, maka LNG akan mudah menguap karena gradien suhu yang besar antara LNG dan lingkungan (Canis dkk., 2014). Selain memiliki banyak kelebihan, LNG masih memiliki bahaya diantaranya *asphyxiation*, panas radiasi, ledakan dan BLEVE. Penelitian tentang analisis risiko LNG telah dilakukan diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Plans-Cuchi, dkk. (2004) melakukan investigasi kecelakaan truk pengangkut LNG di Tivissa Spanyol. Hasil investigasi tersebut menyajikan fluks panas radiasi, ledakan dan menyimpulkan terjadinya BLEVE.

Pada penelitian ini dilakukan analisis risiko pada proses pengangkutan dari Pelabuhan Tanjung Mas di Semarang menuju Yogyakarta dan penyimpanan LNG di Yogyakarta. Analisis risiko meliputi membuat skenario keluarnya LNG selama pengangkutan dan penyimpanan, menentukan frekuensi untuk setiap kejadian yang mengakibatkan keluarnya LNG, menganalisis konsekuensi keluarnya LNG dan menentukan layak atau tidaknya pengangkutan LNG dari Semarang menuju Yogyakarta dan penyimpanan di Yogyakarta. Skenario keluarnya LNG dibuat dengan *fault tree analysis* (FTA) dan *event tree analysis* (ETA). Frekuensi kecelakaan dihitung berdasarkan data historis yang ada sedangkan analisis konsekuensi pada penelitian ini diantaranya menentukan kenaikan tekanan



di dalam tangki selama proses pengangkutan dan penyimpanan apabila uap LNG yang terbentuk tidak dibuang ke atmosfer, kolam api, ledakan awan uap dan awan uap. Fluks panas radiasi dari kolam api dan bola api dianalisis dengan metode *point source model* dan metode TNO (CCPS, 2000). Fluks panas radiasi akan berpengaruh langsung terhadap manusia yaitu berupa luka bakar hingga kematian. Pengaruh panas radiasi terhadap manusia dihitung dengan persamaan probit (Assael & Kakosimos, 2010). LNG yang keluar ke lingkungan dengan adanya *delayed ignition* (pengapian tertunda) akan menghasilkan ledakan awan uap sedangkan apabila tidak terjadi pengapian maka hanya menghasilkan awan uap. Ledakan awan uap dan awan uap dianalisis dengan menggunakan metode Baker-Strehlow dan Metode Britter & McQuaid. Penilaian terhadap resiko pada pengangkutan dan penyimpanan LNG didasarkan pada acuan yang dikeluarkan oleh CCPS (2001a, 2008b).

Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu untuk menentukan layak atau tidaknya pengangkutan LNG dari Semarang menuju Yogyakarta serta penyimpanan di Yogyakarta serta menentukan rute yang lebih aman pada pengangkutan LNG dari Semarang menuju Yogyakarta.

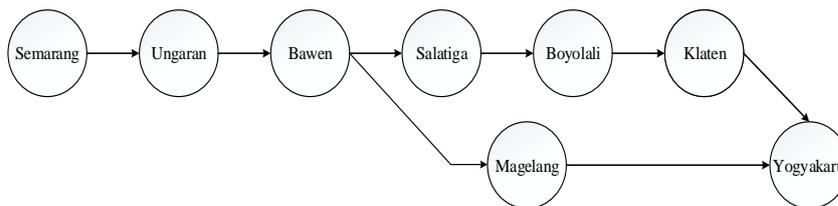
Metode Penelitian

Pada penelitian ini LNG yang digunakan untuk simulasi berasal dari PT. Badak NGL sedangkan tangki yang digunakan untuk simulasi analisis risiko pada pengangkutan dan penyimpanan memiliki volume 53 m³, diameter dalam dan luar 2,338 m dan 2,448 m, tinggi tangki dalam dan luar 12,75 m dan 12,85 m dengan tekanan desain tangki 0,67 MPa.

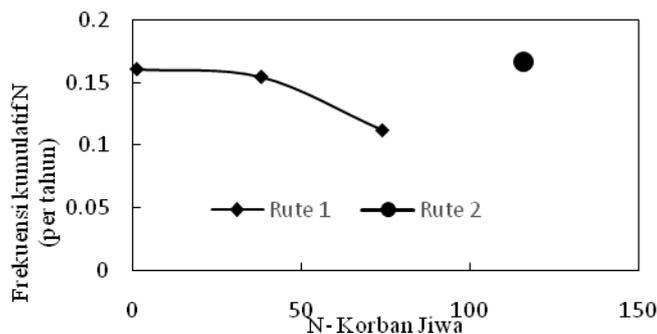
Prosedur penelitian ini adalah membuat skenario penyebab keluarnya LNG ke lingkungan selama proses pengangkutan untuk rute via Salatiga dan via Magelang dan penyimpanan di Yogyakarta. Menentukan frekuensi untuk setiap kejadian pada skenario untuk kegiatan tersebut. Analisis konsekuensi dilakukan dengan memvariasikan diameter lubang kebocoran pada tangki truk yaitu 1 in dan 3 in sedangkan pada tangki penyimpan, diameter lubang kebocoran adalah 1 in dengan memvariasikan keadaan meteorologi di lokasi penyimpanan yaitu musim hujan dan musim kemarau. Data yang diperoleh diplotkan pada grafik kartesius dengan sumbu absis berupa jarak dan sumbu ordinat berupa variable yang diamati diantaranya tekanan LNG di dalam tangki, fluks panas radiasi, dosis LNG dan kelebihan tekanan.

Hasil dan Pembahasan

Rute yang digunakan untuk pengangkutan LNG dari Semarang menuju Yogyakarta dibagi menjadi dua yaitu rute pertama yang melewati Salatiga dan rute kedua yang melewati Magelang seperti tersaji pada Gambar 1.

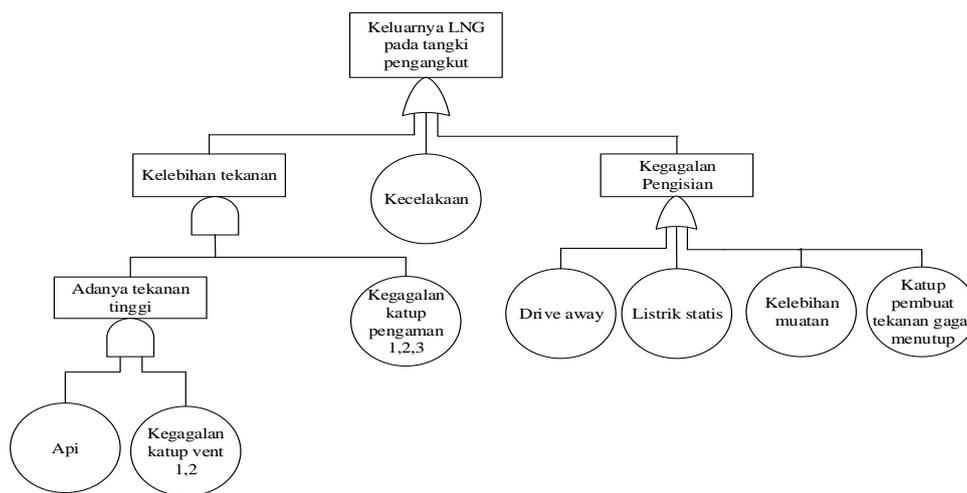


Gambar 1. Rute perjalanan Semarang-Yogyakarta

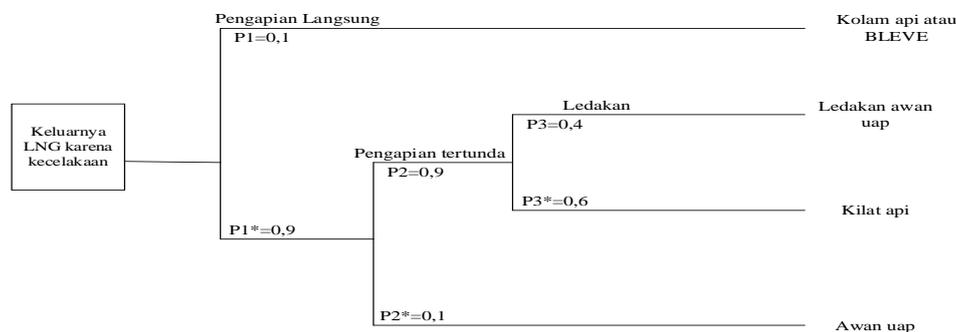


Gambar 2. Profil jumlah korban jiwa terhadap frekuensi kematian

Pemilihan rute yang aman untuk pengangkutan LNG berdasarkan data kecelakaan yang menyebabkan korban jiwa yang tersaji pada grafik F-N pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2 dapat disimpulkan bahwa rute satu relatif lebih aman dibandingkan dengan rute dua. Beberapa faktor yang menyebabkan rute dua memiliki frekuensi kumulatif korban jiwa yang lebih besar dibandingkan rute satu yaitu jalan yang sempit, memiliki tikungan yang tajam serta licinnya apabila turun hujan. Skenario keluarnya LNG dari tangki pengangkut disebabkan tiga faktor utama yaitu kecelakaan, kelebihan tekanan dan pengisian seperti yang tersaji pada Gambar 3. Pada Gambar 3 diperoleh bahwa frekuensi terbesar penyebab keluarnya LNG ke lingkungan adalah faktor pengisian, kecelakaan dan kelebihan tekanan dengan frekuensi sebesar $2,4 \times 10^{-3}$ kegagalan/tahun, $5,96 \times 10^{-8}$ - $2,18 \times 10^{-6}$ kejadian/km.tahun dan 1×10^{-15} kejadian/tahun. Penyebab utama kegagalan karena faktor pengisian adalah listrik statis. Adanya akumulasi listrik statis ini disebabkan LNG memiliki konduktivitas elektrik yang sangat rendah yaitu 1×10^{-3} pS/m (White, 1975). Ketika keluar ke lingkungan, LNG akan menghasilkan beberapa konsekuensi seperti kolam api/BLEVE, ledakan awan uap, kilat api dan awan uap yang tersaji pada Gambar 4 dengan frekuensi setiap kejadian yaitu $2,4 \times 10^{-4}$ kejadian/tahun, $7,78 \times 10^{-4}$ kejadian/tahun, $1,17 \times 10^{-3}$ kejadian/tahun dan $2,16 \times 10^{-4}$ kejadian/tahun. Penelitian yang telah dilakukan oleh Vanem, dkk. (2008) menunjukkan bahwa frekuensi untuk terjadinya api/ledakan pada proses pengangkutan LNG dengan kapal tengker adalah $6,72 \times 10^{-4}$ kejadian/tahun dimana hasil yang diperoleh tidak berbeda dengan frekuensi yang diperoleh dari penelitian ini.



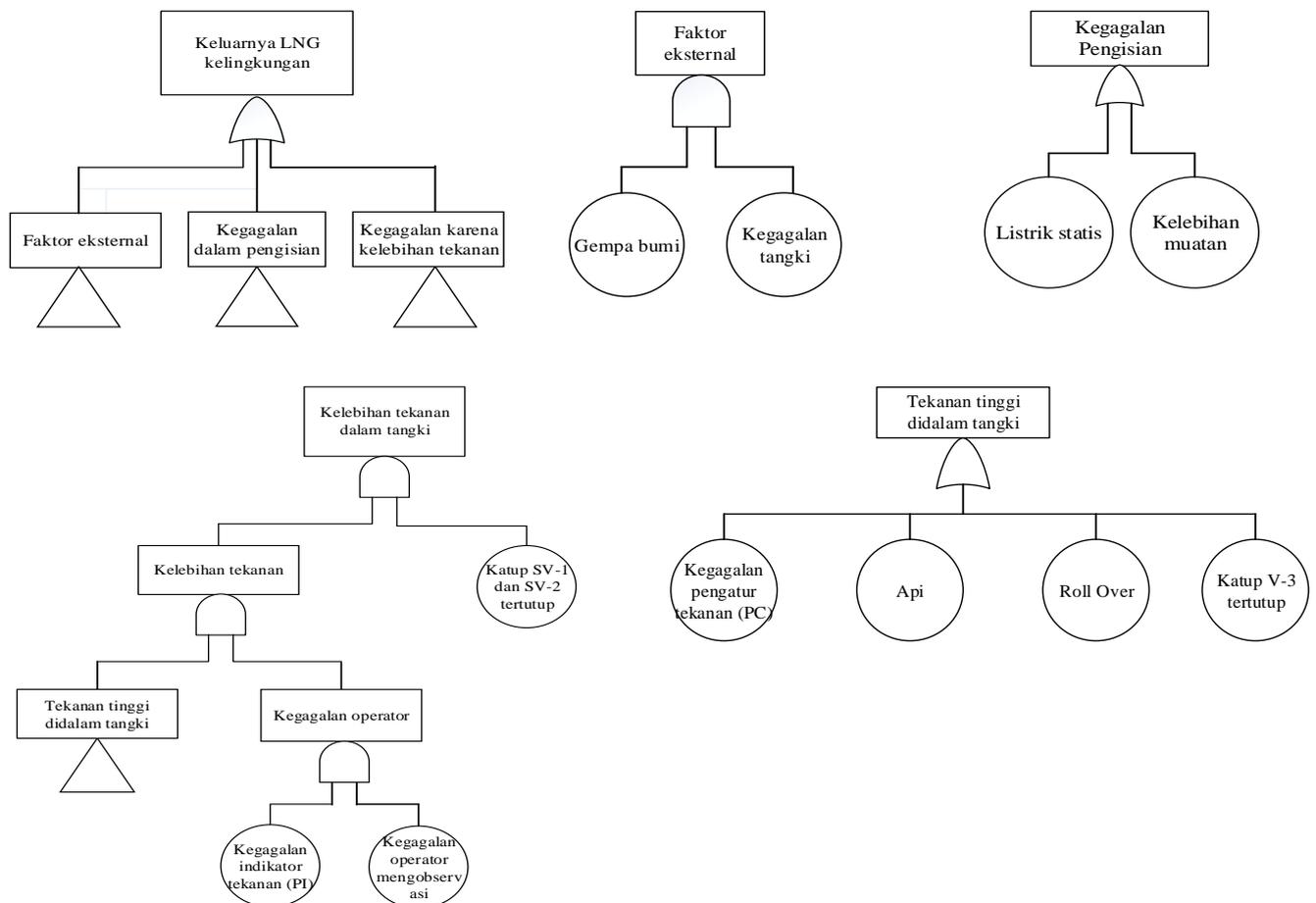
Gambar 3. Bagan analisis kegagalan keluarnya LNG dari truk pengangkut



Gambar 4. Bagan analisis kejadian LNG dari truk pengangkut(RIVM, 2009)

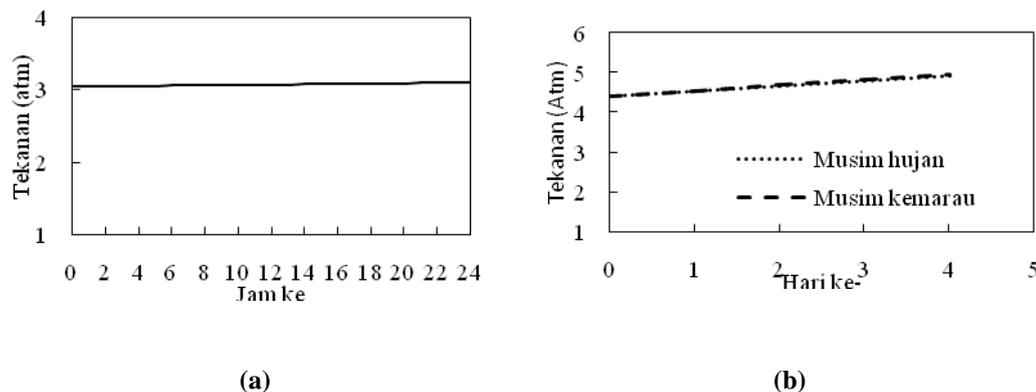
Skenario keluarnya LNG pada tangki penyimpan disebabkan oleh beberapa faktor yaitu kegagalan karena faktor eksternal, kegagalan pengisian dan kelebihan tekanan. Penyebab kegagalan faktor eksternal karena adanya gempa bumi sedangkan untuk kegagalan pengisian disebabkan oleh adanya listrik statis dan kelebihan muatan. Frekuensi kegagalan untuk setiap faktor yaitu $1,024 \times 10^{-7}$ kegagalan/tahun, $7,4 \times 10^{-5}$ kegagalan/tahun dan $1,85 \times 10^{-5}$ kegagalan/tahun. Frekuensi total kejadian keluarnya LNG pada tangki penyimpanan adalah $9,26 \times 10^{-5}$ kejadian/tahun. Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh Kim, dkk (2005), penelitian ini menyebutkan bahwa frekuensi kegagalan tangki LNG tipe membran dengan kapasitas 100.000 m^3 adalah $5,2 \times 10^{-5}$ kegagalan/tahun. Ketika LNG keluar ke lingkungan, LNG dapat menyebabkan beberapa kejadian seperti kolam api/BLEVE, ledakan

awan uap, kilat api dan awan uap dengan skenario yang sama dengan Gambar 4. Frekuensi terjadinya kolom api/BLEVE pada skenario diatas adalah $1,852 \times 10^{-5}$ kejadian/tahun, sedangkan untuk ledakan awan uap adalah $2,67 \times 10^{-5}$ kejadian/tahun. Frekuensi kilat api dan awan uap adalah 4×10^{-5} kejadian/tahun dan $7,41 \times 10^{-6}$ kejadian/tahun.

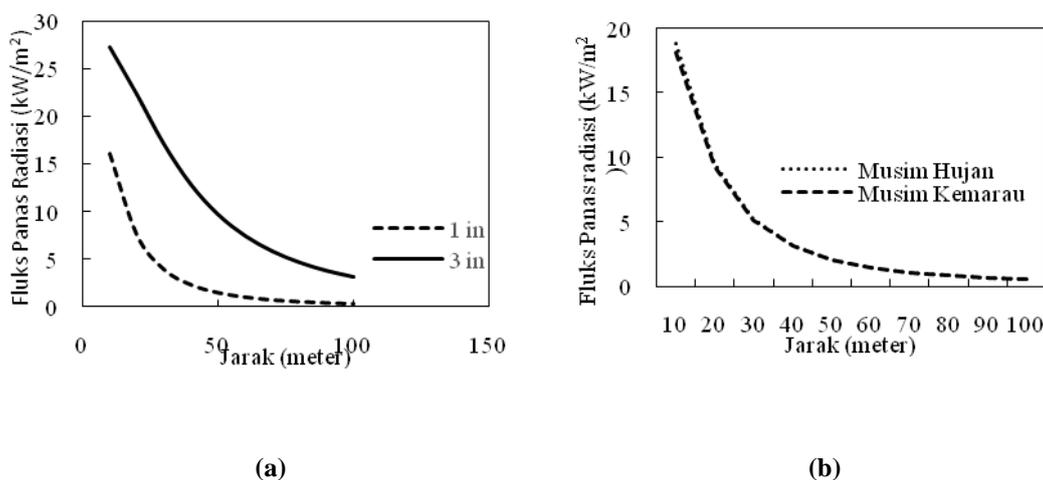


Gambar 5. Bagan analisis kegagalan keluarnya LNG selama penyimpanan

Kenaikan tekanan pada tangki pengangkut dan penyimpanan apabila terjadi *boil-off gas* (BOG) dan tidak dikeluarkan ke lingkungan masih berada dibawah tekanan desain tangki yaitu 6,6 atm sehingga tangki masih dalam keadaan aman seperti tersaji pada Gambar 6. Pada Gambar 6 (b) kenaikan tekanan pada musim kemarau lebih tinggi dibandingkan pada musim hujan meskipun perbedaannya tidak terlalu signifikan. Faktor utama penyebab kecilnya kenaikan tekanan baik tangki pengangkut maupun tangki penyimpan adalah adanya lapisan isolasi yang memiliki konduktivitas panas yang rendah serta adanya ruang kosong pada tangki sehingga panas yang masuk ke dalam tangki tertahan yang mengakibatkan produksi BOG relatif kecil. Fluks panas radiasi kolom api yang dihasilkan dari lubang dengan diameter 3 in memiliki fluks yang lebih besar dibandingkan dengan diameter lubang 1 in. Hal ini disebabkan pada diameter lubang 3 in diameter kolom api yang dihasilkan lebih besar yaitu 36,43 m dibandingkan dengan diameter lubang 1 in yaitu 12,14 m. Pada tangki penyimpanan fluks panas radiasi yang dihasilkan pada musim hujan lebih besar dibandingkan pada musim kemarau meskipun perbedaannya tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan pada musim hujan memiliki kecepatan angin lebih besar yaitu 9 m/s dibandingkan pada musim kemarau yaitu 7 m/s. Radius aman (*exclusion zone*) bagi manusia yaitu berupa fluks panas radiasi sebesar 5kW/m^2 pada diameter lubang 1 in yaitu 27,46 m sedangkan untuk diameter lubang 3 in radius aman adalah 77,4 m. Bola api dari LNG dengan kapasitas $47,7 \text{ m}^3$ akan memiliki diameter sebesar 162,48 m, tinggi 121,86 m dan waktu terjadinya bola api adalah 11,21 detik.



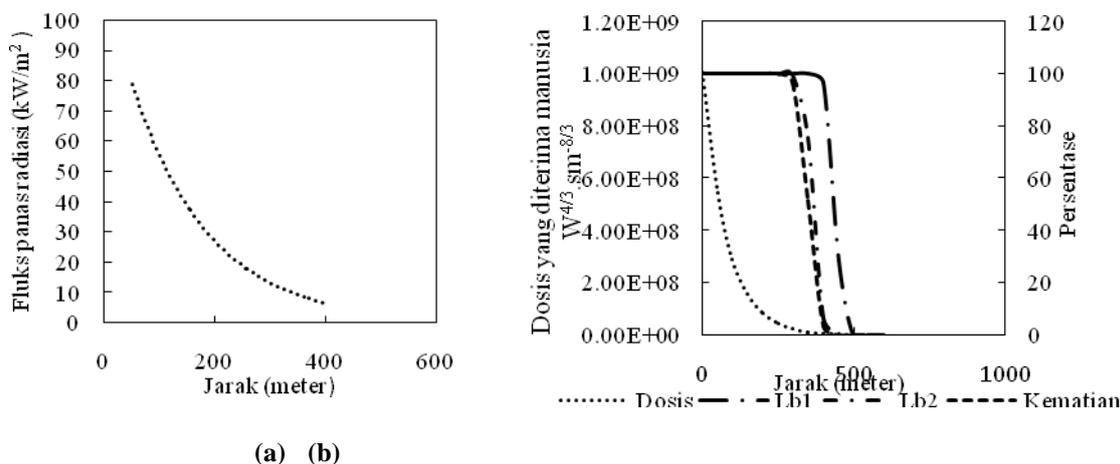
Gambar 6. Profil kenaikan tekanan pada tangki pengangkut (a) dan penyimpanan (b)



Gambar 7. Fluks panas radiasi kolam api pada tangki pengangkut (a) dan penyimpanan (b)

Fluks panas radiasi yang dihasilkan dari bola api pada tangki pengangkut dan penyimpanan tidak dipengaruhi oleh diameter lubang kebocoran dan keadaan meteorologi suatu wilayah melainkan hanya dipengaruhi oleh tekanan di dalam tangki sehingga fluks panas dan dimensi bola api memiliki besar yang sama. Zona aman bagi manusia dengan fluks sebesar 5 kW/m^2 adalah 405 m. Luasnya zona aman bagi manusia mengakibatkan kemungkinan manusia untuk terkena paparan fluks panas radiasi sangat besar baik yang hanya menyebabkan luka bakar tingkat 1, 2 hingga kematian seperti tersaji pada Gambar 8 (b). Ledakan awan uap yang dihasilkan dari LNG baik dari tangki pengangkut dan penyimpanan akan memiliki energi ledakan sebesar 1.215.900,8 MJ. Dimensi awan yang berbentuk hemisfer memiliki volume $120.539,246 \text{ m}^3$ dengan jari-jari 38,6 m. Efek ledakan berupa *shock wave* akan menghasilkan kelebihan tekanan. Besar atau kecilnya tekanan yang dihasilkan merupakan fungsi jarak dari pusat ledakan. Pada radius 50 m dari pusat ledakan tekanan yang dirasakan pada daerah tersebut sebesar 0,079 bar, radius 100 m tekanan yang dirasakan adalah 0,072 bar sedangkan pada radius 150 m tekanan yang dirasakan adalah 0,046 bar. Kerusakan yang ditimbulkan pada radius 150 m adalah pecahnya kaca jendela pada bangunan. Investigasi kecelakaan truk LNG yang telah dilakukan oleh Martinez (2012) menyebutkan pada radius 160 m mengakibatkan kaca jendela pada SPBU pecah dan diperkirakan tekanan pada radius tersebut adalah 0,03-0,04 bar. Awan uap dari LNG dengan rasio konsentrasi (C_{mak}/C_0) sebesar 0,1 yang dihasilkan dari diameter lubang 3 in memiliki jarak yang lebih jauh sebesar 297,56 m dibandingkan dengan diameter lubang 1 in yaitu 74,5 m. Hal ini disebabkan LNG yang keluar dari lubang 1 in membutuhkan waktu pengosongan yang lebih lama dibandingkan melalui lubang dengan diameter 3 in. Pada penyimpanan LNG untuk rasio konsentrasi yang sama pada musim kemarau jarak yang dihasilkan lebih jauh dibandingkan dengan musim hujan. Penyebab utamanya adalah pada musim kemarau mempunyai kecepatan angin yang lebih rendah dibandingkan pada musim hujan. Hasil eksperimen yang telah dilakukan menunjukkan bahwa kecepatan angin yang rendah akan menghasilkan jarak yang lebih jauh dibandingkan dengan kecepatan angin yang lebih tinggi (Koopman, dkk., 2007). Penilaian resiko pengangkutan berdasarkan CCPS (2008) bahwa pengangkutan LNG masuk ke dalam rangking III dimana kegiatan pengangkutan LNG harus memiliki

verifikasi prosedur dan kontrol sedangkan pada proses penyimpanan masuk kedalam kategori 5 atau *optional (evaluate alternative)*. Berdasarkan level frekuensi untuk setiap kejadian maka proses pengangkutan dan penyimpanan masuk dalam kategori ALARP.



Gambar 8. Profil fluks panas radiasi bola api (a) dan profil dosis fluks panas radiasi terhadap manusia

Kesimpulan

Pengangkutan dan penyimpanan LNG dengan kapasitas 53 m^3 untuk mendukung transportasi umum di kota Yogyakarta adalah aman dan handal untuk diaplikasikan selama prosedur standar operasi yang baik diterapkan secara konsisten.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Dit. Lantas Polda Jateng, PT. Trans Marga Jateng dan Jasa Marga Semarang.

Daftar Pustaka

- Andreola, M, 2012. Rolls Royce: The Integrator for environ-shiping, ENA eco-design conference, Ancona.
- Assael, Marc J., Kakosimos, Konstantinos E., 2010. Fires, explosion, and toxic gas dispersion: effect calculation and risk analysis. CRC Press, New York.
- BP, 2014. BP Statistic Review of World Energy June 2014. British Petroleum, London.
- BP, 2007. LNG fire protection and emergency response. British Petroleum, London.
- Canis, Bill., Pirog, Robert., Yacobucci, D. Brent, 2014. Natural Gas for Cars and Truck: Options and Challenges, Congressional Research Service, USA.
- CCPS, 2008. Guidelines for chemical transportation, safety, security and risk. Center for Chemical Process safety of the American Institute of Chemical engineers, New York.
- CCPS, 2008. Guidelines for hazard evaluation procedures. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical engineers, New York.
- Kim H, Koh JS, Kim Y, Theofanous TG, 2005. Risk assessment of membrane type LNG storage tanks in Korea-based on fault tree analysis, Korean J. Chem. Eng. 22(1), 1-8.
- Kopman, Ronald P., Ermak, Donald L., 2007. Lesson learned from LNG safety research, Journal of Hazardous Materials 140, 412-428.
- Kumar,S., Tae Kwon,H.,T., Choi,K.H., Lim,W., Cho,J.,H., Tak,K., 2011. LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development, Applied Energy 88, 4264-4273.
- Planas-Cuchi, Eulalia., Gasulla, Nuria., Ventosa, Albert., Casal, Joaquim., 2004. Explosion of a road tanker containing liquified natural gas, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 17, 315-321
- RIVM, 2009. Reference manual Bevi risk assessments version 3.2, Netherland.
- U.S. Department of Energy, 2015. Alternative Fuel Data Centre – Fuel Properties Comparison. http://www.afdc.energy.gov/fuels/fuel_comparison_chart.pdf (diakses 12 Desember 2015)
- Vanem E, Antao P, Ostvik I, Del Castillo de Comas, Francisco, 2008. Analyzing the risk of LNG carrier operations, Reliability Engineering and System Safety 93, 1328–1344.
- White, Maureen Evelyn, 1975. Electrical conductivity of low dielectric constant liquid, MIT, USA.



Lembar Tanya Jawab
Moderator : Luqman Buchori (UNDIP Semarang)
Notulen : Retno Ringgani (UPN "Veteran" Yogyakarta)

1. Penanya : Zainus S. (Batan)
Pertanyaan : 1. Apa bedanya LNG dan bahan bakar gas?
2. Kenapa penelitiannya diambil skenario dari Semarang?
Jawaban : 1. Komponen dalam LNG dan LPG sama gas metan, hanya beda cara penyimpanannya
2. Karena di Semarang di skenario ada terminal LNG sehingga dilakukan penelitian Proses Perjalanan dari Semarang menuju Yogyakarta.

2. Penanya : Luqman B. (UNDIP)
Pertanyaan : Apakah sudah diujicobakan hasilnya?
Jawaban : Belum. Penelitian ini masih awal nantinya akan dilanjutkan penelitian lanjutan dari desain tangki.

