



Model Dispersi Gas dan Vapor Cloud Explosion pada Kebocoran Outlet Pigtail Tubes Primary Reformer

Perwitasari*, P. Sumardi, dan Indra Perdana
Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
JI Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55281
*Email: perwita08@gmail.com

(Submisi: 9 Maret 2018; Revisi: 21 April 2018; Penerimaan: 23 April 2018)

ABSTRACT

Outlet pigtail tubes, one of the components in primary reformer, have a function to carry the reformed gas from the catalyst tubes to the collection manifold. Moreover, it also has a function to provide the required flexibility within the system to avoid overstress at the end of connections of the pigtail to the manifold and to the bottom of the catalyst tube. It operates in an extreme condition with temperature range of 825-850 °C and pressure 36.2 kg/cm² which is possible to initiate a failure. The consequences of outlet pigtail tubes failure are a dispersion of synthesis gas and vapor cloud explosion. This research aimed to make a model of those consequences with an assumption that the leakage hole was the same as the diameter of outlet pigtail tubes. The gas dispersion model used in this research was dense gas dispersion continuous release model. The results showed that the highest ratio of synthesis gas-air concentration was 0.1 at 17.4 m distance from leaking point. Whereas the lowest ratio of synthesis gas-air concentration was 0.002 at 163.4 m distance from leaking point. The highest ratio of the concentration of gas dispersion gave vapor cloud explosion energy of about 11.67 x 10⁵ kJ with an overpressure of about 8.41 kPa. The overpressure caused a partial demolition of the building (for example control room), panels blow in, and fastening fails of equipment or machines around the area.

Keywords: outlet pigtail tubes, gas dispersion, vapor cloud explosion

ABSTRAK

Outlet pigtail tubes adalah salah satu komponen pada primary reformer yang berfungsi untuk membawa gas hasil reforming dari tube katalis ke manifold. Selain itu outlet pigtail tubes juga berfungsi untuk memberikan fleksibilitas yang diperlukan di dalam sistem sehingga terhindar dari overstress di bagian akhir sambungan antara pigtail dengan manifold dan bagian bawah dari tube katalis. Outlet pigtail tubes beroperasi pada kondisi ekstrim yaitu suhu 825-850 °C dan tekanan 36,2 kg/cm² yang mana memungkinkan untuk terjadinya kegagalan. Konsekuensi dari kegagalan outlet pigtail tubes adalah dispersi gas sintesis dan ledakan awan uap. Penelitian ini bertujuan untuk membuat model dari konsekuensi tersebut dengan asumsi bahwa lubang kebocoran sama dengan diameter outlet pigtail tubes. Model dispersi gas yang digunakan dalam penelitian ini adalah model dispersi dense gas untuk pengeluaran yang kontinu. Hasil menunjukkan bahwa rasio konsentrasi gas sintesis-udara tertinggi adalah 0,1 pada jarak 17,4 meter, sedangkan rasio konsentrasi terendah adalah 0,002 pada jarak 163,4 meter. Konsentrasi tertinggi dari gas terdispersi memberikan energi untuk ledakan awan uap sebesar 11,67 x 10⁵ kJ dengan overpressure sebesar 8,41 kPa. Overpressure tersebut menyebabkan kerusakan pada sebagian dari bangunan (sebagai contoh ruang kontrol), terlemparnya papan, dan mempercepat kegagalan dari peralatan atau mesin di sekitar area.

Kata kunci: *outlet pigtail tubes*, dispersi gas, ledakan awan uap

1. Pendahuluan

Primary reformer merupakan salah satu alat proses yang vital pada industri pupuk yang berfungsi untuk mengubah gas alam menjadi sintesis gas (H_2 , CO dan CO_2) melalui reaksi *steam methane reforming* (SMR). Gas alam masuk ke dalam *primary reformer* pada suhu 480-500 °C dan tekanan 39,2 kg/cm², kemudian keluar pada suhu 800-850 °C dan tekanan 36,2 kg/cm² (Kusumaningtyas, 2010). *Primary reformer* terdiri dari dua bagian yaitu *radiant section* dan *convection section*. *Radiant section* terdiri dari kumpulan *tube* katalis dan di dalam *tube* tersebut terjadi reaksi *steam methane reforming*. Bagian bawah *tube* katalis terhubung dengan *outlet pigtail tubes* yang berfungsi untuk membawa gas hasil *reforming* dari *tube* katalis ke *manifold*. Selain itu *outlet pigtail tubes* juga berfungsi untuk memberikan fleksibilitas yang diperlukan di dalam sistem sehingga terhindar dari *overstress* di bagian akhir sambungan antara *pigtail* dengan *manifold* dan bagian bawah *tube* katalis (Barnett dan Price, 2013). Oleh karena beban suhu dan tekanan yang harus ditahan cukup tinggi, maka dimungkinkan untuk terjadinya kegagalan pada *outlet pigtail tubes*. Salah satu kegagalan yang mungkin terjadi adalah adanya kebocoran pada *outlet pigtail tubes* yang disebabkan karena *liquid metal embrittlement*. *Liquid metal embrittlement* terjadi karena adanya reaksi antara *aluminium foil* yang digunakan sebagai isolasi pada *outlet pigtail tubes* dengan *chromium oxide* yang merupakan salah satu bahan campuran (*alloy*) penyusun *outlet pigtail tubes* pada suhu 850 °C (Pandey dkk., 2017). Reaksi yang terjadi ditunjukkan pada Persamaan 1:



Reaksi tersebut bersifat sangat eksotermis sehingga dapat menimbulkan pemanasan lokal pada permukaan *outlet pigtail tubes* dan menyebabkan terbentuknya *molten metal corrosion* (Pandey dkk., 2017). Proses korosi

yang terjadi dapat menyebabkan timbulnya kebocoran pada *outlet pigtail tubes*.

Beberapa kegagalan yang pernah terjadi pada *pigtail tubes reformer* antara lain terjadi *intergranular stress oxidation cracking* pada *outlet pigtail tubes steam reformer furnace* setelah beroperasi selama 60.000 jam. Hal ini disebabkan oleh okidasi pada suhu tinggi yang terjadi berulang-ulang (Kodali dan Richert, 2003). Selain itu juga terjadinya *creep* pada bagian luar *outlet pigtail tubes* yang berujung pada keretakan setelah beroperasi selama 3 tahun. Terjadinya *creep* disebabkan oleh degradasi *metal microstructure* yang diikuti oleh proses pendinginan yang buruk pada *tubes* (Roumeau, 2010).

Konsekuensi yang mungkin terjadi sebagai akibat gagalnya *outlet pigtail tubes* di antaranya adalah *vapor cloud* karena dispersi gas, dan *vapor cloud explosion* (VCE). *Vapor cloud explosion* (VCE) merupakan ledakan yang sangat berbahaya dan merusak. Terjadi ketika sejumlah besar *flammable vapor* terlepas dan terdispersi membentuk kumpulan awan uap yang selanjutnya terpantik dan menimbulkan ledakan (Crowl dan Louvar, 2002). Dampak yang ditimbulkan oleh *vapor cloud explosion* terutama berasal dari *overpressure* yang dihasilkan dan berpotensi merusak alat proses maupun bangunan yang ada di sekitarnya. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis terhadap konsekuensi yang terjadi supaya dapat diketahui seberapa besar dampak yang ditimbulkan.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat model dispersi gas dan *vapor cloud explosion* yang timbul akibat dari kebocoran *outlet pigtail tube*. Model yang dibuat diharapkan dapat memberikan gambaran besarnya dampak yang dihasilkan *vapor cloud explosion* terhadap peralatan proses maupun bangunan yang ada di sekitar.

2. Metode Penelitian

2.1 Bahan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data-data sekunder yang tersaji pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi gas masuk outlet pigtail tubes

Komponen	Fraksi Mol
Metana	0,0471
Karbon dioksida	0,0642
Karbon monoksida	0,0480
Hidrogen	0,4335
Steam	0,3970

Sumber: Data Pabrik Pupuk X di Jawa Barat tahun 2017

Tabel 2. Parameter proses yang digunakan

Parameter	Nilai
Diameter lubang kebocoran	1,5 inchi
Suhu lingkungan*	28°C
Kecepatan angin*	5,812 m/s
Kelembapan udara*	61,5%
Berat jenis gas	7,097 kg/m ³
Berat jenis udara	1,175 kg/m ³
Konstanta percepatan gravitasi	9,8 m/s ²

Sumber: www.golfweather.com

2.2 Cara Penelitian

Model dispersi gas yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *dense gas dispersion* untuk *continuous release*. Persamaan perhitungan yang digunakan berdasarkan pada standar yang dikeluarkan oleh *The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO, 2005)*. Perhitungan dimulai dengan menghitung koreksi gravitasi dan kecepatan keluar gas dari lubang kebocoran menggunakan Persamaan (2) sampai dengan Persamaan (4). Persamaan kecepatan keluar gas menggunakan Persamaan untuk *choked flow*. Perhitungan kecepatan gas keluar menggunakan asumsi diameter lubang kebocoran adalah diameter *outlet pigtail tubes* atau diameter maksimum lubang kebocoran dengan pertimbangan dapat memberikan efek yang terburuk dari keluarnya gas. Hasil perhitungan dari Persamaan (2) dan Persamaan (4) digunakan untuk menghitung rasio dari dispersi gas (Persamaan (5)) yang akan digunakan dalam pembacaan grafik *Britter and McQuaid* (Gambar 1).

$$g_o = g \frac{(\rho_g - \rho_{udara})}{\rho_{udara}} \tag{2}$$

$$\dot{m}_{choked} = C_d A P_1 \sqrt{\frac{k g_c M}{R_g T_1} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \tag{3}$$

Kecepatan gas keluar akan digunakan untuk menentukan kecepatan volumetrik gas keluar (v_o)

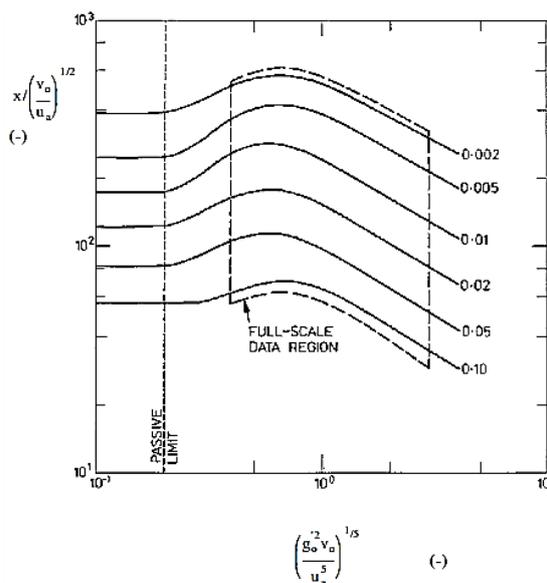
$$v_o = \frac{\dot{m}_{choked}}{\rho_g} \tag{4}$$

Rasio dari dispersi gas dihitung dengan menggunakan nilai yang diperoleh dari perhitungan sebelumnya.

$$\left(\frac{g_o^2 v_o}{u_a^5}\right)^{1/5} \tag{5}$$

Jarak dispersi gas (x) ditentukan dengan melakukan pembacaan grafik *Britter and McQuaid* dan menghitung dengan Persamaan (6).

$$\frac{x}{\left(\frac{v_o}{u_a}\right)^{1/2}} \tag{6}$$



Gambar 1. Grafik Britter and McQuaid untuk jarak dispersi gas (TNO, 2005)

Upwind extension dari *plume* dihitung dengan menggunakan Persamaan (7), sedangkan parameter jarak (L_b) dihitung dengan menggunakan Persamaan (8).

$$x_u = b_o + 2L_b \tag{7}$$

$$L_b = \frac{g_o v_o}{u_a^3} \tag{8}$$

Nilai parameter jarak yang diperoleh dari

perhitungan di atas akan digunakan untuk menghitung lebar pada Persamaan (9) dan tinggi *vapor cloud* yang terbentuk dari dispersi gas pada Persamaan (10).

$$b(x) = 2b_o + 8L_b + 2,5L_b^{1/3}x^{2/3} \quad (9)$$

$$b_z(x) = \frac{v_o}{2u_a b(x)} \quad (10)$$

Kecepatan volumetrik gas keluar dari lubang kebocoran dan rasio konsentrasi yang diperoleh dari grafik *Britter and McQuaid* akan digunakan untuk menghitung volume *vapor cloud* (V_c) pada Persamaan (11). Volume *vapor cloud* (V_c) yang diperoleh akan digunakan untuk menghitung energi yang dihasilkan dari *vapor cloud explosion* (E_c) pada Persamaan (12).

$$V_c = \frac{v_o R_d}{(C_{mean}/C_o)} \quad (11)$$

$$E_c = V_c \Delta H_c 1000 \rho_g C_t \quad (12)$$

Efek yang ditimbulkan dari *vapor cloud explosion* adalah *overpressure* yang mana untuk menentukan nilainya diperlukan perhitungan *scaled distance* (r') dengan menggunakan Persamaan (13).

$$r' = \frac{x}{(E_c P_a)^{1/3}} \quad (13)$$

Scaled distance digunakan untuk menentukan nilai *scaled overpressure* (P_s') melalui pembacaan grafik pada Gambar 2 dan *scaled positive phase duration* melalui pembacaan grafik pada Gambar 3. Nilai yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung *side blast-on overpressure* (P_s), *positive phase duration* (t_p) dan *positive impulse* (i_s) pada Persamaan (14) sampai dengan Persamaan (16).

$$P_s = P_s' P_a \quad (14)$$

$$t_p = t_p' \frac{(E_c/P_a)^{1/3}}{a_a} \quad (15)$$

$$i_s = \frac{1}{2} P_s t_p \quad (16)$$

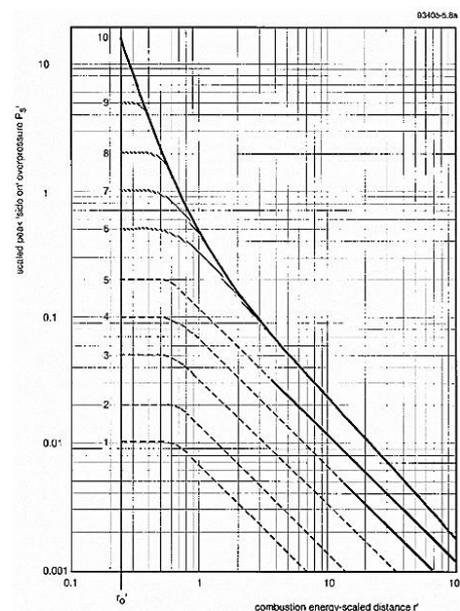
Ledakan menghasilkan gelombang *overpressure* yang merambat melalui tanah. *Overpressure* tersebut dapat menimbulkan kerusakan apabila bertemu dengan hambatan. Hambatan pada area pabrik dapat berupa bangunan maupun peralatan

proses. Data mengenai kerusakan yang terjadi pada instalasi di industri sangat terbatas sehingga untuk menghitung efek dari *overpressure* digunakan pendekatan bangunan. Perhitungan efek *overpressure* pada bangunan menggunakan standar *The Netherland Organization of Applied Scientific Research* atau TNO yang telah diakui secara internasional (TNO, 1992). Efek *overpressure* berdasarkan standar TNO dibagi menjadi tiga kriteria yaitu *minor damage*, *major damage*, dan *collapse*. *Minor damage* merupakan kerusakan yang meliputi pecahnya kaca jendela, bergesernya pintu dan kerangka jendela dari tempat semula dan rusaknya sebagian atap bangunan. *Major damage* meliputi kerusakan seperti pada *minor damage* ditambah dengan retaknya dinding bangunan dan robohnya sebagian dinding bangunan. Sedangkan kriteria yang terakhir yaitu *collapse* merupakan kerusakan yang menyeluruh pada bangunan yang mana bangunan tersebut roboh. Ketiga kriteria dari efek *overpressure* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (17) sampai dengan Persamaan (19).

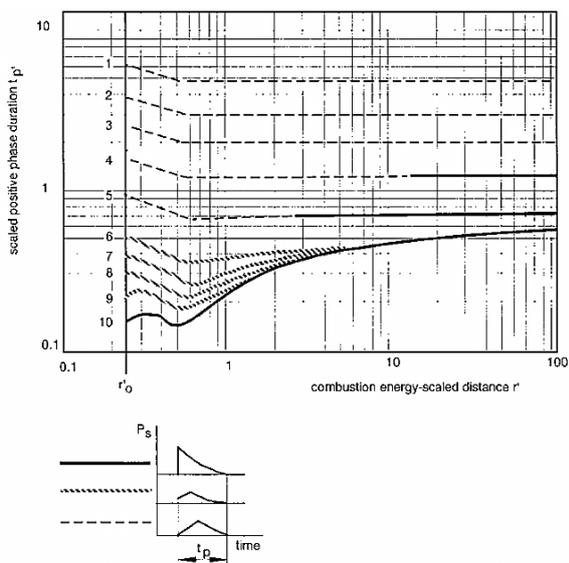
$$P_{minor} = 5 - 0,26 \ln \left(\left(\frac{4600}{P_s} \right)^{3,9} + \left(\frac{110}{I_s} \right)^5 \right) \quad (17)$$

$$P_{major} = 5 - 0,26 \ln \left(\left(\frac{17500}{P_s} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I_s} \right)^{9,3} \right) \quad (18)$$

$$P_{collapse} = 5 - 0,22 \ln \left(\left(\frac{40000}{P_s} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I_s} \right)^{11,3} \right) \quad (19)$$



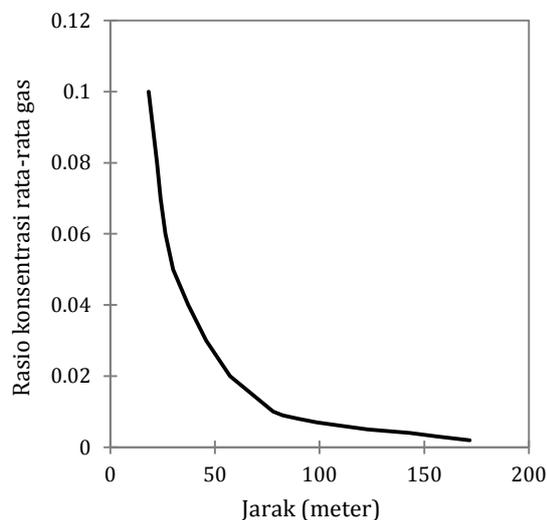
Gambar 2. Grafik *multi-energy method* untuk *scaled overpressure* (TNO, 2005)



Gambar 3. Grafik multi-energy method untuk positive phase duration (TNO, 2005)

3. Hasil dan Pembahasan

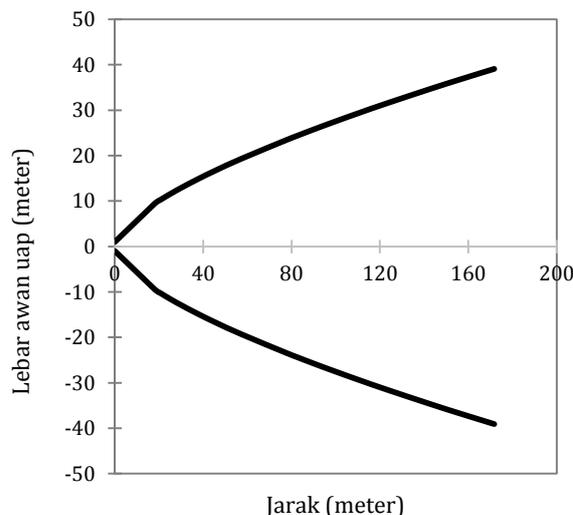
Pemodelan dispersi gas dilakukan pada kebocoran sebuah *outlet pigtail tubes* dengan mengasumsikan bahwa besar lubang kebocoran sama dengan diameter *outlet pigtail tube* yaitu 1,5 inci. Hasil perhitungan untuk model dispersi gas ditunjukkan oleh Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7.



Gambar 4. Grafik hubungan rasio konsentrasi rata-rata gas terdispersi dengan jarak

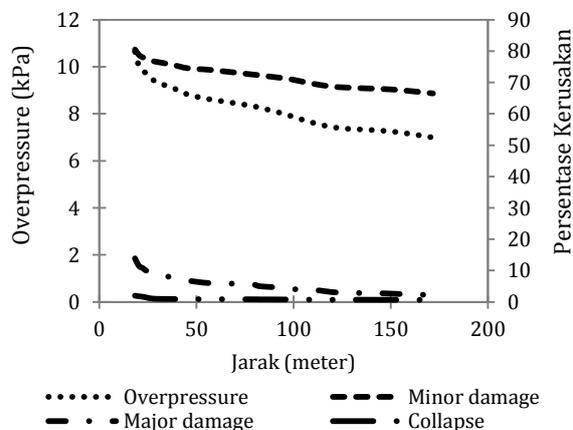
Berdasarkan Gambar 4, rasio konsentrasi rata-rata (C_{mean}/C_o) tertinggi yaitu 0,1 berada pada jarak 18,3 meter sedangkan konsentrasi terendah 0,002 pada jarak 171,7 meter. Penurunan rasio konsentrasi sangat dipengaruhi oleh kecepatan

angin, sehingga semakin cepat angin yang berhembus, maka penurunan konsentrasi rata-rata gas di udara semakin cepat.

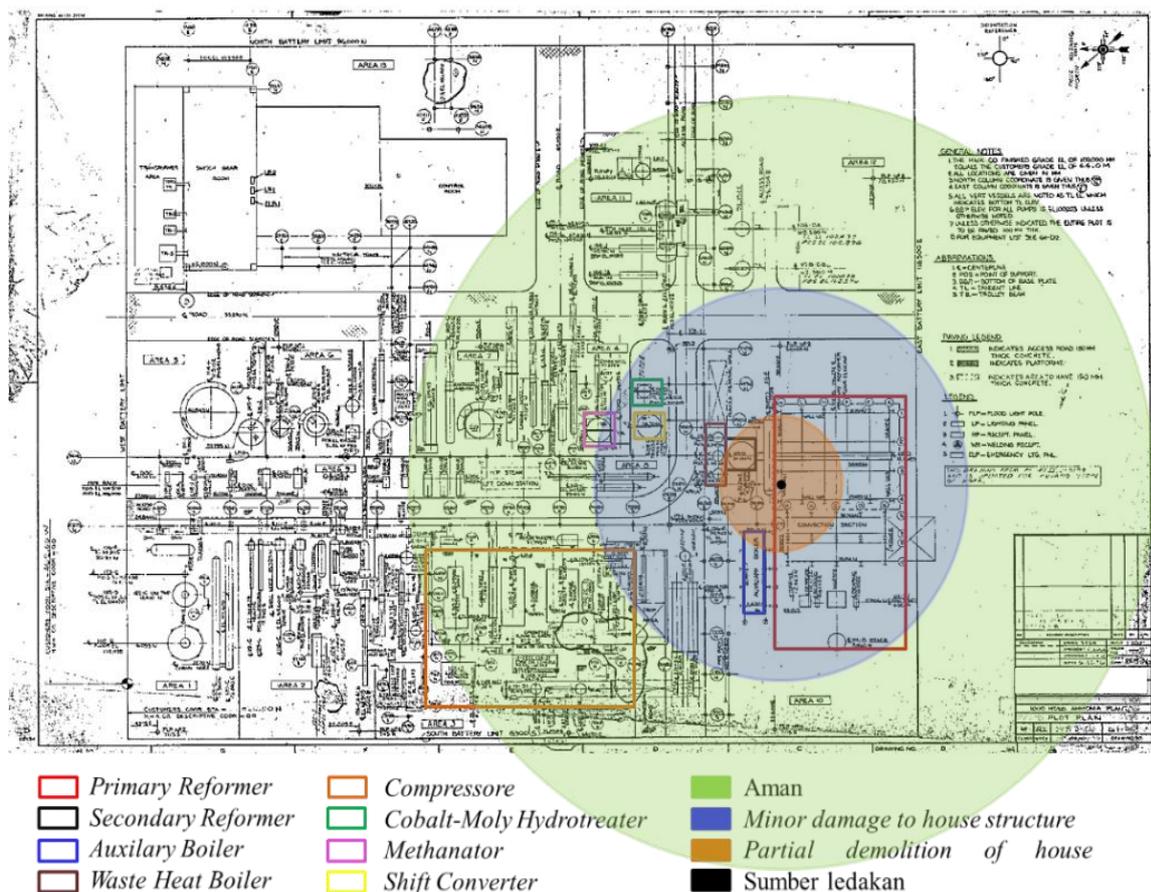


Gambar 5. Grafik hubungan lebar awan uap terdispersi dengan jarak

Berdasarkan Gambar 5, pada jarak 171,7 meter, lebar awan uap cukup besar yaitu 39,8 meter. Pendistribusian konsentrasi gas dalam udara sangat dipengaruhi oleh kecepatan massa keluar gas dan juga kecepatan angin. Kecepatan massa keluar gas sangat dipengaruhi oleh besar lubang kebocoran dan tekanan keluar gas. Oleh karena itu ketika tekanan keluar gas besar atau diameter lubang kebocoran lebih besar sedangkan kecepatan angin rendah, maka kemungkinan pembentukan awan uap dengan tingkat rasio konsentrasi yang tinggi akan lebih cepat. Hal tersebut meningkatkan tingkat kefatalan dari ledakan awan uap dan tingkat resikonya.



Gambar 6 Grafik hubungan antara overpressure, persentase kerusakan, dan jarak



Gambar 7. Jangkauan *overpressure* pada area pengolahan amonia

Berdasarkan Gambar 6, energi ledakan terbesar terjadi pada jarak 18,3 meter yaitu sebesar 138×10^5 kJ yang memberikan *overpressure* sebesar 10,64 kPa. Kondisi ini dapat mengakibatkan 80,5% *minor damage* pada bangunan seperti rusaknya jendela, terlepasnya pintu, kerusakan pada atap, dan lainnya. Sedangkan kemungkinan untuk *major damage* seperti retak dan robohnya dinding bangunan adalah sekitar 13,9%. Kerusakan yang ditimbulkan dari ledakan awan uap tidak terlalu besar. Hal ini dimungkinkan karena ukuran lubang kebocoran yang kecil sehingga konsentrasi *flammable gas* yang keluar tidak terlalu besar dan juga lebar awan uap yang terbentuk pada jarak tersebut tidak terlalu besar.

Berdasarkan Gambar 7 warna oranye merupakan daerah dengan *overpressure* 10,64 kPa. Daerah yang tercakup dalam zona tersebut terdiri atas sebagian besar *radiant section* dan sebagian kecil *convection section* dari *primary*

reformer, sebagian kecil *secondary reformer* dan *auxiliary boiler*. Efek yang ditimbulkan dari *overpressure* akan mengganggu kerja peralatan proses tersebut, namun tidak sampai menimbulkan kerusakan. Hal ini dikarenakan *outlet pigtail tubes yang bocor* berada di luar dinding *radiant section* bagian bawah. Oleh karena itu, kerusakan lebih banyak terjadi pada beberapa pipa proses yang berada di sekitar area *radiant section*

. Meskipun efek yang ditimbulkan oleh *overpressure* tidak sampai membahayakan manusia, tetapi rusaknya beberapa pipa proses dapat berujung pada *shutdown* pabrik. Hal tersebut menimbulkan kerugian yang cukup besar secara *financial* yaitu dari biaya *shutdown* dan perbaikan yang harus ditanggung oleh perusahaan.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Dispersi gas dari kebocoran *outlet pigtail tube* dipengaruhi oleh kecepatan gas keluar dan kecepatan angin dengan rasio konsentrasi gas-udara tertinggi 0,1 berada pada jarak 18,3 meter dari sumber kebocoran. Salah satu faktor yang mempengaruhi kecepatan gas keluar di samping tekanan gas keluar adalah diameter lubang kebocoran. Diameter lubang yang digunakan adalah diameter maksimum yang dapat terbentuk sebesar 1,5 inci dan memberikan jumlah gas terdispersi yang terbesar.
2. *Vapor cloud explosion* yang memberikan efek terbesar berada pada jarak 18,3 meter dengan *overpressure* sebesar 10,64 kPa. Dampak yang ditimbulkan antara lain 80,5% *minor damage* pada bangunan seperti rusaknya jendela, terlepasnya pintu, kerusakan pada atap, dan lainnya. Selain itu juga *major damage* seperti retak dan robohnya dinding bangunan yang berkisar 13,9%. Selain itu gelombang *overpressure* yang ditimbulkan juga merusak beberapa pipa proses yang berada di sekitar area *radiant section* dari *primary reformer* yang dapat berujung pada *shutdown* pabrik.

Daftar Notasi

g_o	= koreksi kecepatan gravitasi, m/detik ²
g	= kecepatan gravitasi, m/detik ²
ρ_g	= berat jenis gas, kg/m ³
ρ_{udara}	= berat jenis udara, kg/m ³
\dot{m}_{choked}	= kecepatan gas keluar, kg/detik
C_d	= koefisien <i>discharge</i> , asumsi sama dengan pipa pecah ($C_d=1$)
A	= luas lubang keluaran, m ²
g_c	= konstanta gravitasi, kg/(N.s ²)
R_g	= kostanta gas, Joule/(kgmol.K)
T_1	= suhu <i>upstream</i> , K
u_a	= kecepatan angin, m/detik
x_u	= <i>upwind extension</i> , meter
L_b	= parameter, meter
$b(x)$	= lebar awan uap fungsi jarak, meter
b_o	= radius sumber, meter

$b_z(x)$	= tinggi awan uap fungsi jarak, meter
V_c	= volume awan uap pada waktu dispersi tertentu, m ³
R_d	= lama gas keluar, detik
E_c	= energi yang dihasilkan dari ledakan awan uap, Joule
r'	= <i>scaled distance</i>
P_a	= tekanan lingkungan, Pascal
P_s	= <i>side-on blast overpressure</i> , Pascal
t_p	= <i>positive phase duration</i> , detik
a_a	= <i>ambient speed sound</i> , m/detik
i_s	= <i>positive impulse</i> , Pa.detik

Daftar Pustaka

- Barnett, D., Price, J., 2013, Reformer Furnace Outlet Systems: Design Considerations, Emergency Repair, and Enganced Reliability, BD Energy System, Texas.
- Crowl, D.A., Louvar, J.F., 2002, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications, 2nd ed, Prentice Hall PTR, New Jersey.
- [Http://www.golfweather.com/indonesia/padang-golf-pupuk-kujang-cikampek/139024](http://www.golfweather.com/indonesia/padang-golf-pupuk-kujang-cikampek/139024) (diakses 17 Januari 2018).
- Kodali, P., Richert, J. P., 2003, Failure Mechanisms of Alloy 800H in Steam Reformer Furnace Pigtailes, Corrosion 2003, NACE International, California.
- Kusumaningtyas, L., 2010, Laporan Kerja Praktek PT Pupuk Kujang Cikampek (Persero), Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Pandey, K. K., Mistry, S., Chaklader, S. D., Gayen, R., 2017, Liquid Metal Embrittlement in Outlet Pigtailes of Reformer of Hydrogen Generation Unit in Digboi Refinery, Nigis-Corcon, Mumbai.
- Process Engineer, 2017, Data Pabrik Pupuk X di Jawa Barat, PT Pupuk X, Jawa Barat.
- Roumeau, X., 2010, High Temperature Cracking of 800Ht Pigtailes in A Hydrogen Unit, Corrosion 2010, NACE International, Texas
- The Netherland Organization of Applied Scientific Research (TNO), 1992, Green Book-Methods for The Determination of

Possible Damage: to People and Objects Resulting from Release of Hazardous Materials, 1st ed, Gevaarlijke Stoffen, Netherland.

The Netherland Organization of Applied Scientific Research (TNO), 2005, Yellow Book-Method for The Calculation of Physical Effects: Due to Release of Hazardous Materials (Liquid and Gases), 3rd ed, Gevaarlijke Stoffen, Netherland.
