






Consequence Modelling of Biogas Release from Storage Tanks Using EFFECTS Software

Alimatun Nashira¹ , Heningtyas Dwi Afrilia¹

¹ Department of Chemical Engineering, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia

 alimatun.nashira@ums.ac.id

 <https://doi.org/10.53017/uje.267>

Received: 07/08/2025

Revised: 03/09/2025

Accepted: 02/11/2025

Abstract

Biogas is a renewable energy source with the potential to reduce dependence on fossil fuels and greenhouse gas emissions. However, handling biogas requires special attention to safety and security aspects due to its flammable and toxic nature. This study aims to model the consequence of biogas release using the EFFECTS software. The simulation varies pressure levels (1034, 1500, 2000, 2500, 3000 mbar), biogas composition, and atmospheric conditions (Pasquill stability classes B, C, and F). The modelling analyses the potential consequences of a biogas release incident, taking into account meteorological and topographical conditions that influence gas dispersion. The worst impacts of explosion and toxic gas dispersion occur under stable atmospheric conditions (Pasquill stability class F). Storage tank pressure has little effect on the overpressure contour distance, with the light damage zone only reaching a maximum distance of 68 meters from the tank. However, biogas tank pressure significantly affects the reach of toxic substances, where a leak from a tank at 3000 mbar results in AEGL-2 and AEGL-3 zones extending up to 7086 meters and 2779 meters, respectively. Biogas compositions with higher methane content have a slightly larger explosion range, while those richer in carbon dioxide have a farther reach of toxic substances, though the differences are not significant. The results of this simulation are expected to provide valuable insights for industrial accident prevention efforts and the enhancement of safety standards in the renewable energy sector, particularly in biogas management.

Keywords: *Biogas; Consequence modelling; Explosion; Toxic*

Pemodelan Dampak Pelepasan Biogas dari Tangki Penyimpan dengan Menggunakan Software EFFECTS

Abstrak

Biogas merupakan energi terbarukan yang potensial untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan emisi gas rumah kaca. Namun, penanganan biogas memerlukan perhatian khusus terhadap aspek keselamatan dan keamanan karena sifatnya yang mudah terbakar dan beracun. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dampak pelepasan biogas menggunakan *software* EFFECTS. Simulasi ini bervariasi tekanan (1034, 1500, 2000, 2500, 3000 mbar), komposisi biogas, dan kondisi atmosfer (*pasquill stability class* B, C, F). Pemodelan ini akan menganalisis konsekuensi yang mungkin timbul dari insiden pelepasan biogas, dengan mempertimbangkan kondisi meteorologi dan topografi yang mempengaruhi penyebaran gas. Dampak terburuk dari ledakan maupun sebaran gas toksik terjadi pada kondisi atmosfer stabil (*pasquill stability class F*). Tekanan tangki penyimpanan tidak begitu berpengaruh pada jarak *overpressure contour*, di mana dampak kerusakan ringan hanya dirasakan hingga jarak maksimum 68 m dari tangki. Namun, tekanan tangki biogas berpengaruh pada jangkauan zat toksik, di mana kebocoran tangki bertekanan 3000 mbar mengakibatkan zona AEGL-2 dan AEGL-

3 hingga mencapai jarak 7086 m dan 2779 m. Komposisi biogas yang lebih kaya metana memiliki jangkauan ledakan yang sedikit lebih besar, sedangkan yang lebih kaya karbondioksida memiliki jangkauan zat toksik yang lebih jauh, namun perbedaannya tidak signifikan. Hasil dari simulasi ini diharapkan dapat memberikan informasi penting untuk upaya pencegahan kecelakaan industri dan peningkatan standar keamanan dalam industri energi terbarukan, khususnya dalam pengelolaan biogas.

Kata kunci: Biogas; Pemodelan dampak; Ledakan; Toksik

1. Pendahuluan

Dalam menjalankan sebuah pabrik sangat penting mempertimbangkan faktor keselamatan. Dengan meningkatnya tuntutan untuk sistem produksi yang bertanggung jawab sebagai salah satu Sustainable Development Goals (SDGs) yang dicanangkan oleh Perserikatan Bangsa Bangsa, meningkat pula tuntutan untuk menjamin keamanan dan keselamatan di pabrik kimia [1]. Menurut Peraturan Pemerintah no,or 5 tahun 2012, keselamatan dan kesehatan kerja atau K3 adalah segala kegiatan untuk menjamin dan melindungi keselamatan dan kesehatan tenaga kerja melalui upaya pencegahan kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja. Lingkungan industri dengan segala kompleksitas mesin, bahan baku, dan proses produksinya yang berpotensi menyimpan berbagai bahaya menjadikan manajemen keselamatan dan kesehatan kerja yang komprehensif bukan hanya merupakan kepatuhan terhadap regulasi melainkan kebutuhan yang fundamental.

Salah satu alternatif energi terbarukan yang mengandung risiko keselamatan adalah biogas. Biogas diproduksi dari bahan organik berupa limbah organik seperti kotoran hewan, sampah, serta limbah padat yang kompleks dimana didekomposisi oleh mikroorganisme pada proses anaerob. Biogas dengan berbahan dasar kotoran hewan dan sampah organik memiliki kandungan metana 47,16%, karbon dioksida 42,93%, oksigen 1,07%, nitrogen 7,68% dan hidrogen sulfida 0,05% [2]. Adapun komposisi biogas dari proses fermentasi anaerob dari sampah organik terdiri atas CH_4 55-75%, CO_2 25-45%, N_2 0-0,3%, H_2 1-5%, H_2S 0-3% dan O_2 0,1-0,5%[3]. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi biogas dapat berbeda-beda tergantung pada bahan utama yang digunakan.

Nilai kalor pembakaran biogas akan semakin tinggi apabila kandungan metananya semakin besar, menghasilkan suhu nyala yang lebih tinggi [4]. Sebagai komponen paling mudah terbakar, metana menjadi basis penting dalam berbagai penelitian mengenai perancangan deteksi kebocoran biogas [5,6]. Untuk terjadi kebakaran, gas metana perlu bercampur dengan oksigen di atmosfer dan mengalami penyalaan oleh sumber energi eksternal. Selain itu, tingginya konsentrasi gas metana di atmosfer akan mengurangi jumlah oksigen yang ada di atmosfer sehingga berpotensi mengakibatkan gejala kekurangan oksigen bagi makhluk hidup, terkhusus bagi manusia.

Selain metana, komponen biogas yang memiliki nilai bahaya tinggi adalah hidrogen sulfida karena sifat toksiknya. Hidrogen sulfida memiliki sifat tidak berwarna, sangat beracun, lebih berat daripada udara dan berbau seperti telur busuk pada konsentrasi rendah. Pada konsentrasi di atas 150 ppm, indera penciuman tidak bekerja dan gas tidak lagi dirasakan. Pada konsentrasi > 700 ppm, penghirupan hidrogen sulfida dapat mengakibatkan kehilangan kesadaran [7].

Pemanfaatan software untuk simulasi pemodelan kebocoran gas merupakan langkah strategis dalam meningkatkan tingkat keselamatan operasional pabrik. Ini memungkinkan analisis mendalam skenario pelepasan bahan berbahaya, memprediksi penyebarannya, serta mengevaluasi dampak potensial terhadap pekerja, lingkungan, dan masyarakat sekitar secara virtual, sebelum insiden nyata terjadi [8]. Ada berbagai software yang dapat

digunakan untuk pemodelan dampak pelepasan gas, salah satunya adalah software EFFECTS yang dikembangkan oleh Gexcon Ltd. Sudah ada cukup banyak studi mengenai simulasi dampak pelepasan gas di Indonesia, namun mayoritas menggunakan software ALOHA seperti penelitian Danasa dkk. [9] dan Novrikasari dkk. [10]. Software ALOHA kurang cocok untuk pemodelan pelepasan biogas karena memiliki keterbatasan yaitu hanya mampu memodelkan zat tunggal, sementara biogas sendiri merupakan campuran dengan berbagai variasi komposisi.

Pemodelan pelepasan campuran gas di Indonesia sudah dilakukan untuk gas pada *primary reformer*, yang merupakan campuran antara hidrogen dan uap air dengan sedikit CH₄, CO₂, dan CO [11]. Penelitian ini mengidentifikasi bahwa pelepasan gas tersebut dari *pigtail tubes* dapat menimbulkan 80,5% minor damage dan 13,9% major damage pada bangunan, serta merusak beberapa pipa proses hingga berujung pada *shutdown* pabrik. Adapun untuk biogas, masih sangat sedikit publikasi mengenai asesmen resiko pada instalasi biogas di Indonesia dan belum ada pemodelan dampak kecelakaan yang sudah dilakukan. Pemodelan yang sudah dilakukan di Eropa pun menggunakan software ALOHA dengan asumsi konservatif bahwa biogas merupakan metana murni [12].

Temuan ini memperkuat pentingnya analisis risiko dalam pengelolaan di industri kimia. Studi di atas juga menunjukkan bahwa penggunaan software EFFECTS dapat menjadi alat bantu untuk menganalisis bahaya biogas di industri kimia. Mengingat komposisi biogas yang bervariasi, maka pada penelitian ini disimulasikan pelepasan biogas dengan berbagai komposisi. Selain itu pengaruh tekanan tangki penyimpanan dan kondisi atmosfer juga dianalisis untuk memberikan pertimbangan mengenai kondisi yang paling aman untuk menyimpan biogas.

2. Metode

Lokasi yang dipilih untuk simulasi adalah PT X, suatu perusahaan di Indonesia yang memiliki pembangkit listrik bertenaga biogas. Nama perusahaan tidak disebutkan untuk anonimitas. Spesifikasi tangki tersaji pada Tabel 1. Pada penelitian ini akan ada tiga skenario variasi yaitu tekanan tangki penyimpanan biogas, komposisi, dan kondisi atmosfer. Semua kejadian kebocoran akan dianggap pelepasan dengan model *Gas LOC Scenario Leak* (G3), yaitu pelepasan dari lubang secara kontinyu hingga waktu tertentu. Waktu kebocoran diasumsikan selama 1800 detik sedangkan ukuran lubang diasumsikan sebesar 250 mm. Model yang digunakan pada *software* EFFECTS adalah combined model, di mana *software* akan mendeteksi jenis kecelakaan yang paling mungkin terjadi dulu sebelum mensimulasikannya. Jika ada potensi ledakan berjenis *Vapour Cloud Explosion* (VCE) akan disimulasikan dengan model *Multi Energy*, sedangkan dispersi awan uap dimodelkan dengan model dispersi gas netral jika densitas campuran kurang dari 1,3 kg/m³, dan model dispersi *heavy gas* jika lebih dari nilai tersebut.

Tabel 1. Parameter tangki penyimpanan biogas

Parameter	Nilai
Jenis Tangki	Fixed Dome
Kapasitas Tangki	28316 m ³
Suhu Tangki	40 °C
Tekanan Tangki Operasional	1034 mbar

Skenario A yaitu skenario tekanan tangki biogas di mana variasi tekanan ada pada Tabel 2. Tekanan terendah untuk penyimpanan dianggap 1034 mbar berdasarkan data salah satu perusahaan yang memiliki tangki biogas, sedangkan tekanan tertinggi yang disimulasikan adalah 3000 mbar. Skenario B yaitu skenario komposisi biogas di mana dibuat 8 variasi komposisi sebagaimana tersaji pada Tabel 3. Skenario C yaitu skenario kondisi atmosfer atau pasquill stability class yang memungkinkan di lokasi tangki berdasarkan data dari BMKG selama satu bulan pada bulan Oktober 2024. Skenario basis untuk tekanan adalah A1 sedangkan komposisi basis adalah komposisi B1 yang merupakan keadaan yang paling umum ditemui pada biogas di Indonesia. Kecepatan angin, suhu, dan kelembaban udara yang digunakan pada studi ini dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 2. Variasi tekanan tangki pada skenario A

Nomor	Tekanan (mbar)
A1	1034
A2	1500
A3	2000
A4	2500
A5	3000

Tabel 3. Variasi komposisi biogas pada skenario B

Komposisi	CH4	CO2	H2S	N2	NH3
B1	0,55	0,38	0,01	0,05	0,01
B2	0,55	0,36	0,02	0,06	0,01
B3	0,55	0,34	0,03	0,07	0,01
B4	0,55	0,32	0,04	0,08	0,01
B5	0,50	0,43	0,01	0,05	0,01
B6	0,55	0,38	0,01	0,05	0,01
B7	0,60	0,33	0,01	0,05	0,01
B8	0,65	0,28	0,01	0,05	0,01

Tabel 4 Variasi kondisi atmosfer pada skenario C

Pasquill Stability Class	Parameter	Nilai
B (tidak stabil)	Arah Mata Angin	Tenggara
C (sedikit tidak stabil)	Kecepatan Angin	9,4 km/jam
F (stabil)	Kelembaban Udara	73,06%

Dalam menilai dampak *overpressure*, digunakan konsep Level of Concern (LOC), yaitu batas ambang tekanan yang dapat menimbulkan tingkat kerusakan tertentu. Nilai LOC yang umum digunakan dalam berbagai literatur dan *software* pemodelan konsekuensi, adalah 8 psi, 3,5 psi, dan 1 psi. Hal ini dikarenakan nilai *overpressure* tersebut adalah ambang batas di mana kerusakan parah, sedang, dan ringan terasa. Satuan default dalam EFFECTS adalah mbar, sehingga dilakukan konversi dari satuan psi tanpa mengubah nilai fisis, dengan hasil sebagai berikut: 8 psi setara dengan 551,58 mbar, 3,5 psi dengan 241,32 mbar, dan 1 psi dengan 68,948 mbar. Ketiga nilai ini digunakan dalam simulasi untuk menentukan radius jangkauan dampak dari titik kebocoran berdasarkan intensitas tekanan ledakan yang ditimbulkan.

Untuk menilai risiko kesehatan akibat sebaran H_2S , digunakan indikator AEGL (*Acute Exposure Guideline Levels*), yaitu pedoman konsentrasi paparan zat kimia di udara yang dikembangkan untuk melindungi masyarakat umum, termasuk individu yang sensitif. AEGL terbagi menjadi tiga tingkat, yaitu dari 1 hingga 3. Pada studi ini yang dianalisis hanya AEGL-2 dan AEGL-3 dengan paparan selama 30 menit.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Berdasarkan hasil simulasi, pelepasan biogas dari tangki penyimpanan diketahui dapat menimbulkan dua jenis dampak utama, yaitu ledakan awan uap (*Vapour Cloud Explosion/VCE*) dan penyebaran gas beracun, khususnya hidrogen sulfida (H_2S). Dampak VCE dikaji melalui parameter *overpressure*, yaitu gelombang tekanan destruktif yang dihasilkan akibat pelepasan energi dari ledakan gas yang terbakar cepat setelah pencampuran dengan udara dan terjadi penyalaan tertunda (*delayed ignition*). Gelombang tekanan ini berpotensi menyebabkan kerusakan struktural pada peralatan, bangunan industri, maupun lingkungan sekitar.

Mengacu pada data resmi dari biro keselamatan dan kesehatan kerja Amerika Serikat, nilai AEGL untuk hidrogen sulfida (H_2S) pada durasi paparan selama 30 menit ditetapkan sebagai berikut: AEGL-1 memiliki nilai ambang sebesar 0,60 ppm, yaitu konsentrasi yang dapat menyebabkan iritasi ringan namun tidak mengganggu kemampuan individu untuk melarikan diri. Sementara itu, AEGL-2 ditetapkan sebesar 32 ppm, yang menunjukkan batas konsentrasi yang dapat menimbulkan efek kesehatan serius atau ireversibel, serta berpotensi menghambat kemampuan untuk bertindak. Adapun AEGL-3, yang merupakan ambang paparan paling berbahaya karena dapat menyebabkan dampak kesehatan yang mengancam jiwa atau bahkan kematian, memiliki nilai sebesar 59 ppm [7]. Pada studi ini ditemukan bahwa konsentrasi AEGL-2 dan AEGL-3 tersebut telah tercapai.

3.1. Pengaruh tekanan tangki penyimpan

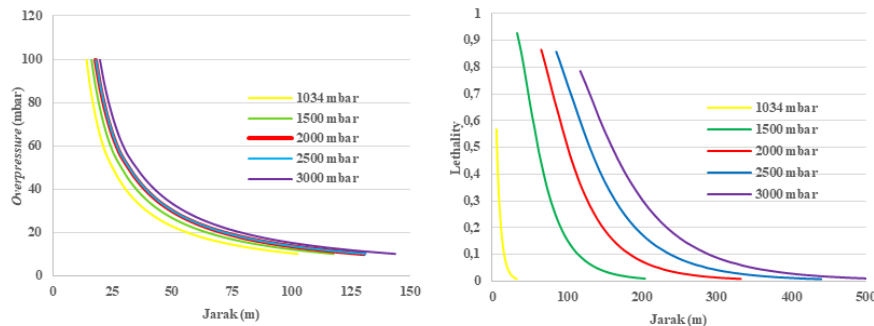
Nilai dari jarak maksimal dan jarak minimal dapat berbeda dikarenakan bentuk area terdampak bisa jadi tidak simetris atau pusat ledakan tidak berada di area kebocoran, sebagaimana terlihat pada Gambar 1. Terlihat bahwa meski titik kebocoran yang disimbolkan dengan tanda silang tidak berada tepat di tengah-tengah kurva kontur. Hal ini dapat terjadi karena kasus VCE terjadi akibat *delayed ignition*, sehingga posisi awan uap sudah bergeser akibat difusi dan konveksi di udara.



Gambar 1. Peta area terdampak ledakan pada skenario A

Gambar 1 ini juga menunjukkan bahwa dampak yang hanya terjadi persis di sekitar tangki Skenario A5 (tekanan 3000 mbar) dengan dampak paling parah pun hanya memiliki *overpressure contour* 551,58 mbar yang memicu kerusakan total bangunan hingga jarak maksimal 22 m dari titik pelepasan. Hal ini serupa dengan hasil penelitian Travnicek yang memodelkan kebocoran biogas sebagai metana murni, di mana kerusakan total alat atau bangunan hingga jarak 23 meter [12]. Selain itu tidak terlihat perbedaan signifikan antara pelepasan dari tangki bertekanan 1034 mbar dan 3000 mbar. Terlihat juga pada Gambar 2

yang menyajikan kurva *overpressure* terhadap jarak untuk setiap skenario A, di mana masing-masing skenario memiliki kurva yang nyaris berimpit. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum biogas tergolong aman dari resiko ledakan meski disimpan hingga tekanan storage 3000 mbar. Keunggulan menyimpan dengan tekanan tinggi adalah volume penyimpanan lebih efisien, meningkatkan kemurnian dan nilai kalor, serta cocok untuk aplikasi transportasi [13].



Gambar 2. Jangkauan dampak ledakan (kiri) dan sebaran bahan beracun (kanan)

Dari Gambar 2 nampak bahwa tekanan tangki lebih mempengaruhi dampak sebaran bahan beracun dibandingkan dengan dampak ledakan. Pada umumnya, peningkatan tekanan tangki memang akan meningkatkan bahaya kebocoran. Temuan serupa didapat pada pemodelan dispersi amonia di mana peningkatan tekanan 0,7 atm hingga 1 atm yang menyebabkan peningkatan konsentrasi amonia di dekat sumber kebocoran [14]. Hal ini terjadi karena tekanan mempercepat interaksi antar molekul dan laju pelepasan dari ke luar tangki. Setelah keluar dari tangki, terjadi dispersi zat ke atmosfer di mana seiring dengan jarak, pengaruh tekanan terhadap kecepatan dispersi melemah dan konsentrasi pada tiap skenario cenderung seragam. Namun, pengaruh ini tidak begitu nampak dalam pada fenomena VCE karena tidak seperti sebaran gas toksik yang bersifat kumulatif, penyalaan awan uap hanya terjadi pada rentang konsentrasi pembakaran. *Lower Flammability Limit* dan *Upper Flammability Limit* dari metana bernilai tetap sehingga meski awan uap semakin besar dengan tingginya laju kebocoran, metana yang ada di luar “inti pembakaran” tidak berkontribusi terhadap ledakan.

Ilustrasi besarnya pengaruh tekanan tangki terhadap sebaran gas toksik dapat dilihat juga pada Gambar 3 yang membandingkan skenario tekanan penyimpanan 1034 mbar dan 3000 mbar. Kebocoran pada tangki bertekanan 3000 mbar mengakibatkan zona AEGL-2 dan AEGL-3 hingga mencapai jarak 7086 m dan 2779 m pada skenario terburuk. Namun, area yang terdampak adalah perkebunan sawit, bukan permukiman padat penduduk. Ini menunjukkan bahwa pemilihan lokasi perusahaan sudah mempertimbangkan aspek keselamatan dengan baik.

3.2. Pengaruh komposisi biogas

Tabel 5 menunjukkan data jangkauan kontur *overpressure* skenario B, sehingga dapat dibandingkan pengaruh komposisi terhadap dampak ledakan. Dari tabel ini juga terlihat bahwa komposisi biogas tidak mempengaruhi dampak ledakan yang terjadi secara signifikan. Komposisi 1 sampai 4 yang memiliki kandungan metana sama menghasilkan ledakan yang persis sama kontur *overpressure*nya. Komposisi 7 dan 8 memiliki jangkauan *overpressure* yang sedikit lebih luas. Hal ini diakibatkan oleh kadar metana yang mencapai 60% dan 65% di komposisi 7 dan 8, sedangkan pada komposisi lain di bawah nilai tersebut. Temuan ini didukung oleh studi lain mengenai pembakaran biogas, di mana komposisi

biogas yang kaya metana memiliki nilai kalor pembakaran yang lebih tinggi dan dapat mencapai suhu penyalaan yang lebih tinggi [4].

Tabel 5. Jarak maksimum kontur *overpressure* VCE untuk berbagai komposisi biogas

Kontur <i>overpressure</i> (psi)	Jarak maksimum kontur untuk masing-masing komposisi (m)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	35	35	35	35	33	35	37	38
3,5	20	20	20	20	19	20	22	22
8	16	16	16	16	16	17	18	18

Berdasarkan Tabel 6, skenario terburuk untuk sebaran bahan beracun terjadi pada komposisi 5 yang memiliki kadar CO₂ lebih tinggi dibandingkan dengan komposisi lain. Pada suhu tetap, kenaikan jumlah fraksi mol komponen yang memiliki berat molekul yang besar akan membuat berat molekul campuran gas menjadi lebih besar dan mengakibatkan densitas gas juga semakin besar. Karena berat molekulnya lebih besar, karbon dioksida dimungkinkan menghasilkan campuran gas berdensitas tinggi yang lambat terdispersi oleh udara. Hal ini serupa dengan studi mengenai dispersi gas berat lain yang cenderung tetap berada di dekat permukaan tanah, sehingga lebih membahayakan bagi makhluk hidup di area sekitar sumber kebocoran [15].

Tabel 6. Jarak maksimum kontur AEGL dari dispersi gas beracun untuk berbagai komposisi biogas

Kontur	Jarak maksimum kontur untuk masing-masing komposisi (m)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
AEGL-2	378	369	353	341	405	381	353	324
AEGL-3	166	161	155	172	178	167	155	172

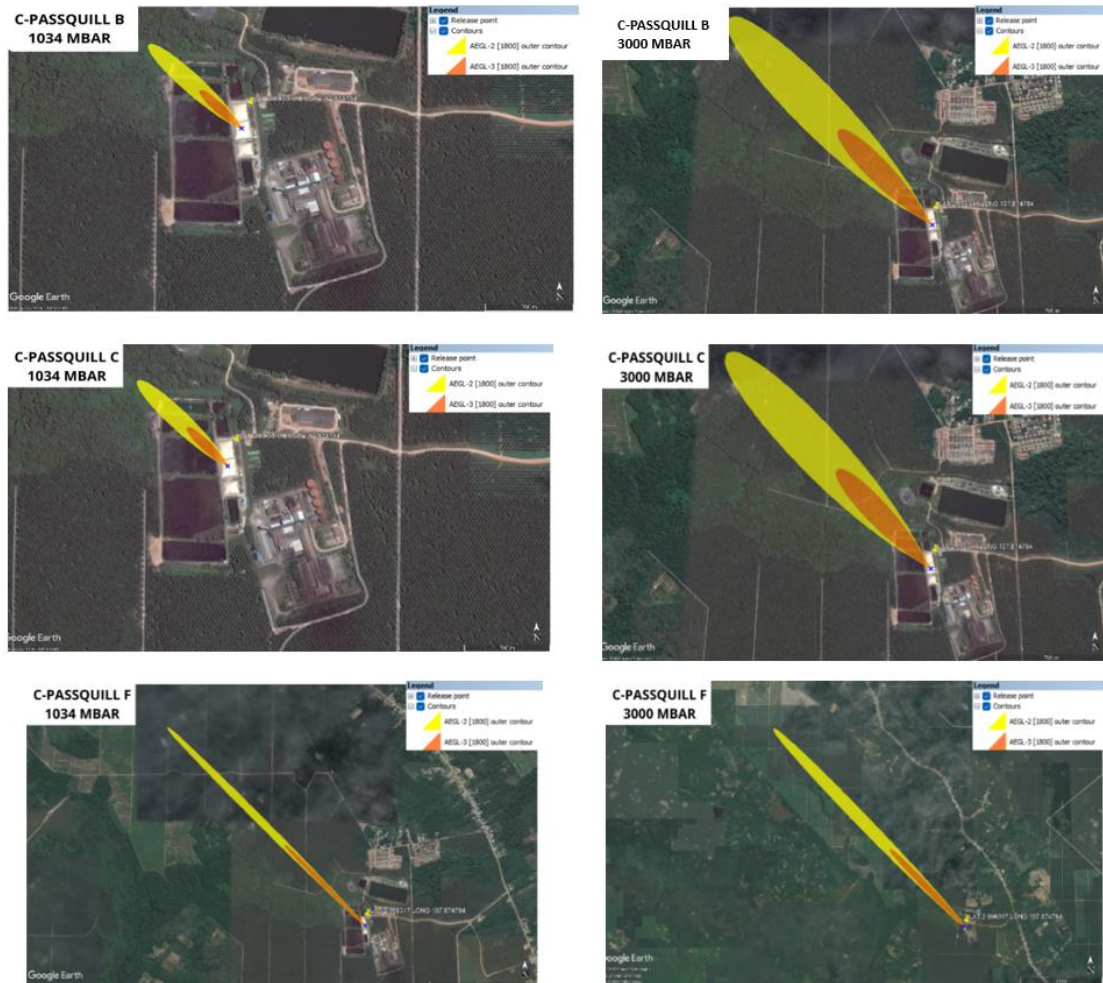
3.3. Pengaruh kondisi atmosfer

Berbeda dengan komposisi dan tekanan, kondisi atmosfer mempengaruhi dampak ledakan biogas secara signifikan untuk tangki penyimpanan atmosferik. Dapat dilihat pada Tabel 3.3 dampak paling parah terjadi pada *pasquill stability class* F dengan jarak maksimal mencapai 39 m, 45 m, dan 68 m pada tiap *overpressure contour*. Artinya alat-alat atau bangunan yang berada pada jarak 39 m dari titik pelepasan dapat mengalami kerusakan total, sedangkan pada jarak 68 m mengalami kerusakan ringan seperti pecahnya kaca. Adanya turbulensi pada *pasquill stability class* B dan C membatasi jangkauan *overpressure* pada tekanan 1034 mbar. Sebaliknya, *pasquill stability class* F yang tidak terdapat turbulensi menghasilkan jangkauan *overpressure* yang lebih jauh karena material terdispersi lebih lambat, dan menyebabkan gas dapat terakumulasi lebih banyak di lokasi sekitar kebocoran [16].

Tabel 7. Jarak maksimum kontur *overpressure* VCE untuk berbagai kondisi atmosfer

Kondisi atmosfer	Jarak maksimum kontur untuk masing-masing kondisi atmosfer (m)					
	Tekanan tangki 1034 mbar			Tekanan tangki 3000 mbar		
	1 psi	3,5 psi	8 psi	1 psi	3,5 psi	8 psi
Pasquill B	15	18	31	22	26	42

Pasquill C	16	20	35	22	26	42
Pasquill F	39	45	68	22	26	42



Gambar 3. Peta area terdampak toksisitas biogas komposisi B1 dengan berbagai kondisi atmosfer

Hal menarik teramati pada tangki penyimpanan biogas bertekanan, di mana tidak ada pengaruh sama sekali dari perbedaan kondisi atmosfer. Pada tekanan penyimpanan 3000 mbar, kecepatan molekul keluar dari lubang kebocoran akan beberapa kali lipat lebih besar, sehingga dinamika pergerakan molekul biogas didominasi oleh momentum pelepasan awalnya [17]. Faktor lainnya adalah kerapatan biogas, di mana pada tekanan tinggi ia akan semakin jauh lebih rapat dari udara dan cenderung berada dekat permukaan tanah sehingga tidak terpengaruh turbulensi atmosfer.

Simulasi dampak akibat sebaran gas beracun juga menemukan bahwa perubahan kondisi atmosfer dari tidak stabil (B) ke stabil (F) mempengaruhi zona terdampak AEGL-2 dan AEGL-3 secara signifikan sebagaimana diilustrasikan oleh peta kontur pada Gambar 3. Perbedaannya dibandingkan simulasi ledakan adalah, untuk sebaran gas beracun, dispersi dari tangki bertekanan masih dipengaruhi oleh turbulensi atmosfer. Hal ini karena rentang waktu observasi dalam simulasi sebaran gas toksik lebih lama (diasumsikan paparan 30 menit) dibandingkan simulasi ledakan. Hal ini sejalan dengan studi Dong dkk. mengenai pelepasan gas alam yang menyimpulkan bahwa meski pengaruh tekanan sangat dominan terhadap proses kebocoran, tetapi kondisi lingkungan tetap memiliki pengaruh terhadap jangkauan zona bahaya karena mempengaruhi dispersi [18].

4. Kesimpulan

Baik tekanan tangki penyimpanan, komposisi biogas, dan kondisi atmosfer mempengaruhi dampak kecelakaan jika terjadi kebocoran biogas. Namun, pengaruh dari tekanan dan komposisi biogas tidak terlalu signifikan pada ledakan VCE, sementara tekanan masih berpengaruh besar terhadap sebaran gas beracun. Skenario terburuk ledakan terjadi pada kondisi atmosfer F (stabil) dengan tekanan tangki atmosferik (1034 mbar) di mana kerusakan total dapat terjadi hingga jarak 39 m. Skenario terburuk sebaran bahan beracun juga terjadi pada kondisi atmosfer F (stabil) namun dengan tekanan storage 3000 mbar di mana dampak jangkauan mencapai 7086 m untuk AEGL-2 dan 2779 untuk AEGL-3. Dari kedua hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa dampak terparah ledakan maupun sebaran toksik terjadi pada kondisi atmosfer stabil. Pemilihan lokasi pabrik yang jauh dari pemukiman memungkinkan zona terdampak masih pada area perkebunan.

Referensi

- [1] Fabiano, B. (2017). Loss prevention and safety promotion in the process industries: issues and challenges. *Process Safety and Environmental Protection*, 110: 1–4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.030>
- [2] Effendy, S., Syarif, A., Negeri Sriwijaya Jl Sriwijaya Negara Palembang, P. (2018). Biogas Hasil Konversi Limbah Kotoran Sapi Sebagai Bahan Bakar Genset untuk Menghasilkan Energi Listrik Kapasitas 0,3 kWatt. *Seminar Nasional Inovasi Dan Aplikasi Teknologi Di Industri*, p. 97–102.
- [3] Sutanto, Supriyanto, T. (2018). Proses Produksi Biogas dari Sampah Organik Rumah Tangga di Wilayah Duren Mekar. *Seminar Nasional Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta*. p. 355–63.
- [4] Wresta, A., Saepudin, A. (2018). Analysis of product and temperature of biogas combustion in various air biogas equivalence ratio and methane content. *Indonesian Journal of Chemistry, Gadjah Mada University*. 18: 211–21. <https://doi.org/10.22146/ijc.23923>
- [5] J. K, M., D. N, M., J. M, M., F. B, M. (2020). A Micro-Controller Based Biogas Leakage and Fire Detection System. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 216–21. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET207629>
- [6] Cipta Lismana, G., A'an Auliq, M., Rintyarna, B.S. (2025). Perancangan Dan Implementasi Sensor MQ-4 Gas Metana (CH₄) Pada Sistem Biogas Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputasi (ELKOM)*, 7: 99–108. <https://doi.org/10.32528/elkom.v7i1.11458>
- [7] OSHA. (2024). Hydrogen Sulfide Hazards [Internet]. *Occupational Safety and Health Administration*.
- [8] El Harbawi, M., Mustapha, S., Choong, T.S.Y., Abdul Rashid, S., Kadir, S.A.S.A., Abdul Rashid, Z. (2008). Rapid analysis of risk assessment using developed simulation of chemical industrial accidents software package. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5: 53–64. <https://doi.org/10.1007/BF03325997>
- [9] Danasa, A.S., Soesilo, T.E.B., Martono, D.N., Sodri, A., Hadi, A.S., Chandrasa, G.T. (2019). The ammonia release hazard and risk assessment: A case study of urea fertilizer industry in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 399: 012087. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/399/1/012087>
- [10] Novrikasari, N., Lestari, F., Sudiman, D.R., Kamso, S., Nugroho, Y.S., Prasetyo, B.T., et al. (2023). Analisis Kesiapsiagaan Bencana Teknologi dari Pabrik X pada Aspek Proyeksi Zona Bahaya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22: 38–45. <https://doi.org/10.14710/jkli.22.1.38-45>
- [11] Perwitasari, P., Sumardi, S., Perdana, I. (2018). Model Dispersi Gas dan Vapor Cloud Explosion pada Kebocoran Outlet Pigtail Tubes Primary Reformer. *Jurnal Rekayasa Proses*, 12: 9. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.33802>

- [12] Trávníček, P., Kotek, L., Junga, P. (2017). Modelling of Consequences of Biogas Leakage from Gasholder. *Journal of Central European Agriculture*, University of Zagreb - Faculty of Agriculture, 18: 15–28. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/18.1.1861>
- [13] Dahlgren, S. (2022). Biogas-based fuels as renewable energy in the transport sector: an overview of the potential of using CBG, LBG and other vehicle fuels produced from biogas. *Biofuels*, 13: 587–99. <https://doi.org/10.1080/17597269.2020.1821571>
- [14] Tan, W., Lv, D., Guo, X., Du, H., Liu, L., Wang, Y. (2020). Accident consequence calculation of ammonia dispersion in factory area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 67: 104271. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104271>
- [15] Safakar, M., Syafiie, S., Yunus, R. (2016). CFD Analysis of Indoor Chlorine Gas Dispersion Storage: Temperatures, Wind Velocities and Ventilation Effects Studies. *AJChE*.
- [16] Yang, M., Lam, J.S.L. (2024). Risk assessment of ammonia bunkering operations: Perspectives on different release scales. *Journal of Hazardous Materials*, 468: 133757. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133757>
- [17] Jiang, X., Lu, H., Xia, Z., Shan, Z.-W., Xiang, Y., Cheng, Y.F. (2025). Above-ground natural gas riser leak dispersion and leakage rate prediction based on CFD and BPNN approaches. *Process Safety and Environmental Protection*, 203: 107854. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107854>
- [18] Dong, G., Xue, L., Yang, Y., Yang, J. (2010). 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*, 23: 522–30. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.04.007>



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
