

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kegagalan pada fasilitas penyimpanan dan sistem perpipaan dapat menyebabkan pelepasan bahan kimia ke lingkungan akibat berbagai mekanisme, seperti korosi, *overpressure*, kegagalan instrumen, maupun kesalahan operasional. Pada tangki penyimpanan, kejadian seperti *overflowing*, kegagalan katup ventilasi, atau kerusakan sambungan las dapat memicu kebocoran maupun terbentuknya genangan cairan di sekitar fasilitas. Apabila bahan yang terlepas bersifat mudah terbakar atau beracun, pelepasan tersebut berpotensi berkembang menjadi kebakaran (*fires*), ledakan (*explosions*), maupun dispersi gas beracun (*toxic gas dispersion*), yang dalam kajian keselamatan proses dikategorikan sebagai kecelakaan besar (*major accidents*) (Assael dan Kakosimos, 2010).

Salah satu bentuk pelepasan bahan kimia tersebut adalah pelepasan bahan bakar, yang pernah dilaporkan terjadi pada fasilitas Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU) di Tanjung Riau, Kota Batam, pada tahun 2023. Peristiwa ini ditandai dengan melubernya bahan bakar dari tangki penyimpanan hingga ke area sekitar fasilitas dan masuk ke saluran drainase di lingkungan warga. Berdasarkan keterangan pihak Pertamina, kejadian tersebut disebabkan oleh kesalahan dalam proses pengisian yang mengakibatkan tangki mengalami kondisi penuh (*overflowing*), bukan karena kebocoran tangki. Selain itu, kejadian ini juga menimbulkan bau menyengat yang tercium hingga ke permukiman warga di sekitar lokasi (Batam Pos, 2023).

Kejadian serupa juga ditemukan pada fasilitas industri dengan skala yang lebih besar. Salah satu kejadian pada proses transfer bahan bakar terjadi di fasilitas Caribbean Petroleum Corporation (CAPECO) di Bayamón, Puerto Rico, pada 23 Oktober 2009. Kejadian ini terjadi saat proses pemindahan bahan bakar bensin dari kapal tanker *Cape Bruny* ke tangki penyimpanan, di mana tangki 409 mengalami *overflowing* selama kurang lebih 26 menit. Akibatnya, sekitar 200.000 galon (sekitar 757.000 liter) bensin keluar dari tangki melalui

vent dengan laju yang cukup besar, kemudian menyebar dan membentuk awan uap dengan luas sekitar 107 *acres* atau sekitar 433.000 m². *Overfilling* ini terjadi karena sistem pengukuran level tidak dapat menunjukkan ketinggian cairan secara akurat, sehingga kondisi tangki yang sudah penuh tidak terdeteksi dengan baik. Selain itu, tidak adanya sistem proteksi seperti *high-level alarm* dan *automatic overfill prevention system* menyebabkan aliran bahan bakar tetap berlangsung hingga tangki meluap (Chemical Safety Board, 2015).

Pada skala yang lebih luas, pelepasan bahan kimia berbahaya dapat menimbulkan dampak yang sangat serius. Salah satu contohnya adalah kebocoran gas metil isosianat (*methyl isocyanate*, MIC) di Bhopal, India, pada 2–3 Desember 1984 pada fasilitas produksi pestisida. Kebocoran sekitar 40 ton gas beracun menyebabkan lebih dari 3.000 korban jiwa dalam waktu singkat, dengan jumlah kematian jangka panjang diperkirakan melebihi 15.000 orang, serta lebih dari 500.000 penduduk terpapar. Paparan gas tersebut menimbulkan gangguan kesehatan serius, seperti iritasi pada mata dan saluran pernapasan, gangguan fungsi paru, serta efek jangka panjang terhadap kesehatan. Kejadian ini menjadi salah satu contoh serius kebocoran bahan kimia pada fasilitas industri berisiko tinggi (Pusat Studi Lingkungan Hidup Universitas Gadjah Mada, 2024).

Berdasarkan berbagai kejadian tersebut, salah satu bentuk pelepasan bahan kimia yang dapat terjadi adalah terbentuknya *toxic vapour cloud*, yaitu awan uap beracun yang terbentuk ketika bahan kimia yang terlepas mengalami penguapan dan kemudian tersebar di atmosfer (Crowl dan Louvar, 2001). Pergerakan dan penyebaran bahan pencemar di atmosfer dipengaruhi oleh pergerakan udara, di mana angin berperan dalam mentransportasikan polutan dari sumber ke arah tertentu. Selain itu, proses pencampuran udara di atmosfer menyebabkan terjadinya pengenceran konsentrasi polutan seiring waktu setelah dilepaskan ke lingkungan (Turner, 2020).

Bensin sebagai salah satu bahan yang berpotensi terlepas ke lingkungan merupakan campuran kompleks yang tersusun dari berbagai kelompok hidrokarbon, terutama parafin dan aromatik sebagai komponen utama dalam komposisinya (Zhang dkk., 2008). Kompleksitas komposisi tersebut

menyebabkan bensin sulit direpresentasikan secara langsung dalam proses pemodelan, sehingga digunakan pendekatan *surrogate fuel* yang terdiri dari sejumlah kecil komponen untuk mewakili bahan bakar sebenarnya (Piehl dkk., 2018). Salah satu komponen yang umum digunakan dalam *surrogate fuel* adalah isooktana, yang termasuk dalam kelompok isoalkana dan digunakan sebagai bagian dari campuran referensi dalam representasi bensin (Zhang dkk., 2008).

Sejalan dengan penggunaan isooktana sebagai komponen dalam *surrogate fuel* untuk merepresentasikan bahan bakar, isooktana (2,2,4-trimetilpentana) berperan dalam penentuan nilai oktan bahan bakar (United States Environmental Protection Agency, 2007). Berdasarkan lembar data keselamatan bahan, isooktana diklasifikasikan sebagai cairan dan uap yang sangat mudah terbakar (*highly flammable liquid and vapour*), serta uapnya dapat menyebar pada permukaan rendah dan menimbulkan bahaya penyalaaan (European Commission, 2017). Paparan terhadap uap isooktana dilaporkan dapat menyebabkan efek pada sistem saraf pusat seperti pusing dan mengantuk (European Commission, 2017). Informasi tambahan menunjukkan bahwa paparan senyawa hidrokarbon alifatik dapat berkaitan dengan gangguan pada sistem saraf pusat serta iritasi pada saluran pernapasan (Haz-Map, n.d.).

Dalam analisis risiko, pemodelan dispersi digunakan untuk memperkirakan jarak sebar dan konsentrasi bahan kimia setelah pelepasan ke lingkungan. Salah satu penelitian menunjukkan bahwa bahan yang tersimpan dalam bentuk cair bertekanan, seperti LPG, dapat menguap dan membentuk awan uap ketika terjadi kebocoran. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kondisi meteorologi, khususnya kecepatan angin dan stabilitas atmosfer, mempengaruhi jarak sebaran gas di atmosfer. Pada kondisi musim panas (*summer*) dengan kecepatan angin rata-rata 3,08 m/s dan stabilitas atmosfer tidak stabil (kelas B), konsentrasi AEGL-3 sebesar 33.000 ppm menyebar hingga sekitar 240 m, AEGL-2 sebesar 17.000 ppm mencapai sekitar 300 m, dan AEGL-1 sebesar 5.500 ppm mencapai sekitar 570 m dari sumber pelepasan. Sementara itu, pada kondisi musim dingin (*winter*) dengan kecepatan angin rata-rata 2,15 m/s dan stabilitas atmosfer yang sangat tidak stabil (kelas A), konsentrasi AEGL-3

menyebar hingga sekitar 300 m, AEGL-2 mencapai sekitar 400 m, dan AEGL-1 mencapai sekitar 600 m. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa variasi kecepatan angin dan kelas stabilitas atmosfer mempengaruhi sebaran konsentrasi gas di udara (Dey dan Dutta, 2025).

Selain dipengaruhi oleh kondisi meteorologi, hasil pemodelan dispersi juga dapat digunakan untuk menggambarkan luas area terdampak akibat pelepasan bahan kimia. Penelitian mengenai proyeksi zona bahaya akibat dispersi gas amonia menunjukkan bahwa hasil simulasi dapat menghasilkan area risiko hingga beberapa kilometer dari sumber pelepasan (Novrikasari dkk., 2023). Hasil proyeksi tersebut menggambarkan luasnya area risiko di sekitar fasilitas. Hasil proyeksi zona bahaya dalam penelitian tersebut digunakan sebagai dasar dalam penyusunan langkah kesiapsiagaan dan mitigasi terhadap potensi kebocoran bahan kimia (Novrikasari dkk., 2023).

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah diuraikan, maka permasalahan yang dapat diidentifikasi dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kegagalan pada fasilitas penyimpanan dan proses penanganan bahan kimia dapat menyebabkan kebocoran dan pelepasan bahan kimia ke lingkungan.
2. Bahan kimia yang terlepas dan memiliki sifat mudah menguap berpotensi membentuk *toxic vapour cloud* di area sekitar fasilitas.
3. *Toxic vapour cloud* yang terbentuk dapat menyebar mengikuti arah dan kecepatan angin serta berpotensi menjangkau area di luar sumber pelepasan.
4. Penyebaran *toxic vapour cloud* berpotensi menimbulkan paparan terhadap pekerja maupun masyarakat apabila konsentrasinya berada pada tingkat yang membahayakan.
5. Jangkauan dan tingkat konsentrasi *toxic vapour cloud* dipengaruhi oleh kondisi meteorologi, seperti kecepatan angin dan stabilitas atmosfer pada saat pelepasan terjadi.
6. Penyebaran *toxic vapour cloud* perlu dipertimbangkan dalam upaya mitigasi risiko di sekitar fasilitas.

1.3 Pembatasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka pembatasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya membahas konsekuensi bahaya berupa penyebaran *toxic vapour cloud* akibat pelepasan bahan bakar pada proses transfer bahan bakar minyak (BBM).
2. Penelitian ini tidak membahas potensi bahaya lanjutan akibat sifat mudah terbakar bahan kimia, seperti kebakaran (*pool fire, jet fire*) maupun ledakan (*vapour cloud explosion*).
3. Penelitian ini tidak membahas secara rinci desain teknis sistem proteksi kebakaran, namun rekomendasi mitigasi tetap diberikan berdasarkan hasil analisis penyebab kegagalan dan evaluasi zona dampak.
4. Penelitian ini berfokus pada senyawa isooktana sebagai representasi bensin (*surrogate fuel*) dalam pemodelan dispersi.
5. Analisis akar penyebab kegagalan dibatasi pada pendekatan kualitatif (identifikasi jalur logika kegagalan tanpa perhitungan probabilitas angka), sedangkan analisis konsekuensi paparan dilakukan secara kuantitatif.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apa saja penyebab kegagalan pada proses transfer bahan bakar minyak (BBM) yang dapat memicu terjadinya pelepasan bahan bakar berdasarkan analisis *Fault Tree Analysis* (FTA)?
2. Bagaimana karakteristik penyebaran *toxic vapour cloud* akibat pelepasan bahan bakar yang mengandung isooktana pada proses transfer BBM di fasilitas SPBU?
3. Bagaimana jangkauan zona dampak akibat penyebaran *toxic vapour cloud* serta kecukupan jarak aman di fasilitas SPBU terhadap zona dampak tersebut?

4. Upaya mitigasi apa yang dapat dilakukan untuk mengurangi risiko paparan *toxic vapour cloud* berdasarkan analisis penyebab kegagalan dan evaluasi zona dampak?

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi akar penyebab kegagalan pada proses transfer bahan bakar minyak (BBM) yang dapat memicu terjadinya pelepasan bahan bakar.
2. Menganalisis karakteristik penyebaran *toxic vapour cloud* akibat pelepasan bahan bakar yang mengandung isooktana pada proses transfer BBM di fasilitas SPBU.
3. Menganalisis jangkauan zona dampak serta mengevaluasi kecukupan jarak aman di fasilitas SPBU terhadap penyebaran *toxic vapour cloud*.
4. Merumuskan upaya mitigasi untuk mengurangi risiko paparan *toxic vapour cloud* berdasarkan hasil analisis penyebab kegagalan dan evaluasi zona dampak.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman mengenai penyebab pelepasan bahan bakar pada proses transfer bahan bakar minyak (BBM) berdasarkan analisis *Fault Tree Analysis* (FTA).
2. Menyajikan jangkauan zona dampak penyebaran *toxic vapour cloud* akibat pelepasan bahan bakar yang mengandung isooktana pada proses transfer BBM di fasilitas SPBU.
3. Memberikan masukan dalam upaya mitigasi risiko paparan *toxic vapour cloud* berdasarkan analisis penyebab kegagalan dan evaluasi zona dampak yang dihasilkan.