

KAJIAN LITERATUR MENGENAI SIMULASI DINAMIK UNTUK *QUANTITAVE RISK ANALISIS* (QRA) DI *THERMAL OXIDATOR* (TOX)

Achmad Rifai¹, Anton Irawan^{*1,2}, Teguh Kurniawan^{1,2}

¹Program Studi Magister Teknik Kimia, Pascasarjana, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Raya Jakarta Km.4 Pakupatan, Serang, 42122, Indonesia

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Jenderal Sudirman km.3, Cilegon, 42435, Indonesia

*Email: antonirawan@untirta.ac.id

Abstrak

Keselamatan proses merupakan salah satu bagian yang penting untuk mengendalikan setiap resiko dalam melakukan kegiatan di perusahaan. Beberapa industri yang memiliki resiko tinggi adalah industri kimia dan migas. Guna menganalisis risiko dalam pekerjaan perlu adanya penggunaan metode yang tepat salah satunya yaitu menggunakan metode analisis risiko kuantitatif (QRA), untuk mengurangi resiko besar yang tersembunyi di dalam pabrik dimana di dalamnya terdapat bahan berbahaya yang harus ditangani. Salah satu alat dalam industri kimia dan migas yang perlu dilakukan QRA adalah oksidator termal (TOX) karena alat ini bisa menimbulkan dispersi ke lingkungan dalam prosesnya mengambil kandungan gas asam yang terdapat di gas alam. Material yang terkandung di dalam gas asam dalam komponen organik volatil (VOC) dimana yang paling berbahaya adalah hidrogen sulfida (H₂S). Tujuan dari kajian literatur ini adalah menunjukkan bahwa penilaian resiko awal (QRA) bisa dilakukan dengan pendekatan dinamis mulai dari identifikasi bahaya hingga evaluasi resiko, diharapkan dengan menggunakan gabungan simulasi dinamis dan analisis resiko, bisa membuka sisi lain yang tidak terlihat sebelumnya dengan metode QRA konvensional. Penilaian resiko tidak hanya dalam tahap suatu desain proses tapi juga selama pabrik tersebut beroperasi, sehingga bisa diperoleh kondisi yang lebih aman dan pemeliharaan yang lebih mudah, dan hal ini juga mendukung proses pengambilan keputusan yang lebih tepat berdasarkan hasil kajian resiko yang dilakukan,

Kata Kunci: Asesmen Risiko, QRA, Oksidator Termal (TOX)

Abstract

Process safety is an important part of controlling every risk in carrying out activities in the company. Some industries that have a high risk are the chemical and oil and gas industries. To analyze the risks in the work, it is necessary to use the right method, one of which is to use the quantitative risk analysis (QRA) method, to reduce the big risks hidden in the factory where there are hazardous materials that must be handled. One of the tools in the chemical and oil and gas industry that needs to be done by QRA is the thermal oxidizer (TOX) because this tool can cause dispersion to the environment in the process of taking the acid gas content found in natural gas. The material contained in acid gas is volatile organic compounds (VOC) where the most dangerous is hydrogen sulfide (H₂S). The purpose of this literature review is to show that initial risk assessment (QRA) can be carried out with a dynamic approach from hazard identification to risk evaluation, it is hoped that using a combination of dynamic simulation and risk analysis, can open up other sides not seen before with conventional QRA methods. Risk assessment is not only in the process design stage but also during the plant's operation so that safer conditions and easier maintenance can be obtained, and this also supports a more appropriate decision-making process based on the results of the risk assessment carried out.

Keywords: Risk Assesment, QRA, Thermal Oxidator (TOX)

1. PENDAHULUAN

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) merupakan aspek penting dalam mengendalikan semua risiko yang ada di dalam operasional perusahaan sehingga Penerapan (K3) di tempat kerja dapat meminimalkan risiko kecelakaan kerja pada setiap kegiatan proses produksi. Guna menganalisis risiko dalam kerja perlu adanya penggunaan metode yang tepat. Metode tersebut yakni dengan menggunakan metode QRA (*quantitative risk analysis*).

Tujuan utama dari QRA adalah untuk mengurangi risiko akut di fasilitas pabrik dimana bahan berbahaya diproses. Estimasi kuantitatif risiko memungkinkan manajemen untuk mengidentifikasi kontributor risiko utama dan hasil dari berbagai pilihan pengurangan risiko (Freeman et al., 1990). QRA diusulkan di bidang industri nuklir pada tahun 1970-an karena jumlah kerusakan yang signifikan yang disebabkan oleh kecelakaan kerja dari adanya bahan berbahaya.

Salah satu industri yang memiliki resiko tinggi adalah kawasan industri kimia. Resiko tersebut berasal dari bahaya yang disebabkan oleh bahan yang harus diproses, disimpan, dan ditangani. Potensi berbagai kecelakaan jauh lebih tinggi daripada di pabrik kimia yang hanya berdiri sendiri. Selain itu, kedekatan instalasi proses dan tangki penyimpanan di dalamnya dapat menimbulkan risiko efek domino berantai. Karena itu harus selalu dilakukan dan hal ini menjadi tantangan dalam kelompok kawasan tersebut. Upaya untuk mengurangi potensi bahaya dilakukan oleh industri dalam rangka mencegah timbulnya kerugian baik dari sisi bisnis, pelanggaran hukum maupun hilangnya reputasi yang dapat disebabkan adanya kecelakaan kerja dan bencana industri, maka dilakukan QRA.

Hasil kecelakaan dan risiko kerja pada industri kimia sangat erat kaitannya dengan variabel proses, untuk itu studi QRA berusaha menghubungkan simulasi proses (statis dan dinamis) dengan simulasi kecelakaan. Di Domenico et al., (2014) mengilustrasikan keuntungan dari mengintegrasikan simulasi proses dan QRA untuk mengidentifikasi penerimaan teknologi baru pabrik metanol. Dan et al., (2014) menyimpulkan untuk konsep simulasi statis dengan menerapkan perilaku dari fluida yang mempunyai karakteristik dipadukan dengan simulasi kecelakaan yang mungkin terjadi untuk fasilitas di pengolahan gas. Sebelumnya studi menggunakan model keadaan ajek untuk simulasi proses sebagai alat untuk menghitung risiko kuantitatif dengan simulasi situasi kecelakaan (Di Domenico et al., 2014).

Penelitian yang dilakukan pada pabrik minyak berat di dalam proses menggunakan QRA yang terintegrasi dengan dinamik simulasi (Ko et al., 2020), membahas mengenai QRA dengan menggunakan simulasi dinamik sehingga mendapatkan variasi dari beberapa parameter kunci dari proses desulfurisasi. Metode QRA dikombinasikan dengan simulasi proses dinamik untuk mengetahui potensi bahaya karena desain keamanan bawaan yang tidak terlihat pada QRA konvensional. Hasilnya dapat menunjukkan bahwa

dengan kombinasi metode ini dapat menunjukkan tingkat bahaya yang lebih tinggi jika hanya menggunakan QRA konvensional. QRA yang terintegrasi dengan simulasi dinamik bisa mendapatkan hasil penilaian yang diidentifikasi sebagai risiko yang tidak dapat ditoleransi atau di luar area ALARP (*as low as resonable practicable*) yang berbeda dengan kondisi ajek, sehingga bisa dibuatkan mitigasi yang lebih tepat untuk menghindari terjadi insiden yang tidak diinginkan, dengan demikian memungkinkan proses dalam fasilitas industri yang lebih aman dan lebih dapat diandalkan.

Dalam suatu pabrik yang memproses gas yang berasal dari sumur produksi, kandungan yang ada di dalam gas bisa bermacam-macam, seperti air, CO₂, H₂S, Merkuri, dan lain lain Untuk menghilangkan atau mengurangi kandung zat-zat pengganggu tersebut biasanya dilakukan beberapa proses seperti absorpsi. Sebagai salah satu zat pengotor, CO₂ dihilangkan atau dikurangi dengan beberapa cara, yang paling umum adalah dengan melakukan absorpsi menggunakan larutan MDEA (Methyldiethanolamine) pada prosesnya selain CO₂, H₂S juga ikut terbawa saat proses ini, dan kemudian hasilnya dibakar pada oksidiser termal.

Oksidiser termal pada unit penghilangan asam berfungsi untuk membakar gas-gas asam. Pengoperasian TOX mempunyai risiko yang sangat tinggi, terutama ketika terjadi kegagalan dalam membakar *volatile organic component* (VOC), yang dapat menyebabkan dispersi pada lingkungan sekitar, dalam hal ini gas H₂S sebanyak 1000 ppm terbuang ke lingkungan (ANSI). Hidrogen sulfida atau H₂S merupakan sebuah senyawa kimia yang sangat berbahaya, dapat menimbulkan kematian dalam hitungan menit pada konsentrasi 1000–2000 ppm (Tomatis et al., 2019). Menurut ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*): Nilai ambang batas (TLV-TWA/*threshold limit value-time weighted average*) H₂S adalah 10 ppm, yang didefinisikan sebagai konsentrasi rata-rata yang diperkenankan untuk pemaparan selama 8 jam sehari atau 40 jam seminggu.

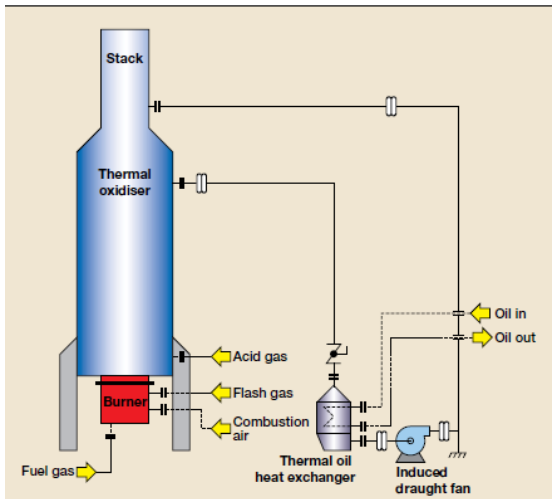
Berdasarkan penjelasan di atas, maka perlu diadakan penelitian tentang kajian literatur pada konsekuensi atau tingkat risiko oksidiser termal (TOX) pada unit proses penghilangan gas asam. Asesmen risiko dilakukan dalam skenario kejadian kegagalan pada oksidiser termal dalam membakar komponen organik volatil (VOC). Kemudian tahapan selanjutnya adalah dengan memodelkan kejadian kecelakaan yang mungkin terjadi untuk memberikan gambaran terjadinya suatu keadaan abnormal sehingga dapat menemukan tindakan preventifnya.

2. KAJIAN LITERATUR

2.1 Oksidiser Termal (TOX)

Oksidiser termal (TOX) dirancang untuk membakar VOC yang merupakan salah satu zat pencemar udara. Senyawa organik ini bersifat mudah menguap serta dapat dengan mudah terdispersi di udara menguap (Spokas et al., 2011) sehingga dapat

membahayakan lingkungan sekitar. Oleh karena itu senyawa ini perlu diuraikan sebelum dibuang ke udara, dalam hal ini sistem penghilangan gas asam (Olszewski, 2015). Pengendalian pencemaran menggunakan oksidiser termal yang juga dikenal sebagai insinerator (Sharma et al., 2013). Polutan seperti VOC adalah masalah emisi dari gas pembuangan yang harus ditangkap sebelum dilepaskan ke atmosfer bumi. Oksidiser termal dapat digambarkan layaknya pembakaran di dalam tungku seperti yang terlihat pada Gambar 1. Awalnya VOC dipanaskan sampai suhu sesuai titik acuan dan kemudian dioksidasi (atau dibakar). Proses ini memecah VOC menjadi CO₂ dan air, yang keduanya dapat dibuang ke atmosfer (Lee et al., 2020).



Gambar 1. Vertical direct-fired thermal oxidiser
Sumber: (RYAN TATE Zeeco, Inc, 2012)

Pemilihan TOX yang digunakan biasanya disesuaikan pada industri (Sussman et al., 2016). Setiap industri mempunyai kecenderungan yang berbeda dalam memilih jenis TOX yang digunakan, berdasarkan pada karakteristik dari manufakturnya. Pada umumnya pemilihan jenis di industri mempertimbangkan hal-hal antara lain : 1) Polutan yang harus dihilangkan, 2) Konsentrasi polutan dalam aliran udara, 3) Total volume/aliran aliran udara, 4) Biaya operasional, dan 5) Biaya peralatan pertama (Yang et al., 2012). Pada industri minyak dan gas (migas) kriteria pemilihan ini dikarenakan TOX memiliki peran penting untuk mengatasi gas buang. Hal ini dikarenakan kinerja TOX ditentukan dari proses pembakaran yang terjadi pada burner harus sempurna serta suhu oksidasi gas buang pada ruang pembakaran harus sesuai (Susiloputra & Dwiyanoro, 2017).

Mekanisme kerja TOX menunjang untuk proses pembakaran gas buang, yaitu terletak pada burner yang merupakan tungku bakar dari oksidiser termal. Burner ini bekerja untuk menghasilkan api yang digunakan untuk membakar gas buang. Pada industri migas komponen limbah gas pengikut pada umumnya merupakan 6 komponen yang harus dibakar agar konsentrasinya dapat terurai dan aman untuk dibuang ke lingkungan dengan kadar yang telah ditentukan

yakni H₂S, CO₂, metana, etana, propana, dan H₂O yang akan dimasukkan ke pusat dari burner tile. Hal ini dilakukan untuk menjamin bahwa gas asam bercampur sempurna dengan bahan bakar dan udara dan menghasilkan gas buang yang terdiri dari 4 komponen, yaitu CO₂, H₂O, N₂, dan SO₂.

Senyawa organik yang mudah menguap (VOC) dikenal berbahaya efek terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Finlayson-Pitts & Hemminger, 2000). Oleh karena itu, tingkat emisi tahunan sangat tinggi dilaporkan di Cina selama dekade terakhir, khususnya di kota besar seperti Shanghai (247,2 ton/km²), Tianjin (62,8 ton/km²) dan Beijing (38,4 ton/km²) (Zheng et al., 2017) penyebab perhatian. Dalam skenario ini, sangat penting untuk mengimplementasikan secara optimal langkah-langkah untuk pengurangan emisi VOC antropogenik agar kualitas udara di Cina meningkat.

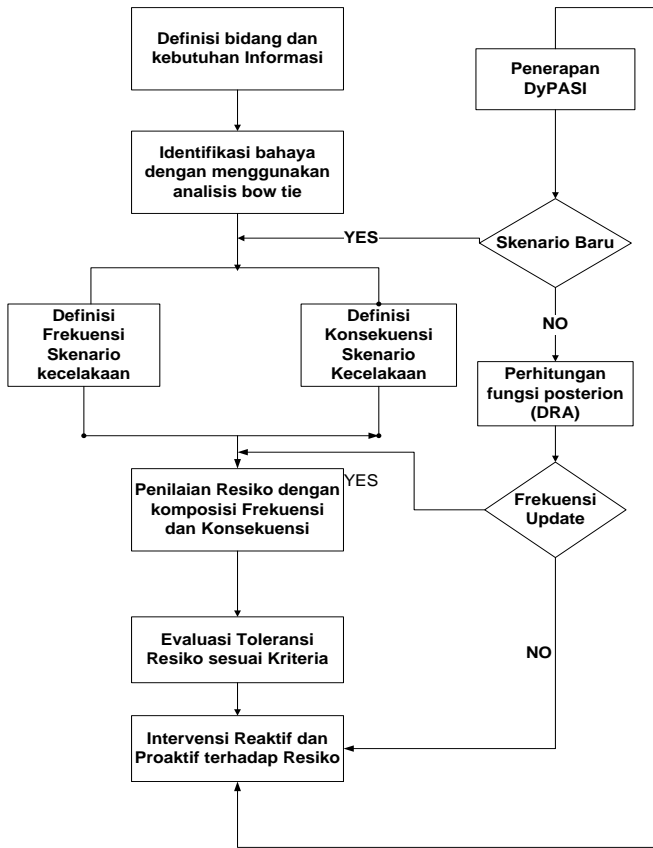
Dalam proses pembakaran di TOX diperlukan oksigen sebagai salah satu dari segitiga api sehingga keberadaannya harus dimonitor dengan cermat. Analiser oksigen memiliki peran yang sangat penting, karena kadar oksigen pada hasil pembakaran yang diukur akan mempengaruhi presentase bahan bakar gas yang dikeluarkan untuk proses pembakaran pada burner. Probe pada analiser sangat mudah mengalami korosi, sehingga hasil pengukuran yang dilakukan menjadi tidak tepat.

Selain faktor dari probe pada analiser oksigen, hal penting lain dalam pemilihan jenis TOX/TOU adalah jenis dari VOC dalam aliran gas limbah, termasuk adsorpsi, pengolahan biologis, dan insinerasi termal (Bouchaala, 2012). Termal proses oksidasi biasanya bekerja pada suhu sekitar 900°C dan ini terutama digunakan untuk perawatan volume tinggi VOC pekat (Khan dan Ghoshal, 2000). Secara khusus, proses oksidasi katalitik dievaluasi secara ekstensif karena suhu operasi yang lebih rendah (di bawah 400°C). Hal ini ditandai dengan berkurangnya konsumsi bahan bakar tambahan maupun kebutuhan akan kebutuhan material tahan panas (Lou dan Huang, 2008). TOX yang masih konvensional digunakan karena umurnya yang panjang (sekitar 20 tahun) (Katari dkk., 1987; Sorrels dkk., 2017). Konsumsi bahan bakar tambahan fasilitas kuno tersebut jauh lebih tinggi dari yang diperkirakan, dibandingkan dengan pengoksidasi dengan jenis yang lebih baru (Jin et al., 2016), Perlu dilakukan analisis mengenai dampak lingkungan (AMDAL) dan analisis mengenai biaya (CBA) sehingga bisa mengidentifikasi teknologi terbaik yang akan digunakan untuk mengganti teknologinya yang sudah tertinggal.

2.2 Metode QRA (Quantitative Risk Analysis)

Setelah mendapatkan perhitungan mengenai jumlah frekuensi kejadian dan konsekuensi yang terjadi, kemudian digabungkan untuk mendapatkan nilai skor risiko rendah, risiko paling berbahaya atau mematikan (Aven, 2017). QRA mencakup seluruh aktifitas yang dilakukan untuk mengidentifikasi peristiwa berbahaya secara berurutan untuk mengukur tingkat risiko secara keseluruhan

(Marhavilas et al., 2011). Peristiwa berbahaya serupa sering terjadi dikelompokkan dan dinilai bersama. Untuk lebih jelas langkah dari QRA bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Analisis menggunakan metode QRA
Sumber: (Antonioni et al., 2009)

2.2.1 Identifikasi skenario QRA

Bahaya yang ada dan mungkin bisa terjadi di fasilitas pabrik telah diidentifikasi dalam studi bahaya (misalnya HAZID-hazard identification atau HAZOP-hazard and operating study) dan hasilnya digunakan sebagai titik awal untuk mengidentifikasi skenario untuk dimasukkan dalam QRA (H. J. Paskan et al., 2018). Studi mengenai bahaya biasanya akan memiliki peringkat secara kualitatif frekuensi yang diharapkan dan kemungkinan konsekuensi dari mengidentifikasi bahaya sehingga QRA bisa fokus hanya pada bahaya yang signifikan. Pada industri kimia, potensi bahaya yang memiliki risiko tertinggi adalah pelepasan gas yang dapat menimbulkan kebakaran, ledakan, serta persebaran gas beracun. Penelitian yang dilakukan oleh Jeffrey D. Marx et al., (2012) ditemukan tindakan yang dapat dilakukan sebagai pencegahan terjadinya insiden adalah menggunakan metode kasus realistik. Pelepasan gas yang terjadi (kebocoran) pada sambungan hasil pengelasan antara pipa dengan flange dengan skenario diameter lubang kebocoran yang besar diameternya antara kurang dari 1 mm sampai lebih besar dari 100 mm, tingkatan risiko tertinggi dari kebocoran tersebut dapat dilihat di table-1. Tindakan mitigasi yang direkomendasikan yaitu berupa engineering design, perbaikan management, deteksi

gas dan peringatan dini serta pelatihan tanggap darurat.

Tabel 1. Ukuran lubang dan kategori insiden

Kategori Ukuran Lubang	Penilaian	Semua Insiden (dengan ukuran lubang yang ditentukan)
Semua Insiden	Jumlah Insiden	4845
D ≤ 1 mm	Jumlah	1943
	%	40,1
1 mm < D ≤ 10 mm	Jumlah	2083
	%	43,0
10 mm < D ≤ 100 mm	Jumlah	699
	%	14,4
D > 100 mm	Jumlah	120
	%	2,5

Sumber: (Jeffrey D. Marx et al 2012)

2.2.2 Penilaian frekuensi

Pada tahap ini, penilaian frekuensi dilakukan dengan cara menghitung frekuensi rilis dari bagian yang dapat diisolasi yang melibatkan perhitungan item peralatan di masing-masing bagian (seperti yang ditunjukkan pada P&ID) dan dikalikan dengan pelepasan peralatan frekuensi dari database yang diterbitkan (Marx & Ishii, 2021).

Persamaan berikut menunjukkan bagaimana frekuensi di awal kejadian, probabilitas menengah, dan frekuensi hasil akhir terkait satu sama lain (CCPS, 2000).

$$f_i = F_i P_{o,i} P_{oc,i} \tag{1}$$

dimana f_i adalah frekuensi dari hasil akhir skenario i yang muncul dari kejadian I (1/thn), F_i adalah frekuensi kejadian I yang menyebabkan hasil yang berbeda (1/tahun), P_o ; i adalah probabilitas kejadian untuk hasil antara insiden I yang menyebabkan sejumlah i final hasil, dan P_{oc} ; i adalah probabilitas kejadian untuk final hasil yang merupakan bagian dari hasil yang timbul dari insiden I .

2.2.3 Penilaian konsekuensi

Berbagai model tersedia untuk memperkirakan konsekuensi kebakaran yang dihasilkan, dispersi gas, ledakan, dan lain-lain. Potensi bahaya dari efek insiden tersebut bisa menyebabkan kematian menggunakan kriteria yang sesuai sehingga bisa ditentukan konsekuensinya. Konsekuensi bisa mengarah pada kejadian yang lebih signifikan pada aset itu sendiri, lingkungan, dan reputasi perusahaan. Hal ini bisa diperkirakan dan dimitigasi dengan menggunakan metode QRA (H. Paskan & Reniers, 2014).

Proporsi cedera dan kematian yang terjadi dalam populasi yang terpapar radiasi termal atau pelepasan zat beracun biasanya diwakili oleh fungsi Probit (Pr) (Di Domenico 2014).

Kematian penduduk di area perkampungan karena kerusakan struktural:

$$Pr = -23.8 + 2.92 \times \ln(P) \tag{2}$$

Kematian penduduk di luar area perkampungan karena kerusakan organ dalam tubuh

$$Pr = -77.1 + 6.91 \times \ln(P) \tag{3}$$

Dimana P Tekanan dalam Pascal
 Persamaan yang digunakan untuk menghitung tingkat
 keberacunan didasarkan pada Buku Ungu

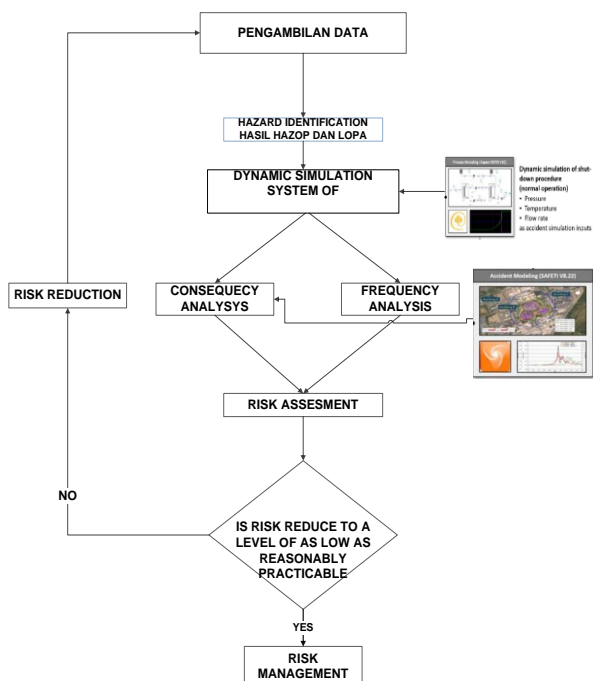
$$Pr = a + b \times \ln(C^n \times t) \quad (4)$$

 Dimana:
 a,b,n = konstanta yang menjelaskan keberacunan
 bahan (spesifik untuk setiap zat)
 C = Konsentrasi (mg/m³)
 t = Waktu terpapar (menit)

2.2.4 Analisis risiko

Analisis risiko mengkombinasikan antara
 konsekuensi dan frekuensinya dalam model QRA
 terintegrasi untuk memberikan nilai risiko numerik
 (Van Weyenberge et al., 2019). QRA darat biasanya
 dilakukan menggunakan spreadsheet berbeda dengan
 di QRA darat biasanya dilakukan dengan perangkat
 lunak yang tersedia (Koorneef et al., 2010) langkah-
 langkah dalam melakukan analisis risiko bisa terlihat
 di Gambar 4. Potensi bahaya non-proses juga perlu
 untuk dianalisis, seperti bahaya transportasi, bahaya
 tiap pekerjaan, kapal tabrakan, benturan pesawat, dan
 bahaya alam. Masing-masing memiliki karakteristik
 sendiri dalam menentukan metode yang akan
 digunakan untuk menghasilkan analisis risiko.

Nilai risiko yang dihitung dijumlahkan untuk
 semua kemungkinan hasil dan diekspresikan dalam
 bentuk yang diperlukan (Nair et al., 2012). Risiko lepas
 pantai biasanya diekspresikan dalam istilah risiko
 individu per tahun (IRPA) dan potensi kehilangan
 nyawa (PLL) (Zhen et al., 2018), sedangkan risiko darat
 biasanya akan menghitung risiko individu lokasi-
 spesifik (LSIR) dan FN untuk pertimbangan risiko
 sosial juga IRPA.



Gambar 4. Analisis risiko menggunakan metode QRA yang diintegrasikan dengan dinamik simulasi
 Sumber:(Ko et al., 2020; Skogdalen & Vinnem, 2012)

2.2.5 Evaluasi resiko

Evaluasi risiko bisa dievaluasi dengan
 membandingkan antara data di negara dan perusahaan
 kriteria penerimaan risiko (Ray et al., 2014).
 Kontributor yang paling signifikan terhadap total risiko
 juga diidentifikasi untuk memungkinkan langkah-
 langkah perbaikan terutama yang memiliki risiko
 terbesar dengan melakukan mitigasi penurunan dari
 kemungkinan yang bisa terjadi (Anand et al., 2010).
 Salah satu alat pelengkap untuk QRA adalah *cost-
 benefit analysis* (CBA) yang digunakan untuk
 menentukan peringkat pengurangan risiko dalam segi
 keefektifan biaya (Salling & Leleur, 2015). QRA
 memiliki banyak sumber ketidakpastian, baik dalam
 datanya, metode atau asumsi, dan ini perlu dipahami
 melalui sebuah studi yang dihasilkan yang dapat
 menginformasikan interpretasi dari hasil QRA.

Analisis konsekuensi dan potensi bahaya memiliki
 tujuan sebagai berikut: penilaian kemungkinan
 kerusakan peralatan dan struktur, estimasi risiko sosial
 dan/atau risiko individu untuk populasi yang terkena
 dampak fisik yang berbahaya, pemetaan kawasan
 rentan terkena dampak, mengantisipasi keadaan
 darurat, dan lain lain. Peraturan saat ini hanya
 berdasarkan kuantifikasi paparan efek pelepasan dan
 penyebaran zat berbahaya probabilitas yang
 menimbulkan kematian. Untuk simulasi skenario yang
 terjadi bisa menggunakan perangkat lunak yang
 digunakan untuk menilai potensi bahaya bagi
 kehidupan dan lingkungan, dan untuk mengukur
 tingkat keparahannya antara lain PHAST® (Process
 Hazard Analysis Software Tool), versi 6:51, yang
 dikembangkan oleh DNV.

3. ANALISIS PERKEMBANGAN QRA

3.1 Dasar-Dasar Penilaian Risiko

Kecelakaan kerja yang pernah terjadi seperti yang
 ada dalam penelitian Varma & Varma (2005) dan Paté-
 Cornell (1993) serta yang lebih baru, seperti dalam
 penelitian Paltrinieri et al., (2012) dan Camilli et al.,
 (2010), dapat diambil kesimpulan bahwa pentingnya
 peran dari manajemen risiko yang memadai dan
 kontrol untuk industri proses kimia. Peraturan
 keselamatan industri yang ada bertujuan untuk
 mengendalikan bahaya kecelakaan besar terkait bahan
 kimia. Hal itu pernah terjadi di pabrik industri kimia
 kota Seveso, di Italia tahun 1976. Pada tahun 2012,
 generasi ketiga dari peraturan ini (peraturan Seveso
 III) diterbitkan dan berlaku untuk lebih dari 10.000
 perusahaan industri di Uni Eropa, terutama sektor
 kimia, petrokimia, logistik dan penyulingan logam
 (Mannan, 2012). QRA digunakan untuk mematuhi
 peraturan Seveso (H. Pasman & Reniers, 2014). Hal ini
 digunakan untuk mengevaluasi risiko keamanan
 proses secara keseluruhan dalam industri proses kimia
 dan mengidentifikasi area yang memerlukan
 pengurangan risiko (Center for Chemical Process
 Safety & American Institute of Chemical Engineers,
 2000). Pemilihan metode QRA setelah berkonsultasi
 antara perusahaan dan otoritas yang berwenang.
 Pemilik perusahaan bertanggung jawab atas desain

yang diperlukan untuk melakukan instalasi, namun pemilihan metode QRA hanya dilakukan oleh otoritas yang berwenang (V Villa, 2017).

3.1.1 Penilaian risiko kuantitatif untuk industri proses kimia

Kegiatan komunikasi, konsultasi, pemantauan, dan tinjauan harus dilakukan sebelum, selama, dan setelah penilaian. Hal ini bertujuan untuk menjamin pencapaian tujuan. Proses penilaian risiko yang ditentukan oleh standar NORSOK Z-013 Azzi et al., (2016) yang menjelaskan mengenai resiko dan analisis mengenai persiapan jika terjadi situasi darurat (*risk and emergency preparedness analysis*). Berdasarkan dari hasil QRA yang ada dapat memberikan otoritas dari pemangku kepentingan dasar yang kuat untuk menciptakan kesadaran tentang bahaya dan risiko yang ada. Langkah-langkah potensial untuk mengendalikan atau mengurangi risiko dapat diterapkan, dan pengaruhnya dapat dinilai.

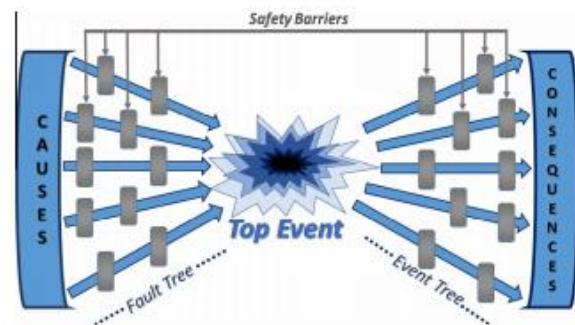
Sebagai tahap awal, tujuan, tanggung jawab, metode, kriteria penerimaan risiko dan proses (selama proses dan rencana pelaksanaan) harus didefinisikan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai penuh dari hasil yang diperoleh (Ramesh et al., 2005). Langkah pertama dalam pengembangan proses kimia QRA adalah identifikasi bahaya, yang memiliki beberapa tujuan, yaitu:

- Menyoroti kemungkinan malfungsi sistem, yang bahkan tanpa menyebabkan kecelakaan, dapat meningkatkan penurunan kualitas produk atau penghentian proses pabrik.
- Menguraikan kemungkinan kejadian yang merupakan situasi yang tidak diinginkan, seringkali potensi pelepasan zat berbahaya ke lingkungan untuk dianalisis dengan metode QRA.
- Menjelaskan skenario potensial yang terkait dengan peristiwa bahaya dan konsekuensinya. Berdasarkan jenis gangguan proses dan kinerja pengendalian dan hambatan keamanan, skenario dapat melibatkan kehilangan kualitas, kehilangan keselamatan, atau keduanya.

Seperti yang dilaporkan oleh Center for chemical process safety (Center for Chemical Process Safety & American Institute of Chemical Engineers, 2000), beberapa pendekatan untuk identifikasi bahaya dapat dikelompokkan menjadi: tahap pemeriksaan awal, analisis bahaya awal (PHA), mode kegagalan dan analisis efek (FMEA), analisis pohon kesalahan (FTA), analisis dasi kupu-kupu (*bow tie*), analisis bahaya dan pengoperasian (HAZOP), dan lain lain. Penerapannya bergantung pada siklus hidup proyek, serta jumlah informasi yang diperlukan. Metode analisis skenario kegagalan sistem yang dikembangkan Khan & Abbasi (2002) dapat digunakan sebagai kriteria untuk mengidentifikasi skenario bahaya yang kredibel (Valeria Villa, Reniers, et al., 2016). Fase berikut ini penting untuk keseluruhan proses analisis QRA dan

mengarah pada estimasi frekuensi kecelakaan potensial serta evaluasi dari konsekuensi kecelakaan. Seperti yang dinyatakan oleh ("Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications," 2011), analisis risiko pada dasarnya melibatkan estimasi konsekuensi dan frekuensi kecelakaan dengan menggunakan teknik-teknik dan perhitungan matematika.

Tingkat kegagalan umum dapat diambil dari pangkalan data dan kemudian diterapkan pada penghitungan QRA; data pabrik tertentu harus diterapkan, jika tersedia. Pedoman penilaian risiko kuantitatif "purple book" (PurpleBook, 1999) (Skogdalen & Vinnem, 2012) melaporkan beberapa insiden kejadian (LOC) dan frekuensi kegagalan untuk sejumlah instalasi standar seperti tangki penyimpanan, unit transportasi, jaringan pipa dan peralatan pemuatan. LOC harus disertakan jika frekuensi kegagalan lebih tinggi dari 8-10 per tahun dan jika kerusakan mematikan (probabilitas 1%) di luar batas bangunan mungkin terjadi. Data kegagalan yang dilaporkan dalam sumber ini sebagian besar didasarkan pada penelitian yang dilakukan dalam studi COVO (Komisi COVO, 1982), seperti dilansir (Beerens et al., 2006). Demikian pula, *health & safety executive* (HSE) telah menerbitkan satu set data frekuensi kegagalan umum untuk diproses.



Gambar 5. Bow tie diagram: alat standar yang penting untuk penilaian risiko

Sumber: H. Pasman & Reniers, 2014; Skogdalen & Vinnem, 2012

Estimasi konsekuensi digunakan untuk menentukan potensi kerusakan atau cedera dari kejadian tertentu yang tidak diinginkan. Kuantifikasi konsekuensi biasanya dilakukan dalam hal kerugian produksi, kerugian kesehatan manusia, kerugian aset, dan kerugian lingkungan (F. I. Khan & Haddara, 2004). Penilaian konsekuensi dapat dilakukan dengan menggunakan sejumlah besar model matematis dan empiris; deskripsi dari banyak pendekatan (Arunraj & Maiti, 2009). Alat standar yang biasa digunakan dalam penilaian resiko adalah *bow tie* seperti terlihat pada Gambar 5. Estimasi konsekuensi pertama-tama mencakup model sumber, yang memungkinkan penilaian hilangnya penahanan zat berbahaya (misalnya, laju pelepasan bahan berbahaya, tingkat asap dan laju penguapan) dan efek fisik terkait, seperti kebakaran, ledakan, dan dispersi beracun (Taylor,

2009). Model fisik-matematis untuk estimasi dampak, dinamakan model kerusakan, dapat diterapkan untuk menghitung distribusi kerusakan secara spasial, biasanya dianggap oleh QRA sebagai probabilitas kematian manusia. Misalnya, peninjauan model yang tersedia untuk estimasi kerusakan telah dilakukan oleh (Cozzani & Salzano, 2004), yang memberikan kontribusi yang signifikan pada pengembangan model kerentanan untuk tangki penyimpanan yang mengalami gelombang kejut.

Langkah QRA berikut, bernama komposisi ulang risiko dapat dilakukan untuk memperkirakan risiko, dengan menjumlahkan kontribusi semua skenario terhadap risiko di setiap posisi spesifik di atas ruang (Center for Chemical Process Safety & American Institute of Chemical Engineers, 2000). Pilihan matriks risiko sangat penting karena mengarahkan jenis informasi yang akan diperoleh dari analisis risiko dan apakah hasilnya dianggap sah dan informatif oleh pembuat keputusan dan pemangku kepentingan (Inger Lise Johansen & Rausand, 2014).

Hasil estimasi risiko jika dibandingkan dengan kriteria penerimaan, yang hasilnya ditentukan oleh peraturan dari perusahaan. Contoh relevan dari kriteria penerimaan yang berbeda adalah yang dikembangkan oleh Badan Nasional (Claessen et al., 2011). Selain itu juga terdapat pada matriks risiko yang dikembangkan dalam kerangka Proyek ARAMIS Eropa (Salvi & Debray, 2006). Dalam kasus risiko yang tidak dapat diterima, penerapan langkah preventif dalam mengurangi risiko dapat diterapkan (Aven & Vinnem, 2005). Selama fase konsep dan rekayasa, usulan pengurangan risiko harus difokuskan pada kemungkinan opsi, tata letak yang berbeda, peralatan, dan lokasi (Azzi et al., 2016). Selama fase operasional, usulan pengurangan risiko pada sifat operasional dan proyek modifikasi harus dievaluasi untuk menunjukkan bahwa tingkat risiko selama operasi adalah yang terendah, atau memberikan pembenaran (Azzi et al., 2016).

QRA dapat dianggap sebagai prosedur berulang yang memberikan gambaran risiko dari setiap proses (Center for Chemical Process Safety & American Institute of Chemical Engineers, 2000) dan harus diperbarui maksimal setiap lima tahun atau jika terjadi suatu perubahan besar pada pabrik, seperti yang dinyatakan oleh peraturan Seveso (Kletz & Amyotte, 2019). Komunikasi dan konsultasi, serta kegiatan pemantauan harus selalu dilakukan demikian juga tinjauan dan pembaruan harus dilakukan selama proses masih terjadi (Azzi et al., 2016).

Secara khusus, matriks risiko yang menangani bahaya bagi manusia dianalisis seperti contoh pada Tabel-2. Skor dari 1 sampai 5 diberikan untuk dimensi berikut:

1. Penerapan nyata (nyata-skor 1) terhadap penerapan hipotetis (hipotetis-skor 5) ke fase siklus hidup pabrik proses kimia. Misalnya, penerapan matriks risiko ke fase "operasi dan pemeliharaan" memiliki implikasi yang relatif nyata dari kejadian yang telah diketahui, yang dihubungkan dengan aktivitas

rutin (skor 1). Sebaliknya, penerapan matriks risiko ke fase "kelayakan" menyiratkan prediksi perilaku sistem, yang dimodelkan berdasarkan hipotesis (skor 5). Di antara dua ekstrem ini, penerapan ke fase siklus hidup lainnya diberi peringkat sebagai berikut (dari yang berwujud hingga hipotetis): "desain terperinci dan instalasi rekayasa" (skor 2), "penonaktifan/pembuangan" (skor 3) dan "konsep" (skor 4). Nilai rata-rata ditentukan untuk matriks risiko yang diterapkan ke lebih dari satu fase.

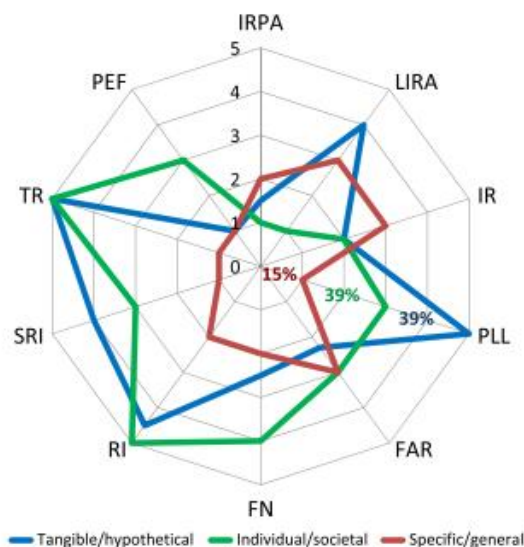
2. Matriks risiko berfokus pada kerugian individu tunggal (skor individu 1) terhadap matriks risiko yang membahas efek sosial dari peristiwa yang tidak diinginkan (skor sosial 5). Matriks risiko kelompok berada pada posisi tengah (skor 3).

3. Matriks risiko spesifik yang hanya menangani satu fase siklus hidup (skor spesifik 1) terhadap matriks risiko umum yang menangani semua lima fase risiko (skor umum 5). Penilaian untuk dimensi ini sangat mudah dan menentukan tingkat spesifikasi matriks risiko.

Tabel 2. Matriks resiko dan insiden

Sumber: Pedoman Safety Pertamina, 2020

	A	B	C	D	E
5	Moderate	Serious	Critical	Critical	Critical
4	Acceptable	Moderate	Serious	Critical	Critical
3	Acceptable	Acceptable	Moderate	Serious	Serious
2	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Moderate	Serious
1	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Moderate



Gambar 7. Analisis kualitatif ini dengan menggunakan grafik radar

Sumber: Baesi et al., 2013

Tabel 2 mengilustrasikan hasil analisis kualitatif ini dengan menggunakan grafik radar. Tiga persentase yang dilaporkan pada diagram dihitung dengan membandingkan area yang ditentukan oleh tiga kontur dan total area grafik. Kontur biru ditentukan oleh penilaian nyata/hipotetis dari matriks risiko. Areanya menunjukkan bahwa matriks risiko bahaya manusia yang dikumpulkan oleh I. L. Johansen & Rausand (2012) cenderung lebih fokus pada fase siklus hidup nyata/beton dari pabrik proses kimia (seperti yang telah didefinisikan sebelumnya): area yang dihasilkan sebesar 39%, dimana 0% mewakili fase siklus hidup nyata/beton dan 100% mewakili fase pemodelan hipotetis.

Hal ini diketahui fakta bahwa ada perhatian besar juga dalam hal keselamatan fase "operasi dan pemeliharaan" serta "desain rinci dan instalasi teknik", yang mewakili inti dari siklus hidup pabrik dan merupakan fase kunci dalam hal produktifitas. Fase lain yang dilakukan hanya sekali dalam siklus hidup pabrik dan memiliki sedikit peluang untuk dikoreksi ("kelayakan", "konsep", dan "penonaktifan/pembuangan") mungkin menyembunyikan risiko laten.

Kontur hijau ditentukan oleh penilaian individu/masyarakat dari matriks risiko. Area tersebut menunjukkan bahwa matriks risiko yang dipertimbangkan cenderung lebih fokus pada individu: area yang dihasilkan sebesar 39%, dimana 0% mewakili risiko individu dan 100% mewakili risiko sosial. Tumpang tindih yang baik antara area hijau dan biru menunjukkan bahwa matriks risiko individu cenderung lebih disukai untuk fase siklus hidup pabrik yang berwujud/beton, seperti "operasi dan pemeliharaan" dan "desain rinci dan instalasi teknik", sementara kelompok dan masyarakat matriks risiko cenderung digunakan untuk fase yang lebih hipotetis, seperti "kelayakan" dan "konsep".

Kontur merah ditentukan oleh penilaian spesifik/umum dari matriks risiko. Area tersebut menunjukkan spesifikasi yang diucapkan dari matriks ini: area yang dihasilkan sebesar 15%, dimana 0% mewakili matriks tertentu dan 100% mewakili matriks umum. Jadi, dalam sebagian besar kasus, matriks risiko ditentukan untuk beberapa fase siklus hidup pabrik proses kimia dan tidak dapat digunakan secara efektif untuk menggambarkan fase lainnya. Pada bagian berikut, detail lebih lanjut tentang penerapan QRA pada fase siklus hidup ini dibahas.

3.1.2 Penerapan QRA dalam industri proses kimia

Pada awal sejarahnya, QRA digunakan sebagai aktivitas verifikasi (Valeria Villa, Paltrinieri, et al., 2016). Saat ini QRA memainkan peran yang relevan dalam berbagai aspek siklus hidup pabrik, seperti yang ditunjukkan pada bagian sebelumnya. Aplikasi penting dari QRA adalah desain berbasis risiko; seperti yang ditunjukkan oleh Fadier dan De la Garza (2006). Desain berbasis risiko memainkan peran yang relevan dalam mengurangi risiko saat instalasi dan operasi suatu pabrik industri kimia.

Pendekatan kuantitatif yang baik dalam melakukan desain teknik berbasis risiko yang melibatkan hasil penggabungan semua metode tentang desain ke dalam proses pengambilan keputusan (Demichela et al., 2004). Hasil dari QRA perlu diperoleh pada tahap sedini mungkin (Froidevaux et al., 2006), seperti pada tahapan konsep dan desain, atau setidaknya segera setelah biaya instalasi dan potensi kecelakaan dapat diperkirakan. Seperti yang ditunjukkan sebelumnya,

Matriks risiko spesifik diterapkan dalam fase desain, perhatian khusus perlu diberikan pada risiko kelompok dan masyarakat, Medina et al. telah mengembangkan dan menerapkan prosedur pengoptimalan yang relevan, yang dapat diterapkan untuk mengurangi risiko pabrik atau unit tertentu dengan menemukan desain yang "optimal" (Markowski & Sam Mannan, 2010).

QRA telah sering diterapkan dalam desain yang lebih terinci dan instalasi teknik pada tahap desain awal, desainer proses biasanya kekurangan informasi tentang tingkat risiko dari pabrik (Shariff & Zaini, 2013). Umumnya, QRA diterapkan setelah tata letak peralatan utama selesai. Misalnya, pemodelan sistem keselamatan saat ini merupakan bagian integral dari studi penilaian risiko dan merupakan penerapan QRA yang signifikan. Dalam hal ini, sistem keselamatan yang bertujuan untuk menghindari, mencegah, membatasi, atau mengendalikan kecelakaan dievaluasi untuk menilai sejauh mana efektivitasnya dalam mengurangi risiko kecelakaan ke tingkat yang dapat diterima. Kontribusi penting diberikan oleh metodologi SCAP (S. U. M. Khan et al., 2002). Metodologi kuantitatif untuk desain tindakan keselamatan berdasarkan atas sistem umpan balik kesalahan dan kecelakaan yang kredibel. Antonioni et al. (2009) dan F. Khan et al. (2010) mengusulkan metodologi baru: pendekatan berbasis risiko untuk mengukur keselamatan proses penggunaan perangkat indikator keselamatan kerja.

Penerapan QRA yang relevan adalah pendekatan berbasis risiko untuk operasi dan pemeliharaan, yang saat ini diakui secara luas, setelah banyak peneliti dan industri membahas mengenai masalah ini, (Vaurio, 1995). Pemeliharaan berbasis risiko dirancang untuk mempelajari semua mode kegagalan, menentukan risiko yang terkait dengan mode kegagalan tersebut, serta mengembangkan strategi pemeliharaan yang dapat meminimalkan terjadinya mode kegagalan berisiko tinggi, (Valeria Villa, Paltrinieri, et al., 2016). Strategi pemeliharaan dan inspeksi berbasis risiko telah dikembangkan untuk memberikan dasar tidak hanya untuk mempertimbangkan kemampuan sistem saat membuat keputusan mengenai jenis dan waktu untuk tindakan pemeliharaan, melainkan juga untuk mempertimbangkan risiko yang akan terjadi sebagai konsekuensi dari kegagalan tak terduga (F. I. Khan & Haddara, 2004).

Selama fase dekomisioning, penilaian risiko harus ditujukan untuk mengevaluasi risiko terhadap kesehatan dan keselamatan personel yang secara langsung terlibat dalam operasi dekomisioning dan

pengaruhnya ke lingkungan, dengan mempertimbangkan spesifikasi geografis dan sosial (Guinee, 2002). Penerapan QRA pada lingkungan tidak hanya terbatas pada fase siklus mahluk hidup dan tanaman, hal ini juga diterapkan ke seluruh kawasan industri, Egidi et al. (1995) dan beberapa perkembangan selanjutnya dengan tujuan perencanaan penggunaan lahan (Leonelli et al., 2000).

Seiring dengan perkembangan jaman, perhatian mengenai integrasi QRA dengan penilaian kuantitatif skenario domino, Antonioni et al. (2009) telah dilakukan, dan juga faktor bahaya eksternal (Renni et al., 2010). Pendekatan komprehensif diperoleh untuk memungkinkan pendeteksian terhadap bencana alam (NaTech), seperti banjir, Renni et al. (2010), dan penerangan, Necci et al. (2014), serta untuk memperluas potensinya ke penilaian kuantitatif dari kontribusi terhadap risiko industri karena skenario tersebut. Ringkasan dari pendekatan yang disebutkan dapat ditemukan di Villa, Paltrinieri, et al. (2016), juga masalah keamanan, seperti kemungkinan adanya serangan teroris dan sabotase (Landucci et al., 2017), yang semakin banyak dimasukkan dalam QRA, untuk mendefinisikan gambar risiko lengkap yang mewakili secara rinci dan realistis terkait situasi nyata tersebut.

3.1.3 Langkah ke depan dalam penilaian risiko: Pendekatan penilaian risiko dinamis

Kelemahan QRA dari stativitas intrinsik menghalangi kemungkinan pembaruan dan integrasi dari angka risiko secara keseluruhan, karena lingkungan dunia nyata yang selalu berubah atau perbaikan selanjutnya berdasarkan atas gagasan risiko baru. Untuk mengatasi batasan ini, selama dekade terakhir beberapa upaya telah dikhususkan untuk pengembangan pendekatan baru guna penilaian dan manajemen risiko, yang dapat mempertimbangkan perubahan kondisi yang dinamis, baik internal maupun eksternal ke dalam sistem, yang mempengaruhi penilaian risiko (Valeria Villa, Paltrinieri, et al., 2016). Dalam tulisan ini dilaporkan uraian singkat tentang metodologi yang paling relevan dan aplikasi pendekatan dinamis untuk analisis risiko dalam industri proses kimia dengan menggarisbawahi fitur yang relevan.

3.2 Simulasi Dinamik Dalam QRA

Penilaian risiko dinamis bertujuan untuk mempertimbangkan gagasan risiko baru dan peringatan dini, untuk memperbaiki risiko terkait secara sistematis serta memastikan peningkatan. Hal ini dapat menjawab kebutuhan akan nilai probabilitas kegagalan dan frekuensi kejadian yang lebih realistis. Nilai-nilai generik kemudian dapat diperjelas dengan perbaikan berkelanjutan dari penilaian dinamis (DRA dan DRA dengan jaringan Bayesian). Integrasi penilaian risiko awal parsial juga memungkinkan untuk terjadi jika pendekatan dinamis mulai dari identifikasi bahaya hingga evaluasi risiko digunakan (gabungan DRA dan DyPASI). Melalui penggunaan teknik seperti DRA dan Risk Barometer, analisis dapat secara relatif

meningkatkan kesadaran mereka tentang ketidakpastian yang terkait dengan hasil. Pertimbangan ahli dapat digunakan secara konstruktif untuk pembuatan dan penyempurnaan alat dinamis dari penilaian risiko untuk menentang kemungkinan skeptisisme yang mungkin ditimbulkan oleh teknik tersebut (misalnya, barometer risiko). Pada akhirnya, teknik seperti barometer risiko akan mewakili dukungan untuk keputusan kritis dan memungkinkan pengambilan keputusan berdasarkan risiko, yaitu hasil yang diperoleh dari proses penilaian risiko akan dibebankan dengan atribut lain selama proses keputusan.

Penilaian risiko dinamis dapat diterapkan tidak hanya dalam tahap desain suatu proses, tetapi juga sepanjang masa hidup yang memungkinkan operasi yang lebih aman dan pemeliharaan yang lebih mudah, serta mendukung proses pengambilan keputusan yang lebih tepat berdasarkan risiko (Khakzad et al., 2012). Seperti yang dilaporkan dalam Tabel 5, Pendekatan Dinamis memungkinkan untuk menunjukkan keunggulan dalam desain dan operasi pada fasilitas pemrosesan, sementara batasan utama dibagi antara fase desain dan operasi. Sementara itu, tantangan berikutnya akan dikhususkan untuk memecahkan masalah formalisasi, standarisasi, dan pembuatan perangkat lunak yang sepenuhnya otomatis. Walaupun beberapa langkah maju telah dibuat dari studi awal, setiap pendekatan dinamis terbukti efektif hanya jika dikaitkan dengan metode keselamatan yang tepat dengan terus mencari kemungkinan pelajaran yang dapat diambil dan mencatat kinerja proses dan insiden yang terjadi (Paltrinieri et al., 2014).

4. KESIMPULAN

Penilaian risiko dinamis bertujuan untuk mempertimbangkan gagasan risiko baru dan peringatan dini, untuk memperbaiki risiko terkait secara sistematis, memastikan peningkatan dan Eksibilitas. Integrasi penilaian risiko awal parsial akan memungkinkan jika pendekatan dinamis dimulai dari identifikasi bahaya hingga evaluasi risiko digunakan (gabungan DRA dan DyPASI). Melalui penggunaan teknik seperti DRA dan barometer risiko, analisis dapat secara relatif meningkatkan kesadaran mereka tentang ketidakpastian yang terkait dengan hasil. Pertimbangan ahli dapat digunakan secara konstruktif untuk pembuatan dan penyempurnaan alat dinamis dari penilaian risiko untuk menentang kemungkinan skeptisisme yang mungkin ditimbulkan oleh teknik tersebut (misalnya, barometer risiko). Teknik seperti barometer risiko akan mewakili dukungan untuk keputusan kritis dan memungkinkan pengambilan keputusan berdasarkan risiko, yaitu hasil yang diperoleh dari proses penilaian risiko akan dibebankan dengan atribut lain selama proses keputusan.

Untuk mengidentifikasi bahaya dari disperse yang terjadi pada alat oksidator termal, metode QRA sangat sesuai karena didalamnya dilakukan perhitungan secara numerik untuk menganalisis dampak dari risiko yang terjadi. Dispersi dari komponen volatil organik

(VOC) dikombinasikan di dalam suatu model, area yang akan digunakan oleh karyawan serta populasi komunitas di luar atau area sekitar pabrik juga didefinisikan. Model tersebut kemudian menghitung probabilitas kematian pada orang dengan menghitung probabilitas bahwa seseorang akan berada dalam area efek konsekuensi dari sebuah kejadian.

Efektivitas penerapan kerangka manajemen risiko dinamis dalam mengumpulkan dan mempertimbangkan bukti risiko yang muncul bergantung pada pengembangan berkelanjutan teknik dinamis untuk identifikasi bahaya dan penilaian risiko, digabungkan dengan budaya keselamatan yang tepat, diilustrasikan oleh elaborasi 3D dari DRM, analisis QRA sebagai "*unknown unknowns*" (analisis tidak sadar bahwa mereka tidak mengetahuinya). Informasi tentang peristiwa ini secara bertahap dikumpulkan melalui aktivitas berkelanjutan yaitu "pemantauan, peninjauan, dan peningkatan berkelanjutan" setelah adanya kemungkinan hasil yang diragukan timbul. Informasi ini diwakili oleh peringatan dini, kejadian sebelumnya, prekursor kecelakaan, hasil tes atau studi terkait. Karena peningkatan kesadaran akan potensi risiko terkait yang kerap diabaikan, peristiwa ini berubah menjadi "yang tidak diketahui"

5. DAFTAR PUSTAKA

- Anand, P., Springer, S. A., Copenhagen, M. M., & Altice, F. L. (2010). Neurocognitive impairment and HIV risk factors: A reciprocal relationship. In *AIDS and Behavior*. <https://doi.org/10.1007/s10461-010-9684-1>
- Antonioni, G., Spadoni, G., & Cozzani, V. (2009). Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.02.012>
- Apeland, S., & Aven, T. (2000). Risk based maintenance optimization: Foundational issues. *Reliability Engineering and System Safety*. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(99\)00068-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(99)00068-X)
- Apostolakis, G. E. (2004). How useful is quantitative risk assessment? In *Risk Analysis*. <https://doi.org/10.1111/j.0272-4332.2004.00455.x>
- Arunraj, N. S., & Maiti, J. (2007). Risk-based maintenance-Techniques and applications. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.069>
- Arunraj, N. S., & Maiti, J. (2009). A methodology for overall consequence modeling in chemical industry. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.133>
- Aven, T. (2017). Improving risk characterisations in practical situations by highlighting knowledge aspects, with applications to risk matrices. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.05.006>
- Aven, T., & Vinnem, J. E. (2005). On the use of risk acceptance criteria in the offshore oil and gas industry. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.10.009>
- Azzi, C., Rogstadkjernet, L., van Wingerden, K., Choi, J., & Ryu, Y. (2016). Influence of scenario choices when performing CFD simulations for explosion risk analyses: Focus on dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.03.012>
- Baesi, S., Abdolhamidzadeh, B., Hassan, C. R. C., Hamid, M. D., & Reniers, G. (2013). Application of a multi-plant QRA: A case study investigating the risk impact of the construction of a new plant on an existing chemical plant's risk levels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.11.005>
- Beerens, H. I., Post, J. G., & Uijt De Haag, P. A. M. (2006). The use of generic failure frequencies in QRA: The quality and use of failure frequencies and how to bring them up-to-date. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.013>
- Camilli, R., Reddy, C. M., Yoerger, D. R., Van Mooy, B. A. S., Jakuba, M. V., Kinsey, J. C., McIntyre, C. P., Sylva, S. P., & Maloney, J. V. (2010). Tracking hydrocarbon plume transport and biodegradation at deepwater horizon. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1195223>
- Chemical process safety: fundamentals with applications. (2011). *Choice Reviews Online*. <https://doi.org/10.5860/choice.49-1486>
- Claessen, S. J. J., Francke, A. L., Belarbi, H. E., Pasman, H. R. W., Van Der Putten, M. J. A., & Deliëns, L. (2011). A new set of quality indicators for palliative care: Process and results of the development trajectory. *Journal of Pain and Symptom Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jpainsymman.2010.10.267>
- COVO. (1982). COVO Commission, risk analysis of six potentially hazardous industrial objects in the rijnmond area, a pilot study. A Report to the Rijnmond Public Authority, Central Environmental Control Agency, Schiedam, The Netherlands, 1981, Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel Publishing Co, ISBN 90 277 1393 6.
- Cozzani, V., & Salzano, E. (2004). The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.09.013>
- Dan, S., Lee, C. J., Park, J., Shin, D., & Yoon, E. S. (2014). Quantitative risk analysis of fire and explosion on the top-side LNG-liquefaction process of LNG-FPSO. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.011>
- De la Garza, E. (2006). ¿Hacia dónde va la Teoría Social? *Tratado Latinoamericano de Sociología*.
- Demichela, M., & Piccinini, N. (2004). Risk-based design of a regenerative thermal oxidizer. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. <https://doi.org/10.1021/ie0342208>
- Demichela, M., Piccinini, N., & Romano, A. (2004). Risk analysis as a basis for safety management system.

- Journal of Loss Prevention in the Process Industries. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2003.11.003>
- Di Domenico, J., Vaz, C. A., & de Souza, M. B. (2014). Quantitative risk assessment integrated with process simulator for a new technology of methanol production plant using recycled CO₂. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.02.045>
- Egidi, D., Foraboschi, F. P., Spadoni, G., & Amendola, A. (1995). The ARIPAR project: analysis of the major accident risks connected with industrial and transportation activities in the Ravenna area. *Reliability Engineering and System Safety*. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00026-X](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00026-X)
- Fadier, E., & De La Garza, C. (2006). Safety design: Towards a new philosophy. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.09.008>
- Finlayson-Pitts, B. J., & Hemminger, J. C. (2000). Physical Chemistry of Airborne Sea Salt Particles and Their Components. *Journal of Physical Chemistry A*. <https://doi.org/10.1021/jp002968n>
- Freeman, K. H., Hayes, J. M., Trendel, J. M., & Albrecht, P. (1990). Evidence from carbon isotope measurements for diverse origins of sedimentary hydrocarbons. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/343254a0>
- Froidevaux, L., Livesey, N. J., Read, W. G., Jiang, Y. B., Jimenez, C., Filipiak, M. J., Schwartz, M. J., Santee, M. L., Pumphrey, H. C., Jiang, J. H., Wu, D. L., Manney, G. L., Drouin, B. J., Waters, J. W., Fetzer, E. J., Bernath, P. F., Boone, C. D., Walker, K. A., Jucks, K. W., ... Hendershot, R. (2006). Early validation analyses of atmospheric profiles from EOS MLS on the Aura satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.864366>
- Guinee, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/bf02978897>
- Hendershot, D. C., Sussman, J. A., Winkler, G. E., & Dill, G. L. (2006). Implementing inherently safer design in an existing plant. *Process Safety Progress*. <https://doi.org/10.1002/prs.10117>
- Johansen, I. L., & Rausand, M. (2012). Risk metrics: Interpretation and choice. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2012.6838079>
- Johansen, Inger Lise, & Rausand, M. (2014). Foundations and choice of risk metrics. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.09.011>
- Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2012). Dynamic risk analysis using bow-tie approach. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.04.003>
- Khan, F., Abunada, H., John, D., & Benmosbah, T. (2010). Development of risk-based process safety indicators. *Process Safety Progress*. <https://doi.org/10.1002/prs.10354>
- Khan, F. I., & Abbasi, S. (2002). A criterion for developing credible accident scenarios for risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00050-5)
- Khan, F. I., & Haddara, M. R. (2004). Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.01.011>
- Khan, S. U. M., Al-Shahry, M., & Ingler, W. B. (2002). Efficient photochemical water splitting by a chemically modified n-TiO₂. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1075035>
- Kletz, T., & Amyotte, P. (2019). What went wrong?: Case histories of process plant disasters and how they could have been avoided. In *What Went Wrong?: Case Histories of Process Plant Disasters and How They Could Have Been Avoided*. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00118-3>
- Ko, C., Lee, H., Kim, K., & Lee, W. B. (2020). Quantitative risk assessment integrated with dynamic process simulation for reactor section in heavy oil desulfurization process. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104158>
- Koornneef, J., Spruijt, M., Molag, M., Ramírez, A., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2010). Quantitative risk assessment of CO₂ transport by pipelines-A review of uncertainties and their impacts. In *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.068>
- Kramer, M. S., Cutler, N., Feighner, J., Shrivastava, R., Carman, J., Sramek, J. J., Reines, S. A., Liu, G., Snavely, D., Wyatt-Knowles, E., Hale, J. J., Mills, S. G., MacCoss, M., Swain, C. J., Harrison, T., Hill, R. G., Hefti, F., Scolnick, E. M., Cascieri, M. A., ... Rupniak, N. M. J. (1998). Distinct mechanism for antidepressant activity by blockade of central substance P receptors. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.281.5383.1640>
- Landucci, G., Argenti, F., Cozzani, V., & Reniers, G. (2017). Assessment of attack likelihood to support security risk assessment studies for chemical facilities. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.06.019>
- Lee, J. E., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Song, J. H., Jung, S. C., & Park, Y. K. (2020). Recent advances in volatile organic compounds abatement by catalysis and catalytic hybrid processes: A critical review. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137405>
- Leonelli, P., Bonvicini, S., & Spadoni, G. (2000). Hazardous materials transportation: A risk-analysis-based routing methodology. *Journal of Hazardous Materials*. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00084-9)
- Mannan, S. (2012). Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment And Control: Fourth Edition. In *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification,*

- Assessment and Control: Fourth Edition. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24104-3>
- Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. In *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004>
- Markowski, A. S., & Sam Mannan, M. (2010). ExSys-LOPA for the chemical process industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.05.011>
- Marx, J. D., & Ishii, B. R. (2021). A new look at release event frequencies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104368>
- Nair, V. S., Maeda, L. S., & Ioannidis, J. P. A. (2012). Clinical outcome prediction by MicroRNAs in human cancer: A systematic review. In *Journal of the National Cancer Institute*. <https://doi.org/10.1093/jnci/djs027>
- Necci, A., Antonioni, G., Cozzani, V., Krausmann, E., Borghetti, A., & Nucci, C. A. (2014). Assessment of lightning impact frequency for process equipment. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2014.05.001>
- Olszewski, P. (2015). Heat recovery investigation from dryer-thermal oxidizer system in corn-ethanol plants. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.033>
- Paltrinieri, N., Dechy, N., Salzano, E., Wardman, M., & Cozzani, V. (2012). Lessons Learned from Toulouse and Buncefield Disasters: From Risk Analysis Failures to the Identification of Atypical Scenarios Through a Better Knowledge Management. *Risk Analysis*. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01749.x>
- Paltrinieri, N., Scarponi, G. E., Khan, F., & Hauge, S. (2014). Addressing dynamic risk in the petroleum industry by means of innovative analysis solutions. *Chemical Engineering Transactions*. <https://doi.org/10.3303/CET1436076>
- Pasman, H. J., Rogers, W. J., & Mannan, M. S. (2018). How can we improve process hazard identification? What can accident investigation methods contribute and what other recent developments? A brief historical survey and a sketch of how to advance. In *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.05.018>
- Pasman, H., & Reniers, G. (2014). Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.03.004>
- Paté-Cornell, M. E. (1993). Learning from the Piper Alpha Accident: A Postmortem Analysis of Technical and Organizational Factors. *Risk Analysis*. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1993.tb01071.x>
- Perrillo, R. P., Gish, R., & Falck-Ytter, Y. T. (2015). American Gastroenterological Association Institute technical review on prevention and treatment of hepatitis b virus reactivation during immunosuppressive drug therapy. *Gastroenterology*. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2014.10.038>
- PurpleBook. (1999). Committee for the Prevention of Disasters, Guideline for Quantitative Risk Assessment.
- Qi, M., Zhu, J., Xu, J., Zhao, D., & Liu, Y. (2019). Investigation of Inherently Safer Design Through Process Intensification: Novel Safety Assessment Methodology and Case Study in C3-Alkyne Hydrogenation Distillation Process. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b04854>
- Ramesh, R., Mannan, M. A., & Poo, A. N. (2005). Tracking and contour error control in CNC servo systems. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.08.008>
- Ray, K. K., Kastelein, J. J. P., Matthijs Boekholdt, S., Nicholls, S. J., Khaw, K. T., Ballantyne, C. M., Catapano, A. L., Reiner, Ž., & Lüscher, T. F. (2014). The ACC/AHA 2013 guideline on the treatment of blood cholesterol to reduce atherosclerotic cardiovascular disease risk in adults: The good the bad and the uncertain: A comparison with ESC/EAS guidelines for the management of dyslipidaemias 2011. *European Heart Journal*. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu107>
- Renni, E., Basco, A., Busini, V., Cozzani, V., Krausmann, E., Rota, R., & Salzano, E. (2010). Awareness and mitigation of NaTech accidents: Toward a methodology for risk assessment. *Chemical Engineering Transactions*. <https://doi.org/10.3303/CET1019063>
- Safety, C. (Center for C. P., & Engineers, A. I. of C. (2000). CCPS (Center for Chemical Process Safety), American Institute of Chemical Engineers. Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Wiley-AIChE.
- Salling, K. B., & Leleur, S. (2015). Accounting for the inaccuracies in demand forecasts and construction cost estimations in transport project evaluation. *Transport Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.11.006>
- Salvi, O., & Debray, B. (2006). A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.034>
- Shariff, A. M., & Zaini, D. (2013). Inherent risk assessment methodology in preliminary design stage: A case study for toxic release. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.12.003>

- Sharma, R., Sharma, M., Sharma, R., & Sharma, V. (2013). The impact of incinerators on human health and environment. In *Reviews on Environmental Health*. <https://doi.org/10.1515/reveh-2012-0035>
- Skogdalen, J. E., & Vinnem, J. E. (2012). Combining precursor incidents investigations and QRA in oil and gas industry. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.12.009>
- Spokas, K. A., Novak, J. M., Stewart, C. E., Cantrell, K. B., Uchimiyama, M., DuSaire, M. G., & Ro, K. S. (2011). Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.108>
- Susiloputra, A. B., & Dwiyanoro, B. A. (2017). Analisa Heat Balance Thermal Oxidizer dengan Waste Heat Recovery Unit. *Jurnal Teknik ITS*. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i1.22384>
- Sussman, R. G., Naumann, B. D., Pfister, T., Sehner, C., Seaman, C., & Weideman, P. A. (2016). A harmonization effort for acceptable daily exposure derivation – Considerations for application of adjustment factors. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2016.05.023>
- Taylor, J. R. (2009). The QRAQ project, quality of risk assessment for process plant. Taylor Associates ApS. 2005e2009, 1–5, <http://itsa.dk/default.htm>.
- Tomatis, M., Moreira, M. T., Xu, H., Deng, W., He, J., & Parvez, A. M. (2019). Removal of VOCs from waste gases using various thermal oxidizers: A comparative study based on life cycle assessment and cost analysis in China. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.131>
- Van Weyenberge, B., Deckers, X., Caspeele, R., & Merci, B. (2019). Development of an Integrated Risk Assessment Method to Quantify the Life Safety Risk in Buildings in Case of Fire. *Fire Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0763-6>
- Varma, R., & Varma, D. R. (2005). The Bhopal disaster of 1984. *Bulletin of Science, Technology and Society*. <https://doi.org/10.1177/0270467604273822>
- Vaurio, J. K. (1995). Optimization of test and maintenance intervals based on risk and cost. *Reliability Engineering and System Safety*. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00035-Z](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00035-Z)
- Villa, V. (2017). Extension of Quantitative Risk Assessment to the Analysis of External Hazard Factors in the Chemical and Process Industry.
- Villa, Valeria, Paltrinieri, N., Khan, F., & Cozzani, V. (2016). Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry. In *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.06.002>
- Villa, Valeria, Reniers, G. L. L., & Cozzani, V. (2016). Application of cost-benefit analysis for the selection of process-industry related security measures. *Chemical Engineering Transactions*. <https://doi.org/10.3303/CET1653018>
- Yang, J., Chen, Y., Cao, L., Guo, Y., & Jia, J. (2012). Development and field-scale optimization of a honeycomb zeolite rotor concentrator/recuperative oxidizer for the abatement of volatile organic carbons from semiconductor industry. *Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1021/es203174y>
- Zhen, X., Moan, T., Gao, Z., & Huang, Y. (2018). Risk assessment and reduction for an innovative subsurface well completion system. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en11051306>
- Zheng, S., Li, X., Yan, B., Hu, Q., Xu, Y., Xiao, X., Xue, H., & Pang, H. (2017). Transition-Metal (Fe, Co, Ni) Based Metal-Organic Frameworks for Electrochemical Energy Storage. In *Advanced Energy Materials*. <https://doi.org/10.1002/aenm.201602733>