

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Sistem Perpipaan

Dalam kegiatan sehari-hari, transportasi fluida (zat cair atau gas) dari satu tempat ke tempat yang lainnya sangat vital bagi kehidupan. Untuk itu, dibentuklah sebuah sistem yang terdiri dari rangkaian pipa-pipa yang bertujuan untuk mendistribusikan fluida tanpa mengalami kebocoran. Sistem perpipaan juga dilengkapi dengan komponen-komponen seperti katup/*valve*, *flange*, belokan/*elbow*, percabangan, *nozzle*, *reducer*, *support*, isolasi, dan lain-lain.



Gambar 2.1. Inspeksi visual pada sebuah *pipeline* [10].

Pipeline memiliki perbedaan dengan *piping* antara lain dari fungsinya, lokasi penggunaannya serta panjang totalnya. Seperti yang telah dijelaskan bahwa *piping* digunakan untuk mengalirkan fluida antara peralatan-peralatan yang beroperasi di suatu *plant*. Sementara *pipeline* lebih berfungsi untuk kebutuhan transmisi dan distribusi fluida dari suatu daerah ke daerah lainnya contoh pada Gambar 2.1. Secara umum *pipeline* dalam industri *oil* dan *gas* dibedakan menjadi tiga jenis [11]:

1. *Export line*, adalah *pipeline* yang menyalurkan minyak atau gas olahan dari *platform* satu ke *platform* yang lain (antar *platform*) atau antara *platform* dengan *on-shore facility*.
2. *Flowline*, adalah *pipeline* yang menyalurkan fluida dari sumur pengeboran ke *downstream process component* yang pertama.
3. *Injection line*, adalah *pipeline* yang mengarahkan liquid atau gas untuk mendukung aktifitas produksi (contoh: air atau injeksi gas, *gas lift*, *chemical injection*).

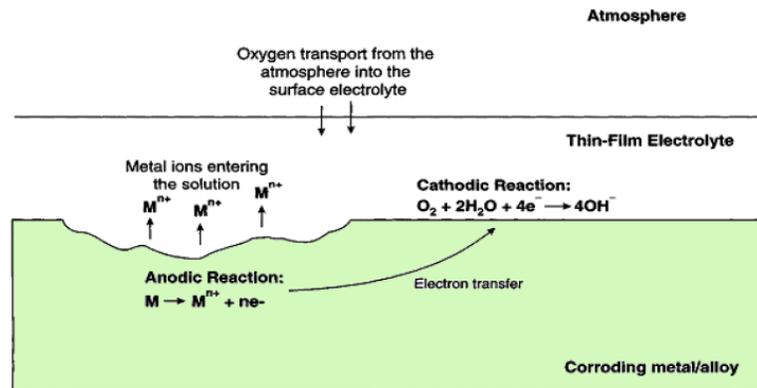
Dalam menentukan desain *pipeline* terdapat beberapa faktor yang menentukan antara lain [12]:

1. Jenis fluida yang didistribusikan.
2. Kondisi operasi
3. Pembebanan
4. Lokasi instalasi
5. Faktor ekonomi

Faktor-faktor tersebut kemudian disesuaikan dengan standar yang telah dibuat oleh berbagai lembaga seperti API (*American Petroleum Institute*), ASME (*The American Society of Mechanical Engineers*), dan berbagai lembaga yang lainnya. Standar tersebut telah mengatur ketentuan-ketentuan desain *pipeline* agar memenuhi kriteria yang telah ditetapkan untuk mencapai kondisi operasi yang maksimal.

2.2 Korosi

Korosi didefinisikan sebagai kerusakan pada material yang diakibat oleh adanya reaksi kimia dengan lingkungan sekitar material tersebut. Peristiwa korosi yang sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti asam, basa, dan netral. Mekanisme terkorosi sebuah logam akibat berkontak langsung dengan atmosfer bisa dilihat dari Gambar 2.2 berikut.

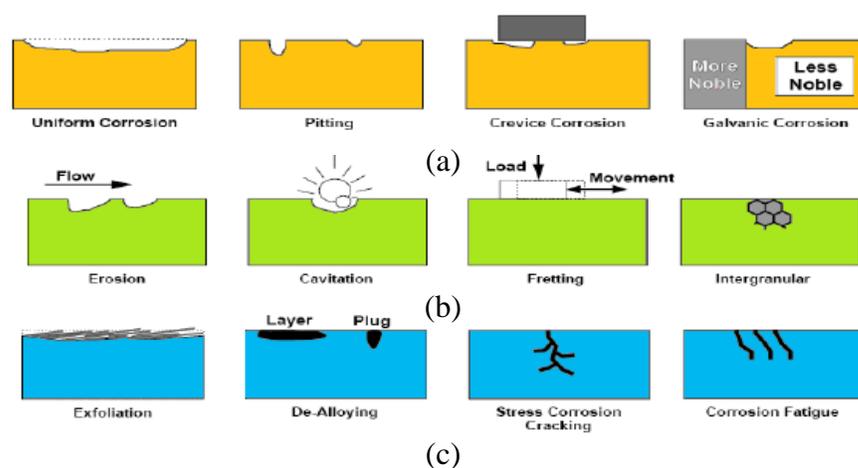


Gambar 2.2. Mekanisme terkorosinya logam akibat berkontak dengan atmosfer [13].

Untuk pipa khususnya yang terbuat baja karbon, yang mengalami oksidasi (*anodic reaction*) adalah Fe. 2Fe di uraikan menjadi $2Fe^{2+}$ dan $4e^{-}$.

Ion Fe^{2+} yang terlepas tersebut menyebabkan penipisan pada dinding pipa. Berdasarkan kemudahan dalam mengidentifikasinya, korosi yang umum terjadi pada pipa dikelompokkan seperti yang terlihat pada Gambar 2.3 berikut ini:

1. Kelompok pemeriksaan secara visual pada Gambar 2.3 (a)
2. Kelompok pemeriksaan menggunakan peralatan spesial pada Gambar 2.3 (b)
3. Kelompok pemeriksaan secara mikroskopik pada Gambar 2.3 (c)



Gambar 2.3. Jenis-jenis korosi berdasarkan cara mengidentifikasinya [14].

2.3 Hidrogen Sulfida H₂S [15]

Gas H₂S adalah rumus kimia dari gas hidrogen sulfida yang terbentuk dari 2 unsur hidrogen dan 1 unsur sulfur seperti pada Gambar 2.4. Satuan ukur gas H₂S adalah PPM (*part per million*). Gas H₂S disebut juga gas telur busuk, gas asam, asam belerang atau uap bau.

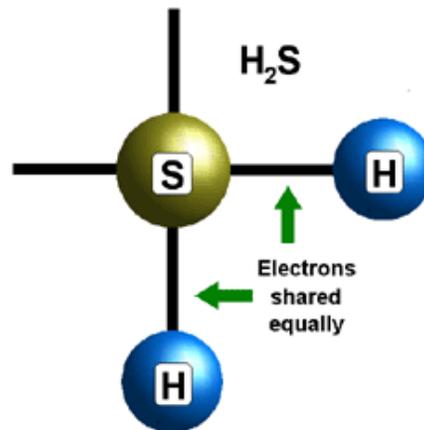
2.3.1 Proses Terjadinya Gas H₂S

Gas H₂S terbentuk akibat adanya penguraian zat-zat organik oleh bakteri. Oleh karena itu gas ini dapat ditemukan di dalam operasi pengeboran minyak/gas dan panas bumi, lokasi pembuangan limbah industri, peternakan atau pada lokasi pembuangan sampah.

2.3.2 Sifat dan Karakteristik Gas H₂S

Gas H₂S mempunyai sifat dan karakteristik antara lain:

1. Tidak berwarna tetapi mempunyai bau khas seperti telur busuk pada konsentrasi rendah sehingga sering disebut sebagai gas telur busuk.
2. Merupakan jenis gas beracun.
3. Dapat terbakar dan meledak pada konsentrasi LEL (*Lower Explosive Limit*) 4.3% (43000 PPM) sampai UEL (*Upper Explosive Limite*) 46% (460000 PPM) dengan nyala api berwarna biru pada temperature 500⁰F (260⁰C).
4. Berat jenis gas H₂S lebih berat dari udara sehingga gas H₂S akan cenderung terkumpul di tempat/daerah yang rendah. Berat jenis gas H₂S sekitar 20 % lebih berat dari udara dengan perbandingan berat jenis H₂S sebesar 1.2 atm dan berat jenis udara sebesar 1 atm.
5. H₂S dapat larut (bercampur) dengan air (daya larut dalam air 437 ml/100 ml air pada 0⁰C; 186 ml/100 ml air pada 40⁰C).
6. H₂S bersifat korosif sehingga dapat mengakibatkan karat pada peralatan logam.



Gambar 2.4. Ikatan ion gas H_2S [16].

2.3.3 Efek Fisik Gas H_2S Terhadap Manusia

Efek fisik gas H_2S pada tingkat rendah dapat menyebabkan terjadinya

1. Gejala-gejala sakit kepala atau pusing.
2. Badan terasa lesu.
3. Rasa kering pada hidung, tenggorokan, dada,
4. Batuk-batuk dan
5. Kulit terasa perih.

2.4 *Risk* (Resiko) Secara Umum

Resiko adalah potensi bahwa tindakan yang dipilih atau kegiatan yang akan dilakukan menyebabkan kerugian atau hasil yang tidak diinginkan. Gagasan ini menunjukkan bahwa pilihan mempunyai pengaruh pada hasil akhir. Potensi kerugian ini dapat disebut "risiko". Contohnya, ketika seseorang mengendarai mobil berarti orang tersebut sudah menerima kemungkinan akan terjadinya kecelakaan yang menyebabkan dia terluka serius atau meninggal. Alasan orang tersebut tetap mengendarai mobil karena resiko yang diambil dengan kemungkinan akan terluka serius atau meninggal masih cukup rendah. Tentunya hal yang mempengaruhi keputusan tersebut adalah jenis mobil, peralatan keselamatan, kepadatan lalu lintas jalan dan kecepatan kendaraan.

Definisi dari *risk* adalah kombinasi dari kemungkinan terjadinya suatu kejadian (*probability*) dan konsekuensi jika kejadian tersebut terjadi (*consequence*) [17]. Secara matematis, definisi *risk* adalah sebagai berikut:

$$Risk = Probability \times Consequence \quad (2.1)$$

Pemahaman dari definisi *risk* tersebut adalah bahwa *risk* berkaitan dengan suatu peristiwa yang belum terjadi, namun dapat diperkirakan akibat (*consequence*) dari peristiwa tersebut jika terjadi dan seberapa besar kemungkinan peristiwa tersebut dapat terjadi.

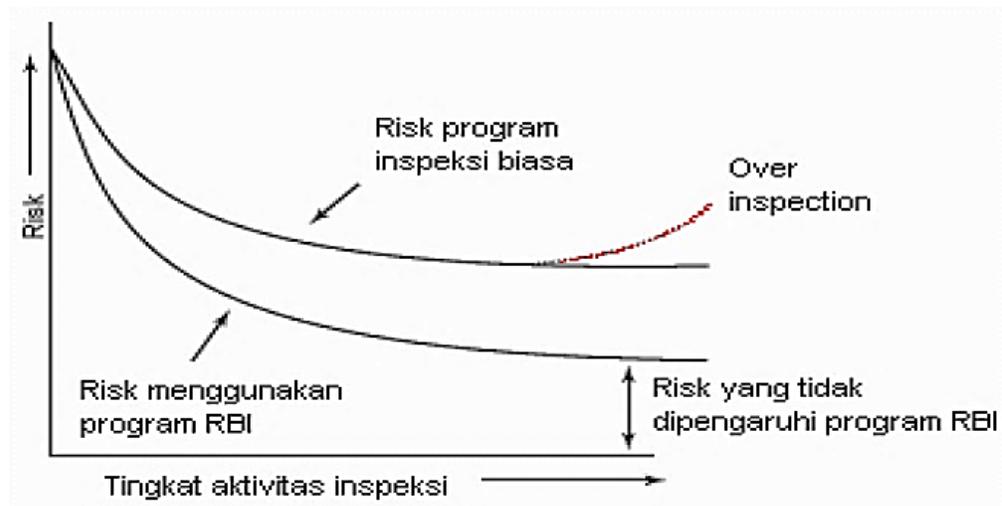
2.5 Konsep Risk Based Inspection API 581 (RBI)

Risk Based Inspection (RBI) adalah sebuah pendekatan sistematis tentang metode pengelolaan inspeksi atas peralatan atau unit kerja pada sebuah pabrik yang didasarkan pada tingkat resiko yang dimiliki oleh peralatan atau unit kerja tersebut. Oleh karena itu, secara umum metode RBI dapat diaplikasikan ke semua jenis industri dan sangat bergantung pada kondisi aktual dari peralatan industri yang dianalisis.

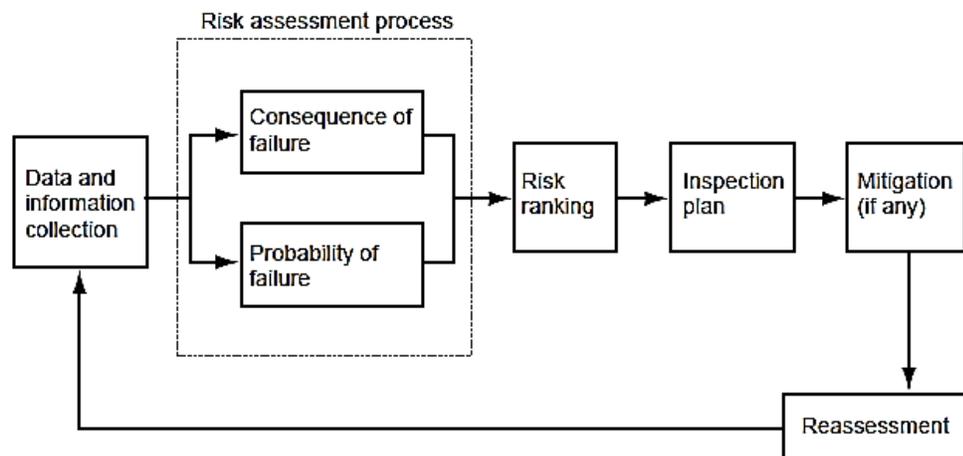
Perencanaan inspeksi (*inspection planning*) yang didasarkan *risk* akan memprioritaskan nilai-nilai *risk* yang lebih tinggi dibanding dengan yang lebih rendah. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi dan juga menekan biaya (*cost*) inspeksi. Secara umum, tujuan dari metode ini adalah [19]:

- a) Menyeleksi atau menyaring (*screening*) seluruh peralatan pada unit operasi dari suatu fasilitas untuk mengidentifikasi area yang memiliki risiko paling tinggi (*high risk*).
- b) Menghitung nilai *risk* (*risk assessment*) seluruh peralatan pada unit operasi dari hasil penghitungan *probability of failure* dan *consequence of failure*.
- c) Menentukan prioritas peralatan yang membutuhkan inspeksi dan mitigasi berdasarkan hasil perhitungan risiko (*risk assessment*).
- d) Mengembangkan program inspeksi yang sesuai dan efektif.
- e) Mengelola risiko akibat kegagalan yang terjadi pada suatu peralatan dan menentukan metode mitigasi untuk mengurangi risiko tersebut.

Pada Gambar 2.5 akan menjelaskan bahwa kurva yang paling rendah mengindikasikan penggunaan program RBI yang efektif. Hal ini karena dalam pelaksanaan program RBI, fokus pada hal yang memiliki resiko paling tinggi dan mengabaikan pada tingkat resiko yang rendah. Resiko tidak bisa turunkan hingga menjadi nol atau tidak ada sama sekali hanya dengan usaha inspeksi, proses RBI secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.5. Manajemen menggunakan RBI [19].



Gambar 2.6. Proses *Risk Based Inspection* secara umum [19].

2.5.1 Jenis-jenis *Risk Based Inspection* pada API 580 [19]

Dalam API 581 ada beberapa jenis *Risk Based Inspection* (RBI), yaitu kualitatif RBI, semi-kuantitatif RBI dan kuantitatif RBI. Ketiga jenis ini memiliki tingkat kerumitan yang berbeda dan juga kebutuhan data yang berbeda juga. Semua ini ditentukan oleh industri proses yang akan dilakukan inspeksi. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 2.7 Dalam kualitatif RBI dapat dilihat bahwa tingkat analisis detailnya lebih rendah dibandingkan pada kuantitatif RBI.

2.5.1.1 Kualitatif *Risk Based Inspection*

Model kualitatif dapat diartikan sebagai penilaian *engineering* berdasarkan *experience* dan pendekatan dimana nilai numerik tidak dihitung melainkan peringkat deskriptif diberikan, seperti tingkat “rendah”, “menengah” atau “tinggi” ataupun peringkat numerik seperti 1, 2 atau 3. Peringkat kualitatif biasanya merupakan hasil dari menggunakan rekayasa sebuah penilaian berbasis pendekatan penilaian.

Keuntungan menggunakan pendekatan kualitatif adalah bahwa penilaian dapat di selesaikan dengan cepat dan dengan biaya awal yang rendah, ada sedikit kebutuhan untuk informasi rinci, dan hasilnya mudah disajikan dan dipahami. Namun hasilnya subjektif berdasarkan pendapat dan pengalaman dari tim RBI, dan tidak mudah diperbaharui untuk inspeksi berikutnya. Hal ini tidak mudah untuk mendapatkan hasil yang lain dari peringkat item dalam hal risiko, variasi risiko dan estimasi waktu untuk interval inspeksi.

2.5.1.2 Kuantitatif *Risk Based Inspection*

Model kuantitatif dapat diartikan sebagai model berbasis pendekatan dimana model yang cocok tersedia yaitu sebuah perhitungan nilai numerik terhadap informasi berupa desain, keadaan operasi, ketahanan, potensi efek kegagalan terhadap manusia dan lingkungan dengan menggunakan model logika seperti *event trees*. Nilai kuantitatif dapat dinyatakan dan ditampilkan secara kualitatif untuk kesederhanaan. Dengan menetapkan probabilitas dan konsekuensi kegagalan akan mendapatkan nilai risiko dan peringkat risiko.

Keuntungan dari pendekatan kuantitatif adalah bahwa hasilnya dapat digunakan untuk menghitung beberapa presisi bila batas penerimaan risiko akan dilanggar. Metode ini sistematis, konsisten dan terdokumentasi dan cocok untuk kemudahan *update* berdasarkan temuan pemeriksaan. Pendekatan kuantitatif biasanya melibatkan penggunaan komputer untuk menghitung risiko dan program inspeksi.

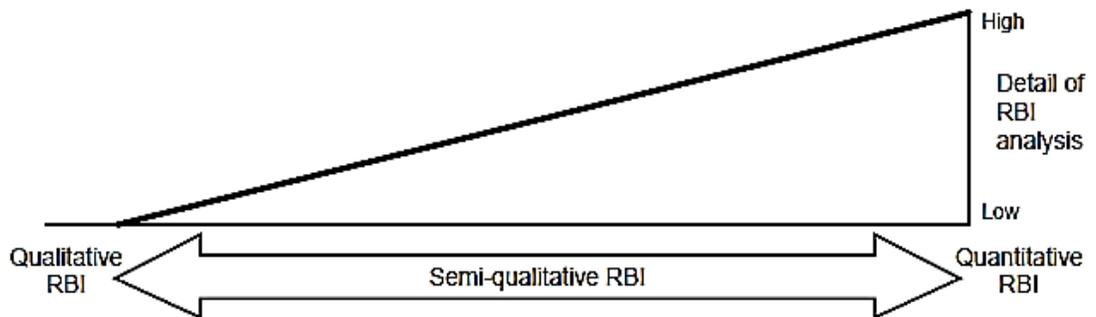
2.5.1.3 Semi-kuantitatif *Risk Based Inspection*

Pendekatan semi-kuantitatif merupakan gabungan dari dua pendekatan sebelumnya. Keuntungan dari pendekatan ini adalah kecepatan analisis yang merupakan kelebihan dari pendekatan kualitatif dan ketelitian analisis yang merupakan kelebihan dari pendekatan kuantitatif, sebagai contoh:

- a) Penilaian *Consequence of Failure* (CoF) adalah kualitatif dan *Probability of Failure* (PoF) kuantitatif.
- b) Penilaian *Consequence of Failure* (CoF) dan *Probability of Failure* (PoF) adalah kuantitatif, sedangkan peringkat risiko dan waktu penilaian inspeksi adalah kualitatif.
- c) Penilaian *Probability of Failure* (PoF) dan atau *Consequence of Failure* (CoF) dilakukan algoritma sederhana berdasarkan pilihan parameter yang paling relevan.
- d) Penilaian *Probability of Failure* (PoF) dan *Consequence of Failure* (CoF) berdasarkan *engineering judgement*.

2.5.2 Hubungan RBI Kualitatif, Kuantitatif, dan Semi-kuantitatif [19]

Dalam pelaksanaannya, sebuah RBI digunakan aspek pendekatan kuantitatif, kualitatif dan semi kuantitatif. Ketiga pendekatan ini tidak saling bersaing tetapi saling melengkapi. Sebagai contoh, pendekatan kualitatif untuk level tinggi digunakan untuk mencari unit yang memiliki risiko tertinggi. Ketiga pendekatan/metode tersebut adalah sebuah hubungan kualitatif dan kuantitatif menjadi sebuah hubungan ekstrim dengan pendekatan semi kualitatif dari ketiganya, dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7. Rangkaian kesatuan proses RBI [19].

2.5.3 Probabilitas Kegagalan [18]

Probabilitas kegagalan adalah kemungkinan terjadinya suatu kegagalan dalam komponen yang akan dianalisis apabila berada dalam kondisi kerja saat ini. Probabilitas kegagalan yang digunakan dalam API RBI adalah perhitungan dari Persamaan (2.2).

$$P_f(t) = gff \cdot D_f(t) \cdot F_{ms} \quad (2.2)$$

dimana,

$P_f(t)$ = Probabilitas kegagalan (*probability of failure*)

gff = Frekuensi kegagalan suatu komponen (*generic failure frequency*)

$D_f(t)$ = Faktor kerusakan (*damage factor*)

F_{ms} = Faktor sistem manajemen (*management systems factor*)

2.5.3.1 Frekuensi Kegagalan

Frekuensi kegagalan secara umum untuk tipe komponen yang berbeda, sudah diatur perwakilan nilai dari data kegagalan industri penyulingan dan petrokimia. Frekuensi kegagalan ini dimaksudkan untuk mengetahui frekuensi kegagalan sebelumnya diakibatkan kerusakan tertentu yang terjadi di lingkungan operasi, dan disediakan untuk beberapa diskrit ukuran lubang untuk berbagai jenis-jenis pelaratan pengolahan seperti bejana tekan, drum, menara, sistem perpipaan, dan tangki.

Frekuensi kegagalan suatu pipa dan komponen lainnya diestimasi dengan menggunakan catatan dan dijadikan sebagai panduan untuk mengetahui secara umum frekuensi kegagalan pipa dan komponen lainnya tersebut. API 581 menyediakan daftar frekuensi kegagalan pipa dan komponen lainnya pada industri proses, yang dapat dilihat dari Tabel 2.1 dibawah ini. Frekuensi kegagalan yang diasumsikan mengikuti distribusi log-normal, dengan tingkat kesalahan berkisar antara 3% sampai 10%. Data yang disajikan dalam Tabel 2.1 didasarkan pada sumber-sumber terbaik yang ada dan pengalaman group sponsor API RBI.

Frekuensi kegagalan untuk pipa dan komponen yang lain yang dibagi dalam ukuran lubang yang relevan. Menurut API, ukuran lubang disederhanakan menjadi empat jenis yakni *small*, *medium*, *large*, dan *rupture* dapat dilihat Tabel 2.2. Hal ini bertujuan untuk mempermudah analisis sehingga perhitungan tidak perlu dilakukan untuk setiap ukuran lubang. Secara umum, analisis dilakukan empat kali untuk tiap ukuran lubang.

Berbagai hal yang berpengaruh terhadap peralatan seperti kondisi operasi, desain, kondisi lingkungan, dan bahan mempengaruhi tiap peralatan secara berbeda-beda. Faktor ini mengidentifikasi kondisi spesifik yang dapat mempengaruhi frekuensi kegagalan dari tiap *equipment* secara spesifik.

Tabel 2.1. Daftar frekuensi kegagalan komponen (*gff*) [18].

No	Jenis peralatan	Jenis komponen	<i>gff</i> sebagai fungsi ukuran lubang (<i>failure/year</i>)				<i>gff</i> Total (<i>failure/year</i>)
			<i>Small</i>	<i>Medium</i>	<i>Large</i>	<i>Rupture</i>	
1	<i>Compressor</i>	COMPC	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	0	3.00E-05
2	<i>Compressor</i>	COMPR	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
3	<i>Heat Exchanger</i>	HEXSS	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
4	<i>Heat Exchanger</i>	HEXTS	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
5	<i>Heat Exchanger</i>	HEXTUBE	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
6	<i>Pipe</i>	PIPE-1 inch	2.80E-05	0	0	2.60E-06	3.06E-05
7	<i>Pipe</i>	PIPE-2 inch	2.80E-05	0	0	2.60E-06	3.06E-05
8	<i>Pipe</i>	PIPE-4 inch	8.00E-06	2.00E-05	0	2.60E-06	3.06E-05
9	<i>Pipe</i>	PIPE-6 inch	8.00E-06	2.00E-05	0	2.60E-06	3.06E-05
10	<i>Pipe</i>	PIPE-8 inch	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
11	<i>Pipe</i>	PIPE-10 inch	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
12	<i>Pipe</i>	PIPE-12 inch	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
13	<i>Pipe</i>	PIPE-16 inch	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
14	<i>Pipe</i>	PIPE-GT 16 inch	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
15	<i>Pump</i>	PUMP2S	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
16	<i>Pump</i>	PUMPR	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
17	<i>Pump</i>	PUMP1S	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
18	<i>Tank650</i>	TANKBOTTOM	7.20E-04	0	0	2.00E-06	7.22E-04
19	<i>Tank650</i>	COURSE-1	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
20	<i>Tank650</i>	COURSE-2	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
21	<i>Tank650</i>	COURSE-3	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
22	<i>Tank650</i>	COURSE-4	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
23	<i>Tank650</i>	COURSE-5	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
24	<i>Tank650</i>	COURSE-6	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
25	<i>Tank650</i>	COURSE-7	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
26	<i>Tank650</i>	COURSE-8	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
27	<i>Tank650</i>	COURSE-9	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
28	<i>Tank650</i>	COURSE-10	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
29	<i>Vessel/FinFan</i>	KODRUM	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
30	<i>Vessel/FinFan</i>	COLBTM	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
31	<i>Vessel/FinFan</i>	FINFAN	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
32	<i>Vessel/FinFan</i>	FILTER	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
33	<i>Vessel/FinFan</i>	DRUM	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
34	<i>Vessel/FinFan</i>	REACTOR	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
35	<i>Vessel/FinFan</i>	COLTOP	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05

Tabel 2.2. Ukuran lubang dalam API 581 [18].

Jenis lubang	Diameter lubang	Diameter lubang pelepasan (<i>release</i>), (d_n) representatif
Kecil (<i>small</i>)	0 s/d ¼ inch	¼ inch
Sedang (<i>medium</i>)	¼ - 2 inch	1 inch
Besar (<i>large</i>)	2 – 6 inch	4 inch
Pecah (<i>rupture</i>)	> 6 inch	Diameter <i>equipment</i> , maksimum 16 inch

2.5.3.2 Faktor Sistem Manajemen [18]

Faktor sistem manajemen (F_{ms}) mempengaruhi sistem manajemen fasilitas pada integritas mekanik peralatan. Faktor ini berasal dari hasil evaluasi sistem manajemen fasilitas atau unit operasi yang mempengaruhi risiko pada *plant*.

Prosedur API RBI mencakup alat evaluasi untuk menilai bagian dari fasilitas sistem manajemen yang berdampak langsung terhadap kemungkinan kegagalan dari komponen. Evaluasi terdiri dari serangkaian wawancara dengan manajemen pabrik, operasional, inspeksi, pemeliharaan, *engineering*, *training* dan keselamatan pekerja. Daftar dalam evaluasi sistem manajemen dan bobot yang diberikan pada setiap subjek ditampilkan dalam Tabel 2.3. Dari hasil wawancara tersebut dapat menyederhanakan analisis hasil yang memungkinkan auditor untuk menentukan kekuatan dan kelemahan dalam suatu sistem manajemen.

Untuk setiap skor evaluasi sistem manajemen, skor manajemen harus terlebih dahulu dikonversi menjadi dalam persentase (0-100%) menggunakan Persamaan (2.3) Kemudian digunakan untuk menghitung faktor sistem manajemen (F_{MS}) menggunakan Persamaan (2.4).

$$P_{score} = \frac{Score}{1000} \cdot 100 \quad (2.3)$$

$$F_{MS} = 10^{(-0.02 \cdot p_{score} + 1)} \quad (2.4)$$

Tabel 2.3. Daftar topik pertanyaan dalam evaluasi sistem manajemen [18].

No	Judul	Jumlah pertanyaan	Skor
1	<i>Leadership and administration</i>	6	70
2	<i>Process safety information</i>	10	80
3	<i>Process hazard analysis</i>	9	100
4	<i>Management of change</i>	6	80
5	<i>Operating procedures</i>	7	80
6	<i>Safe work practices</i>	7	85
7	<i>Training</i>	8	100
8	<i>Mechanical integrity</i>	20	120
9	<i>Pre-Startup safety review</i>	5	60
10	<i>Emergency response</i>	6	65
11	<i>Incident investigation</i>	9	75
12	<i>Contractors</i>	5	45
13	<i>Audits</i>	4	40
Total		101	1000

2.5.3.3 Faktor Kerusakan (*Damage Factor*) [18]

Faktor kerusakan ditentukan berdasarkan mekanisme kerusakan yang berlaku korosi lokal atau semua bagian, retak, *creep*, dan lain-lain yang relevan dengan material konstruksi dan proses *service*, kondisi fisik komponen, dan teknik inspeksi yang digunakan untuk menghitung kerusakan. Faktor kerusakan memodifikasi frekuensi kegagalan di industri dan membuatnya khusus untuk evaluasi komponen.

Fungsi dasar faktor kerusakan adalah untuk mengevaluasi statistik jumlah kerusakan yang mungkin terjadi sebagai fungsi dari waktu *service* dan efektifitas aktifitas inspeksi untuk menghitung kerusakan tersebut.

Metode yang digunakan dalam menentukan faktor-faktor untuk mekanisme kerusakan, sebagai berikut:

- Penipisan (keseluruhan dan lokal)/*thinning damage factor* (D_f^{thin}).
- Lapisan komponen/*linings damage factor*) (D_f^{elin}).
- Kerusakan dari luar (*external corrosion cracking damage factor*) (D_f^{extd}).

- d) *Stress corrosion cracking damage factor* (internal berdasarkan proses fluida, kondisi operasi dan material konstruksi) (D_f^{ssc}).
- e) *High temperatur hydrogen attack damage factor* (D_f^{htha}).
- f) *Mechanical fatigue damage factor* (khusus pipa) (D_f^{mfat}).
- g) *Brittle fracture damge factor* (termasuk *brittle fracture* suhu rendah, *embrittlement* yang parah, *embrittlement* 885, dan jumlah fase *embrittlement*) (D_f^{brit}).

Apabila lebih dari satu mekanisme kerusakan yang terjadi, maka superposisi pokok dengan modifikasi khusus untuk *thinning* (penipisan) keseluruhan, kerusakan dari luar, dan lapisan komponen, digunakan untuk menentukan faktor kerusakan total (*total damage factor*).

2.5.3.3.1 Total Damage Factor ($D_{f-total}$)

Total damage factor adalah apabila lebih dari satu mekanisme kerusakan yang terjadi. Menentukan *total damage factor* menggunakan Persamaan (2.5) untuk *thinning* lokal dan (2.6) untuk *thinning* general.

$$D_{f-total} = \max [D_{f-gov}^{thin}, D_{f-gov}^{extd}] + D_{f-gov}^{ssc} + D_{f-gov}^{htha} + D_f^{brit} + D_f^{mfat} \quad (2.5)$$

$$D_{f-total} = D_{f-gov}^{thin} + D_{f-gov}^{extd} + D_{f-gov}^{ssc} + D_{f-gov}^{htha} + D_f^{brit} + D_f^{mfat} \quad (2.6)$$

2.5.3.3.2 Governing Thinning Damage Factor (D_{f-gov}^{thin})

Governing thinning damage factor ditentukan berdasarkan faktor yang ada di *internal liner* terjadi menggunakan Persamaan (2.7) dan *internal liner* tidak terjadi menggunakan Persamaan (2.8).

$$D_{f-gov}^{thin} = \min [D_f^{thin}, D_f^{elin}] \quad (2.7)$$

$$D_{f-gov}^{thin} = D_f^{thin} \quad (2.8)$$

2.5.3.3.3 Governing Stress Corrosion Cracking Damage Factor (D_{f-gov}^{SSC})

Governing stress corrosion cracking damage factor ditentukan dari Persamaan (2.9).

$$D_{f-gov}^{SSC} = \max [D_f^{caustic}, D_f^{amine}, D_f^{SSC}, D_{f-gov}^{HIC/SOHIC-H_2S}, D_f^{carbonate}, D_f^{PTA}, D_f^{CLSCC}, D_f^{HSC-HF}, D_f^{HIC/SONIC-HF}] \quad (2.9)$$

2.5.3.3.4 Governing Eksternal Damage Factor (D_{f-gov}^{extd})

Governing eksternal damage factor ditentukan dari Persamaan (2.10)

$$D_{f-gov}^{extd} = \max [(D_f^{extcor} + D_f^{CUIF}), D_f^{ext-CLSCC} + D_f^{CUI-CLSCC}] \quad (2.10)$$

2.5.3.3.5 Governing Brittle Fracture Damage Factor (D_{f-gov}^{brit})

Governing brittle fracture damage factor ditentukan dari Persamaan (2.11)

$$D_{f-gov}^{brit} = \max [(D_f^{britfract} + D_f^{tempe}), D_f^{885} + D_f^{sigma}] \quad (2.11)$$

2.5.3.4 Kategori Efektifitas Inspeksi

Faktor kerusakan ditentukan sebagai fungsi dari efektifitas pemeriksaan. Efektifitas inspeksi ada 5 kategori yang digunakan dalam API 581 ditunjukkan pada Tabel 2.5 kategori efektifitas inspeksi dimaksudkan untuk menjadi contoh dan memberikan pedoman untuk menentukan efektifitas inspeksi aktual.

Efektifitas inspeksi secara aktual tergantung pada banyak faktor seperti keterampilan inspektor, pelatihan inspektor, dan kemampuan dalam memilih lokasi inspeksi. Inspeksi adalah peringkat yang sesuai dengan efektifitas dalam mendeteksi kerusakan dan memprediksi laju kerusakan dengan tepat. Efektifitas yang sebenarnya dalam teknik inspeksi tergantung karakteristik dari mekanisme kerusakan.

Efektifitas dari setiap inspeksi yang dilakukan dalam waktu yang telah ditentukan adalah karakteristik untuk setiap mekanisme kerusakan. Jumlah efektifitas tertinggi akan digunakan untuk menentukan faktor kerusakan. Jika beberapa inspeksi yang dilakukan dan

memiliki nilai efektifitas yang rendah selama periode waktu yang ditentukan, maka dapat didekati untuk efektifitas inspeksi setara lebih tinggi sesuai dengan hubungan berikut:

- a) Inspeksi 2 *usually effective* (B) = Inspeksi 1 *highly effective* (A) atau $2B = 1A$
- b) Inspeksi 2 *fairly effective* (C) = Inspeksi 1 *usually effective* (B) atau $2C = 1B$
- c) Inspeksi 2 *poorly effective* (D) = Inspeksi 1 *fairly effective* (B) atau $2D = 1C$

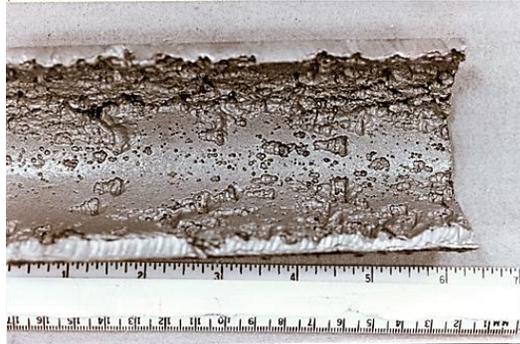
Tabel 2.4. Kategori efektifitas inspeksi [18].

Kategori efektifitas inspeksi	Deskripsi
<i>Highly effective</i>	Metode inspeksi yang mengidentifikasi keadaan kebenaran kerusakan hampir setiap kasus (atau kepercayaan 80-100%)
<i>Usually effective</i>	Metode inspeksi yang mengidentifikasi keadaan kebenaran kerusakan sebagian besar dari waktu (atau kepercayaan 60-80%)
<i>Fairly effective</i>	Metode inspeksi yang mengidentifikasi keadaan kebenaran kerusakan sebagian dari waktu (atau kepercayaan 40-60%)
<i>Poorly effective</i>	Metode inspeksi yang memberikan sedikit informasi untuk mengidentifikasi keadaan kebenaran kerusakan (atau kepercayaan 20-40%)
<i>Ineffective</i>	Metode inspeksi yang tidak memberikan atau hampir tidak ada informasi untuk mengidentifikasi keadaan kebenaran kerusakan (atau kepercayaan kurang dari 20%)

2.5.3.5 Thinning Damage Factor

Probabilitas kegagalannya adalah memperkirakan dengan memeriksa kemungkinan *rate of thinning* lebih besar dari yang diharapkan. Dalam perhitungan faktor kerusakan, diasumsikan bahwa kerusakan *thinning* akan menghasilkan kegagalan oleh *plastic collapse* seperti pada Gambar 2.8.

Corrosion rate harus dihitung dari data ketebalan yang ada, berdasarkan hasil dari inspeksi pipa. Hasil dari inspeksi yang telah dilakukan pada komponen harus digunakan untuk menunjukkan jenis *thinning* (*general* atau *local*). Apabila dari kedua tipe *thinning* (*general* dan *local*) kemungkinan terjadi, kemudian menunjukkan tipe *local thinning*. Tipe dari mekanisme *thinning* dapat ditentukan dari efektifitas inspeksi yang dilakukan.



Gambar 2.8. *Thinning damage factor* [20].

2.5.3.6 SSC Damage Factor-Sulfida Stress Cracking

Sulfida stress cracking didefinisikan sebagai *cracking* dari logam karena aksi gabungan dari tegangan tarik dan korosi yang dihasilkan dari air dan hidrogen sulfida. SSC adalah bentuk *stress cracking* dari hidrogen yang dihasilkan dari penyerapan atom hidrogen hasil dari proses korosi pada permukaan logam dapat dilihat pada Gambar 2.9.

Stres corrosion cracking (SSC) biasanya terjadi lebih mudah dalam material yang memiliki kekerasan tinggi seperti baja dalam daerah *Heat Affected Zones* (HAZ) pada baja kekuatan rendah. Kerentanan terhadap SSC adalah berkaitan dengan fluks permeasi hidrogen dalam baja, yang berkaitan dengan dua parameter lingkungan yaitu pH dan kadar H_2S pada air.

Korosi pada pH yang rendah disebabkan oleh H_2S , sedangkan korosi pada nilai pH yang tinggi disebabkan oleh konsentrasi tinggi dari ion bisulfida. Kehadiran sianida pada pH tinggi dapat memperburuk penetrasi hidrogen ke dalam baja. Kehadiran 1 ppm dalam H_2S dalam air akan cukup menyebabkan SSC.

SSC sangat berhubungan dengan dua parameter material, *hardness* dan *stress level*. Baja yang memiliki kekerasan tinggi menjadi rentan untuk terjadinya SSC. Tegangan sisa tarik yang tinggi pada hasil lasannya (HAZ) juga dapat meningkatkan kerentanan terhadap SSC.



Gambar 2.9. *Sulfida stress cracking* [21].

Asumsi utama dalam menentukan faktor kerusakan untuk *sulfida stress cracking* adalah kerusakan dengan parameter kerentanan tinggi, sedang, atau rendah berdasarkan proses lingkungan, material konstruksi, dan variabel pabrikasi komponen (*heat treatment*).

2.5.3.7 SSC Damage Factor (HIC/SOHIC-H₂S)

Hydrogen induced cracking (HIC) didefinisikan sebagai retak internal *stepwise* yang berhubungan dekat dengan *hydrogen blisters* pada perbedaan bidang logam atau permukaan baja.

Penumpukan tekanan dalam *blisters* ini terkait dengan fluks permeasi hidrogen dalam baja. Sumber hidrogen dalam baja adalah reaksi korosi dengan *hydrogen sulfide* basah. Air harus hadir untuk reaksi korosi terjadi, dan resultan fluks hidrogen terkait dengan dua lingkungan parameter. pH dan kandungan H₂S dalam air. Korosi yang terjadi pada pH rendah disebabkan oleh H₂S, dimana korosi yang terjadi pada pH tinggi, disebabkan oleh konsentrasi tinggi ion *bisulfide*. Kehadiran sianida pada pH tinggi akan dapat memperburuk penetrasi *hydrogen* ke dalam baja. Kehadiran 50 ppm H₂S dalam air telah cukup untuk menyebabkan HIC seperti pada Gambar 2.10.

SOHIC didefinisikan sebagai susunan *blisters* bergabung oleh *hydrogen-induced cracking* yang bersamaan dalam melalui arah ketebalan baja sebagai akibat dari tegangan tarik lokal tinggi. SOHIC adalah bentuk khusus dari HIC yang biasanya terjadi pada logam dasar, bersebelahan dengan zona terkena panas pada pengelasan dimana tegangan tinggi karena efek tegangan aditif dari tekanan internal dan tegangan sisa dari pengelasan.



Gambar 2.10. HIC/SOHIC-H₂S [22].

2.5.3.8 Eksternal Corrosion Damage Factor (Ferritic Component)

Sudah menjadi umum, *plants* yang berlokasi di daerah yang memiliki curah hujan tahunan tinggi, lokasi di daerah laut yang lebih rentan untuk terjadi korosi eksternal dibandingkan *plant* yang di daerah dingin, kering, dan pertengahan benua. Terlepas dari iklim, unit yang terletak diantara dekat menara pendingin dan ventilasi uap sangat rentan terhadap korosi eksternal dapat dilihat pada Gambar 2.11. *Mitigation* dari korosi eksternal dicapai melalui *painting* yang tepat. Sebuah program reguler untuk inspeksi kerusakan cat dan pengecatan akan mencegah kejadian sebagian besar dari korosi eksternal.



Gambar 2.11. External corrosion damage factor-ferritic component [23].

2.5.3.9 Piping Mechanical Fatigue

Kegagalan *fatigue* dalam sistem perpipaan merupakan bahaya yang sangat nyata dalam kondisi tertentu. Mendesain dan pemasangan pipa yang baik seharusnya tidak menimbulkan permasalahan seperti kegagalan *fatigue*, tetapi prediksi dari getaran dalam sistem perpipaan pada tahap mendesain sangat sulit, terutama jika ada sumber tegangan mekanik siklik seperti *reciprocating* pompa dan kompresor. Sedangkan apabila sistem perpipaan tidak diperhitungkan *mechanical fatigue* dalam kondisi pembangunan, perubahan kondisi seperti kegagalan pada *support* pipa, meningkatnya getaran yang keluar dari mesin, perubahan dalam siklus aliran dan tekanan atau akan menambah beban pada bagian persambungan yang tidak ditahan dapat membuat sistem perpipaan rentan kegagalan seperti pada Gambar 2.12.

Berdasarkan input dari *plant engineers* dan *inspectors* dari berbagai disiplin ilmu, indikator kunci dari probabilitas tertinggi dari kegagalan diidentifikasi sebagai berikut:

- a) Kegagalan sebelumnya diakibatkan *fatigue*.
- b) Getaran dari perpipaan termasuk sambungan cabang yang lebih besar dari jenis *plant* sistem perpipaan tersebut.
- c) Sambungan ke mesin *reprocating*, terjadinya kavitasi yang ekstrim.



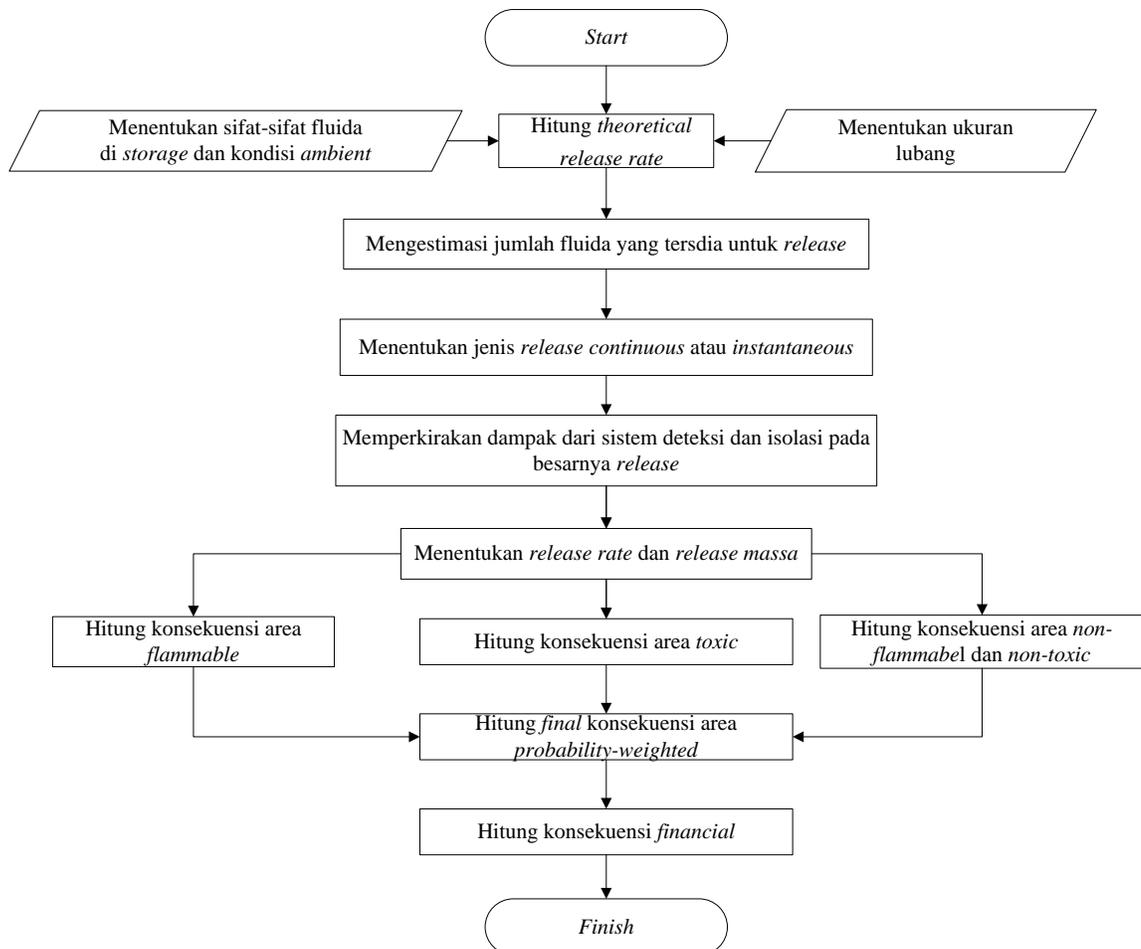
Gambar 2.12. *Piping mechanical fatigue* [24].

2.5.4 Konsekuensi Kegagalan [18]

2.5.4.1 Gambaran Umum

Fluida berbahaya yang hilang dari peralatan pengolahan bertekanan tinggi dapat mengakibatkan kerusakan di sekitar peralatan, cedera serius pada personil, kerugian produksi, dan dampak lingkungan yang tidak diinginkan. Dalam API RBI, konsekuensi hilangnya perlindungan ditentukan dengan menggunakan teknik analisis konsekuensi yang ditetapkan dan dinyatakan sebagai daerah yang terkena dampak.

Selain itu metode analisis dispersi yang digunakan untuk mengukur besarnya *flammable release* dan untuk menentukan tingkat dan lamanya terbuka pada personil untuk *toxic release*. Gambaran umum analisis konsekuensi API RBI pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Prosedur analisis konsekuensi [18].

2.5.4.2 Analisa Konsekuensi *Level 1*

Analisis konsekuensi *level 1* adalah sebuah metode sederhana untuk mengevaluasi konsekuensi bahaya yang keluar untuk sejumlah referensi cairan, referensi cairan yang tersedia akan dilihat Tabel 2.5. Referensi cairan dari Tabel 2.5 sangat sesuai dengan titik didih normal dan berat cairan yang terkandung dalam proses peralatan yang digunakan. Daerah konsekuensi yang mudah terbakar kemudian ditentukan dari ekspresi polinomial sederhana yang merupakan fungsi dari besarnya pelepasan (*release*).

Untuk setiap ukuran lubang kecepatan pelepasan/pembuangan fluida/material (*release rate*) dihitung berdasarkan fase dari cairan. *Release rate* kemudian digunakan dalam bentuk persamaan tertutup untuk menentukan konsekuensi *flammable*.

Untuk analisa konsekuensi *level 1*, serangkaian analisis konsekuensi dilakukan untuk menghasilkan konsekuensi area sebagai fungsi dari referensi fluida dan besar *release*. Berdasarkan analisis ini, bentuk persamaan area untuk konsekuensi *flammable* seperti pada Persamaan (2.12) dikembangkan untuk menghitung konsekuensi area.

$$CA = a \cdot X^b \quad (2.12)$$

dimana:

CA = *Consequence area* (konsekuensi area)

X = *Release rate* (kecepatan pelepasan)

a = Varibael *gas/liquid*

b = Varibael *gas/liquid*

Variable a dan b dalam Persamaan 2.12 disediakan untuk referensi cairan pada Tabel 2.6 dan 2.7. Jika *release* adalah *steady state* dan *continuous* (berkelanjutan) seperti kasus untuk ukuran kecil, maka *release rate* disubstitusikan ke Persamaan (2.3) untuk X. Jika *release* tersebut dianggap *instantaneous* (seketika), misalnya sebagai hasil dari pecahnya bejana tekan atau pipa, maka *release mass* ini disubstitusikan ke Persamaan (2.3) untuk X. Transisi antara *continuous release* dan *instantaneous release* dalam API RBI didefinisikan sebagai *release* dimana lebih dari 4,536 kgs (10,000 lbs) dari massa fluida yang keluar dalam waktu kurang dari 3 menit.

Tabel 2.5. Daftar *representative fluids* untuk analisis level 1 [18].

No	Referensi fluida	Jenis fluida	Contoh fluida
1	C1-C2	TYPE 0	<i>Methane, ethane, ethylene, LNG, fuel gas</i>
2	C3-C4	TYPE 0	<i>Propane, butane, isobutane, LPG</i>
3	C5	TYPE 0	<i>Pentane</i>
4	C6-C8	TYPE 0	<i>Gasoline, naphtha, light straight run, heptane</i>
5	C9-C12	TYPE 0	<i>diesel, kerosene</i>
6	C13-C16	TYPE 0	<i>Jet fuel, kerosene, atmospheric gas oil</i>
7	C17-C25	TYPE 0	<i>Gas oil, typical crude</i>
8	C25+	TYPE 0	<i>Residuum, heavy crude, lube oil, seal oil</i>
9	H ₂	TYPE 0	<i>Hydrogen only</i>
10	H ₂ S	TYPE 0	<i>Hydrogen sulfide only</i>
11	HF	TYPE 0	<i>Hydrogen fluoride</i>
12	WATER	TYPE 0	<i>Water</i>
13	STEAM	TYPE 0	<i>Steam</i>
14	ACID (LOW)	TYPE 0	<i>Acid, caustic</i>
15	AROMATICS	TYPE 1	<i>Benzene, toluene, xylene, cumene</i>
16	AlCl ₃	TYPE 0	<i>Aluminum chloride</i>
17	PYROPHORIC	TYPE 0	<i>Pyrophoric materials</i>
18	AMMONIA	TYPE 0	<i>Ammonia</i>
19	CHLORINE	TYPE 0	<i>Chlorine</i>
20	CO	TYPE 1	<i>Carbon monoxide</i>
21	DEE	TYPE 1	<i>Diethyl ether</i>
22	HCL	TYPE 0	<i>Hydrogen chloride</i>
23	NITRIC ACID	TYPE 0	<i>Nitric acid</i>
24	NO ₂	TYPE 0	<i>Nitrogen dioxide</i>
25	PHOSGENE	TYPE 0	<i>Phosgene</i>
26	TDI	TYPE 0	<i>Toluene diisocyanate</i>
27	METHANOL	TYPE 1	<i>Methanol</i>
28	PO	TYPE 1	<i>Propylene oxide</i>
29	STYRENE	TYPE 1	<i>Styrene</i>
30	EEA	TYPE 1	<i>Ethylene glycol monoethyl ether acetate</i>
31	EE	TYPE 1	<i>Ethylene glycol monoethyl ether</i>
32	EG	TYPE 1	<i>Ethylene glycol</i>
33	EO	TYPE 1	<i>Ethylene oxide</i>

Tabel 2.6. Konstanta persamaan konsekuensi kerusakan komponen akibat *flammable* [18].

Fluida	Continuous releases constants								Instantaneous releases constants							
	Auto-Ignition Not Likely (CAINL)				Auto-Ignition Likely (CAIL)				Auto-Ignition Not Likely (IAINL)				Auto-Ignition Likely (IAIL)			
	Gas		Liquid		Gas		Liquid		Gas		Liquid		Gas		Liquid	
	a	b	a	b	a	B	A	b	a	b	a	B	a	b	a	b
C1-C2	43	0.98	N/A	N/A	280	0.95	N/A	N/A	41	0.67	N/A	N/A	1079	0.62	N/A	N/A
C3-C4	49.48	1	N/A	N/A	313.6	1	N/A	N/A	27.96	0.72	N/A	N/A	522.9	0.63	N/A	N/A
C5	25.17	0.99	536	0.89	304.7	1	N/A	N/A	13.38	0.73	1.49	0.85	275	0.61	N/A	N/A
C6-C8	29	0.98	182	0.89	312.4	1	525	0.95	13.98	0.66	4.35	0.78	275.7	0.61	57	0.55
C9-C12	12	0.98	130	0.9	391	0.95	560	0.95	7.1	0.66	3.3	0.76	281	0.61	6	0.53
C13-C16	N/A	N/A	64	0.9	N/A	N/A	1023	0.92	N/A	N/A	0.46	0.88	N/A	N/A	9.2	0.88
C17-C25	N/A	N/A	20	0.9	N/A	N/A	861	0.92	N/A	N/A	0.11	0.91	N/A	N/A	5.6	0.91
C25+	N/A	N/A	11	0.91	N/A	N/A	544	0.9	N/A	N/A	0.03	0.99	N/A	N/A	1.4	0.99
H ₂	64.5	0.992	N/A	N/A	420	1	N/A	N/A	61.5	0.657	N/A	N/A	1430	0.62	N/A	N/A
H ₂ S	0.992	1	N/A	N/A	203	0.89	N/A	N/A	148	0.63	N/A	N/A	357	0.61	N/A	N/A
HF	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
WATER	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
STEAM	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
ACID (LOW)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
AROMATICS	17.87	1.097	103	1	374.5	1.055	N/A	N/A	11.46	0.667	70.1	1	512.6	0.71	701	1
AlCl ₃	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PYROPHORIC	12	0.98	130	0.9	391	0.95	560	0.95	7.1	0.66	3.3	0.76	281	0.61	6	0.53
AMMONIA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
CHLORINE	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
CO	0.107	1.752	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	69.68	0.667	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
DEE	39.84	1.134	737.4	1.106	320.7	1.033	6289	0.65	155.7	0.667	5.11	0.92			5.67	0.919
HCL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
NITRIC ACID	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
NO ₂	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PHOSGENE	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
TDI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
METHANOL	0.026	0.909	1751	0.934	N/A	N/A	N/A	N/A	28.11	0.667	1.92	0.9	N/A	N/A	N/A	N/A
PO	14.62	1.114	1295	0.96	N/A	N/A	N/A	N/A	65.58	0.667	3.4	0.87	N/A	N/A	N/A	N/A
STYRENE	17.87	1.097	103	1	374.5	1.055	N/A	N/A	11.46	0.667	70.1	1	512.6	0.71	701	1
EEA	0.002	1.035	117	1	N/A	N/A	N/A	N/A	8.014	0.667	69	1	N/A	N/A	N/A	N/A
EE	12.62	1.005	173.1	1	N/A	N/A	N/A	N/A	38.87	0.667	72.2	1	N/A	N/A	N/A	N/A
EG	7.721	0.973	108	1	N/A	N/A	N/A	N/A	6.525	0.667	69	1	N/A	N/A	N/A	N/A
EO	31.03	1.069	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	136.3	0.667	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabel 2.7. Konstanta persamaan konsekuensi cedera personal akibat *flammable* [18].

Fluida	Continuous releases constants								Instantaneous releases constants							
	Auto-Ignition Not Likely (CAINL)				Auto-Ignition Likely (CAIL)				Auto-Ignition Not Likely (IAINL)				Auto-Ignition Likely (IAIL)			
	Gas		Liquid		Gas		Liquid		Gas		Liquid		Gas		Liquid	
	a	b	a	b	a	b	A	b	a	b	a	b	a	b	a	b
C1-C2	110	0.96	N/A	N/A	745	0.92	N/A	N/A	79	0.67	N/A	N/A	3100	0.63	N/A	N/A
C3-C4	125.2	1	N/A	N/A	836.7	1	N/A	N/A	57.72	0.75	N/A	N/A	1769	0.63	N/A	N/A
C5	62.05	1	1545	0.89	811	1	N/A	N/A	28.45	0.76	4.34	0.85	959.6	0.63	N/A	N/A
C6-C8	68	0.96	516	0.89	828.7	1	1315	0.92	26.72	0.67	12.7	0.78	962.8	0.63	224	0.54
C9-C12	29	0.96	373	0.89	981	0.95	1401	0.92	13	0.66	9.5	0.76	988	0.63	20	0.54
C13-C16	N/A	N/A	183	0.89	N/A	N/A	2850	0.9	N/A	N/A	1.3	0.88	N/A	N/A	26	0.88
C17-C25	N/A	N/A	57	0.89	N/A	N/A	2420	0.9	N/A	N/A	0.32	0.91	N/A	N/A	16	0.91
C25+	N/A	N/A	33	0.89	N/A	N/A	1604	0.9	N/A	N/A	0.08	0.99	N/A	N/A	4.1	0.99
H ₂	165	0.933	N/A	N/A	1117	1	N/A	N/A	118.5	0.652	N/A	N/A	1430	0.62	N/A	N/A
H ₂ S	52	1	N/A	N/A	375	0.94	N/A	N/A	271	0.63	N/A	N/A	357	0.61	N/A	N/A
HF	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
WATER	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
STEAM	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
ACID (LOW)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
AROMATICS	64.14	0.963	353.5	0.883	1344	0.937	488	0.27	18.08	0.686	0.14	0.94	512.6	0.71	1.4	0.935
AlCl ₃	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PYROPHORIC	29	0.96	373	0.89	981	0.92	1401	0.92	13	0.66	9.5	0.76	988	0.63	N/A	N/A
AMMONIA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
CHLORINE	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
CO	27	0.991	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	105.3	0.692	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
DEE	128.1	1.025	971.9	1.219	1182	0.997	2658	0.86	199.1	0.682	47.1	0.81	N/A	N/A	5.67	0.919
HCL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
NITRIC ACID	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
NO ₂	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PHOSGENE	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
TDI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
METHANOL	0.016	1.008	4484	0.902	N/A	N/A	N/A	N/A	37.71	0.688	6.26	0.87	N/A	N/A	N/A	N/A
PO	38.76	1.047	1955	0.84	N/A	N/A	N/A	N/A	83.68	0.682	15.2	0.83	N/A	N/A	N/A	N/A
STYRENE	64.14	0.963	353.5	0.883	1344	0.937	488	0.27	18.08	0.686	0.14	0.94	512.6	0.71	1.4	0.935
EEA	0.017	0.946	443.1	0.835	N/A	N/A	N/A	N/A	11.41	0.687	0.15	0.92	N/A	N/A	N/A	N/A
EE	35.56	0.969	46.56	0.8	N/A	N/A	N/A	N/A	162	0.66	0.15	0.93	N/A	N/A	N/A	N/A
EG	25.67	0.947	324.7	0.869	N/A	N/A	N/A	N/A	8.971	0.687	0.14	0.92	N/A	N/A	N/A	N/A
EO	49.43	1.105	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	220.8	0.665	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Konsekuensi area *flammable* terakhir ditentukan sebagai rata-rata pertimbangan probabilitas individu konsekuensi area dihitung setiap ukuran lubang *release*. Dalam API RBI, empat ukuran lubang yang digunakan, ukuran lubang yang paling kecil merupakan kebocoran kecil dan ukuran lubang terbesar untuk yang pecah atau *complete release* untuk isinya.

Hal ini dilakukan untuk kedua kerusakan peralatan dan cedera personil pada konsekuensi area. Pembobotan probabilitas yang dilakukan menggunakan distribusi ukuran lubang dan frekuensi dari ukuran lubang *release* yang dipilih. Persamaan untuk pembobotan probabilitas konsekuensi area *flammable* ditunjukkan pada Persamaan (2.13).

$$CA^{flam} = \left[\frac{\sum_{n=1}^4 gff_n \cdot CA^{flam}}{gff_{total}} \right] \quad (2.13)$$

dimana:

CA^{flam} = *Cosequence area flammable* (ft²)

CA_n^{flam} = *Cosequence area flammable* untuk setiap (n) ukuran lubang (ft²)

gff_n = *Generic failure frequencies* untuk setiap (n) ukuran lubang (*failure/year*)

gff_{total} = *Total generic failure frequencies* (*failure/year*)

Total frekuensi kegagalan (gff_{total}), persamaan di atas adalah ditentukan dengan Persamaan (2.14).

$$gff_{total} = \left[\sum_{n=1}^4 gff_n \right] \quad (2.14)$$

Analisis konsekuensi *level 1* adalah metode untuk mendekati konsekuensi area dari *hazardous release*. Masukan yang dibutuhkan adalah sifat fluida dasar seperti *Molecule Weight* (MW), densitas dan ratio panas spesifik gas ideal (k) dan kondisi operasi. Perhitungan *release rate* atau massa tersedia dalam kelompok inventaris yaitu inventarisasi peralatan terpasang yang memberikan kontribusi masa fluida ke peralatan yang bocor juga diperlukan. Prosedur yang sama digunakan untuk menentukan konsekuensi yang terkait dengan *release* bahan kimia beracun seperti H₂S, *ammonia* atau klorin.

Salah satu keterbatasan utama dari analisis konsekuensi *level 1* adalah hanya dapat digunakan dalam kasus-kasus dimana cairan dalam komponen tersebut dapat diwakili oleh salah satu dari referensi cairan. Analisis konsekuensi *level 1* adalah telah digunakan dalam industri pengolahan selama 10 tahun terakhir. Namun kepentingan di dunia internasional telah tumbuh API RBI didalam industri penyulingan dan petrokimia, serta dalam industri kimia, menjadi jelas bahwa terbatasnya jumlah referensi cairan yang tersedia pada tabel konsekuensi area tidak cukup. Sebagai hasilnya, analisis *level 2* dikembangkan untuk menghitung konsekuensi area untuk *release* cairan berbahaya menggunakan pendekatan yang lebih ketat. Analisis konsekuensi *level 2* juga menyelesaikan inkonsistensi dalam analisis *level 1* terkait untuk tipe *release* dan probabilitas suatu kejadian.

2.5.4.3 Analisa Konsekuensi Level 2

Suatu prosedur perhitungan yang rinci disediakan untuk menentukan konsekuensi dari hilangnya penahan dari cairan berbaya dari peralatan bertekanan. Analisis konsekuensi *level 2* dikembangkan sebagai alat digunakan untuk asumsi analisis konsekuensi *level 1* yang disederhanakan tidak *valid*. Contoh dimana perhitungan analisis *level 2* lebih ketat sebagaimana dijabarkan di bawah ini:

- a) *Fluida* tertentu tidak terwakilkan secara cukup dalam daftar referensi cairan yang di berikan pada Tabel 2.5, termasuk kasus-kasus dimana cairan yang berbagai-macam campuran saat mendidih atau dimana konsekuensi cairan beracun (*fluids toxic*) tidak cukup diwakili oleh salah satu referensi cairan.
- b) Tempat penyimpanan cairan (*fluida*) didekat titik kritis dalam hai ini, asumsi gas ideal untuk persamaan *vapor release* yang tidak valid.
- c) Pengaruh *release* dua fasa, termasuk *entrainment* jet cairan serta *rainout* perlu dimasukkan dalam penilaian.
- d) Efek ledakan *non-flammable*, seperti pada gas bertekanan (udara atau nitrogen) yang terbang (*release*) selama bejana bertekanan pecah, harus dimasukkan dalam penilaian.
- e) Asumsi meteorologi yang digunakan dalam perhitungan dispersi yang membentuk dasar untuk tabel analisis konsekuensi *level 1* tidak mewakili dari tempat data.

Untuk melakukan perhitungan analisis konsekuensi *level 2*, komposisi sebenarnya dari cairan yang disimpan dalam peralatan yang dimodelkan. Penyelesaian sifat-sifat cairan yang tersedia memungkinkan untuk menghitung sifat fisik cairan lebih akurat. Penyelesaian sifat-sifat cairan juga bisa melakukan perhitungan yang lebih baik terhadap fase *release* fluida dan untuk *release* dua fasa.

2.5.5 Perhitungan Analisis Konsekuensi Level 1 pada Pipeline [18]

2.5.5.1 Menentukan *Representative Fluid* dan Sifat-Sifatnya

Dalam analisis konsekuensi *level 1*, *representative fluids* yang paling sesuai dengan cairan yang terkandung dalam sistem bertekanan yang sedang dievaluasi dipilih dari *representative fluids* dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Dalam analisis konsekuensi *level 1*, sifat-sifat dalam fluida yang diperlukan sudah diestimasi untuk masing-masing *representative fluids* pada Tabel 2.8. Sifat-sifat fluida yang diperlukan untuk analisis *level 1* tergantung pada fase penyimpanan fluida tersebut, diidentifikasi dibawah ini:

- a) *Stored liquid*
 1. *Normal Boiling Point* (NBP)
 2. Densitas, (ρ_l)
 3. *Auto-ignition Temperature* (AIT)
- b) *Stored vapor* atau gas
 1. *Normal Boiling Point* (NBP)
 2. *Molecular Weight* (MW)
 3. *Ideal gas specific heat ratio* (k)
 4. *Constant pressure specific heat*, (C_p)
 5. *Auto-ignition Temperature* (AIT)

Tabel 2.8. Sifat-sifat dari *representative fluids* dalam analisis level 1 [18].

No	Referensi fluida	Ambient state	Molecular weight	Liquid density (lb/m)	Auto ignition temp (F)	Cp				
						Ideal gas constant A	Ideal gas constant B	Ideal gas constant C	Ideal gas constant D	Ideal gas constant E
1	C1-C2	GAS	23	15.639	1036	12.3	1.15E-01	-2.87E-05	-1.30E-09	N/A
2	C3-C4	GAS	51	33.61	695	2.632	0.3188	-1.34E-04	1.47E-08	N/A
3	C5	LIQUID	72	39.03	544	-3.626	0.4873	-2.60E-04	5.30E-08	N/A
4	C6-C8	LIQUID	100	42.702	433	-5.146	6.76E-01	-3.65E-04	7.66E-08	N/A
5	C9-C12	LIQUID	149	45.823	406	-8.5	1.01E+00	-5.56E-04	1.18E-07	N/A
6	C13-C16	LIQUID	205	47.728	396	-11.7	1.39E+00	-7.72E-04	1.67E-07	N/A
7	C17-C25	LIQUID	280	48.838	396	-22.4	1.94E+00	-1.12E-03	-2.53E-07	N/A
8	C25+	LIQUID	422	56.187	396	-22.4	1.94E+00	-1.12E-03	-2.53E-07	N/A
9	H ₂	GAS	2	4.433	752	27.1	9.27E-03	-1.38E-05	7.65E-09	N/A
10	H ₂ S	GAS	34	61.993	500	31.9	1.44E-03	2.43E-05	-1.18E-08	N/A
11	HF	GAS	20	60.37	32000	29.1	6.61E-04	-2.03E-06	2.50E-09	N/A
12	WATER	LIQUID	18	62.3	N/A	2.76E+05	-2.09E+03	8.125	-1.41E-02	9.37E-06
13	STEAM	GAS	18	62.3	N/A	3.34E+04	2.68E+04	2.61E+03	8.90+03	1.17E+03
14	ACID (LOW)	LIQUID	18	62.3	N/A	2.76E+05	-2.09E+03	8.125	-1.41E-02	9.37E-06
15	AROMATICS		0	0	0	0	0	0	0	0
16	AlCl ₃	POWDER	133.5	152	1036	4.34E+04	3.97E+04	4.17E+02	2.40E+04	N/A
17	PYROPHORIC	LIQUID	149	45.823	0	-8.5	1.01E+00	-5.56E-04	1.18E-07	N/A
18	AMMONIA		0	0	0	0	0	0	0	0
19	CHLORINE		0	0	0	0	0	0	0	0
20	CO	GAS	28	50	1128	2.91E+04	8.77E+03	3.09E+03	8.46E+03	1.54E+03
21	DEE	LIQUID	74	45	320	8.62E+04	2.55E+05	1.54+03	1.44E+05	-6.89E+02
22	HCL	GAS	36	74	N/A	0	0	0	0	0
23	NITRIC ACID	LIQUID	63	95	N/A	0	0	0	0	0
24	NO ₂	LIQUID	90	58	N/A	0	0	0	0	0
25	PHOSGENE	LIQUID	99	86	N/A	0	0	0	0	0
26	TDI	LIQUID	174	76	1148	0	0	0	0	0
27	METHANOL	LIQUID	32	50	867	3.93E+04	8.79E+04	1.92E+03	5.37E+04	8.97E+02
28	PO	LIQUID	58	52	840	4.95E+04	1.74E+05	1.56E+03	1.15E+05	7.02E+02
29	STYRENE	LIQUID	104	42.7	914	8.93E+04	2.15E+05	7.72E+02	9.99E+04	2.44E+03
30	EEA	LIQUID	132	61	715	1.06E+05	2.40E+05	6.59E+02	1.50E+05	1.97E+03
31	EE	LIQUID	90	58	455	3.25E+04	3.00E+05	1.17E+03	2.08E+05	4.73E+02
32	EG	LIQUID	62	69	745	6.30E+04	1.46E+05	1.67E+03	9.73E+04	7.74E+02
33	EO	GAS	44	55	804	3.35E+04	1.21E+05	1.61E+03	8.24E+04	7.37E+02

Dalam analisis konsekuensi *level 1*, titik didih normal digunakan dalam menentukan fase material saat *release* ke atmosfer dan berat molekul atau densitas digunakan dalam menentukan *release rate*, tergantung apakah cairan atau gas. *Ideal gas specific heat ratio* (k) ditentukan menggunakan Persamaan (2.15), C_p dapat diketahui menggunakan Tabel 2.8 di atas.

$$k = \frac{c_p}{c_p - R} \quad (2.15)$$

dimana:

k = *Ideal gas specific heat ratio*

C_p = *Constant pressure specific heat*

R = *Universal gas constant* = 8.314 J/(kg-mol)K [1545 ft-lbf/lb-mol^oR]

Karakteristik dispersi cairan tersebut dan kemungkinan hasil konsekuensi setelah keluar adalah sangat tergantung pada fasa gas, cairan atau dua fasa dari fluida tersebut setelah dilepaskan ke lingkungan. Kebanyakan *release* dari unit yang bertekanan yaitu dua fasa terutama cairan yang kental dan memiliki kecenderungan untuk berbusa. Fluida yang dilepaskan dibawah tekanan diatas titik didih fluida tersebut maka akan terbakar dan menghasilkan *release* dua fasa dapat dilihat pada Table 2.9.

Tabel 2.9. Panduan analisis konsekuensi *level 1* dalam menentukan fase *fluida* [18].

Fase fluida pada kondisi operasi	Fase fluida pada kondisi lingkungan	API RBI penentuan fase akhir setelah dilepaskan
Gas	Gas	Modelkan sebagai gas
Gas	Cair	Modelkan sebagai gas
Cair	Gas	Modelkan sebagai gas. Jika titik didih fluida pada kondisi lingkungan tunak lebih dari 80°F, modelkan sebagai cair
Cair	Cair	Modelkan sebagai cair

2.5.5.2 Menentukan Ukuran Lubang

Ukuran lubang untuk *release* pada Tabel 2.2 digunakan dalam analisis level 1 dan 2. Penggunaan ukuran lubang didasarkan pada jenis komponen dan geometri. Dalam

menentukan ukuran lubang untuk *release* dibatasi untuk perhitungan nilai *release* untuk diameter maksimal 16 inch.

2.5.5.3 Penentuan *Release Rate*

Release rate tergantung pada sifat fisik bahan, fase awal, proses kondisi saat operasi, dan ukuran lubang pada sifat fisik bahan. Persamaan untuk *release rate* harus dipilih, berdasarkan fase material saat didalam peralatan, dan metode pemberhentiannya *sonic* atau *subsonic* saat material dilepaskan. Dalam analisis konsekuensi *level 1*, tahap awal atau keadaan cairan di dalam peralatan yang untuk didefinisikan sebagai cairan atau uap/gas.

2.5.5.3.1 Perhitungan *Release Rate Liquid*

Rumus yang digunakan untuk menghitung laju pelepasan fluida cair melalui suatu lubang adalah Persamaan (2.16) sebagai berikut:

$$Wn = C_d \cdot K_{v,n} \cdot \rho_l \cdot \frac{A_n}{C_1} \sqrt{\frac{2 \cdot g_c \cdot (P_s - P_{atm})}{\rho_l}} \quad (2.16)$$

dimana:

Wn = *Release rate* untuk *liquid* (lbs/sec)

C_d = *Discharge coefficient* (Rekomendasi API: 0.61)

C_1 = Konstanta (12)

A_n = Luas area lubang (in²)

ρ_l = Densitas/massa jenis fluida (lb/ft³)

P_s = Tekanan normal operasi pada *storage* (psi)

P_{atm} = Tekanan atmosfer (psi)

g_c = Faktor konversi dari lb_f ke lb_m (32.2 lbm-ft/lbf-sec²)

$K_{v,n}$ = Faktor koreksi *viscosity* (Asumsi API; 1.0)

2.5.5.3.2 Perhitungan *Release Rate Vapor/Gas*

Ada 2 rezim untuk aliran gas atau uap yang melewati sebuah lubang, aliran *sonic* untuk tekanan internal tinggi, dan aliran *subsonic* untuk tekanan rendah (besarnya, 103.4 kPa [15 psi] atau kurang) oleh karena itu, *release rate* untuk uap/gas dihitung dalam proses 2 langkah. Pada langkah pertama, tentukan rezim aliran (*sonic/subsonic*) dan langkah kedua *release rate* dihitung dengan menggunakan persamaan untuk rezim aliran tertentu. Perubahan tekanan aliran (P_{trans}) dari *sonic* ke *subsubsonic* didefinisikan dengan Persamaan (2.17).

$$P_{trans} = P_{atm} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.17)$$

dimana:

P_{trans} = Tekanan transisi (Psi)

P_{atm} = Tekanan atmosfer (Psi)

k = *Ideal gas specific heat ratio*

- a) Apabila tekanan dalam *storage* (P_s) lebih besar dari pada tekanan transisi (P_{trans}) hitung menggunakan Persamaan (2.17), kemudian hitung *release rate* menggunakan Persamaan (2.18). Persamaan ini berdasarkan fase gas/uap pada kecepatan *sonic* saat melewati lubang.

$$W_n = \frac{C_d}{C_2} \cdot A_n \cdot P_s \sqrt{\left(\frac{k \cdot MW \cdot g_c}{R \cdot T_s} \right) \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2.18)$$

dimana:

W_n = *Theoretical release rate* (lb/s)

C_d = *Discharge coefficient* (Rekomendasi API: 0.90)

C_2 = Konstanta (1)

A_n = Luas area lubang (in²)

P_s = Tekanan *storage* (Psi)

k = *Ideal gas specific heat ratio*

MW = *Molecul weight*

g_c = Faktor konversi dari lb_f ke lb_m ($32.2 \text{ lbf}\cdot\text{ft}/\text{lb}_m\cdot\text{sec}^2$)

R = *Universal gas constant* = $8.314 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{mol})\text{K}$ [$1545 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/\text{lb}\cdot\text{mol}\cdot^\circ\text{R}$]

T_s = Temperatur *storage* ($^\circ\text{R}$)

- b) Apabila tekanan dalam *storage* (P_s) lebih kecil atau sama dengan tekanan transisi (P_{trans}) hitung menggunakan Persamaan (2.19). Persamaan ini berdasarkan fase gas/uap pada kecepatan *subsonic* saat melewati lubang.

$$Wn = \frac{C_d}{C_2} \cdot A_n \cdot P_s \sqrt{\left(\frac{MW \cdot g_c}{R \cdot T_s}\right) \left(\frac{2 \cdot k}{k-1}\right) \left(\frac{P_{atm}}{P_s}\right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_s}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)} \quad (2.19)$$

dimana:

W_n = *Theoretical release rate* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

C_d = *Discharge coefficient* (Rekomendasi API: 0.90)

C_2 = Konstanta (1)

A_n = Luas area lubang (in^2)

P_s = Tekanan *storage* (psi)

P_{atm} = Tekanan atmosfer (psi)

k = *Ideal gas specific heat ratio*

MW = *Molecul weight*

g_c = Faktor konversi dari lb_f ke lb_m ($32.2 \text{ lbf}\cdot\text{ft}/\text{lb}_m\cdot\text{sec}^2$)

R = *Universal gas constant* = $8,314 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{mol})\text{K}$ [$1545 \text{ ft}\cdot\text{lbf}/\text{lb}\cdot\text{mol}\cdot^\circ\text{R}$]

T_s = Temperatur *storage* ($^\circ\text{R}$)

- c) Dalam Persamaan (2.18) dan (2.19), *discharge coefficient*, C_d , untuk aliran *fully turbulent* gas atau uap dari lubang *sharp-edge* besarnya antara $0,85 \leq C_d \leq 1,0$, direkomendasikan dari API adalah $C_d = 0.90$.

2.5.5.4 Estimasi Jumlah Total Fluida yang Ada untuk Keluar

Dalam API RBI, massa yang tersedia untuk *release* diperkirakan untuk setiap ukuran lubang kurang dari dua kuantitas:

a) Kelompok massa yang tersedia.

Komponen yang dievaluasi adalah bagian dari kelompok komponen besar yang diharapkan dapat memberikan persediaan cairan untuk *release*. Perhitungan kelompok massa yang tersedia digunakan sebagai batas tertinggi dari massa fluida yang tersedia untuk *release* dan tidak menunjukkan bahwa jumlah cairan yang akan *release* dalam semua skenario lubang kebocoran. Kelompok massa yang tersedia dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.20).

$$mass_{inv} = \sum_{i=1}^N mass_{comp,i} \quad (2.20)$$

dimana:

$mass_{inv}$ = Massa inventori (lb)

$mass_{comp,i}$ = Massa komponen (lb)

b) Massa komponen.

Dalam API RBI, diasumsikan bahwa untuk kebocoran besar intervensi operator akan terjadi dalam 3 menit, sehingga membatasi jumlah material yang dilepaskan. Oleh karena itu, jumlah massa yang tersedia untuk *release* dibatasi massa komponen ditambah massa tambahan, yang dihitung berdasarkan 3 menit kebocoran dari komponen *inventory group*. Massa tambahan ini dihitung dengan asumsi *flow rate* sama dari kebocoran komponen, terbatas pada 203 mm (8 inch) ukuran lubang *release*. Massa tambahan bisa dihitung untuk setiap ukuran lubang menggunakan persamaan (2.21).

$$Mass_{add,n} = 180 \cdot \min [W_n, W_{max8}] \quad (2.21)$$

dimana:

$mass_{add,n}$ = Massa *additional* untuk setiap (n) ukuran lubang

W_n = *Theoretical release rate* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

W_{max8} = Kecepatan maksimum *mass additional* dengan ukuran lubang 8 in (lb/s)

Massa yang tersedia untuk *release* dihitung menggunakan Persamaan (2.22).

$$mass_{avail,n} = \min [mass_{comp} + mass_{add,n} , mass_{inv}] \quad (2.22)$$

dimana:

$mass_{avail,n}$ = Massa yang tersedia untuk *release* setiap (n) ukuran lubang (lb)

$mass_{inv}$ = Massa inventori (lb)

$mass_{comp}$ = Massa komponen (lb)

$mass_{add,n}$ = Massa *additional* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb)

2.5.5.5 Menentukan Jenis *Release* (*Continuous* atau *Instantaneous*)

Dalam API, pemodelan *release* salah satu dari dua jenis *release* sebagai berikut:

a) *Instantaneous release*

Pelepasan fluida terjadi dalam waktu yang relatif cepat dengan jumlah fluida yang terbang relatif besar pada Gambar 2.14 (a).

b) *Continuous release*

Pelepasan fluida jenis kontinu terjadi dalam waktu yang relatif lama dan secara perlahan pada Gambar 2.14 (b).

Tipe pelepasan kontinu ataupun instan ditentukan dari kecepatan pelepasan dalam waktu tertentu. Jika dalam waktu 3 menit, pelepasan fluida melebihi 10.000 lbs, maka jenis pelepasannya adalah instan. Jika tidak melebihi 10.000 lbs, maka pelepasannya adalah jenis kontinu. Khusus untuk ukuran lubang ¼ inch, jenis pelepasan langsung ditentukan sebagai kontinu.



Gambar 2.14. Jenis pelepasan (a) *instantaneous* dan (b) *continuous* [25].

2.5.5.6 Estimasi Dampak dari Sistem Deteksi dan Isolasi pada Besarnya *Release*

Pabrik pengolahan minyak dan kimia/petrokimia biasanya memiliki berbagai sistem deteksi, isolasi dan mitigasi yang dirancang untuk mengurangi efek dari pelepasan material berbahaya. Beberapa sistem mengurangi besar dan durasi *release* dengan mendeteksi dan mengisolasi kebocoran. Sistem lain mengurangi konsekuensi area dengan meminimalkan kemungkinan untuk pengapian atau membatasi penyebaran material.

Dalam API RBI sistem deteksi, isolasi, dan mitigasi diasumsikan mempengaruhi *release* dengan 2 cara:

a) Sistem deteksi dan isolasi

Sistem ini dirancang untuk mendeteksi kebocoran dan cenderung mengurangi besar durasi dari *release*.

b) Sistem mitigasi.

Sistem ini dirancang untuk mengurangi konsekuensi dari *release*. Sistem deteksi dan isolasi dalam unit dapat memiliki dampak yang signifikan terhadap besaran dan durasi dari *release* cairan berbahaya.

Pedoman untuk menentukan peringkat kualitatif (A, B, atau C) dapat dilihat pada Tabel 2.10 dan 2.11. Sistem deteksi untuk A biasanya hanya ditemukan khusus di industri kimia dan tidak sering digunakan dalam industri perminyakan.

Tabel 2.10. Pemberian peringkat untuk jenis-jenis sistem deteksi [18].

Tipe sistem deteksi	Peringkat
Instrumentasi didesain secara khusus untuk mendeteksi kebocoran dengan didasarkan atas perubahan kondisi operasi (contoh: <i>pressure loss</i> dalam aliran) di dalam sistem.	A
Penempatan detektor secara tepat untuk mendeteksi keberadaan material di luar batas <i>pressure boundary</i> .	B
Pendeteksian visual, kamera, maupun detektor dengan cakupan yang terbatas.	C

Tabel 2.11. Pemberian peringkat untuk jenis-jenis sistem isolasi [18].

Tipe sistem isolasi	Peringkat
Sistem isolasi maupun <i>shutdown</i> diaktifkan secara langsung oleh instrumentasi maupun detektor tanpa intervensi operator.	A
Sistem isolasi maupun <i>shutdown</i> diaktifkan oleh operator dari ruang kontrol atau lokasi yang jauh dari kebocoran.	B
Isolasi bergantung pada katup yang dioperasikan secara manual.	C

2.5.5.6.1 Dampak Terhadap Besar *Release*

Sistem deteksi dan isolasi dapat mengurangi besar *release*, untuk *release* kedua material *flammable* dan *toxic* katup isolasi berfungsi untuk mengurangi tingkat pelepasan atau massa dengan jumlah tertentu, tergantung pada kualitas sistem ini. Nilai-nilai pengurangan pada sistem ini dapat dilihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12. Faktor untuk *release* berdasarkan sistem deteksi dan isolasi [18].

Klasifikasi sistem		Penyesuain besar <i>release</i>	Faktor reduksi, $fact_{di}$
Deteksi	Isolasi		
A	A	Mengurangi <i>release rate</i> atau mass 25%	0.25
A	B	Mengurangi <i>release rate</i> atau mass 20%	0.20
A atau B	C	Mengurangi <i>release rate</i> atau mass 10%	0.10
B	B	Mengurangi <i>release rate</i> atau mass 15%	0.15
C	C	Tidak ada penyesuain untuk <i>release rate</i> atau <i>mass</i>	0.00

2.5.5.6.2 Dampak Terhadap Durasi *Release*

Sistem deteksi dan isolasi juga dapat mengurangi durasi *release*, yang sangat penting ketika menghitung konsekuensi dari *toxic release*, karena fungsi dari *toxic release* adalah fungsi dari konsentrasi dan durasi penyebaran. Durasi yang digunakan sebagai input langsung terhadap estimasi konsekuensi *flammable* dan *toxic*, dapat dilihat pada Tabel 2.13.

Tabel 2.13. Durasi kebocoran berdasarkan sistem deteksi dan isolasi [18].

Peringkat sistem deteksi	Peringkat sistem isolasi	Durasi kebocoran	Ukuran lubang
A	A	20 menit	¼ inch
		10 menit	1 inch
		5 menit	4 inch
A	B	30 menit	¼ inch
		20 menit	1 inch
		10 menit	4 inch
A	C	40 menit	¼ inch
		30 menit	1 inch
		20 menit	4 inch
B	A atau B	40 menit	¼ inch
		30 menit	1 inch
		20 menit	4 inch
B	C	1 jam	¼ inch
		30 menit	1 inch
		20 menit	4 inch
C	A, B, atau C	1 jam	¼ inch
		40 menit	1 inch
		20 menit	4 inch

2.5.5.7 Menentukan *Release Rate* dan Massa untuk Analisis Konsekuensi

2.5.5.7.1 *Continuous Release Rate*

Untuk *continuous release*, pelepasan dimodelkan *steady state*. Sehingga *release rate* digunakan sebagai input analisis konsekuensi, dengan menggunakan Persamaan (2.23).

$$rate_n = W_n (1 - fact_{di}) \quad (2.23)$$

dimana:

$rate_n$ = *Mitigated discharge rate* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

W_n = *Theoretical release rate* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

$fact_{di}$ = Faktor reduksi jumlah *release* dengan berdasarkan system deteksi dan isolasi.

2.5.5.7.2 Instantaneous Release Mass

Untuk *transient instantaneous release*, *release mass* diperlukan dalam melakukan analisa. *Release mass* yang tersedia, ($mass_{available,n}$) yang digunakan sebagai *release mass* tertinggi, $mass_n$ ditunjukkan dengan persamaan (2.24).

$$mass_n = \min [\{rate_n \cdot ld_n\}, mass_{available,n}] \quad (2.24)$$

dimana:

$mass_n$ = *Mitigated discharge mass* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb)

$rate_n$ = *Mitigated discharge rate* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

ld_n = *Leak duration actual* untuk setiap (n) ukuran lubang (s)

$mass_{available,n}$ = Massa yang tersedia untuk *release* setiap (n) ukuran lubang (lb)

Persamaan (2.25) digunakan untuk menghitung durasi aktual dari release ld_n .

$$ld_n = \min [\{\frac{mass_{avail,n}}{rate_n}\}, \{60 \cdot ld_{max,n}\}] \quad (2.25)$$

dimana:

ld_n = *Leak duration actual* untuk setiap (n) ukuran lubang (s)

$mass_{available,n}$ = Massa yang tersedia untuk *release* setiap (n) ukuran lubang (lb)

$rate_n$ = *Mitigated discharge rate* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

$ld_{max,n}$ = *Leak duration maximum* untuk setiap (n) ukuran lubang (s)

2.5.5.8 Penentuan *Flammable Consequence* dan *Explosive Consequence*

Dalam analisis konsekuensi *level 1* untuk *representatif fluida*, persamaan untuk menghitung konsekuensi area *flammable* dan *explosive* sudah dikembangkan. Konsekuensi area diestimasi dari persamaan *release rate* untuk *continuous release* dan *release mass* untuk *instantaneous release* sebagai input, contoh kejadian konsekuensi *flammable* pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Konsekuensi akibat *flammable* [25].

2.5.5.8.1 Persamaan Konsekuensi Area

Dalam analisis konsekuensi *level 1*, persamaan persamaan yang digunakan untuk menentukan konsekuensi area *flammable* untuk kerusakan komponen dan cedera personil.

a) *Continuous release*

Untuk *continuous release* menggunakan Persamaan (2.26). Koefisien untuk persamaan ini, untuk area kerusakan komponen dan cedera personil yang dapat dilihat pada Tabel 2.6 dan 2.7.

$$CA_n^{CONT} = a(rate_n)^b \quad (2.26)$$

dimana:

CA_n^{CONT} = *Consequence area* untuk *continuous release* (ft²)

$rate_n$ = *Mitigated discharge rate* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

a,b = Variabel *gas/liquid*

b) *Instantaneous Release*

Untuk *instantaneous release* menggunakan Persamaan (2.27). Koefisien untuk persamaan ini, untuk area kerusakan komponen dan cedera personil yang dapat dilihat pada Tabel 2.7 dan 2.8.

$$CA_n^{INST} = a(mass_n)^b \quad (2.27)$$

dimana:

CA_n^{INST} = *Consequence area* untuk *instantaneous release* (ft²)

$mass_n$ = *Mitigated discharge mass* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb)

a,b = Variabel *gas/liquid*

2.5.5.8.2 Batas Konsekuensi Area untuk Pelepasan Fluida [10.000 ft²]

Konsekuensi dari *release flammable* sangat tidak tergantung pada durasi dari *release* melainkan sejak fluida mencapai keadaan *steady state* dalam waktu singkat tersebar ke atmosfer. Untuk *pool fire* hasil dari *release continuous* dan *instantaneous*, asumsi metode API RBI ukuran maksimum 10.000 ft² dan batas dari konsekuensi area *flammable*, CA_{cmd}^{flam} kerusakan komponen untuk area maksimum dari ukuran ini.

Apabila batas area 10.000 ft² untuk cairan diterapkan, maka efektifitas dari *release rate*, $effrate_n$ dihitung berdasarkan area ini dan kemudian digunakan dalam area akibat cedera personil, perhitungan CA_{inj}^{flam} . Untuk gas dan uap, batas 10.000 ft² berdasarkan konsekuensi area tidak diterapkan.

2.5.5.8.3 Penyesuaian Konsekuensi Area untuk Sistem Mitigasi

Evaluasi respon pasca-kebocoran sangat penting dalam langkah analisis konsekuensi. Dalam langkah ini variasi sistem mitigasi dievaluasi untuk efektifitas dari sistem tersebut dalam membatasi konsekuensi area. Besarnya konsekuensi untuk *release flammable* berdasarkan sistem unit mitigasi dapat dilihat pada Tabel 2.14, serta dapat dilihat faktor reduksi konsekuensi area, $fact_{mit}$.

Tabel 2.14. Penyesuaian konsekuensi *flammable* untuk sistem mitigasi [18].

Sistem mitigasi	Penyesuaian konsekuensi area	Faktor reduksi konsekuensi area, $fact_{mit}$
<i>Inventory blowdown, coupled with isolation system classification B or higher</i>	Mengurangi konsekuensi area 25%	0.25
<i>Fire water deluge system and monitors</i>	Mengurangi konsekuensi area 20%	0.20
<i>Fire water monitors only</i>	Mengurangi konsekuensi area 5%	0.05
<i>Foam spray system</i>	Mengurangi konsekuensi area 15%	0.15

2.5.5.8.4 Penyesuaian Konsekuensi Area untuk Efektifitas Energi

Perbandingan dari perhitungan konsekuensi dengan sejarah aktual indikasi *release* tersebut memerlukan koreksi besarnya *release instantaneous* untuk keefektifitas energi. Dalam API RBI, koreksi ini dibuat untuk kejadian *instantaneous release* massa melebihi 10.000 lbs dengan membagi wilayah perhitungan konsekuensi dengan *factor*, $eneff_n$ Persamaan (2.28).

$$eneff_n = 4 \log_{10} [C_4 \cdot mass_n] - 15 \quad (2.28)$$

dimana:

$eneff_n$ = Faktor efisiensi energi untuk setiap (n) ukuran lubang

$mass_n$ = *Mitigated discharge mass* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb)

C_4 = Konstanta (1)

2.5.5.8.5 Hasil *Blending* Berdasarkan Jenis *Release*

Perhitungan konsekuensi area *level 1* menghasilkan hasil yang sangat berbeda tergantung apakah persamaan area *continuous* atau persamaan area *instantaneous* yang digunakan. Faktor *blending* ditentukan berdasarkan jenis *release*.

a) *Continuous release*

Untuk hasil dari *release* mendekati *continuous* ke *instantaneous* titik transisi 10.000 lbs dalam 3 menit, atau *release rate* 55.6 lb/s, faktor *blending* diberikan pada Persamaan (2.29).

$$fact_n^{IC} = \min \left[\frac{rate_n}{C_5}, 1.0 \right] \quad (2.29)$$

dimana:

$fact_n^{IC}$ = Faktor *blending* konsekuensi area pelepasan *continuous/instantaneous* untuk setiap (n) ukuran lubang

$rate_n$ = *Mitigated discharge rate* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

C_5 = Konstanta (55.6)

Apabila konstanta persamaan *instantaneous* tidak terdapat pada Tabel 2.7 dan 2.8 untuk referensi fluida, maka faktor *blending* pada Persamaan (2.30).

$$fact_n^{IC} = 0.0 \quad (2.30)$$

b) *Instantaneous release*

Blending tidak diperlukan, karena definisi dari *release* sesaat adalah satu dengan tingkat *release* yang disesuaikan, $rate_n$ lebih besar dari 55.6 lb/s atau 10.000 lbs dalam 3 menit, faktor *blending*, $fact_n^{IC}$ menggunakan persamaan (2.31) akan selalu sama dengan 1.0.

$$fact_n^{IC} = 1 \quad (2.31)$$

Area *release* campuran, dihitung menggunakan Persamaan (2.32). Untuk area ini, proporsional bagaimana menutup *release rate* aktual, $rate_n$ adalah transisi *continuous/instantaneous rate* 55.6 lb/s.

$$CA_n^{IC-blend} = CA_n^{INST} \cdot fact_n^{IC} + CA_n^{CONT} (1 - fact_n^{IC}) \quad (2.32)$$

2.5.5.8.6 Hasil *Blending* Berdasarkan AIT

Perhitungan konsekuensi area *level* 1 menghasilkan hasil yang sangat berbeda tergantung apakah persamaan *auto-ignition not likely* digunakan atau *auto-ignition likely* yang digunakan. Dalam analisis konsekuensi *level* 1, konsekuensi area *blending* menggunakan Persamaan (2.33).

$$CA^{AIT-blend} = CA^{AIL} \cdot fact^{AIT} + CA_n^{AINL} (1 - fact^{AIT}) \quad (2.33)$$

Faktor *blending* AIT, $fact^{AIT}$ ditentukan menggunakan persamaan.

$$fact^{AIT} = 0 \quad \text{untuk } T_s + C_6 \leq AIT \quad (2.34)$$

$$fact^{AIT} = \frac{(T_s - AIT + C_6)}{2 \cdot C_6} \quad \text{untuk } T_s + C_6 > AIT > T_s - C_6 \quad (2.35)$$

$$fact^{AIT} = 1 \quad \text{untuk } T_s + C_6 \leq AIT \quad (2.36)$$

2.5.5.8.7 Menentukan Final Area Konsekuensi *Flammable*

Final daerah konsekuensi *flammable* ditentukan sebagai pertimbangan rata-rata probabilitas individu (*blended*) perhitungan daerah konsekuensi *flammable* untuk setiap ukuran lubang *release*. Hal ini dilakukan untuk kedua kerusakan komponen dan konsekuensi daerah cedera personil. Bobot penilaian menggunakan frekuensi kegagalan dari ukuran lubang.

Persamaan untuk pertimbangan probabilitas dari area konsekuensi kerusakan komponen menggunakan Persamaan (2.37).

$$CA_{cmd}^{flam} = \left[\frac{\sum_{n=1}^4 gff_n \cdot CA_{cmd,n}^{flam}}{gff_{total}} \right] \quad (2.37)$$

dimana:

CA_{cmd}^{flam} = Final probability weighted component damage flammable consequence area (ft²)

$CA_{cmd,n}^{flam}$ = Blended component damage flammable consequence area untuk setiap (n) ukuran lubang (ft²)

gff_n = Generic failure frequencies untuk setiap (n) ukuran lubang (failure/year)

gff_{total} = Total generic failure frequencies (failure/year)

Persamaan untuk pertimbangan probabilitas dari konsekuensi area cedera personil menggunakan Persamaan (2.38).

$$CA_{inj}^{flam} = \left[\frac{\sum_{n=1}^4 gff_n \cdot CA_{inj,n}^{flam}}{gff_{total}} \right] \quad (2.38)$$

dimana:

CA_{inj}^{flam} = Final probability weighted personnel injury flammable consequence area (ft²)

$CA_{inj,n}^{flam}$ = Blended personnel injury flammable consequence area untuk setiap (n) ukuran lubang (ft²)

gff_n = *Generic failure frequencies* untuk setiap (n) ukuran lubang (*failure/year*)

gff_{total} = *Total generic failure frequencies* (*failure/year*)

2.5.5.9 Penentuan *Toxic Consequence*

Dalam hasil *release toxic* tidak semua hanya terjadi satu jenis efek berbahaya, contoh bahan-bahan beracun seperti, *hidrogen sulfia* (HF), *ammonia*, dan *klorin* yang hanya menimbulkan bahaya beracun. Ada yang lain seperti *hidrogen sulfida* (H_2S) seperti pada Gambar 3.34 memiliki dua jenis efek beracun dan mudah terbakar.



Gambar 2.16. H_2S toxic [26].

2.5.5.9.1 Menentukan *Release Rate dan Mass*

Kecepatan pelepasan racun dan massa digunakan dalam analisis konsekuensi *toxic* untuk menentukannya berdasarkan fraksi massa (*mfrac*) dari komponen beracun tersebut, untuk benar cairan beracun $mfrac = 1$.

$$rate_n^{tox} = mfrac^{tox} \cdot W_n \quad (2.39)$$

dimana:

$rate_n^{tox}$ = kecepatan *release massa* komponen *toxic* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

$mfrac^{tox}$ = fraksi massa dari material toxic ($H_2S = 0,0004$)

W_n = *Theoretical release rate* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

$$mass_n^{tox} = mfrac^{tox} \cdot massa_n \quad (2.40)$$

dimana:

$mass_n^{tox}$ = *release massa* komponen *toxic* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb)

$mfrac^{tox}$ = fraksi massa dari material toxic ($H_2S = 0,0004$)

$mass_n$ = *Mitigated discharge mass* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb)

2.5.5.9.2 Estimasi Konsekuensi Area Beracun untuk HF dan H₂S

Konsekuensi area beracun untuk *continuous release* pada HF dan H₂S dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.41), untuk *continuous release* menggunakan $rate_n^{tox}$.

$$CA_{inj}^{tox} = C_8 \cdot 10^{(c \cdot \log_{10} C_4 \cdot rate_n^{tox} + d)} \quad (2.41)$$

dimana:

CA_{inj}^{tox} = *Final probability weighted personnel injury toxic consequence area* (ft²)

$rate_n^{tox}$ = Kecepatan *release massa* komponen *toxic* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb/s)

C_8 = Konstanta (1)

C_4 = Konstanta (1)

d = Diameter lubang (in)

Sedangkan untuk *instantaneous release* pada HF dan H₂S dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.42), untuk *instantaneous release* menggunakan $mass_n^{tox}$.

$$CA_{inj}^{tox} = C_8 \cdot 10^{(c \cdot \log_{10} C_4 \cdot mass_n^{tox} + d)} \quad (2.42)$$

dimana:

CA_{inj}^{tox} = *Final probability weighted personnel injury toxic consequence area* (ft²)

$mass_n^{tox}$ = *release massa* komponen *toxic* untuk setiap (n) ukuran lubang (lb)

C_8 = Konstanta (1)

C_4 = Konstanta (1)

d = Diameter lubang (in)

2.5.5.10 Penentuan *Non-Flammable, Non-Toxic Consequences*

Konsekuensi yang berhubungan dengan *release* dari material *non-flammable* dan *non-toxic* tidak seberat material lainnya. Bagaimana pun juga, material tersebut masih dapat cedera serius untuk personil dan kerusakan peralatan. Dalam hal ini adalah yang termasuk dalam material *non-flammable* dan *non-toxic* adalah uap, *acid*, dan *caustic*.

2.5.5.11 Menentukan Konsekuensi Area untuk Kerusakan Komponen dan Cedera Personil

Final konsekuensi area untuk kerusakan komponen dan cedera personil adalah maksimum area dari perhitungan:

- a) Konsekuensi *flammable*
- b) Konsekuensi *toxic*
- c) Konsekuensi *non-flammable* dan *non-toxic*

Final konsekuensi area untuk kerusakan komponen dapat ditentukan dengan persamaan (2.43).

$$CA_{cmd} = \max [CA_{cmd}^{flam}, CA_{cmd}^{tox}, CA_{cmd}^{nft}] \quad (2.43)$$

Karena konsekuensi area kerusakan komponen untuk *toxic* dan *non-flammable/non-toxic* sama dengan nol (0) atau tidak ada, maka final konsekuensi area untuk kerusakan komponen sama dengan konsekuensi area untuk *flammable* pada Persamaan 2.44.

$$CA_{cmd} = CA_{cmd}^{flam} \quad (2.44)$$

dimana:

CA_{cmd} = Final konsekuensi area kerusakan komponen (ft²)

CA_{cmd}^{flam} = *Final probability weighted component damage flammable consequence area* (ft²)

Final konsekuensi area untuk cedera personil dapat ditentukan dengan persamaan (2.45).

$$CA_{inj} = \max [CA_{inj}^{flam}, CA_{inj}^{tox}, CA_{inj}^{nfn}] \quad (2.45)$$

dimana:

CA_{inj} = Final konsekuensi area cedera personil (ft²)

CA_{inj}^{flam} = Final probability weighted personnel injury flammable consequence area (ft²)

CA_{inj}^{tox} = Final probability weighted personnel injury toxic consequence area (ft²)

CA_{inj}^{nfn} = Final probability weighted personnel injury non-flammable non-toxic consequence area (ft²)

2.5.5.12 Penentuan *Financial Consequences*

Banyak biaya-biaya yang terkait dengan kegagalan peralatan dalam sebuah *plant* dibawah ini biaya-biaya yang akan dikeluarkan ketika terjadi kegagalan peralatan:

- a) Biaya untuk perbaikan dan penggantian.

Dalam biaya kerusakan komponen ada biaya kebocoran (*holecost*) tergantung dari ukuran jenis komponen dan ukuran kebocoran, serta biaya material (*matcost*). Biaya perbaikan dan penggantian dapat ditentukan dengan Persamaan (2.46).

$$FC_{cmd} = \left[\frac{\sum_{n=1}^4 gff_n \cdot holecost_n}{gff_{total}} \right] \cdot matcost \quad (2.46)$$

dimana:

FC_{cmd} = *Financial consequence* kerusakan komponen (\$)

$holecost_n$ = Biaya perbaikan peralatan untuk setiap (n) ukuran lubang (\$)

$matcost$ = Faktor biaya material

gff_n = *Generic failure frequencies* untuk setiap (n) ukuran lubang (*failure/year*)

gff_{total} = *Total generic failure frequencies* (*failure/year*)

- b) Biaya kerusakan peralatan disekitar area yang terpengaruh kegagalan.

Sangat diperlukan dalam menghitung biaya kerusakan komponen untuk komponen yang lain berada disekitar peralatan yang gagal, apabila kerusakannya karena kejadian *flammable*. Hasil dari pelepasan racun tidak menjadi kerusakan peralatan disekitar

kejadian, untuk mengetahui biaya kerusakan peralatan disekitar area yang gagal, dapat menggunakan Persamaan (2.47).

$$FC_{affa} = CA_{cmd} \cdot equipcost \quad (2.47)$$

dimana:

FC_{affa} = *Financial consequence* kerusakan disekitar komponen (\$)

CA_{cmd} = Final konsekuensi area kerusakan komponen (ft²)

$equiptcost$ = Biaya proses penggantian komponen (\$/ft²)

- c) Biaya yang terkait dengan *production losses* dan *business interruption* sebagai hasil dari *downtime* untuk perbaikan atau penggantian kerusakan peralatan.

Biaya yang terkait dengan *business interuption* ditentukan berdasarkan jumlah *downtime* dan *lost production* ketika perbaikan kerusakan peralatan yang disebabkan kebocoran atau pecah. Biaya tersebut dapat ditentukan dengan Persamaan (2.48).

$$FC_{prod} = (Outage_{cmd} + Outage_{affa}) (prodcost) \quad (2.48)$$

dimana:

FC_{prod} = *Financial consequence* produksi yang terbuang (\$)

$Outage_{cmd}$ = Waktu yang diperlukan untuk memperbaiki komponen yang dievaluasi (*days*)

$Outage_{affa}$ = Waktu yang diperlukan untuk memperbaiki peralatan disekitar komponen yang dievaluasi (*days*)

$prodcost$ = Biaya produksi yang hilang karena waktu yang digunakan untuk memperbaiki peralatan (\$/day)

- d) Biaya untuk potensi cedera pada personil yang berhubungan dengan kegagalan.

Biaya untuk potensi cedera pada personil setiap perusahaan sudah memiliki manajemennya masing-masing, untuk menghitung biaya yang dikeluarkan dapat menggunakan Persamaan (2.49).

$$FC_{inj} = CA_{inj} \cdot popdens \cdot injcost \quad (2.49)$$

dimana:

FC_{inj} = *Financial consequence* hasil dari cedera serius personil (\$)

CA_{inj} = Final konsekuensi area cedera personil (ft²)

$popdens$ = *Population density* dari personil atau pekerja (personil/ft²)

$injcost$ = Biaya untuk cedera serius atau parah pada personil (\$)

e) Biaya pembersihan lingkungan.

Lingkungan hasil dari konsekuensi akibat keluarnya material dari suatu komponen menjadi biaya yang signifikan dan seharusnya ada untuk biaya lain termasuk denda serta biaya pinalti lainnya. Metode yang diterapkan berdasarkan jumlah material yang tumpah kelapangan, jumlah hari yang diperlukan untuk membersihkan tumpahan dan bahaya lingkungan yang berasal dari sifat-sifat fluida yang keluar. Jumlah biaya yang dikeluarkan untuk membersihkan tumpahan material atau fluida ke lingkungan dapat menggunakan Persamaan (2.50).

$$FC_{environ} = \left[\frac{\sum_{n=1}^4 gff_n \cdot vol_n^{env}}{gff_{total}} \right] \cdot env\ cost \quad (2.50)$$

dimana:

$FC_{environ}$ = *Financial consequence* pembersihan lingkungan (\$)

vol_n^{env} = Tumpahan minyak (*barrels*)

$envcost$ = Biaya pembersihan lingkungan (\$/bbl)

gff_n = *Generic failure frequencies* untuk setiap (n) ukuran lubang (*failure/year*)

gff_{total} = *Total generic failure frequencies* (*failure/year*)

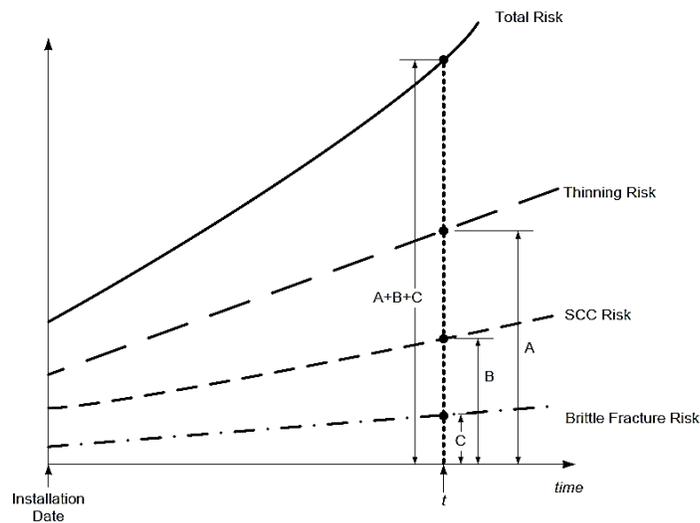
2.5.6 Analisis Resiko

2.5.6.1 Penentuan Resiko

Perhitungan resiko dapat ditentukan sebagai fungsi dari waktu sesuai dengan Persamaan (2.51). Persamaan ini menggabungkan probabilitas/kemungkinan kegagalan dan konsekuensi dari kegagalan.

$$R(t) = P_f(t) \cdot C(t) \quad (2.51)$$

Probabilitas kegagalan, $P_f(t)$ adalah fungsi dari waktu karena faktor kerusakan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2.2) meningkat seiring dengan kerusakan pada material/komponen karena penipisan, retak, atau mekanisme kerusakan lainnya yang berakumulasi dengan waktu. Gambar 2.17 menggambarkan bahwa resiko yang terkait dengan mekanisme kerusakan individu dapat ditambah bersamaan dengan superposisi untuk memberikan resiko secara keseluruhan sebagai fungsi waktu.



Gambar 2.17. Prinsip dari superposisi untuk perhitungan dari nilai resiko API 581 RBI

Dalam API RBI, konsekuensi dari kegagalan, $C(t)$ dianggap tidak bervariasi dengan waktu. Oleh karena itu Persamaan (2.51) dapat ditulis ulang seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (2.52) dan (2.53) tergantung pada apakah risiko dinyatakan sebagai dampak area atau dampak *financial*.

$$R(t) = P_f(t) \cdot CA \quad (2.52)$$

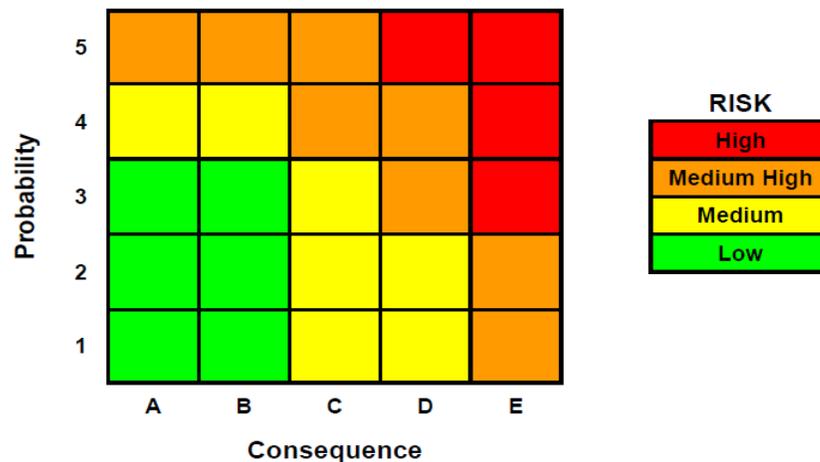
$$R(t) = P_f(t) \cdot FC \quad (2.53)$$

Dalam persamaan ini, persamaan (2.52) CA adalah konsekuensi untuk dampak area dinyatakan dalam satuan area dan persamaan (2.53) FC adalah konsekuensi untuk dampak *financial* (ekonomi). Risiko ini bervariasi dengan waktu karena fakta bahwa probabilitas kegagalan adalah fungsi dari waktu.

2.5.6.2 Matriks Resiko

Memperlihatkan hasil dalam matriks resiko merupakan cara efektif untuk menunjukkan distribusi resiko untuk berbagai komponen dalam unit proses tanpa nilai numerik. Dalam matriks risiko, kategori konsekuensi dan probabilitas sudah disusun sedemikian rupa sehingga komponen memiliki nilai resiko tinggi adalah terletak pada sudut kanan atas. Matriks resiko yang digunakan dalam API RBI ditunjukkan pada Gambar 2.18. Matriks risiko dapat dinyatakan dalam hal konsekuensi terhadap area atau konsekuensi *financial/ekonomi*. Nilai numerik yang berhubungan dengan kategori konsekuensi dan probabilitas ditunjukkan pada Tabel 2.7 dan 2.8 untuk kategori konsekuensi dinyatakan dalam area atau *financial*.

Kategori resiko yaitu tinggi, menengah tinggi, sedang dan rendah diletakkan pada kotak-kotak matriks risiko. Dalam API RBI kategori risiko adalah simetris untuk menunjukkan bahwa kategori konsekuensi diberikan bobot lebih tinggi dari kategori probabilitas.



Gambar 2.18. Matriks resiko API RBI 581.

Tabel 2.15. Nilai numerik yang berhubungan dengan kategori probabilitas dan konsekuensi berdasarkan area dalam API RBI 581.

Kategori probabilitas (1)		Kategori konsekuensi (2)	
Kategori	Range	Kategori	Range (ft ²)
1	$P_f(t) \leq 2$	A	$CA \leq 100$
2	$2 < P_f(t) \leq 20$	B	$100 < CA \leq 1000$
3	$20 < P_f(t) \leq 100$	C	$1000 < CA \leq 3000$
4	$100 < P_f(t) \leq 1000$	D	$3000 < CA \leq 10000$
5	$P_f(t) > 1000$	E	$CA > 10000$

Tabel 2.16. Nilai numerik yang berhubungan dengan kategori probabilitas dan konsekuensi berdasarkan *financial* dalam API RBI 581.

Kategori probabilitas (1)		Kategori konsekuensi (2)	
Kategori	Range	Kategori	Range (\$)
1	$P_f(t) \leq 2$	A	$FC \leq 10,000$
2	$2 < P_f(t) \leq 20$	B	$10,000 < FC \leq 100,000$
3	$20 < P_f(t) \leq 100$	C	$100,000 < FC \leq 1,000,000$
4	$100 < P_f(t) \leq 1000$	D	$1,000,000 < FC \leq 10,000,000$
5	$P_f(t) > 1000$	E	$FC > 10,000,000$

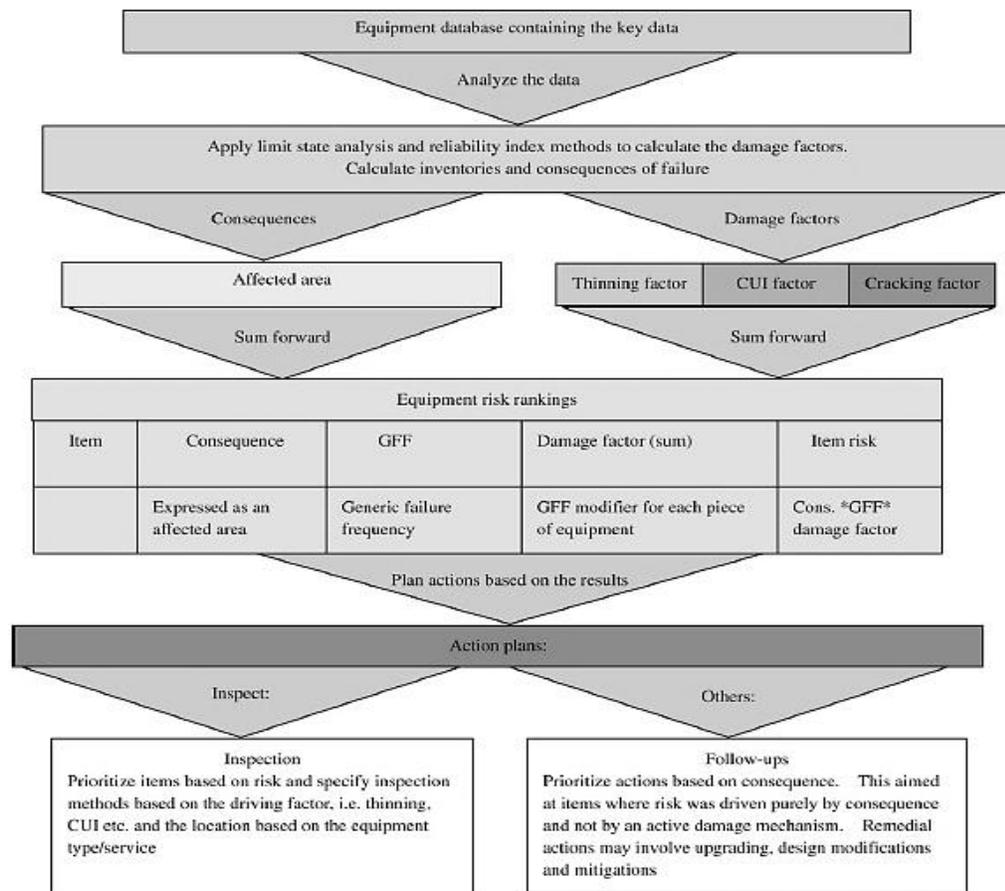
Item-item peralatan yang menuju ke arah sudut kanan atas dari matriks resiko kemungkinan besar akan mendapat prioritas untuk perencanaan inspeksi karena item ini memiliki resiko tinggi. Demikian pula, item-item yang berada ke arah sudut kiri bawah dari matriks resiko mendapat prioritas yang rendah untuk inspeksi karena item ini memiliki resiko rendah. Setelah plot telah selesai, matriks risiko kemudian dapat digunakan sebagai alat penyaring selama proses pemrioritasan.

2.6 Study of a Risk Based Piping Inspection Guideline System [27]

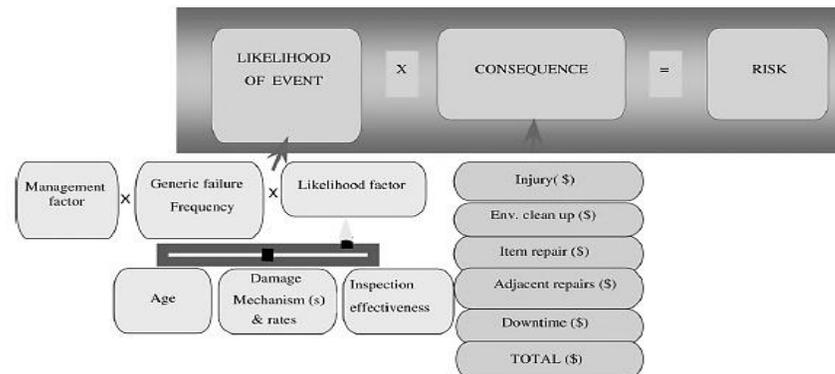
Studi mengenai *Risk Based Inspection* (RBI) pada perpipaan sebenarnya sudah pernah dilakukan sebelumnya. Seperti yang dilakukan Shiaw-Wen [27] mengembangkan

sistem *Risk Based Inspection* (RBI) dan konstruksi model pedoman untuk inspeksi pada *piping*. Pengembangan tersebut sudah dibangun dengan data base inspeksi untuk ukuran *piping* dan jenis korosi yang berbeda-beda.

Metodologi RBI dan proses kerja yang digunakannya dapat dilihat pada Gambar 2.19. RBI bermanfaat untuk meningkatkan waktu pengoperasian pabrik atau setidaknya menjaga nilai resiko yang ada pada tingkatan yang diterima. Dia mengilustrasi unsur yang diperlukan menjadi masukan dalam melakukan analisis RBI kuantitatif dapat dilihat pada Gambar 2.20. Sistem proses analisis dalam penelitiannya berdasarkan standar internasional *API Publication 581* tahun 2000 dan faktor lokal ukuran kualitatif yang diambil dari industri dalam negeri.

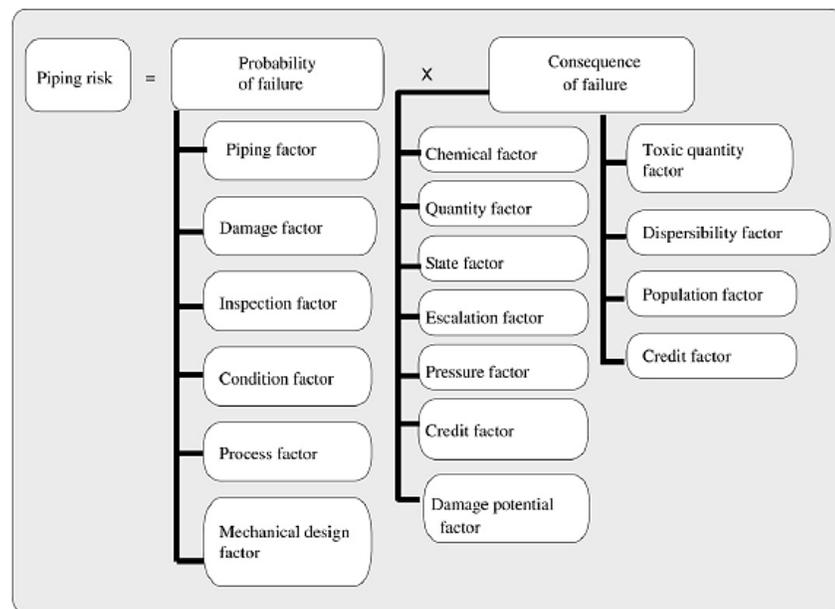


Gambar 2.19. Aplikasi dan metodogi RBI [27].

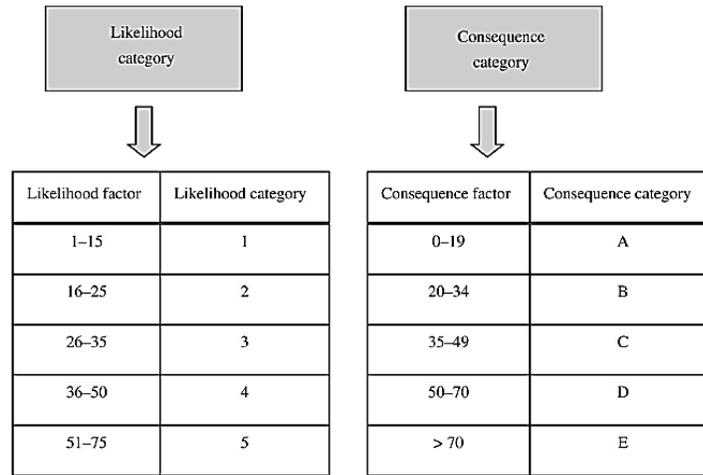


Gambar 2.20. Model analisis resiko [27].

Model RBI yang dibangun untuk perpipaan dapat dilihat pada Gambar 2.21 yang menampilkan data kualitatif yang menjadi fokus dalam inspeksi probabilitas kegagalan dan konsekuensi kegagalan. Kategori resiko yang diklasifikasikan dengan distribusi probabilitas (*likelihood*) dan konsekuensi (*consequence*) yang ditunjukkan pada Gambar 2.22.

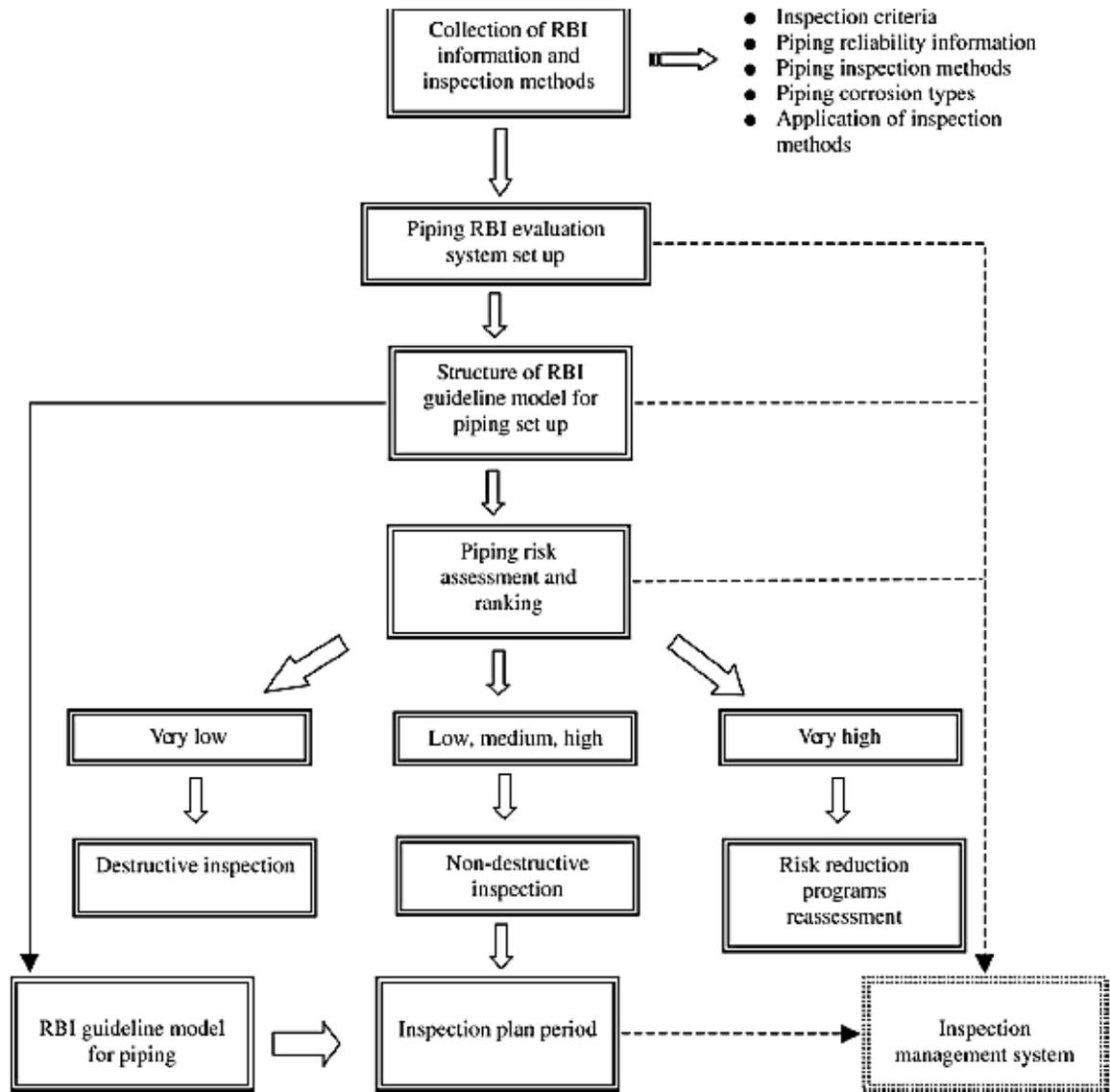


Gambar 2.21. Data dalam perhitungan resiko perpipaan [27].



Gambar 2.22. Kategori nilai probabilitas dan konsekuensi [27].

Konstruksi model *risk based inspeksi* untuk *piping* yang kembangkan dipengaruhi oleh jenis korosi, alat untuk inspeksi dan posisi inspeksi. Setelah melakukan *screening*, kemudian pilihan langkah-langkah inspeksi yang diusulkan untuk *nondestructive* yang optimal. Dapat dilihat pada Gambar 2.23 menggambarkan stuktur model pedoman RBI pada *piping*.



Gambar 2.23. Struktur dari pedoman RBI untuk *piping* [27].

Dalam studi kasus yang dilakukan analisis *piping* di *Naphtha Cracking Unit Petroleum Refinery* Taiwan menggunakan *Rational Unified Process (RUP)*. RUP adalah model *software* untuk *maintenance* berhubungan dengan pengembangan dan perawatan. Hasil simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2.17 di bawah ini dan plot dalam bentuk matriks resiko dapat dilihat pada Gambar 2.24.

Tabel 2.17. Jumlah perpipaan yang dianalisis nilai resiko [27].

Equipment type (unit: in.)	Total
PIPE < 2	3
PIPE-2	51
PIPE-4	145
PIPE-6	49
PIPE-8	51
PIPE-10	18
PIPE-12	40
PIPE-16	23
PIPE > 16	91
Grand total	471
Likelihood of failure	Total
1	433
2	22
3	8
4	4
5	4
Grand total	471
Consequence of failure	Total
A	12
B	58
C	168
D	233
E	0
Grand total	471

LoF	CoF				
5	0	0	3	1	0
4	0	0	3	1	0
3	1	0	3	4	0
2	0	0	1	21	0
1	11	58	158	206	0
	A	B	C	D	E

Gambar 2.24. Distribusi matriks resiko [27].

Berdasarkan *journal* yang ditulis Shiaw-Wen [27] penuliskan mencoba membanding metode dan hasil analisis yang digunakan dijelaskan pada Tabel 2.18 di bawah ini:

Tabel 2.18. Perbandingan penelitian yang dilakukan Shiaw-Wen [27] dengan penulis.

No	Perbandingan	Shiaw-Wen,dkk	Penulis
1	Metode RBI	API 581 tahun 2000	API 581 tahun 2008
2	Analisis perhitungan	Kualitatif menggunakan <i>software</i> RUP	Kuantitatif menggunakan program bantu/ <i>template</i> perhitungan
3	Sistem perpipaan	<i>Piping</i>	<i>Pipeline</i>
4	Hasil <i>output</i>	Matriks resiko	Matriks resiko
5	Studi kasus	<i>Naphtha Cracking Unit Petroleum Refinery Taiwan</i>	PT. Chevron Pacific Indonesia <i>Oil Company</i>

Dari Tabel 2.18 di atas secara umum metode yang digunakan oleh Shiaw-Wen [27] dengan penulis sama-sama berpedoman pada API 581 yaitu pedoman untuk menghitung analisis *Risk Based Inspection* (RBI). Untuk analisis perhitungan yang digunakan berbeda, Shiaw-Wen,dkk menggunakan kualitatif RBI karena menggunakan *software* RUP. Sedangkan penulis menggunakan kuantitatif RBI karena menggunakan program bantu/*template* perhitungan yang buat oleh penulis sendiri berpedoman pada API 581 RBI *Technology* yang didalamnya terdapat rumus-rumus perhitungan kuantitatif analisis resiko. Metode penelitian dan program bantu/*template* yang digunakan oleh penulis dijelaskan secara rinci di bab III (tiga).