



YAYASAN PERGURUAN CIKINI  
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

Jl. Moh. Kahfi II, Bhumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640  
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7866955, hp: 081291030024  
Email : [humas@istn.ac.id](mailto:humas@istn.ac.id) Website : [www.istn.ac.id](http://www.istn.ac.id)

Nomor : 10/02.2/Gmm/XII/2020  
Lamp. :  
Hal : Penunjukan Dosen Pembimbing

Kepada Yth,  
Prof. Dr. Ir. DN. Adnyana, APU  
Dosen Pembimbing Tesis  
Program Studi Magister Teknik Mesin  
Jakarta

Dengan hormat,

Bersama ini disampaikan nama mahasiswa yang mengambil tugas penelitian/tesis :

Nama Mahasiswa : *Amam Fachrur Rozie*  
No. Pokok : *19510004*  
Judul Penelitian/Tesis : *Studi Evaluasi Keselamatan Pada LPG Storage Tank Berdasarkan Analisa Tingkat Resiko Di Stasiun Pengisian Gas Menggunakan Metode Risk Based Inspection*

Mohon kesediaan Bapak untuk membimbing mahasiswa tersebut diatas.

Dosen Pembimbing berhak mengubah judul dan topik penelitian apabila dinilai tidak sesuai.

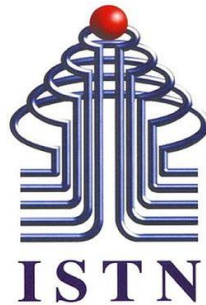
Demikian atas perhatian dan kerjasamanya disampaikan terima kasih.

Jakarta, Desember 2020  
Program Studi  
Magister Teknik Mesin-ISTN  
Kepala,



*[Signature]*  
Dr. Ir. Koswara, MSc

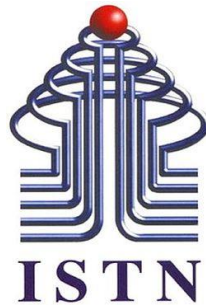
Tembusan Yth :  
1. Mahasiswa ybs  
2. Arsip



**STUDI EVALUASI KESELAMATAN PADA *LPG STORAGE*  
*TANK* BERDASARKAN ANALISA TINGKAT RISIKO DI  
STASIUN PENGISIAN GAS MENGGUNAKAN METODE *RISK*  
*BASED INSPECTION***

**AMAM FACHRUR ROZIE  
19510004**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS PASCA SARJANA  
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL  
JAKARTA  
AGUSTUS 2020**



**STUDI EVALUASI KESELAMATAN PADA *LPG STORAGE*  
*TANK* BERDASARKAN ANALISA TINGKAT RISIKO DI  
STASIUN PENGISIAN GAS MENGGUNAKAN METODE *RISK*  
*BASED INSPECTION***

**Diajukan sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Magister Teknik**

**AMAM FACHRUR ROZIE  
19510004**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS PASCA SARJANA  
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL  
JAKARTA  
AGUSTUS 2020**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tugas Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber naik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar**

**Nama : Amam Fachrur Rozie**

**NPM : 19510004**

**Tanggal : Sabtu, 21 Agustus 2021**

**Tertanda**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Amam Fachrur Rozie', written in a cursive style.

**Amam Fachrur Rozie**



## HALAMAN PERNYATAAN NON PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Amam Fachrur Rozie  
NPM : 19510004  
Mahasiswa : Pasca Sarjana Teknik Mesin  
Tahun Akademik : 2020 / 2021

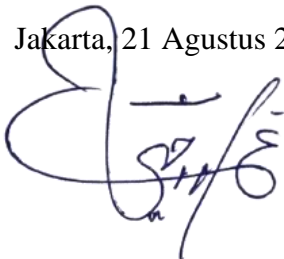
Menyatakan bahwa saya tidak melakukan kegiatan plagiat dalam penulisan Tugas Akhir yang berjudul :

### **STUDI EVALUASI KESELAMATAN PADA *LPG STORAGE TANK* BERDASARKAN ANALISA TINGKAT RISIKO DI STASIUN PENGISIAN GAS MENGGUNAKAN METODE *RISK BASED INSPECTION***

Apabila suatu saat nanti terbukti melakukan plagiat, maka saya akan menerima sanksi yang telah ditetapkan.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Jakarta, 21 Agustus 2021



Amam Fachrur Rozie

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :  
Nama : Amam Fachrur Rozie  
NPM : 19510004  
Program Studi : Pasca Sarjana Teknik Mesin

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik Mesin pada Program Studi Teknik Mesin – Teknik Manajemen Pemeliharaan Fakultas Pasca Sarjana, Institut Sains Dan Teknologi Nasional**

## DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. D. N. Adyana, APU (.....)

Penguji : Prof. Dr. Ir. Dipl.-Ing. Bambang Teguh P, DEA (.....)

Penguji : Dr. Ir. Tri Wibowo, M.Sc (.....)

Penguji : Dr. Ir. Koswara, M.Sc (.....)

Ditetapkan di : Jakarta

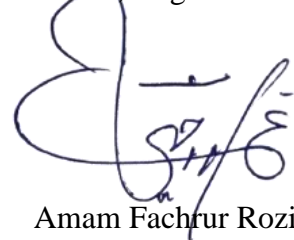
Tanggal : Sabtu, 21 Agustus 2021

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas berkat limpahan rahmat, Kesehatan dan kekuatannya lah sehingga Tesis ini dapat diselesaikan. Salam dan slawat semoga tercurahkan kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW sebagai Uswatun Hasanah dan Rahmatan Lil' alamin

Alhamdulillahirobbil'alamin Tesis yang berjudul "***STUDI EVALUASI KESELAMATAN PADA LPG STORAGE TANK BERDASARKAN ANALISA TINGKAT RISIKO DI STASIUN PENGISIAN GAS MENGGUNAKAN METODE RISK BASED INSPECTION***" ini dapat diselesaikan. Penulisan Tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Magister Teknik pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Pasca Sarjana Institut Sains dan Teknologi Nasional. Penulis menyadari bahwa masih sangat banyak kekurangan dalam penulisannya, oleh karena itu kritik dan saran sangat diharapkan agar didapatkan mutu yang lebih baik.

Jakarta, Agustus 2021



Amam Fachrur Rozie

## LEMBAR UCAPAN TERIMA KASIH

Syukur alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT atas berkat, rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan Tesis ini. Penulis mengucapkan rasa terima kasih yang setulus-tulusnya kepada :

- **Prof. Dr. Ir. D. N. Adnyana, APU.** Selaku pembimbing dalam penelitian.

Yang telah banyak memberikan nasihat dan bersedia meluangkan waktu untuk memberikan petunjuk, saran dan bimbingan demi kesempurnaan penyelesaian tesis ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada :

1. **Dr. Ir. Koswara, M.Sc.,** selaku Kepala Program Studi Teknik Mesin Fakultas Pasca Sarjana Institut Sains dan Teknologi Nasional yang telah berkenan memberi persetujuan dan menetapkan dosen pembimbing serta yang telah banyak memberikan arahan dan motivasi.
2. **Prof. Dr. Ir. Dipl.-ing Bambang Teguh Prasetyo, DEA.,** selaku dewan penguji yang telah banyak memberikan masukan kepada penulis
3. **Dr. Ir. Tri Wibowo, M.Sc.,** selaku dewan penguji yang telah banyak memberikan masukan kepada penulis.
4. Pak **Andri** yang telah membantu penulis dalam penyampaian informasi dan kelancaran administrasi.
5. Buna **Selly Rezeqi Qur'ani, S.Pd., Banafsha Mersiha Rozie, Batrisya Gazbiyya Rozie,** trio dalam keluarga Rozie yang selalu memberikan “inspirasi”
6. Bapak **Marisan & Ibu Endang Ruliyah,** tercinta yang selalu berdoa untuk kelancaran penulis dalam studi S2
7. Papa **Rusdi Karno & Mama Dida Watini Sumartini,** tercinta yang selalu berdoa untuk kelancaran penulis dalam studi S2

8. Dek' **Suci Romadhini, S.Kom, Arif Hidayatullah, S.T, Septiyanna Arri Maturrizqi, dan Ahnaf Hafiz Nurul Ilmi**, atas segala macam bentuk *support system* nya.
9. Teman-teman perkuliahan Zendi, Ria, Taufik, Wanda dan Richard tanpa terkecuali atas kerja samanya sehingga terbentuk keluarga didalamnya.

Bila ada kesalahan pada penyusunan tesis ini penulis mohon maaf yang sebesar-besarnya. Akhir kata, semoga penelitian ini bermanfaat.



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademika Institut Sains dan Teknologi Nasional, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Amam Fachrur Rozie  
NPM : 19510004  
Program Studi : Teknik Mesin – Teknik Manajemen Pemeliharaan  
Fakultas : Pasca Sarjana  
Jenis Karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Institut Sains dan Teknologi Nasional **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non- exclusive Royalty- Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

***“STUDI EVALUASI KESELAMATAN PADA LPG STORAGE TANK BERDASARKAN ANALISA TINGKAT RISIKO DI STASIUN PENGISIAN GAS MENGGUNAKAN METODE RISK BASED INSPECTION”***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Institut Sains dan Teknologi Nasional berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*) *soft copy* dan *hard copy*, merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Jakarta

Pada tanggal : Agustus 2021

Yang menyatakan

( Amam Fachrur Rozie)

## ABSTRAK

**Nama** : Amam Fachrur Rozie  
**Program Studi** : Teknik Mesin – Teknik Manajemen Pemeliharaan  
**Judul** : “Studi Evaluasi Keselamatan pada *LPG Storage Tank* Berdasarkan Analisa Risiko di Stasiun Pengisian Gas Menggunakan Metode *Risk Based Inspection*”

Analisa risiko merupakan hal yang sangat penting dalam dunia industri baik itu industri manufaktur, *power plant*, petrokimia, obat-obatan dan tidak terkecuali dengan industri minyak dan gas bumi karena hal tersebut berkaitan dengan keselamatan dan keamanan. Dalam penelitian ini suatu analisa risiko telah dilakukan pada suatu bejana tekan (*pressure vessel*) yang di fungsikan sebagai *LPG Storage Tank* berkapasitas 50 Ton dan telah di pergunakan selama 10 tahun, tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mendapatkan informasi terkini dari kondisi terbaru dari *LPG Storage Tank* tersebut yaitu berupa tingkat risiko, sisa umur, interval inspeksi, metode inspeksi yang tepat, serta mitigasi risiko yang diperlukan dari penggunaan *LPG Storage Tank* jika mengalami kegagalan. Analisa secara keseluruhan menggunakan metode *Risk Based Inspection (RBI)* yang mengacu pada metodologi RBI pada API RP 581. Dalam analisa RBI terdapat 2 variabel utama yang di jadikan pokok dalam proses analisa yaitu kemungkinan terjadinya kegagalan (*Probability of Failure - POF*) dan konsekuensi kegagalan (*consequences of failure – COF*) selain itu dalam penelitian ini menggunakan *visual inspection*, *NDT UT Measurement*, dan *review document*. Dari hasil analisa dan observasi maka dapat disimpulkan bahwa tingkat risiko dari *LPG Storage Tank* dalam *risk matrix* adalah *medium-high* karena terletak di kolom 1E pada matriks risiko dengan interval inspeksi adalah 5 tahun untuk *internal & external inspection* dan nilai laju korosi yang terjadi pada *LPG Storage Tank* adalah sebesar 0,057 mm/yr dengan sisa umur pakai dari *LPG Storage Tank* adalah sebesar 24 tahun.

Kata Kunci: Risiko, Keselamatan, *LPG Storage Tank*, *Risk Matrix*, *Risk Based Inspection*

## ABSTRACT

**Nama** : Amam Fachrur Rozie  
**Program Studi** : Teknik Mesin – Teknik Manajemen Pemeliharaan  
**Judul** : “Studi Evaluasi Keselamatan pada *LPG Storage Tank* Berdasarkan Analisa Risiko di Stasiun Pengisian Gas Menggunakan Metode *Risk Based Inspection*”

*Risk analysis is very important in the industrial world, be it the manufacturing industry, power plants, petrochemicals, medicines and the oil and gas industry is no exception because it is related to safety and security. In this study, a risk analysis has been carried out on a pressure vessel that functions as an LPG Storage Tank with a capacity of 50 tons and has been in use for 10 years, the purpose of this study is to obtain the latest information on the latest conditions of the LPG Storage Tank. These are in the form of risk levels, remaining life, inspection intervals, appropriate inspection methods, as well as risk mitigation required from the use of LPG Storage Tanks if they fail. The overall analysis uses the Risk Based Inspection (RBI) method which refers to the RBI methodology in API RP 581. In the RBI analysis, there are 2 main variables that are used as the basis for the analysis process, namely the probability of failure (POF) and the consequences of failure. (consequences of failure – COF) other than that in this study using visual inspection, NDT UT Measurement, and document review. From the results of the analysis and observation, it can be concluded that the level of risk of the LPG Storage Tank in the risk matrix is medium-high because it is located in column 1E of the risk matrix with an inspection interval of 5 years for internal & external inspection and the value of the corrosion rate that occurs in LPG Storage. The tank is 0.057 mm/yr with the remaining life of the LPG Storage Tank is 24 years.*

**Keyword** : Risk, Safety, LPG Storage Tank, Risk Matrix, Risk Based Inspection

## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN NON PLAGIAT .....	iv
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
LEMBAR UCAPAN TERIMA KASIH .....	vii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	ix
ABSTRAK .....	x
ABSTRACT.....	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xvi
DAFTAR TABEL.....	1
BAB I.....	3
PENDAHULUAN.....	3
1.1    Latar Belakang.....	3
1.2    Rumusan Masalah .....	5
1.3    Tujuan Penelitian.....	5
1.4    Batasan Masalah Penelitian.....	6
1.5    Manfaat Penelitian.....	6
1.6    Sistematika Penulisan.....	6
BAB II.....	8
STUDI LITERATUR.....	8
2.2    Inspeksi.....	10
2.3    Risiko.....	11
2.4    Time Based Inspection (TBI) .....	12
2.5    Risk Based Inspection (RBI).....	12
2.6    Jenis Jenis Metode RBI .....	14
2.6.2 <i>Risk Based Inspection</i> – Pendekatan Kuantitatif.....	15
2.6.3 <i>Risk Based Inspection</i> – Pendekatan Semi-Kuantitatif .....	17

2.7	Manajemen Risiko.....	17
2.8	Kemungkinan Kegagalan / Probability of Failure (PoF).....	19
2.8.1	<i>Generic Failure Frequency (gff)</i> .....	20
2.8.2	Damage Factor .....	22
2.8.3	Kalkulasi <i>Thinning Damage Factor</i> .....	27
2.8.4	Faktor Sistem Manajemen.....	34
2.9	Konsekuensi Kegagalan / <i>Consequences of Failure</i> .....	35
2.9.1	Fluida Representatif dan Sifatnya .....	38
2.9.2	Pemilihan Ukuran Lubang Kebocoran.....	41
2.9.3	Kalkulasi Laju Kebocoran.....	42
2.9.4	Kalkulasi Kebocoran Fluid Inventory Available .....	44
2.9.5	Kalkulasi Tipe Kebocoran.....	45
2.9.6	Estimasi Dampak Sistem Deteksi dan Isolasi .....	46
2.9.7	Menentukan Laju dan Massa Kebocoran Untuk Konsekuensi .....	49
2.9.8	Menentukan Konsekuensi Keterbakaran dan Ledakan .....	50
2.9.9	Konsekuensi Racun.....	55
2.9.10	Konsekuensi Tidak Mudah Terbakar dan Tidak Beracun .....	56
2.9.11	Konsekuensi Kerusakan Area Komponen dan Cedera Personel .....	57
2.10	Penentuan <i>Risk Ranking</i> .....	57
2.11	Penentuan Interval Inspeksi.....	58
2.12	Metode Inspeksi.....	60
2.11	Penelitian Sebelumnya.....	60
BAB III.....		64
METODOLOGI PENELITIAN.....		64
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	64
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian .....	65
3.3	<i>Time Schedule</i> Penelitian.....	65
3.4	Kerangka Penelitian.....	66
3.4.1	Identifikasi Masalah & Risiko .....	66
3.4.2	Studi Literatur .....	66
3.4.3	Observasi (Pengumpulan Data & Informasi).....	66
3.4.4	Kalkulasi <i>Probability of Failure (PoF)</i> dan Kalkulasi <i>Consequence of Failure (CoF)</i> .....	66
3.4.5	Kalkulasi Total Risiko.....	68



3.4.6	Penentuan <i>Risk Ranking</i> .....	68
3.4.7	Penentuan Jadwal dan Metode Inspeksi.....	68
3.4.8	Mitigasi .....	68
3.4.9	Kesimpulan .....	68
BAB IV	.....	69
ANALISA DAN PEMBAHASAN	.....	69
4.1	Observasi & Inspeksi.....	69
4.2	Inspeksi Berbasis Risiko.....	72
4.3	Analisa Kemungkinan Kegagalan ( <i>Probability of Failure – PoF</i> ) .....	73
4.3.1	Kalkulasi Frekuensi Kegagalan Umum ( <i>Generic Failure Frequency</i> ) 73	
4.3.2	Kalkulasi Faktor Kerusakan ( <i>Damage Factor - Df</i> ) .....	73
4.3.3	Kalkulasi Faktor Sistem Manajemen ( <i>Management System Factor - FMS</i> ).....	79
4.4	Analisa Konsekuensi Kegagalan ( <i>Consequence of Failure – CoF</i> ).....	80
4.4.1	Penentuan Fluida Representatif.....	81
4.4.2	Penentuan <i>Release Hole Size</i> .....	81
4.4.3	Penentuan Laju Kebocoran .....	82
4.4.4	Kalkulasi Laju Kebocoran Massa Tersedia ( <i>Available Mass for Release</i> ).....	85
4.4.5	Penentuan Tipe Kebocoran.....	86
4.4.6	Perkiraan Dampak Kebocoran.....	87
4.4.7	Kalkulasi Laju Massa Kebocoran .....	88
4.4.8	Menentukan Konsekuensi Kebakaran dan Ledakan.....	88
4.4.9	Menjustifikasi Konsekuensi Keracunan .....	96
4.4.10	Menjustifikasi Konsekuensi Tidak Mudah Terbakar dan Tidak Beracun.....	96
4.4.11	Menentukan Nilai Akhir Konsekuensi .....	96
4.4	Tingkat Risiko .....	97
4.5	Menentukan Jadwal Inspeksi.....	98
4.6	Menentukan Metode Inspeksi.....	99
BAB V	.....	101
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	101
5.1	Kesimpulan.....	101
5.2	Saran .....	101

BAB VI .....	103
REFERENSI PENELITIAN .....	103

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Pemetaan Operasi Minyak dan Gas .....	8
Gambar 2. 2 P&ID Stasiun Pengisian Gas Elpiji.....	9
Gambar 2. 3 LPG Storage Tank .....	10
Gambar 2. 4 Kontinum Proses dari RBI.....	15
Gambar 2. 5 Diagram Alir Damage Factor - API RBI 581 .....	33
Gambar 2. 6 Diagram Proses Kalkulasi PoF .....	35
Gambar 2. 7 Proses Menentukan Tipe Kebocoran .....	46
Gambar 2. 8 Risk Matrix.....	58
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	64
Gambar 3. 2 Alur Kerja RBI .....	65
Gambar 3. 3 Time Schedule Penelitian .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Gambar 4. 1 Sketsa LPG Storage Tank 50 T.....	71
Gambar 4. 2 Matrik Risiko dari Hasil Kalkulasi LPG Storage Tank.....	98

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Rekomendasi Nilai Frekuensi Kegagalan Utama .....	21
Tabel 2. 2 Klasifikasi Damage Factor (API 581) .....	23
Tabel 2. 3 Kategori Tingkat Efektifitas Inspeksi (API 581) .....	27
Tabel 2. 4 Pedoman Penilaian Efektifitas Inspeksi - General Thinning .....	28
Tabel 2. 5 Thinning Damage Factor.....	30
Tabel 2. 6 Nilai Faktor Konversi untuk Consequence of Failure.....	36
Tabel 2. 7 Daftar Fluida Representative untuk Level 1 CoF .....	38
Tabel 2. 8 Tabel sifat fluida representatif yang digunakan untuk level 1 CoF.....	40
Tabel 2. 9 Pedoman Level 1 untuk menentukan Fasa Fluida .....	41
Tabel 2. 10 Release Hole Size (API RBI) .....	42
Tabel 2. 11 Penilaian Sistem Deteksi dan Isolasi .....	47
Tabel 2. 12 Pengaturan Kebocoran berdasarkan sistem deteksi dan Isolasi .....	48
Tabel 2. 13 Durasi Kebocoran berdasarkan pada Sistem Deteksi dan Isolasi.....	49
Tabel 2. 14 Pengaturan untuk Konsekuensi Keterbakaran dan Mitigasi .....	51
Tabel 2. 15 Konsekuensi Keterbakaran .....	52
Tabel 2. 16 Kategori Kemungkinan Kegagalan dan Konsekuensi Kegagalan.....	58
Tabel 3. 1 Time Schedule Penelitian.....	65
Tabel 4. 1 Data Teknis .....	69
Tabel 4. 2 Data komposisi kimia dan mekanikal properti .....	70
Tabel 4. 3 Data Ketebalan Pemeriksaan Aktual .....	72
Tabel 4. 4 Hasil Nilai GFF Total untuk LPG Storage Tank .....	73
Tabel 4. 5 Hasil Kalkulasi Laju Korosi.....	76
Tabel 4. 6 Hasil Kalkulasi Ketebalan yang disyaratkan (treq).....	77
Tabel 4. 7 Hasil Kalkulasi Faktor Kerusakan (Art) .....	78
Tabel 4. 8 Nilai Damage Factor for Thinning .....	78
Tabel 4. 9 Nilai Probability of Failure.....	80
Tabel 4. 10 Properties Fluida LPG berdasarkan kategori fluida C3-C4 .....	81
Tabel 4. 11 Tabel Kalkulasi Laju Lubang Kebocoran.....	82

Tabel 4. 12 Luas Area Lubang Kebocoran .....	83
Tabel 4. 13 Nilai Laju Kebocoran tiap Ukuran Lubang .....	85
Tabel 4. 14 Massa Fluida tiap Ukuran Lubang.....	86
Tabel 4. 15 Tipe Kebocoran tiap Lubang Kebocoran.....	87
Tabel 4. 16 Pengaruh sistem deteksi dan isolasi terhadap kebocoran.....	87
Tabel 4. 17 Nilai Laju, Durasi dan Massa Kebocoran tiap Lubang Kebocoran .....	88
Tabel 4. 18 Nilai Laju, Durasi dan Massa Kebocoran tiap Lubang Kebocoran.....	89
Tabel 4. 19 Hasil Kalkulasi Area Kerusakan Komponen AINL-CONT.....	90
Tabel 4. 20 Hasil Kalkulasi Area Kerusakan Komponen AIL-CONT.....	91
Tabel 4. 21 Hasil Kalkulasi Area Kerusakan Komponen AINL-INST.....	91
Tabel 4. 22 Hasil Kalkulasi Area Kerusakan Komponen AIL-INST.....	91
Tabel 4. 23 Hasil Kalkulasi Nilai Area Cedera Personil AINL-CONT .....	92
Tabel 4. 24 Hasil Kalkulasi Nilai Area Cedera Personil AIL-CONT .....	92
Tabel 4. 25 Hasil Kalkulasi Nilai Area Cedera Personil AINL-INST .....	93
Tabel 4. 26 Hasil Kalkulasi Nilai Area Cedera Personil AIL-INST .....	93
Tabel 4. 27 Nilai Blending factor .....	94
Tabel 4. 28 Hasil Kalkulasi Nilai Continuous / Instataneous Blended Consequences Area .....	95
Tabel 4. 29 Hasil Kalkulai Nilai Flammable Consequence Area .....	95
Tabel 4. 30 Hasil Kalkulasi Nilai Consequence Area for Component Damage and Personal Injury .....	96
Tabel 4. 31 Hasil Analisa Konsekuensi Keracunan.....	96



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Salah satu alat penunjang dalam eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi ialah *Pressure Vessel*. *Pressure Vessel* atau bejana tekan didefinisikan sebagai wadah/bejana yang didesain untuk dapat menahan tekanan baik internal maupun eksternal. (1) Berdasarkan bentuknya, servis serta konstruksinya terdapat banyak sekali jenis dari *pressure vessel* atau bejana tekan. *Pressure vessel* merupakan sebuah peralatan yang memiliki temperatur dan tekanan yang berbeda dengan kondisi dilingkungannya, hal ini dilakukan untuk menyesuaikan dengan fluida yang ditampung. Berdasarkan dari persyaratan hukum, semua peralatan yang menggunakan tekanan harus dilakukan inspeksi sesuai dengan *inspection code* masing-masing. Inspeksi ini berfungsi untuk meyakinkan dan menjaga kelayakan dari alat tersebut sehingga dapat melanjutkan prosesnya. (2)

Menjalankan atau mengoperasikan sesuatu unit proses atau peralatan dapat menimbulkan bahaya bagi pekerja, sarana maupun lingkungan. Karena itu diperlukan petunjuk operasi aman (*safe work practice*) untuk menjalankan unit operasi atau suatu sistem dan peralatan. (3) Sehingga perlu dilakukan upaya perencanaan metode pemeliharaan berbasis risiko agar keamanan, keselamatan serta keberlangsungan aset, lingkungan dan sistem operasi dapat terjaga dengan baik dan terhindar dari bahaya dan risiko yang tidak diharapkan.

Inspeksi adalah pemeriksaan berkala dengan seksama secara langsung tentang pelaksanaan peraturan, tugas, dan sebagainya. Inspeksi merupakan hal yang sangat penting dalam industri apapun apalagi khususnya dalam bidang eksplorasi minyak mentah dan gas alam. (4)

*Risk Based Inspection (RBI)* adalah suatu metode yang menggunakan tingkat risiko sebagai dasar dalam memprioritaskan dan mengatur suatu aktifitas inspeksi. Keuntungan potensial dari metode RBI ini adalah dapat meningkatkan

waktu operasi dan kerja dari suatu fasilitas proses dimana pada saat yang bersamaan terjadi peningkatan atau setidaknya perawatan pada level risiko yang sama. (5) Pendekatan berbasis risiko biasanya dijelaskan oleh matriks risiko, menggunakan definisi risiko sederhana (produk probabilitas dan konsekuensi). (6)

Penelitian-penelitian sebelumnya tentang *Risk Based Inspection* yang di aplikasikan pada setiap peralatan atau unit pada sistem pengolahan minyak dan gas bumi sudah banyak dipergunakan dan dilakukan penelitian, tetapi belum pernah dilakukan proses analisa berbasis risiko pada *LPG Storage Tank* yang mana tingkat urgensi dari peralatan ini sangatlah tinggi karena fluida kerja yang di distribusikan dan di operasikan adalah LPG yang notabene merupakan fluida yang mudah terbakar (*flammable*).

*LPG Storage Tank* merupakan suatu unit peralatan yang termasuk dalam kategori bejana tekan atau *pressure vessel* . Hal tersebut dikarenakan acuan desain yang dipergunakan untuk konstruksi *LPG Storage Tank* adalah ASME VII Div. 1. (6) *LPG Storage Tank* merupakan unit peralatan yang hampir dipergunakan di seluruh stasiun pengisian bulk elpiji atau SPBE karena berfungsi sebagai tempat penyimpanan sementara fluida LPG dari *LPG Transport tank* yang akan di transfer ke dalam tabung LPG 3 Kg atau 12 Kg. Di satu sisi penggunaan *LPG Storage Tank* menjadi sangat krusial dikarenakan menjadi salah satu unit wajib dalam instalasi pengisian tabung LPG yang dipergunakan di seluruh SPBE seluruh indonesia, di DKI Jakarta terdapat 33 stasiun pengisian bulk elpiji (SPBE) sehingga jika di asumsikan dengan jumlah yang sama lalu di kalikan dengan jumlah provinsi yang ada di indonesia maka jumlah *LPG Storage Tank* berjumlah ratusan sementara itu sangat perlu peninjauan keselamatan dan keamanan operasional pada *LPG Storage Tank* agar tetap aman, layak dan baik untuk beroperasi. Maka dari itu penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisa berbasis risiko terhadap unit *LPG Storage Tank* menggunakan metode *Risk Based Inspection* yang mengacu pada *standard code* API RP 581 sehingga diharapkan penelitian ini dapat bermanfaat sebagai acuan pemeliharaan berbasis risiko untuk dipergunakan para *owner/user* SPBE

yang menggunakan *LPG Storage Tank* sebagai salah satu unit system distribusi LPG.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Pada peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) no.18 tahun 2018 tentang masa berlaku sertifikat Persetujuan Layak Operasi (PLO) serta keputusan Asosiasi Perusahaan Jasa Inspeksi Teknis Indonesia (APITINDO) no. 1 tahun 2020 tentang masa berlaku Sertifikat Inspeksi (COI) maka dapat dikatakan jika metode inspeksi yang masih dipergunakan atas dasar *Time-Based Inspection* maka dari itu berdasarkan uraian diatas maka permasalahan pokok yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah :

- 1.2.1 Kategori tingkat risiko serta matriks risiko untuk *LPG Storage Tank*
- 1.2.2 Frekuensi tingkat inspeksi berdasarkan analisa RBI pada *LPG Storage Tank*
- 1.2.3 Metode inspeksi serta rentang waktu inspeksi yang tepat untuk *LPG Storage Tank*
- 1.2.4 Perbandingan metode *Risk Based Inspection* dengan *Time-Based Inspection*

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini dilakukan adalah :

- 1.3.1 Mengetahui tingkat risiko, matriks risiko dan membuat matrik risiko dari *LPG Storage Tank* agar dapat menjadi bahan rekomendasi pemeliharaan.
- 1.3.2 Mendesain metode inspeksi pada *LPG Storage Tank* serta membuat program penjadwalan inspeksi pada *LPG Storage Tank*
- 1.3.3 Mengetahui metode yang tepat untuk menanggulangi kegagalan yang kemungkinan terjadi.
- 1.3.4 Mengetahui keunggulan metode *Risk Based Inspection* dibandingkan dengan metode inspeksi konvensional

#### **1.4 Batasan Masalah Penelitian**

Pada penelitian ini ruang lingkup penelitian dibatasi pada aspek berikut ini :

- 1.4.1 Temperatur dan tekanan kerja dianggap konstan
- 1.4.2 Tidak memperhitungkan biaya mitigasi
- 1.4.3 Fasa fluida dalam alat dianggap gas/vapour
- 1.4.4 Satuan yang digunakan adalah *US customary units*

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Hasil dari penelitian ini diharapkan :

- 1.5.1 Memberikan pemahaman mengenai analisa risiko menggunakan API RBI 581 pada unit *LPG Storage Tank*.
- 1.5.2 Memberikan informasi tentang tingkat risiko serta informasi lainnya terkait dampak risiko pada *LPG Storage Tank* sehingga dapat mengurangi potensi risiko yang akan terjadi.
- 1.5.3 Memberikan informasi terkait penjadwalan inspeksi pada *LPG Storage Tank* dengan berbasis pada risiko
- 1.5.4 Menjadi acuan informatif tentang analisa risiko pada *LPG Storage Tank* di seluruh Indonesia.

#### **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika tugas akhir ini akan terbagi dalam lima bab, yaitu :

##### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Pada bab ini berisi tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah dalam penelitian, batasan-batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan laporan hasil penelitian.

##### **BAB II STUDI LITERATUR**

Pada bab ini berisi tentang teori-teori dari literatur penunjang yang berhubungan dengan pemecahan permasalahan dalam penelitian ini.

##### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini menjelaskan mengenai tempat penelitian, spesifikasi alat penunjang penelitian, spesifikasi peralatan serta tahapan-tahapan penyelesaian permasalahan penelitian yang dilakukan yang akan digambarkan dengan diagram alir penelitian.

#### **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.**

Pada bab ini berisi mengenai pembahasan, studi lapangan, serta hasil penelitian dari data yang diperoleh sesuai dengan permasalahan yang ditetapkan pada penelitian.

#### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.**

Pada bab ini memberikan pemaparan mengenai hasil dari penelitian serta saran yang bisa dijadikan rekomendasi proses inspeksi selanjutnya berdasarkan hasil dari penelitian yang menjawab permasalahan penelitian.

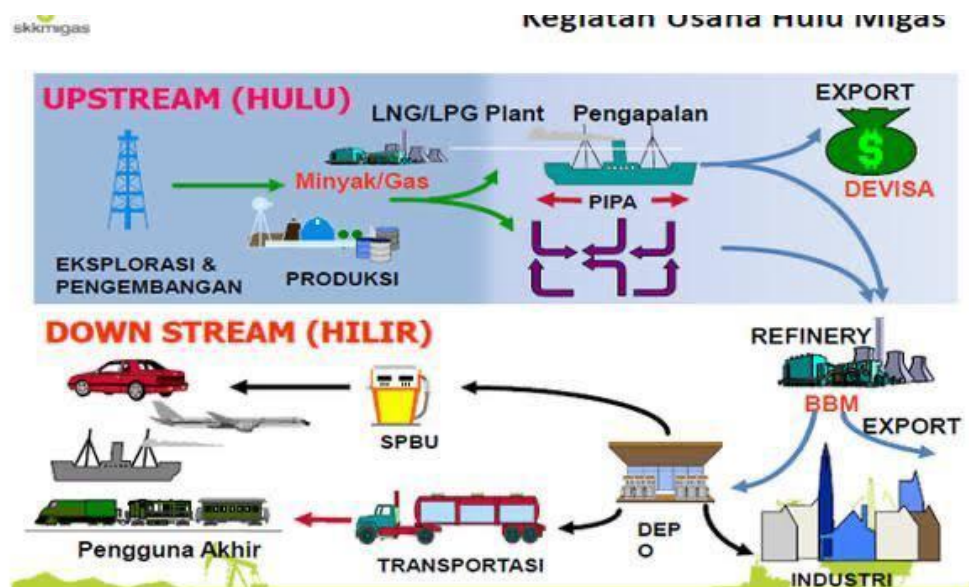
## BAB II

# STUDI LITERATUR

### 2.1 *LPG Storage Tank*

Suatu *pressure vessel* atau bejana tekan yang di pergunakan dalam industri minyak dan gas bumi baik itu dalam indsutri hulu atau pun industri hilir akan selalu memiliki bejana tekan atau *pressure vessel* sebagai penunjang kegiatan operasional minyak dan gas bumi walaupun terdapat unit equipment lain seperti pipa proses, pipa penyalur, katup pengaman, tangki timbun, *heat exchanger* ataupun peralatan putar seperti pompa dan kompresor tetapi tidak dapat dipungkiri bahwa akan selalu ada risiko dan bahaya dari proses yang di lakukan pada bejana tekan tersebut. Di bawah ini merupakan pemetaan jenis usaha minyak dan gas bumi pada umum nya :

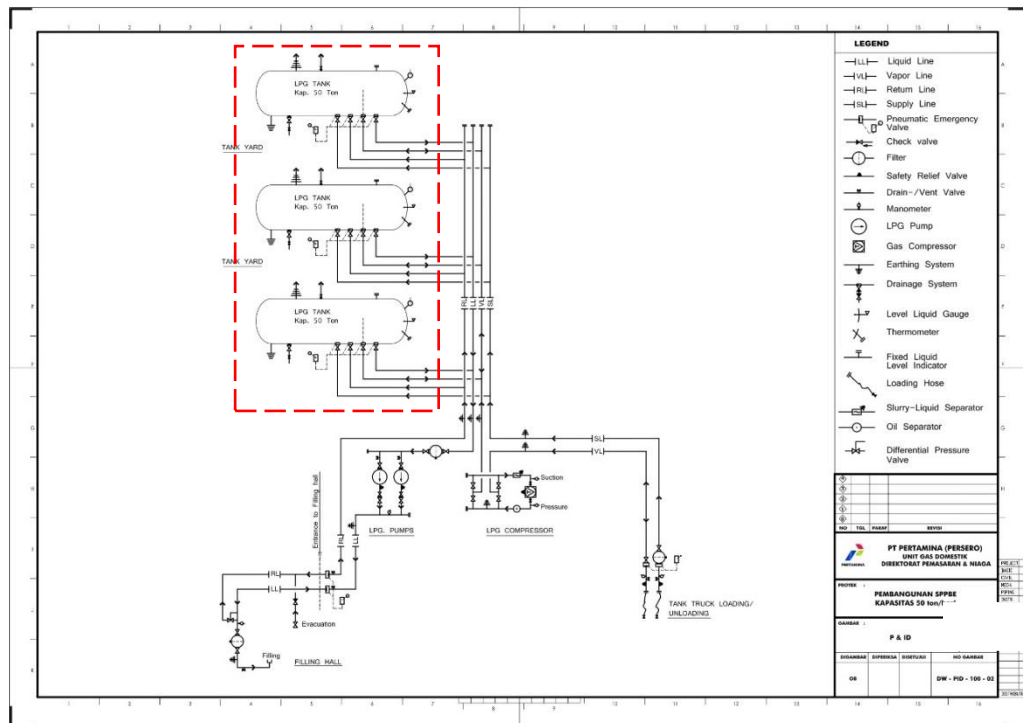
### Proses Kegiatan Usaha Minyak dan Gas Bumi



Gambar 2. 1 Proses Pemetaan Operasi Minyak dan Gas

Dalam penelitian tesis ini objek penelitian unit terdapat pada industri hilir migas yang lebih tepatnya terdapat pada Stasiun Pengisian Bulk Elpiji (SPBE) yang berfungsi sebagai tempat penimbunan dan penyimpanan sementara LPG yang akan

di distribusikan ke dalam tabung LPG 3 Kg atau tabung LPG 12 Kg yang sebelumnya di angkut dari depot Terminal Bahan Bakar Minyak dan Gas (TBBMG) menggunakan *LPG Transport Tank* walaupun ada beberapa kasus yang melakukan mobilisasi menggunakan pipa penyalur. Gambar dibawah ini merupakan sistem perpipaan standar yang digunakan dalam stasiun pengisian bulk elpiji dalam di bawah ini :



Gambar 2. 2 P&ID Stasiun Pengisian Gas Elpiji

Sementara dalam kasus ini objek penelitian hanya di fokuskan pada *LPG Storage* tank nya saja dengan total kapasitas sebesar 50 Ton. Walaupun pada dasarnya masih banyak terdapat peralatan peralatan penunjang dalam proses *filling bulk* elpiji ini seperti *LPG Pump*, *LPG Compressor*, *Pressure Safety Valve (PSV)*, *process piping* dsb, tetapi yang menjadi fokus dalam penelitian ini hanya terletak pada *LPG Storage Tank*.

Berikut ini merupakan dokumentasi dari *LPG Storage Tank* pada saat dilakukan observasi dan visual check :



Gambar 2. 3 LPG Storage Tank

## 2.2 Inspeksi

Inspeksi adalah aktifitas yang dilakukan untuk verifikasi apakah material, fabrikasi, pemasangan, pemeriksaan, pengujian atau perbaikan telah sesuai dengan kebutuhan dari kode aplikasi, keteknikan, atau prosedur tertulis dari pemiliknya<sup>(8)</sup>. Proses inspeksi merupakan salah satu tahapan dari proses pemeliharaan (*maintenance*) yang bertujuan untuk menjaga efektifitas dan efisiensi produksi yang disesuaikan dengan kebutuhan di perusahaan tersebut. Dalam dunia *engineering* kegiatan inspeksi termasuk dalam tahapan fundamental yang bersifat *mandatory* karena terkait dengan keselamatan serta kelayakan dalam penggunaan peralatan dalam dunia *oil & gas*. Peran inspeksi adalah untuk memeriksa/konfirmasi apakah terjadi degradasi, untuk mengukur laju degradasi dan untuk membantu memastikan integritas aset dapat dipertahankan. Hal ini memberikan jaminan bahwa integritas aset dipertahankan sesuai dengan peruntukannya.

Beberapa poin penting untuk dicatat tentang inspeksi adalah :

- Kegiatan inspeksi memberikan informasi yang spesifik, relevan, akurat dan tepat waktu kepada manajemen tentang kondisi aset.



- Ancaman terhadap integritas aset diidentifikasi cukup awal sehingga aset dapat diperbaiki dengan biaya efektif tanpa dampak yang berartipada integrotas atau keselamatan aset.
- Register aset dipelihara berdasarkan kondisi aset dan sejarah inspeksi mereka.
- Kegiatan pemeriksaan dijadwalkan untuk memberikan keadaan yang aman mengenai kondisi pabrik dan peralatan serta meminimalkan dampak merugikan pada kegiatan produksi.
- Peralatan diserahkan dari operasi ke personel inspeksi sebelum aktifitas inspeksi dimulai dan dari inspeksi ke personel operasi mengikuti prosedur yang ada untuk meyakinkan informasi yang akurat pada kondisi peralatan

### 2.3 Risiko

Risiko adalah kombinasi dari kemungkinan suatu peristiwa terjadi selama periode waktu tertentu dan konsekuensi (umumnya negatif) yang berkaitan dengan kejadiannya <sup>(8)</sup>. Dalam penelitian ini proses mengedepankan dan meninjau keselamatan berbasis risiko merupakan hal yang paling banyak dibahas karena proses inspeksi sampai saat ini umumnya bersifat *time based inspection (TBI)*. Hal tersebut dikarenakan peraturan yang berlaku sampai saat ini di Indonesia masih mengacu pada *time based inspection (TBI)* dan penggunaan *Risk Based Inspection (RBI)* masih sangat jarang dilakukan terutama pada industri migas di segmen hilir.

Setiap keputusan yang diambil baik dari aspek pekerjaan atau pun aspek kehidupan sehari-hari akan selalu berkaitan dengan risiko. Keputusan sederhana sekalipun akan ada ancaman risiko di baliknya yang bisa mengancam kelancaran, kesuksesan atau bahkan keselamatan individu sebagai contoh keputusan mengendarai mobil akan selalu ada risiko kecelakaan, mendaki gunung akan ada risiko hipotermia atau bahkan tersesat, menyelami laut yang berisiko tenggelam atau bahkan kram tetapi hal-hal tersebut dapat diatasi jika kita dapat menganalisa tingkat risiko dan melakukan persiapan untuk mereduksi risiko tersebut bahkan meminimalkannya sampai di bawah tingkat toleransi yang diperbolehkan walaupun pada dasarnya tidak dapat untuk menghilangkan aspek risiko tersebut karena ada aspek eksternal yang tidak dapat diprediksi.

Maka dari itu menggunakan metode *risk based inspection* dalam rangka meminimalisir kecelakaan akan sangat memberikan efek yang besar dari segala aspek, terutama aspek biaya dan tingkat keselamatan.

#### **2.4 Time Based Inspection (TBI)**

*Time Based Inspection (TBI)* atau inspeksi berbasis waktu merupakan metode inspeksi yang saat ini dipergunakan di seluruh Indonesia khususnya untuk unit peralatan yang beroperasi di industri minyak dan gas bumi. Inspeksi berbasis waktu adalah inspeksi yang dilakukan dalam rentang waktu tertentu dan disesuaikan dengan ketentuan waktu yang telah di regulasi, dalam kasus ini aturan inspeksi berbasis waktu yang ditetapkan berdasarkan keputusan Permen 18 tahun 2018 yang mensyaratkan setiap instalasi dilakukan proses inspeksi dalam rentang waktu 4 tahun sekali dan untuk peralatan yang di pergunakan dalam instalasi tersebut juga dilakukan proses inspeksi setiap 3 tahun sekali, hal ini berdasarkan pada keputusan Asosiasi Perusahaan Inspeksi Indonesia (APITINDO) no 1 tahun 2020.

Peralatan yang diatur dalam peraturan permen 18 tahun 2018 dan Apitindo no 1 tahun 2020 adalah bejana tekan (*pressure vessel*), pesawat angkat (*crane*), peralatan listrik (*power generator, motor control, transformer, switchgear*) peralatan putar (*pompa & kompressor*), pipa penyalur (*pipeline*) dan Tangki timbun (*storage tank*) dan katup pengaman (*pressure safety valve, relief valve, thermal relief valve, pilot operated safety valve dll*).

Kerugian dari proses inspeksi ini adalah proses inspeksi dilakukan berdasarkan waktu sehingga banyak unit peralatan tetap dilakukan proses inspeksi walaupun masih jauh berada dalam limit risikonya sehingga mengakibatkan *cost maintenance* yang cukup tinggi sehingga proses inspeksi berbasis risiko merupakan proses inspeksi yang paling dianjurkan dalam industri minyak dan gas karena dapat mengurangi *production & maintenance cost*.

#### **2.5 Risk Based Inspection (RBI)**

*Risk Based Inspection (RBI)* adalah suatu proses penilaian dan manajemen risiko yang fokus pada hilangnya penahanan dari peralatan bertekanan pada fasilitas pengolahan dikarenakan kerusakan material<sup>(8)</sup>. Metode ini menggunakan aspek pertimbangan risiko sebagai dasar dan acuan dalam melakukan sebuah inspeksi

serta menentukan skala prioritas dan mengatur usaha usaha dalam program inspeksi yang direncanakan. Sehingga dengan metode *risk based inspection* proses inspeksi dapat di optimalkan.

Penelitian ini akan berfokus pada *LPG Storage Tank* dengan menggunakan metode *risk based inspection* berdasarkan kemungkinan kemungkinan risiko yang akan terjadi dengan mengacu segala macam tahapan tahapan serta instruksi yang tercantum dalam standar yaitu *American Petroleum Institute (API) Recommended Practice RBI 580* dan *API Base Resource Document 581*. Berdasarkan sumber *API Risk Based Inspection 581* tujuan dari metode ini ialah :

- Melindungi peralatan dengan mengidentifikasi area yang memiliki tingkat risiko tinggi.
- Menentukan nilai risiko pada setiap peralatan berdasarkan metodologi yang konsisten.
- Adanya skala prioritas berdasarkan nilai risiko yang terukur.
- Mendesain rencana inspeksi yang sesuai berdasarkan hasil analisa risiko.
- Secara sistematis mengatur dan merancang risiko pada alat yang akan mengalami kegagalan.

Sebelumnya, fokus dari pengujian risiko hanya memperhatikan masalah keamanan di dalam pabrik. Sekarang dengan tingkat kesadaran yang telah meningkat, sebuah analisis risiko harus memperhatikan beberapa hal berikut :

- Risiko di dalam pabrik terhadap pegawai.
- Risiko di luar pabrik terhadap pegawai.
- Risiko interupsi bisnis.
- Risiko kerusakan lingkungan

Untuk mengatasi permasalahan dan risiko di atas maka proses inspeksi dilakukan untuk mereduksi tingkat risiko yang tinggi, hal tersebut dilakukan sebagai salah satu tindakan dari *korektif maintenance* dan *preventif maintenance* yang akan dilakukan. Walaupun berbagai macam cara dan metodologi dilakukan untuk mereduksi dan mencegah terjadinya kecelakaan, tetapi pada dasarnya hal tersebut tidak dapat menghilangkan risiko sepenuhnya. Dalam literatur yang bersumber dari ASME PCC 3-2007 di dalam suatu industri petrokimia atau minyak dan gas bumi,

hanya setengah dari penyebab hilangnya penahanan (*loss of containment*) yang dapat mempengaruhi kegiatan inspeksi (41% dari kegagalan mekanik serta beberapa persen dari kegagalan yang tidak diketahui). Hal ini dapat disebabkan adanya beberapa faktor yang tidak dapat di inspeksi dan di kalkulasi seperti :

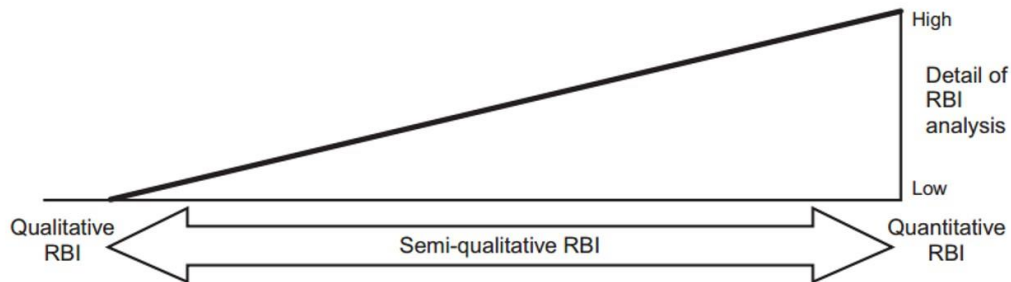
- Kesalahan manusia (*human error*)
- Bencana alam (*natural disaster*)
- Kejadian eksternal (*eksternal accident*)
- Efek sekunder dari peralatan lain (*Secondary effect*)
- Tindakan yang disengaja
- Metode inspeksi yang asal-asalan.
- Kesalahan desain (*failure desain*)
- Mekanisme kegagalan yang tidak diketahui sebelumnya.

Terdapat 2 dokumen yang sampai saat ini umum dipergunakan untuk menjelaskan secara rinci dan digunakan untuk *risk based inspection methodology*. Dokumen tersebut diterbitkan langsung oleh *American Petroleum Institute (API)* yang berjudul *API Recommended Practice 580 – Risk Based Inspection (API RP RBI 580)* dan *API Recommended Practice 581 – Risk Based Inspection Technology (API RB 581)*. Dalam kedua dokumen tersebut terdapat perbedaan mendasar yang berbasis pada tujuan dokumen tersebut dibuat, dimana API RP 580 adalah dokumen yang berisi prinsip dan garis pedoman umum mengenai RBI sehingga bisa dijadikan acuan untuk menjadi auditor RBI, sedangkan API RP 581 adalah dokumen yang menyediakan kalkulasi kuantitatif RBI untuk menentukan suatu rencana inspeksi.

## **2.6 Jenis Jenis Metode RBI**

Dalam API RBI 580 terdapat penjelasan mengenai macam macam jenis metode RBI yang digunakan dalam proses *risk assesment* yaitu secara kualitatif, semi-kuantitatif dan secara kuantitatif. Spektrum analisis risiko harus dianggap sebagai kontinum dengan pendekatan kualitatif dan kuantitatif menjadi dua ekstrem

dari kontinum dan segala sesuatu di antara menjadi pendekatan semi-kuantitatif seperti ditunjukkan pada gambar 2.4



Gambar 2. 4 Kontinum Proses dari RBI

### 2.6.1 Risk Based Inspection – Pendekatan Kualitatif

Pendekatan ini membutuhkan input data berdasarkan informasi deskriptif menggunakan penilaian teknik dan pengalaman sebagai dasar untuk analisis probabilitas dan COF. Masukan sering diberikan dalam rentang data, bukan dalam nilai diskrit. Hasil biasanya diberikan dalam istilah kualitatif seperti tinggi, sedang, dan rendah, meskipun nilai numerik juga bisa terkait dengan kategori ini. Nilai dari jenis analisis ini adalah memungkinkan penyelesaian penilaian risiko dengan tidak adanya data kuantitatif yang rinci. Keakuratan hasil dari analisis kualitatif bergantung pada latar belakang dan keahlian analis risiko dan anggota tim. Meskipun pendekatan kualitatif kurang tepat dibandingkan dengan pendekatan kuantitatif, pendekatan ini efektif dalam penyaringan unit dan peralatan dengan risiko rendah. Pendekatan kualitatif dapat digunakan untuk segala aspek rencana inspeksi pengembangan; Namun, konservatisme yang umumnya melekat pada pendekatan yang lebih kualitatif harus dipertimbangkan saat membuat keputusan akhir mitigasi dan rencana inspeksi <sup>(9)</sup>.

### 2.6.2 Risk Based Inspection – Pendekatan Kuantitatif

Sepenuhnya pendekatan risiko kuantitatif mengintegrasikan ke dalam metodologi informasi yang seragam serta relevan tentang desain fasilitas, praktik operasi, riwayat pengoperasian, keandalan komponen, tindakan manusia, perkembangan fisik kecelakaan, dan potensi efek lingkungan dan kesehatan. Pendekatan risiko kuantitatif menggunakan model logika yang menggambarkan

kombinasi peristiwa yang dapat mengakibatkan kecelakaan parah dan model fisik yang menggambarkan perkembangan kecelakaan dan pengangkutan bahan berbahaya ke lingkungan. Modelnya dievaluasi secara probabilistik untuk memberikan wawasan kualitatif dan kuantitatif tentang tingkat risiko dan untuk mengidentifikasi desain, situs, atau karakteristik operasional yang paling penting untuk mengambil risiko. Pendekatan risiko kuantitatif dibedakan dari pendekatan kualitatif dengan kedalaman analisis dan integrasi penilaian rinci. Model logika pendekatan risiko kuantitatif umumnya terdiri dari pohon kejadian dan pohon kesalahan. Pohon acara menggambarkan acara awal dan kombinasi dari keberhasilan dan kegagalan sistem, sedangkan pohon kesalahan menggambarkan cara-cara di mana kegagalan sistem direpresentasikan seandainya pohon bisa muncul. Model-model ini dianalisis untuk memperkirakan probabilitas setiap urutan kecelakaan. Hasil yang menggunakan pendekatan ini biasanya disajikan sebagai angka risiko (misalnya biaya per tahun). Pendekatan risiko kuantitatif mengacu pada metodologi deskriptif yang dihasilkan dari penerapan teknik analisis risiko pada banyak hal berbagai jenis fasilitas, termasuk fasilitas proses hidrokarbon dan kimia. Untuk semua maksud dan tujuan, ini adalah analisis risiko tradisional. Analisis RBI berbagi banyak teknik dan persyaratan data dengan pendekatan risiko kuantitatif. Jika pendekatan risiko kuantitatif telah disiapkan untuk unit proses, analisis konsekuensi RBI dapat meminjam secara ekstensif dari upaya ini. pendekatan risiko kuantitatif tradisional umumnya terdiri dari tugas:

- Identifikasi sistem,
- identifikasi bahaya,
- penilaian probabilitas,
- analisis konsekuensi,
- hasil risiko.

Definisi sistem, identifikasi bahaya dan analisis konsekuensi saling terkait secara integral. Identifikasi bahaya di analisis RBI umumnya berfokus pada mekanisme kegagalan yang dapat diidentifikasi dalam peralatan (penyebab yang dapat diperiksa) tetapi tidak secara eksplisit menangani skenario potensi kegagalan lain yang diakibatkan oleh peristiwa seperti gangguan daya atau kesalahan manusia. pendekatan risiko kuantitatif menangani risiko total, bukan hanya risiko yang

terkait dengan kerusakan peralatan. Pendekatan risiko kuantitatif biasanya melibatkan evaluasi yang jauh lebih rinci daripada analisis RBI. Data berikut biasanya dianalisis:

- Hasil HAZOP atau PHA yang ada,
- Desain tanggul dan drainase,
- Sistem deteksi bahaya,
- Sistem proteksi kebakaran,
- Statistik rilis,
- Statistik cedera,
- Distribusi populasi,
- Topografi,
- Kondisi cuaca,
- Penggunaan lahan.

Pendekatan risiko kuantitatif umumnya dilakukan oleh analis risiko yang berpengalaman. Ada peluang untuk menghubungkan pendekatan risiko kuantitatif terperinci dengan file Studi RBI.

### **2.6.3 Risk Based Inspection – Pendekatan Semi-Kuantitatif**

Semi-kuantitatif adalah istilah yang menggambarkan setiap pendekatan yang memiliki aspek-aspek yang diturunkan baik dari kualitatif maupun pendekatan kuantitatif. Ini diarahkan untuk mendapatkan manfaat utama dari dua pendekatan sebelumnya (misalnya kecepatan kualitatif dan ketelitian kuantitatif). Biasanya, sebagian besar data yang digunakan dalam pendekatan kuantitatif dibutuhkan untuk ini pendekatan tetapi kurang detail. Model juga mungkin tidak seketat yang digunakan untuk pendekatan kuantitatif. Itu hasil biasanya diberikan dalam kategori konsekuensi dan probabilitas atau sebagai angka risiko tetapi nilai numerik mungkin terkait dengan setiap kategori untuk memungkinkan perhitungan risiko dan penerapan penerimaan risiko yang sesuai kriteria.

## **2.7 Manajemen Risiko**

Dalam kebanyakan situasi, sekali risiko telah diidentifikasi, terdapat peluang alternatif yang tersedia untuk mengurangi risiko tersebut. Namun, hampir semua kerugian komersial utama adalah hasil dari kegagalan untuk memahami atau

mengelola risiko. API RBI mengambil langkah pertama menuju program manajemen risiko yang terintegrasi. Di masa lalu, fokus dari penelitian risiko berada pada isu yang terkait dengan keselamatan di on-site. Saat ini, ada peningkatan kesadaran dari kebutuhan untuk menilai risiko yang dihasilkan dari :

- Risiko *on-site* untuk karyawan
- Risiko *off-site* kepada masyarakat
- Risiko gangguan bisnis
- Risiko kerusakan lingkungan

Pendekatan API RBI memungkinkan setiap kombinasi jenis risiko yang akan di perhitungkan dalam keputusan tentang kapan, di mana, dan bagaimana untuk memeriksa peralatan. Metodologi API RBI dapat digunakan untuk mengelola risiko keseluruhan pabrik dengan memfokuskan upaya inspeksi pada peralatan proses dengan risiko tertinggi. API RBI memberikan dasar untuk mengelola risiko dengan membuat keputusan pada frekuensi pemeriksaan, tingkat detail dan jenis *NDE (Non-Destructive Examination)* yang dilakukan. Pada kebanyakan pabrik, prosentase besar risiko keseluruhan unit akan terkonsentrasi dalam prosesentase relatif kecil dari item peralatan. Potensi komponen risiko tinggi ini mungkin memerlukan perhatian yang lebih besar, mungkin melalui rencana pemeriksaan yang direvisi. Biaya usaha inspeksi yang meningkat kadang – kadang dapat diimbangi dengan mengurangi upaya pemeriksaan yang berlebihan di daerah yang diidentifikasi memiliki risiko yang lebih rendah. Dengan program API RBI di tempat inspeksi akan terus dilakukan seperti yang didefinisikan dalam dokumen kerja yang ada, tetapi prioritas dan frekuensi akan di pandu oleh prosedur API RBI. API RBI fleksibel dan dapat diterapkan pada beberapa tingkatan. Dalam dokumen API 581, API RBI diterapkan untuk peralatan bertekanan yang mengandung cairan proses. Namun, penggunaannya dapat diperluas ke tingkat sistem dan termasuk peralatan tambahan, seperti instrumentasi, sistem kontrol, sistem distribusi listrik dan peralatan lainnya yang kritikal. Pengembangan tingkat analisis dapat meningkatkan nilai pengembalian atas upaya pemeriksaan. Pendekatan API RBI juga bisa di



buat hemat biaya dengan mengintegrasikannya dengan inisiatif industri baru-baru ini dan peraturan pemerintah, seperti *Management of Process Hazard*, *Process Safety Management*, atau *Environmental Protection Agency Risk Management Programs for Chemical Accident Release Prevention*.

Berdasarkan literatur, Metodologi API RBI disajikan dalam 3 bagian :

- *Part 1* – Perencanaan Inspeksi Menggunakan Teknologi API RBI
- *Part 2* – Penentuan Probabilitas Kegagalan dalam Penilaian API RBI
- *Part 3* – Modeling Konsekuensi di API RBI

Inspeksi di sajikan di bagian I untuk peralatan tetap termasuk bejana tekan, pipa, tangki timbun, perangkat pelepas tekanan dan *heat exchanger*. Batas batas tekanan dari peralatan putar juga dapat dievaluasi dengan menggunakan bagian ini juga. Probabilitas kegagalan untuk peralatan tetap dijelaskan didalam Bagian 2. Probabilitas kegagalan didasarkan pada jenis komponen dan mekanisme kerusakan yang ada berdasarkan karakteristik fluida proses, kondisi desain, bahan konstruksi dan *construction code* yang digunakan. Sementara bagian 3 memberikan informasi tentang metode untuk menghitung konsekuensi dari kegagalan jika terjadi. Dua metode yang disediakan. Metode pertama atau level 1 didasarkan pada solusi bentuk tertutup yang dihasilkan untuk satu set terbatas fluida referensi atau kelompok fluida. Metode kedua atau level 2 adalah metode yang lebih teliti dan dapat digunakan untuk komposisi aliran fluida apapun <sup>(8)</sup>

## **2.8 Kemungkinan Kegagalan / Probability of Failure (PoF)**

Terdapat 2 metode kalkulasi POF yang secara umum dijelaskan dan dipergunakan dalam proses kalkulasi, yaitu *the generic failure frequency (gff) method* dan *two parameter Weibull distribution method* . perbedaan dari kedua metode tersebut ialah Metode GFF dipergunakan untuk memprediksi *loss of containment* dari kemungkinan kegagalan batasan ketahanan tekanan dari peralatan, sementara *Weibull Method* digunakan untuk memprediksi kemungkinan kegagalan untuk *Pressure Relieve Device (PRD)* dan juga *heat exchangers (HE)*. Sehingga dalam penelitian ini persamaan kalkulasi yang dipergunakan untuk proses

penelitian adalah metode GFF. Kemungkinan kegagalan pada API RBI dihitung menggunakan persamaan :

$$P_f(t) = gff \cdot D_f(t) \cdot F_{MS} \quad (2.1)$$

Dimana definisi dari persamaan diatas ialah :

- $Gff$  = *generic failure frequency*
- $D_f(t)$  = *damage factor*
- $F_{MS}$  = *management system factor*

### **2.8.1 Generic Failure Frequency (gff)**

Jika data yang tersedia cukup untuk komponen yang diteliti, maka nilai kemungkinan kegagalan dapat dihitung menggunakan kegagalan sebenarnya yang telah diteliti. Meskipun kegagalan belum terjadi pada sebuah komponen, nilai kemungkinan kegagalan sebenarnya lebih besar dari nol karena ada kemungkinan bahwa komponen belum beroperasi cukup lama untuk mengalami kegagalan. Untuk memperkirakan kemungkinan kegagalan, diperlukan penilaian data-data dari komponen yang serupa untuk mengetahui kegagalan yang pernah terjadi sehingga dapat diperkirakan kemungkinan kegagalannya. Frekuensi kegagalan umum sebuah komponen diperkirakan menggunakan catatan dari peralatan-peralatan dalam sebuah perusahaan atau dari berbagai pabrik dalam sebuah industri, dari sumber literatur, dan data umum keandalan komersial. Frekuensi kegagalan umum dimaksudkan untuk menjadi representatif frekuensi kegagalan dari penurunan mutu kerja yang dialami selama dioperasikan pada lingkungan yang spesifik, dan ditunjukkan untuk beberapa ukuran lubang pada tipe-tipe peralatan (misalnya berupa bejana tekan, drum, sistem perpipaan, dll)

Daftar nilai kemungkinan kegagalan umum yang direkomendasikan menurut API RBI 581 tersedia pada tabel 2.1

Tabel 2. 1 Rekomendasi Nilai Frekuensi Kegagalan Utama

Equipment type	Component type	<i>gff</i> as a Function of Hole Size (Failures/yr)				<i>gff</i> total (failures/yr)
		Small	Medium	Large	Rupture	
Compressor	COMPC	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	0	3.00E-05
Compressor	COMPR	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
Heat Exchanger	HEXSS	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
	HEXTS	8.00E-05				
Pipe	PIPE-1	8.00E-05	0	0	2.60E-06	3.06E-05
	PIPE-2					
Pipe	PIPE-4	8.00E-06	2.00E-05	0	2.60E-06	3.06E-05
	PIPE-6					
Pipe	PIPE-8	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
	PIPE-10					
	PIPE-12					
	PIPE-16					
	PIPEGT-16					
Pump	PUMP2S	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
	PUMPR					
	PUMP1S					
Tank 650	TANKBOTTOM	7.20E-04	0	0	2.00E-06	7.20E-04
Tank 650	COURSE-1-10	7.00E-05	2.50E-05	5.00E-06	1.00E-07	1.00E-04
Vessel/Fin Fan	KODRUM	8.00E-06	2.00E-05	2.00E-06	6.00E-07	3.06E-05
	COLBTM					
	FINFAN					
	FILTER					
	DRUM					
	REACTOR					
	COLTOP					
	COLMID					

GFF diasumsikan mengikuti log-normal distribusi, dengan tingkat kesalahan mulai dari 3% hingga 10%. Keseluruhan GFF untuk setiap jenis komponen dibagi menurut ukuran lubang yang relevan, yaitu jumlah generik frekuensi kegagalan untuk setiap ukuran lubang sama dengan frekuensi kegagalan generik total untuk komponen

### 2.8.2 Damage Factor

Faktor kerusakan (*Damage Factor*) dimaksudkan untuk mendukung metodologi API RBI dengan menyediakan alat penyaringan sebagai penentu prioritas inspeksi dan pemaksimalanusaha inspeksi. Faktor kerusakan tidak menyediakan penilaian *Fitness-for-Service* dari komponen. Fungsi dasar dari faktor kerusakan adalah mengevaluasi jumlah kerusakan yang dapat terjadi sebagai fungsi waktu kerja dan keefektifan aktifitas inspeksi. Estimasi faktor kerusakan yang tersedia adalah untuk mekanisme kerusakan di bawah ini :

1. *Thinning* -  $D_f^{thin}$
2. *Component Lining* -  $D_f^{elin}$
3. *External Damage* -  $D_f^{extd}$
4. *Stress Corrosion Cracking (SCC)* -  $D_f^{SCC}$
5. *High Temperature Hydrogen Attack* -  $D_f^{htha}$
6. *Mechanical Fatigue* -  $D_f^{mfat}$
7. *Brittle Fracture* -  $D_f^{brit}$

Dalam proses kalkulasi untuk menentukan faktor kerusakan tidak semua faktor kerusakan digunakan dalam proses kalkulasi. Pada saat menganalisa kemungkinan kegagalan suatu unit API 581 memberikan klasifikasi tertentu untuk penggunaan faktor-faktor kerusakan tersebut yang dicantumkan dalam tabel 2.2 dibawah ini

Tabel 2. 2 Klasifikasi *Damage Factor* (API 581)

<i>Faktor Kerusakan</i>	<i>Kriteria Penyaringan dan Penggunaan</i>
<i>Thinning</i>	<i>all components should be checked for thinning</i>
<i>Component Lining</i>	<i>if the component has an inorganic or organic lining, then the component should be evaluated for lining damage</i>
<i>SCC - Caustic Cracking</i>	<i>If the component's material of construction is carbon or low alloy steel and the process environment contains caustic in any concentration, then the component should be evaluated for susceptibility to caustic cracking</i>
<i>SCC - Amine Cracking</i>	<i>If the component's material of construction is carbon or low alloy steel and the process environment contains acid gas treating amines (MEA, DEA, DIPA, MDEA, etc.) in any concentration, then the component should be evaluated for susceptibility to Amine cracking</i>
<i>SCC - Sulfide Stress Cracking</i>	<i>If the component's material of construction is carbon or low alloy steel and the process environment contains water and HR2RS in any concentration, then the component should be evaluated for susceptibility to sulfide stress cracking</i>
<i>SCC - HIC/SOHIC HR2RS</i>	<i>If the component's material of construction is carbon or low alloy steel and the process environment contains water and H<sub>2</sub>S in any concentration, then the component should be evaluated for susceptibility to HIC/SOHIC-H<sub>2</sub>S cracking</i>
<i>SCC - Carbonate Cracking</i>	<i>If the component's material of construction is carbon or low alloy steel and the process environment contains sour water at pH &gt; 7.5 in any concentration, then the component should be evaluated for susceptibility to carbonate cracking</i>
<i>SCC - PTA Cracking</i>	<i>If the component's material of construction is an austenitic stainless steel or nickel based alloys and the component is exposed to sulfur bearing compounds, then the component should be evaluated for susceptibility to PTA cracking</i>
<i>SCC - CLSCC</i>	<i>If all of the following are true, then the component should be evaluated for susceptibility to CLSCC cracking. a) The component's material of construction is an austenitic stainless steel, b) The component is exposed or potentially exposed to chlorides and water also considering upsets and hydrotest water remaining in component, and cooling tower drift (consider both under insulation and process conditions, and c) The operating temperature is above 38°C [100°F]</i>

<p><i>SCC - HSC-HF</i></p>	<p><i>If the component's material of construction is carbon or low alloy steel and the component is exposed to hydrofluoric acid in any concentration, then the component should be evaluated for susceptibility to HSC-HF</i></p>
<p><i>SCC - HIC/SOHIC HF</i></p>	<p><i>If the component's material of construction is carbon or low alloy steel and the component is exposed to hydrofluoric acid in any concentration, then the component should be evaluated for susceptibility to HIC/SOHIC-HF</i></p>
<p><i>External Corrosion - Ferritic Component</i></p>	<p><i>If the component is uninsulated and subject to any of the following, then the component should be evaluated for external damage from corrosion.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>a) Areas exposed to mist overspray from cooling towers,</i></li> <li><i>b) Areas exposed to steam vents,</i></li> <li><i>c) Areas exposed to deluge systems,</i></li> <li><i>d) Areas subject to process spills, ingress of moisture, or acid vapors.</i></li> <li><i>e) Carbon steel systems, operating between – 23°C and 121°C (–10°F and 250°F). External corrosion is particularly aggressive where operating temperatures cause frequent or continuous condensation and reevaporation of atmospheric moisture,</i></li> <li><i>f) Systems that do not normally operate between -12°C and 177°C (10°F and 350°F) but cool or heat into this range intermittently or are subjected to frequent outages,</i></li> <li><i>g) Systems with deteriorated coating and/or wrappings,</i></li> <li><i>h) Cold service equipment consistently operating below the atmospheric dew point.</i></li> <li><i>i) Un-insulated nozzles or other protrusions components of insulated equipment in cold service conditions</i></li> </ul>

<p><i>CUI - Ferritic Component</i></p>	<p><i>Specific locations and/or systems, such as penetrations and visually damaged insulation areas, are highly suspect and should be considered during inspection program development. Examples of highly suspect areas include, but are not limited to, the following:</i></p> <p><b>a) Penetrations</b></p> <p><i>1) All penetrations or breaches in the insulation jacketing systems, such as dead legs (vents, drains, and other similar items), hangers and other supports, valves and fittings, bolted-on pipe shoes, ladders, and platforms.</i></p> <p><i>2) Steam tracer tubing penetrations.</i></p> <p><i>3) Termination of insulation at flanges and other components.</i></p> <p><i>4) Poorly designed insulation support rings.</i></p> <p><i>5) Stiffener rings.</i></p> <p><b>b) Damaged Insulation Areas</b></p> <p><i>1) Damaged or missing insulation jacketing</i></p> <p><i>2) Termination of insulation in a vertical pipe or piece of equipment</i></p> <p><i>3) Caulking that has hardened, has separated, or is missing</i></p> <p><i>4) Bulges, staining of the jacketing system or missing bands (bulges may indicate corrosion product build-up)</i></p> <p><i>5) Low points in systems that have a known breach in the insulation system, including low points in long unsupported piping runs</i></p> <p><i>6) Carbon or low alloy steel flanges, bolting, and other components under insulation in high alloy piping</i></p>
<p><i>External CLSCC - Austenitic Component</i></p>	<p><i>If all of the following are true, then the component should be evaluated for susceptibility to external CLSCC.</i></p> <p><b>a) The component's material of construction is an austenitic stainless steel,</b></p> <p><b>b) The component external surface is exposed to chloride containing fluids, mists, or solids.</b></p> <p><b>c) The operating temperature is between 49°C and 149°C [120°F and 300°F], or the system heats or cools into this range intermittently</b></p>
<p><i>External CUI CLSCC - Austenitic Component</i></p>	<p><i>If all of the following are true, then the component should be evaluated for susceptibility to CUI CLSCC.</i></p> <p><b>a) The component's material of construction is an austenitic stainless steel,</b></p> <p><b>b) The component is insulated,</b></p> <p><b>c) The component's external surface is exposed to chloride containing fluids, mists, or solids, and</b></p> <p><b>d) The operating temperature is between 120°F and 300°F (50°C and 150°C) or cools or heats into this range intermittently</b></p>

<p><i>HTHA</i></p>	<p><i>If all of the following are true, then the component should be evaluated for susceptibility to HTHA.</i></p> <p><i>a) The material is carbon steel, C-0.5Mo, or a Cr-Mo low alloy steel</i></p> <p><i>b) The operating temperature is greater than 204°C [400°F] and the operating hydrogen partial pressure is greater than 0.552 MPa [80 psia]</i></p>
<p><i>Brittle Fracture</i></p>	<p><i>If all of the following are true, then the component should be evaluated for susceptibility to brittle fracture.</i></p> <p><i>a) The material is carbon steel or a low alloy steel</i></p> <p><i>b) The Minimum Design Metal Temperature (MDMT) is unknown, or the MDMT is known but the component may operate at below the MDMT under normal or upset conditions.</i></p>
<p><i>Temper Embrittlement</i></p>	<p><i>If all of the following are true, then the component should be evaluated for susceptibility to temper embrittlement.</i></p> <p><i>a) The material is 1.25Cr -0.5Mo, 2.25Cr - 0.5Mo, or 3Cr-1 Mo low alloy steel.</i></p> <p><i>b) The operating temperature is between 343 and 577°C [650 and 1070°F]</i></p>
<p><i>885 Embrittlement</i></p>	<p><i>If all of the following are true, then the component should be evaluated for susceptibility to 885 embrittlement.</i></p> <p><i>a) The material is a high chromium (&gt;12% Cr) ferritic steel.</i></p> <p><i>b) The operating temperature is between 371°C and 566°C [700°F and 1050 °F]</i></p>
<p><i>Sigma Phase Embrittlement</i></p>	<p><i>If all of the following are true, then the component should be evaluated for susceptibility to sigma phase embrittlement.</i></p> <p><i>a) The material an austenitic stainless steel.</i></p> <p><i>b) The operating temperature between 593°C and 927°C [1100 and 1700 °F]</i></p>
<p><i>Piping Mechanical Fatigue</i></p>	<p><i>If all of the following are true, then the component should be evaluated for susceptibility to mechanical fatigue.</i></p> <p><i>a) The component is pipe.</i></p> <p><i>b) There have been past fatigue failures in this piping system or there is visible/audible shaking in this piping system or there is a source of cyclic vibration within approximately 15.24 meters [50 feet] and connected to the piping (directly or indirectly via structure). Shaking and source of shaking can be continuous or intermittent. Transient conditions often cause intermittent vibration</i></p>



Faktor kerusakan juga ditentukan sebagai fungsi dari efektifitas inspeksi. Kategori keefektifan inspeksi yang digunakan dalam API RBI ditampilkan dalam tabel dibawah ini :

Tabel 2. 3 Kategori Tingkat Efektifitas Inspeksi (API 581)

<i>Kategori Keefektifan Inspeksi</i>	<i>Deskripsi</i>
<i>Highly Effective</i>	<i>The inspection methods will correctly identify the true damage state in nearly every case (or 80-100% confidence)</i>
<i>Usually Effective</i>	<i>The inspection methods will correctly identify the true damage state most of the time (or 60-80% confidence)</i>
<i>Fairly Effective</i>	<i>The inspection methods will correctly identify the true damage state about half of the time (or 40-60% confidence)</i>
<i>Poorly Effective</i>	<i>The inspection methods will provide little information to correctly identify the true damage state (or 20-40% confidence)</i>
<i>Ineffective</i>	<i>The inspection methods will provide no or almost no information that will correctly identify the true damage state and are considered ineffective for detecting the specific damage mechanism (less than 20% confidence)</i>

### 2.8.3 Kalkulasi *Thinning Damage Factor*

Perhitungan *Damage Factor* untuk komponen merujuk pada mekanisme kerusakan yang menyebabkan penipisan umum atau lokal. Dalam metodologi API RBI, semua peralatan yang dilakukan analisa risiko harus di periksa dan dikalkulasi dengan *Thinning Damage Factor*. Berikut adalah prosedur dalam menghitung nilai *Thinning Damage Factor* :

1. Menentukan ketegori keefektifan inspeksi dari inspeksi yang pernah dilakukan serta jumlah inspeksi yang telah dijalani. Dalam hal ini pedoman dalam penilaian di jabarkan dalam tabel kefektifan inspeksi untuk *general thinning* dibawah ini :

Tabel 2. 4 Pedoman Penilaian Efektifitas Inspeksi - *General Thinning*

Kategori Inspeksi	Kategori Keefektifan Inspeksi	Contoh Inspeksi <i>Instusive</i>	Contoh Inspeksi <i>Non-Intrusive</i>
A	<i>Highly Effective</i>	<i>50 to 100% examination of the surface (partial internals removed), and accompanied by thickness measurements</i>	<i>50 to 100% ultrasonic scanning coverage (automated or manual) or profile radiography</i>
B	<i>Usually Effective</i>	<i>Nominally 20% examination (no internals removed), and spot external ultrasonic thickness measurements</i>	<i>Nominally 20% ultrasonic scanning coverage (automated or manual), or profile radiography, or external spot thickness (statistically validated)</i>
C	<i>Fairly Effective</i>	<i>Visual examination with thickness measurements</i>	<i>2 to 3% examination, spot external ultrasonic thickness measurements, and little or no internal visual examination</i>
D	<i>Poorly Effective</i>	Visual examination	<i>Several thickness measurements, and adocumented inspection planning system</i>
E	<i>Ineffective</i>	<i>No inspection</i>	<i>Several thickness measurements taken only externally, and a poorly documented inspection planning system</i>

2. Tentukan waktu *in-service, age*, sejak inspeksi ketebalan terakhir,  $t_{rd}$
3. Menentukan laju korosi dari base metal,  $C_{r.bm}$ , berdasarkan material dan lingkungan prosesnya. Jika komponen memiliki *cladding*, maka laju korosi untuk *cladding*  $C_{r.bm}$  harus di cari nilainya.
4. Menentukan ketebalan dinding minimum,  $t_{min}$ , menggunakan kode knstruksi yang dipergunakan dalam proses fabrikasi atau menggunakan API 571. Jika komponen nya adalah *tank bottom*, maka menurut API 653

nilai  $t_{min} = 0,1$  in jika tanki tidak memiliki penahan kebocoran dan  $t_{min} = 0,05$  in jika tanki memiliki penahan kebocoran.

5. Untuk komponen dengan *clad*, hitung waktu atau umur sejak inspeksi terakhir yang dibutuhkan untuk mengkorosikan semua material *clad*  $age_{rc}$ , menggunakan persamaan 2.12 dalam API 581 berikut :

$$age_{rc} = \max \left[ \left( \frac{t_{rd} - t}{C_{r,cm}} \right), 0.0 \right] \quad (2.2)$$

6. Menentukan parameter  $A_{rt}$  berdasarkan nilai  $age$  dan  $t_{rd}$  dari tahap 2,  $C_r$  dari tahap 3,  $t_{min}$  dari tahap 4, dan  $age_{rc}$  dari tahap 5 jika diperlukan
  - a. Untuk komponen yang tidak memiliki *cladding*, menggunakan persamaan 2.13 API 581 yaitu :

$$A_{rt} = \max \left[ \left( 1 - \frac{t_{rd} - C_{r,bm} \cdot age}{t_{min} - CA} \right) \right] \quad (2.3)$$

- b. Untuk komponen yang memiliki *cladding*, maka menggunakan persamaan 2.14 yang terdapat pada API 581 berikut :

$$A_{rt} = \max \left[ 1 - \frac{t_{rd} - C_{r,cm} \cdot age_{rc} - C_{r,bm} \cdot (age - age_{rc})}{t_{min} - CA} \right] \quad (2.4)$$

7. Menentukan faktor kerusakan dasar untuk proses kalkulasi *thinning*,  $D_f^{thin}$ , menggunakan tabel 2.5 (untuk selain *bottom tank*) berdasarkan jumlah dan kategori spesifikasi inspeksi dari tahap 1 dan nilai  $A_{rt}$  dari tahap 6

Tabel 2. 5 *Thinning Damage Factor*

Art	Keefektifan Inspeksi								
	E	1 Inspeksi				2 Inspeksi			
		D	C	B	A	D	C	B	A
0,02	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,04	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,06	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,08	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,10	2	2	1	1	1	1	1	1	1
0,12	6	5	3	2	1	4	2	1	1
0,14	20	17	10	6	1	13	6	1	1
0,16	90	70	50	20	3	50	20	4	1
0,18	250	200	130	70	7	170	70	10	1
0,20	400	300	210	110	15	290	120	20	1
0,25	520	450	290	150	20	350	170	30	2
0,30	650	550	400	200	30	400	200	40	3
0,35	750	650	550	300	80	600	300	80	10
0,40	900	800	700	400	130	700	400	120	30
0,45	1050	900	810	500	200	800	500	160	40
0,50	1200	1100	970	600	270	1000	600	200	60
0,55	1350	1200	1130	700	350	1100	750	300	100
0,60	1500	1400	1250	850	500	1300	900	400	230
0,65	1900	1700	1400	1000	700	1600	1105	670	530

ARrt	Keefektifan Inspeksi								
	E	3 Inspeksi				4 Inspeksi			
		D	C	B	A	D	C	B	A
0,02	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,04	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,06	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,08	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,10	2	1	1	1	1	1	1	1	1
0,12	6	3	1	1	1	2	1	1	1
0,14	20	10	3	1	1	7	2	1	1
0,16	90	40	10	1	1	30	5	1	1
0,18	250	130	35	3	1	100	15	1	1
0,20	400	260	60	5	1	180	20	2	1
0,25	520	240	80	6	1	200	30	2	1

0,30	650	320	110	9	2	240	50	4	2
0,35	750	540	150	20	5	440	90	10	4
0,40	900	600	200	50	10	500	140	20	8
0,45	1050	700	270	60	20	600	200	30	15
0,50	1200	900	360	80	40	800	270	50	40
0,55	1350	1000	500	130	90	900	350	100	90
0,60	1500	1200	620	250	210	1000	450	220	210
0,65	1900	1300	880	550	500	1200	700	530	500

8. Menentukan faktor kerusakan dari *thinning*  $D_f^{thin}$  dengan menggunakan persamaan berikut :

$$D_f^{thin} = \frac{D_{fB}^{thin} \cdot F_{IP} \cdot F_{DL} \cdot F_{WD} \cdot F_{AM} \cdot F_{SM}}{F_{OM}} \quad (2.5)$$

Untuk keterangan tentang faktor penyesuaian ditentukan seperti dideskripsikan di bawah ini.

- a) Pengaturan pada *Damage Factor* untuk *On-Line Monitoring*,  $F_{om}$ - Sebagai penambahan dalam inspeksi *on-line monitoring* pada korosi atau variabel kunci yang mempengaruhi korosi) biasanya digunakan dalam banyak proses untuk mencegah kegagalan korosi. Keuntungan dari *on-line monitoring* adalah perubahan laju korosi sebagai hasil dari proses perubahan dapat dideteksi jauh sebelum dapat dideteksi dengan inspeksi berkala normal. Deteksi biasanya memungkinkan tindakan yang lebih tepat waktu untuk dilakukan yang seharusnya menurunkan POF. Berbagai metode digunakan, mulai dari *corrossion probe*, *corrosion coupon*, dan pemantauan variabel proses utama. Jika *on-line monitoring* digunakan, maka kredit harus diberikan untuk mencerminkan keyakinan yang lebih tinggi dalam prediksi tingkat penipisan. Namun, metode ini memiliki tingkat keberhasilan yang bervariasi tergantung pada penipisan tertentu mekanisme. Dengan menggunakan pengetahuan tentang mekanisme penipisan dan jenis *on-lin monitoring*, tentukan faktor pemantauan on-line dari Tabel 4.9. Jika lebih dari satu metode pemantauan digunakan, hanya yang tertinggi faktor pemantauan harus digunakan (yaitu faktor-faktor bukan aditif). Dengan menggunakan pengetahuan tentang *thinning mechanism* dan tabel mengenai tipe dari *on-line monitoring* yang

disediakan dalam API 581, maka nilai faktor ini dapat ditentukan. Jika terdapat lebih dari satu metode monitoring, maka nilai yang dipergunakan dalam kalkulasi adalah nilai tertinggi. Jika nilai  $D_f^{thin} = 1$ , maka faktor ini tidak perlu digunakan.

b) Pengaturan untuk *Injection / Mix Points*,  $F_{IP}$  – Titik pencampuran / injeksi didefinisikan sebagai titik dimana 2 fluida (bahan kimia) atau lebih (termasuk air) sedang ditambahkan ke aliran arus utama. *Corrosive mix point* didefinisikan sebagai :

- Pencampuran aliran uap dan cairan dimana penguapan aliran cairan dapat terjadi
- Air ada di salah satu atau kedua aliran; atau
- Suhu aliran campuran dibawah titik embun air dari aliran gabungan

Jika sistem perpipaan memiliki titik injeksi, maka nilai  $F_{IP} = 3$ . Jika inspeksi dengan keefektifan tinggi mengenai korosi di titik injeksi ini dilakukan (menurut API 570), maka faktor ini tidak digunakan.

c) Penyesuaian untuk *Dead Legs*,  $F_{DL}$  – didefinisikan sebagai bagian dari sistem perpipaan atau pipa-pipa yang digunakan hanya selama *intermittent service* seperti *start-up*, *shut-down*, siklus beregenerasi dsb. Dan tidak berpa *continous service*. *Deadleg* termasuk komponen perpipaan yang biasanya tidak memiliki aliran yang signifikan. Jika sistem perpipaan mengandung *deadleg*, maka harus dilakukan penyesuaian pada DF yang menipis untuk memperhitungkan yang *damage factor* tersebut jika terdapat bagian tersebut pada alat maka nilai  $F_{DL} = 3$ . Jika inspeksi dengan keefektifan tinggi dilakukan untuk mengukur potensi korosi pada bagian ini, maka faktor ini tidak digunakan.

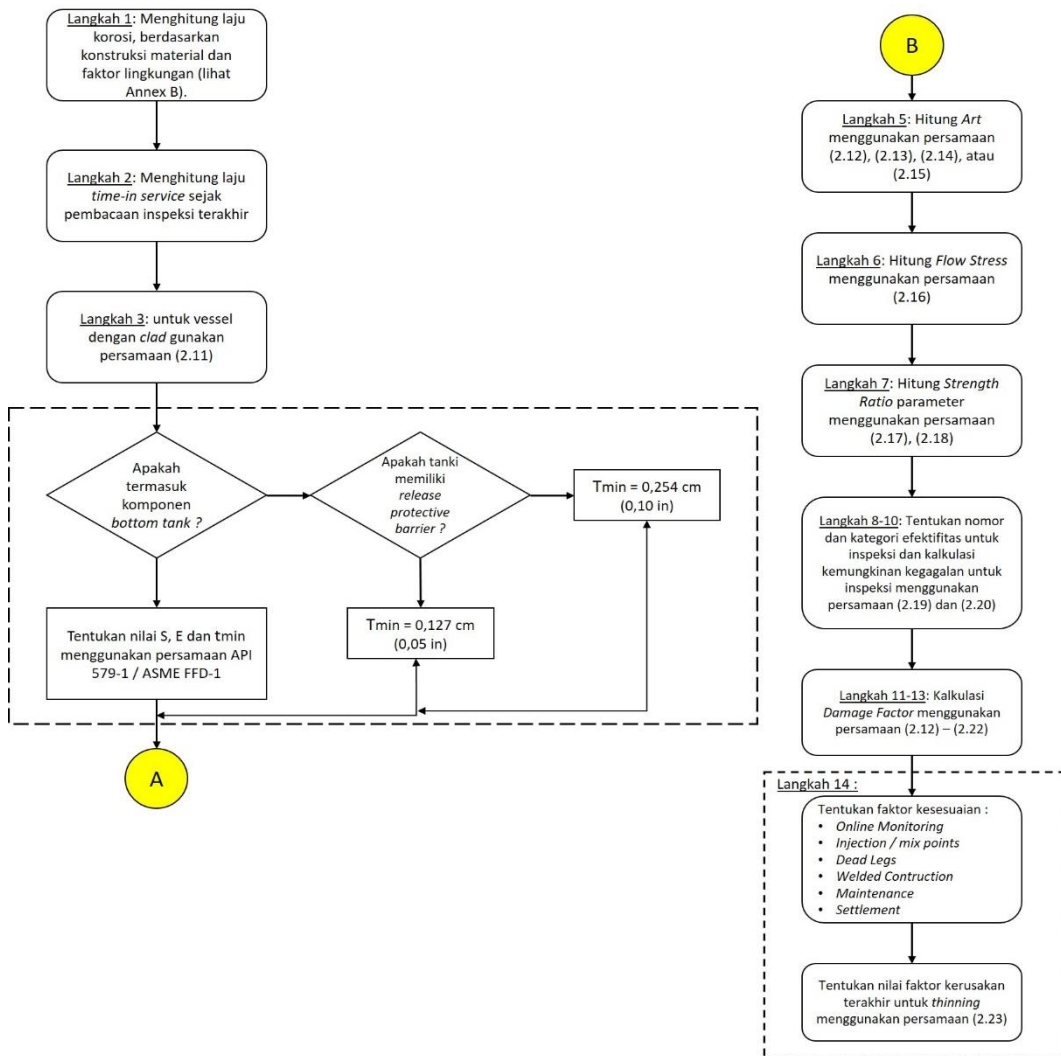
d) Pengaturan untuk *welded construction*,  $F_{WD}$  – hanya digunakan untuk *atmospheric storage tank*. Jika komponen alat dilas (misalnya tidak di rivet), maka  $F_{WD} = 1$ ; jika tidak maka  $F_{WD} = 10$

e) Pengaturan untuk pemeliharaan sesuai API 653,  $F_{AM}$  – hanya digunakan untuk *atmospheric storage tank*. jika tanki mengalami pemeliharaan sesuai API 653, maka  $F_{AM} = 1$  jika tidak maka  $F_{AM} = 5$ .

f) Pengaturan untuk *Settlement*,  $F_{SM}$  – hanya untuk *atmospheric storage tank*.  
 Nilai ditentukan dari kriteria berikut :

- *Recorded settlement exceeds API 653 criteria* -  $F_{SM} = 2$
- *Recorded settlement meets API 653* -  $F_{SM} = 1$
- *Settlement never evaluated* -  $F_{SM} = 1,5$
- *Concrete foundation, no settlement* -  $F_{SM} = 1$

Berdasarkan keterangan dan tahapan-tahapan proses diatas, maka proses mencari nilai dari *Damage Factor* dapat di sederhanakan dengan diagram alir dibawah ini :



Gambar 2. 5 Diagram Alir *Damage Factor* - API RBI 581

#### 2.8.4 Faktor Sistem Manajemen

Efektivitas sistem manajemen keselamatan proses perusahaan dapat berpengaruh nyata pada integritas mekanis. Metodologi mencakup alat evaluasi untuk menilai bagian-bagian fasilitas sistem manajemen yang paling langsung berdampak pada POF suatu komponen. Faktor sistem manajemen digunakan untuk menyesuaikan frekuensi kegagalan generik untuk perbedaan dalam keamanan proses Sistem Manajemen. Faktor ini diperoleh dari hasil evaluasi fasilitas atau unit operasi sistem manajemen yang mempengaruhi risiko instalasi. Praktik yang berbeda dalam unit di fasilitas mungkin menciptakan perbedaan faktor sistem manajemen antara unit <sup>(8)</sup>

Evaluasi sistem manajemen mencakup berbagai topik dan akibatnya membutuhkan masukan dari beberapa disiplin ilmu yang berbeda dalam fasilitas untuk menjawab semua pertanyaan. Idealnya, perwakilan dari pabrik. Berikut fungsi yang harus diwawancarai:

- Divisi Manajemen Pabrik
- Divisi Operasi
- Divisi Pemeliharaan
- Divisi Keselamatan
- Divisi Inspeksi
- Divisi Pelatihan dan Pengembangan SDM
- Divisi *Engineering*

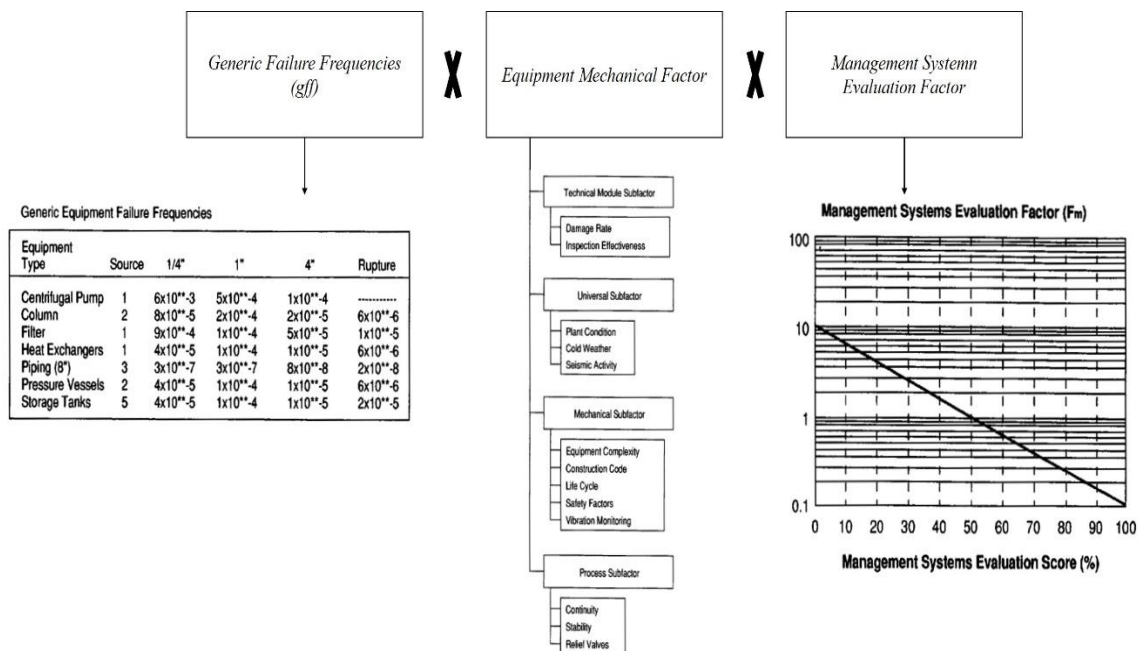
Skala yang direkomendasikan untuk mengubah skor evaluasi sistem manajemen menjadi sistem manajemen faktor ini didasarkan pada asumsi bahwa pabrik "rata-rata" akan mendapat skor 50% (500 dari skor yang mungkin 1.000) pada evaluasi sistem manajemen, dan bahwa skor 100% akan sama dengan pengurangan satu urutan besaran dalam risiko unit total. Berdasarkan peringkat ini persamaan 2.6 dan 2.7 digunakan untuk mengkalkulasi Faktor Sistem Manajemen,  $F_{MS}$ . Kalkulasi yang dapat dipergunakan untuk proses kalkulasi Faktor Sistem Manajemen adalah sebagai berikut :



$$pscore = \frac{score}{1000} \cdot 100 \text{ [unit is \%]} \quad (2.6)$$

$$F_{MS} = 10^{(-0.02 \cdot pscore + 1)} \quad (2.7)$$

Dari semua penjelasan di atas mengenai *Probability of Failure (POF)* maka dapat ditarik kesimpulan bahwa di haruskan terlebih dahulu mencari nilai dari *Generic Failure Frequencies (gff)* , *Damage Factor* dan *Management System Evaluation Factor* sehingga jika digambarkan melalu diagram dapat dilihat seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2. 6 Diagram Proses Kalkulasi PoF

## 2.9 Konsekuensi Kegagalan / *Consequences of Failure*

Konsekuensi kegagalan atau *Consequences of Failure (COF)* adalah proses kalkulasi mengenai nilai konsekuensi dari risiko suatu peralatan. analisa konsekuensi dalam penilaian API RBI 581 dilakukan untuk membantu membuat peringkat dari alat-alat berdasarkan nilai risikonya. Pengukuran konsekuensi ini digunakan untuk membantu membuat skala prioritas untuk program inspeksi. Terdapat 2 metode dalam analisis konsekuensi yaitu level 1 dan level 2. Analisa konsekuensi level 1 bersifat lebih sederhana dan digunakan untuk fluida yang terdapat pada fluida representative yang disediakan oleh API RBI 581, sedangkan analisa konsekuensi level 2 bersifat lebih teliti dan kompleks serta dapat digunakan untuk fluida yang lebih luas dan tidak disediakan dalam tabel fluida representatif.

Analisis level 2 digunakan juga jika hasil analisa dari level 1 tidak valid atau alat memiliki fluida dalam 2 fasa.

Analisa konsekuensi level 1 terdiri dari beberapa tahapan untuk mendapatkan nilai akhir konsekuensinya. Adapun langkah-langkah dalam proses perhitungan dan penentuan nilai nya adalah sebagai berikut :

- Menentukan fluida representatif dan sifatnya
- Menentukan lobang kebocoran
- Menghitung laju kebocoran
- Menghitung massa yang tersedia
- Menentukan tipe kebocoran
- Menentukan dampak dari sistem deteksi dan isolasi
- Menghitung laju dan massa kebocoran untuk analisa konsekuensi
- Menghitung konsekuensi keterbakaran dan ledakan
- Menentukan konsekuensi racun
- Menentukan konsekuensi tidak mudah terbakar dan tidak beracun (*non-toxic and non-flammable toxic*)
- Menentukan konsekuensi kerusakan komponen dan cedera personil.

Dalam analisa konsekuensi kegagalan dalam API RBI 581 terdapat faktor konversi yang digunakan dalam persamaan-persamaan di dalamnya. Nilai dari faktor konversi tersebut ditampilkan dalam tabel dibawah ini

Tabel 2. 6 Nilai Faktor Konversi untuk *Consequence of Failure*

Faktor Konversi	<i>SI Units</i>	<i>US Customary Units</i>
C <sub>1</sub>	31623	12
C <sub>2</sub>	1000	1
C <sub>3</sub>	4536	10000
C <sub>4</sub>	2,205	1
C <sub>5</sub>	25,2	55,6
C <sub>6</sub>	55,6	100
C <sub>7</sub>	1	10,763
C <sub>8</sub>	0,0929	1
C <sub>9</sub>	0,123	0,6

C <sub>10</sub>	9,744	63,32
C <sub>11</sub>	0,145	1
C <sub>12</sub>	1,8	1
C <sub>13</sub>	6,29	0,178
C <sub>14</sub>	1	3600
C <sub>15</sub>	4,685	1
C <sub>16</sub>	30,89	70
C <sub>17</sub>	0,001481	0,00723
C <sub>18</sub>	0,005	0,0164
C <sub>19</sub>	1,085	1,015
C <sub>20</sub>	1,013	0,147
C <sub>21</sub>	5328	9590
C <sub>22</sub>	5,8	14,62
C <sub>23</sub>	0,45	0,346
C <sub>24</sub>	2,6	2,279
C <sub>25</sub>	0,0296	0,0438
C <sub>26</sub>	100	14,5
C <sub>27</sub>	1	0,3967
C <sub>28</sub>	1000	6895
C <sub>29</sub>	$4,303 \times 10^{-4}$	$1,85 \times 10^{-4}$
C <sub>30</sub>	$9,76 \times 10^{-8}$	$6,43 \times 10^{-7}$
C <sub>31</sub>	864	7200
C <sub>32</sub>	0,543	107
C <sub>33</sub>	0,0815	16,03
C <sub>34</sub>	86,4	$1,829 \times 10^5$
C <sub>35</sub>	2,382	0,0259
C <sub>36</sub>	30,5	100

### 2.9.1 Fluida Representatif dan Sifatnya

Pada level 1 analisa konsekuensi, fluida representatif yang paling sesuai dengan fluida yang tercantum dalam sistem bertekanan yang di evaluasi dan dipilih berdasarkan tabel fluida representatif. Dalam beberapa kasus fluida aliran dalam kilang atau pabrik kimia merupakan fluida bahan murni sehingga proses pemilihan fluida representatif melibatkan beberapa asumsi. Dalam proses penentuan fluida representatif ini terdapat beberapa tahapan dan prosedur dalam proses mengkalkulasinya. Adapun prosedur untuk menghitung fluida representatif adalah sebagai berikut :

#### 1. Memilih fluida representatif

Berdasarkan metode RBI menentukan fluida representatif ditentukan dengan memilih berdasarkan fluida kerja yang berada dalam unit yang diperiksa. Dan metode RBI menyediakan tabel list fluida representatif untuk proses kalkulasi. Adapun tabel list untuk fluida representatif disediakan pada tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Daftar Fluida Representative untuk Level 1 CoF

<b>Representative Fluid</b>	<b>Fluid TYPE</b>	<b>Examples of Applicable Materials</b>
C <sub>1</sub> – C <sub>2</sub>	TYPE 0	Methane, Ethane, Ethylene, LNG, Fuel Gas
C <sub>3</sub> – C <sub>4</sub>	TYPE 0	Propane, Butane, Isobutane, LPG
C <sub>5</sub>	TYPE 0	Pentane
C <sub>6</sub> – C <sub>8</sub>	TYPE 0	Gasoline, Naphtha, Light Straight Run, Heptane
C <sub>9</sub> – C <sub>12</sub>	TYPE 0	Diesel, Kerosene
C <sub>13</sub> – C <sub>16</sub>	TYPE 0	Jet Fuel, Kerosene, Atmospheric Gas Oil
C <sub>17</sub> – C <sub>25</sub>	TYPE 0	Gas Oil, Typical Crude
C <sub>25+</sub>	TYPE 0	Residuum, Heavy Crude, Lube Oil, Seal Oil
H <sub>2</sub>	TYPE 0	Hydrogen
H <sub>2</sub> S	TYPE 0	Hydrogen Sulfide
HF	TYPE 0	Hydrogen Fluoride
water	TYPE 0	Water
steam	TYPE 0	Steam
Acid	TYPE 0	Acid, Caustic
Aromatics	TYPE 1	Benzene, Toluene, Xylene, Cumene

AlCl <sub>3</sub>	TYPE 0	Aluminum Chloride
Pyrophoric	TYPE 0	Pyrophoric Materials
Ammonia	TYPE 0	Ammonia
Chlorine	TYPE 0	Chlorine
CO	TYPE 1	Carbon Monoxide
DEE	TYPE 1 (see Note 2)	Diethyl Ether
HCL	TYPE 0 (see Note 1)	Hydrogen Chloride
Nitric Acid	TYPE 0 (see Note 1)	Nitric Acid
NO <sub>2</sub>	TYPE 0 (see Note 1)	Nitrogen Dioxide
Phosgene	TYPE 0	Phosgene
TDI	TYPE 0 (see Note 1)	Toluene Diisocyanate
Methanol	TYPE 1	Methanol
PO	TYPE 1	Propylene Oxide
Styrene	TYPE 1	Styrene
EEA	TYPE 1	Ethylene Glycol Monoethyl Ether Acetate
EE	TYPE 1	Ethylene Glycol Monoethyl Ether
EG	TYPE 1	Ethylene Glycol
EO	TYPE 1	Ethylene Oxide
<p><i>Notes :</i></p> <p>1. HCL, Nitric Acid, NO<sub>2</sub> and TDI are TYPE 1 toxic fluids</p> <p>2. DEE is a TYPE 0 toxic fluid</p>		

2. Menentukan fasa fluida yang tersimpan, liquid atau vapour. Jika yang terdapat dalam unit bejana tekan merupakan fluida 2 fasa, maka di anjurkan untuk melakukan asumsi secara konservatif untuk liquid. Alternatif solusi yang bisa di ambil adalah menggunakan analisa konsekuensi level 2 untuk kasus tersebut.
3. Tentukan *fluids properties* (sifat fluida) yang tersimpan. Untuk yang berfasa *liquids*
  - Untuk fluida *liquid* tentukan :
    - $P_t$  - Densitas liquid, kg/m<sup>3</sup>, dapat ditentukan dari tabel 2.8
    - $AIT$  – *Auto-ignition Temperatur, K* dapat ditentukan dari tabel 2.8
  - Untuk yang berfasa vapour, hal yang perlu ditentukan adalah:
    - $MW$  – *molecular weight*

- $k$  – ideal gas specific heat ratio
- AIT – Auto-ignition Temperature

Untuk menentukan variabel di atas dapat ditentukan dengan dari tabel 2.8 dibawah ini berkenaan dengan fluida representatif.

Tabel 2. 8 Tabel sifat fluida representatif yang digunakan untuk level 1 CoF

Fluida	MW (lb/ftP 3P)	Liquid Density (lb/ft3)	NBP (°F)	Ambient State	Eq. for Cp	Konstanta Cp					AIT (PoPF)
						A	B	C	D	E	
C1-C2	23	15.639	-193	Gas	Note 1	12,3	1,15E+02	-2,87E-05	-1,30E-09	N/A	1036
C3-C4	51	33,61	-6,3	Gas	Note 1	2.632	0,3188	-1.347E-04	1,47E-05	N/A	696
C5	72	39,03	97	Liquid	Note 1	-3.626	0,4873	-2,60E-04	5,30E-08	N/A	544
C6-C8	100	42.702	210	Liquid	Note 1	-5.146	6,76E+02	-3,65E-04	7,66E-05	N/A	433
C9-C12	149	45.823	364	Liquid	Note 1	-8,5	1,01E+00	-5,56E-04	1,18E-04	N/A	406
C13-C16	205	47.728	502	Liquid	Note 1	-11,7	1,39E+00	-7,72E-04	1,67E-04	N/A	396
C17-C25	280	48.383	651	Liquid	Note 1	-22,4	1,94E+00	-1,12E-03	-2,53E-07	N/A	396
C25+	422	56.187	981	Liquid	Note 1	-22,4	1,94E+00	-1,12E-03	-2,53E-07	N/A	396
Water	18	62,3	212	Liquid	Note 3	2,76E+05	-2,09E+03	8.125	-1,41E-02	9,37E-06	N/A
Steam	18	62,3	212	Gas	Note 3	3,34E+04	2,68E+04	2,61E+03	8,90E+03	1,17E+03	N/A
Acid	18	62,3	212	Liquid	Note 3	2,76E+05	-2,09E+03	8.125	-1,41E-02	9,37E-06	N/A
H2	2	4.433	-423	Gas	Note 1	27,1	9,27E+00	-1,38E-05	7,65E-06	N/A	752
H2S	34	61.993	-75	Gas	Note 1	31,9	1,44E+00	2,43E-02	-1,18E-08	N/A	500
HF	20	60,37	68	Gas	Note 1	29,1	6,61E-01	-2,03E-06	2,50E-06	N/A	32000
CO	28	50	-312	Gas	Note 2	2,91E+04	8,77E+03	3,09E+03	8,46E+03	1,54E+03	1128
DEE	74	45	95	Liquid	Note 2	8,62E+04	2,55E+05	1,54E+03	1,44E+05	-6,89E+02	320
HCL	36	74	-121	Gas	---	---	---	---	---	---	N/A
Nitric Acid	63	95	250	Liquid	---	---	---	---	---	---	N/A
ALCL3	133,5	152	382	Powder	Note 1	4,34E+04	3,97E+04	4,17E+02	2,40E+04	N/A	1036
NO2	90	58	275	Liquid	---	---	---	---	---	---	N/A
Phosgene	99	86	181	Liquid	---	---	---	---	---	---	N/A
TDI	174	76	484	Liquid	---	---	---	---	---	---	1148
Methanol	32	50	149	Liquid	Note 2	3,93E+04	8,79E+04	1,92E+03	5,37E+04	8,97E+02	867
PO	58	52	93	Liquid	Note 2	4,95E+04	1,74E+05	1,56E+03	1,15E+05	7,02E+02	840
Styrene (Aromatic)	104	42,7	293	Liquid	Note 2	8,93E+04	2,15E+05	7,72E+02	9,99E+04	2,44E+03	914
EEA	132	61	313	Liquid	Note 2	1,06E+05	2,40E+05	6,59E+02	1,50E+05	1,97E+03	715
EE	90	58	275	Liquid	Note 2	3,25E+04	3,00E+05	1,17E+03	2,08E+05	4,73E+02	455
EG	62	69	387	Liquid	Note 2	6,30E+04	1,46E+05	1,67E+03	9,73E+04	7,74E+02	745
EO	44	55	51	Gas	Note 2	3,35E+04	1,21E+05	1,61E+03	8,24E+04	7,37E+02	804
Pyrophoric	149	45.823	364	Liquid	Note 1	-8,5	1,01E+00	-5,56E-04	1,18E-04	N/A	Note 3

Dalam menentukan nilai  $k$  dari variabel di atas, diperlukan nilai  $C_p$  sementara untuk  $C_p$  dari tabel di atas ditentukan dari persamaan *Note 1* maka persamaan untuk mencari nilai  $C_p$  dari keterangan tabel di atas adalah sebagai berikut :

$$C_p = A + BT + CT^3 + DT^3 \quad (2.7)$$

Dimana T dalam K dan  $C_p$  dalam J/kmol-K. Setelah nilai  $C_p$  didapatkan maka dapat mencari nilai  $k$  dengan persamaan di bawah ini :

$$k = \frac{C_p}{C_p - R} \quad (2.8)$$

- Selanjutnya menentukan fasa stabil fluida ketika dilepaskan ke ruang terbuka (atmosfer) serta fasa dalam alatnya menggunakan tabel 2.9

Tabel 2. 9 Pedoman Level 1 untuk menentukan Fasa Fluida

<i>Phase of Fluid at Normal Operating (Storage) Conditions</i>	<i>Phase of Fluid at Ambient (after release) Conditions</i>	<i>Determination of Final Phase for Consequence Calculation</i>
Gas	Gas	<i>model as gas</i>
Gas	Liquid	<i>model as gas</i>
Liquid	Gas	<i>model as gas unless the fluid boiling point at ambient condition is greater than 80PoPF, then model as liquid</i>
Liquid	Liquid	<i>model as liquid</i>

### 2.9.2 Pemilihan Ukuran Lubang Kebocoran

Dalam proses pemilihan ukuran lubang kebocoran, di dalam metode RBI membatasi jumlah size lubang kebocoran memungkinkan analisis dapat dikelola dengan baik, namun tetap merepresentasikan kisaran hasil yang masih relevan. Penggunaan ukuran lubang ini didasarkan pada jenis komponennya. Ukuran lubang kebocoran dibatasi hingga diameter maksimum 16 in. Diameter ini menunjukkan nilai praktis maksimum untuk mengkalkulasi laju kebocoran karena kegagalan yang amat besar dari komponen umumnya tidak mengikut sertakan disintegrasi dari peralatan. adapun prosedur kalkulasi pemilihan ukuran lubang kebocoran adalah sebagai berikut :

- Tentukan berdasarkan tipe komponen yang akan di periksa menggunakan RBI hal tersebut dilakukan untuk mencari diameter ukuran lubang kebocoran ( $d_n$ ). Berdasarkan API bagian 3 Annex

dijelaskan bahwa untuk ukuran lubang pada tiap tiap komponen, dimana bejana tekan menggunakan 4 ukuran lubang kebocoran. 4 ukuran lubang tersebut dijelaskan pada tabel 2.10

Tabel 2. 10 Release Hole Size (API RBI)

<i>Release Hole Number</i>	<i>Release Hole Size</i>	<i>Range of Hole Diameter (in)</i>	<i>Release Hole Diameter, dRnR (in)</i>
1	<i>Small</i>	0 - 1/4	$d_1 = 0,25$
2	<i>Medium</i>	>1/4 - 2	$d_2 = 1$
3	<i>Large</i>	>2 - 6	$d_3 = 4$
4	<i>Rupture</i>	> 6 inches	$d_4 = \min[D,16]$

- Menentukan frekuensi kegagalan umumnya,  $gff$  dan total frekuensi kegagalannya,  $gff_{total}$  berdasarkan tabel 2.1

### 2.9.3 Kalkulasi Laju Kebocoran

Proses perhitungan laju kebocoran bergantung pada sifat fisik dari fluida tersebut, fasa awal, kondisi proses operasi dan ukuran lubang kebocoran yang telah ditetapkan sebelumnya. Persamaan laju kebocoran yang benar harus dipilih, berdasarkan fasa material saat berada di dalam unit peralatan dan jenis kebocorannya (sonik atau subsonik). Dalam kasus penelitian ini fluida yang terdapat pada pengoperasionalan bejana tekan adalah vapor/gas, sehingga persamaan serta teori yang dimasukkan dalam BAB II ini adalah persamaan dan teori yang bersinggungan dengan fluida gas/vapor. Terdapat tahapan-tahapan dalam mengkalkulasi laju kebocoran yaitu :

- Ada dua cara untuk aliran gas atau uap melalui lubang; sonik untuk internal yang lebih tinggi, dan aliran subsonik untuk tekanan yang lebih rendah (secara nominal, 103,4 kPa (15 psig) atau kurang). Karena itu, uap tingkat rilis dihitung dalam proses dua langkah. Pada langkah pertama, jenis aliran ditentukan dan dilangkah kedua laju kebocoran dihitung menggunakan persamaan untuk jenis aliran spesifik. Transisi tekanan di mana jenis aliran berubah dari sonik ke subsonik ditentukan oleh Persamaan 2.9



$$P_{trans} = P_{atm} \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.9)$$

Dimana :

$P_{trans}$  = transition pressure (psia)

$P_{atm}$  = atmospheric pressure (psia)

$K$  =  $C_p/C_v$

Jika  $P_{trans}$  dari persamaan di atas sudah di temukan, maka selanjutnya menghitung laju kebocoran uap karena unit bejana tekan yang akan di analisa memiliki fluida kerja berupa LPG. Terdapat 2 persamaan yang dipergunakan tetapi hal tersebut harus memenuhi persyaratan tertentu, yaitu :

- a) Jika tekanan di dalam penyimpanan,  $P_s$ , di dalam bejana tekan tersebut lebih besar dari tekanan transisi,  $P_{trans}$ , maka laju kebocoran dihitung menggunakan persamaan (2.10). persamaan ini mengacu pada leju kebocoran gas pada laju *sonic* :

$$W_g(\text{sonic}) = C_d \cdot A \cdot P_s \sqrt{\left( \frac{k \cdot m \cdot g \cdot c}{R \cdot T_s} \right) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2.10)$$

Keterangan :

$W_g(\text{sonic})$  = gas discharge rate, sonic flow (lbs/sec)

$C_d$  = discharge coefficient (for gas  $C_d = 0,85$  to  $1$ )

$A$  = cross section area (in<sup>2</sup>)

$P_s$  = upstream pressure (psia)

$M$  = molecular weight (lb/lb-mol)

$R$  = gas constant (10,73 ft<sup>3</sup>- psia/lb-mol<sup>o</sup>R)

$T_s$  = upstream temperature (°R)

- b) Sedangkan jika tekanan dalam bejana tekan lebih kecil atau sama dengan  $P_{trans}$  maka laju kebocoran di kalkulasi dengan persamaan (2.11) di bawah ini dengan kondisi bahwa laju kebocoran gas merupakan jenis *subsonic*

$$W_n = \frac{C_d}{C_2} \cdot A_n \cdot P_s \sqrt{\left( \frac{MW \cdot g \cdot c}{R \cdot T_s} \right) \left( \frac{2 \cdot k}{k-1} \right) \left( \frac{P_{atm}}{P_s} \right)^{\frac{2}{k}} \left( 1 - \left( \frac{P_{atm}}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (2.11)$$

Keterangan :

$W_n$  = gas discharge rate, subsonic flow (lbs/sec)

- c) Dalam Persamaan diatas (2.10) dan (2.11), *discharge coefficient*,  $C_d$ , untuk aliran gas atau uap turbulen penuh dari lubang tajam biasanya dalam kisaran  $0.85 \leq C_d \leq 1.0$ . Nilai konservatif dari adalah direkomendasikan  $C_d = 0.90$

Kemudian setelah mendapatkan angka-angka dari persamaan di atas, maka selanjutnya dilakukan kalkulasi untuk menghitung area lubang kebocoran menggunakan persamaan berikut :

$$A_n = \frac{\pi d_n^2}{4} \quad (2.12)$$

#### 2.9.4 Kalkulasi Kebocoran Fluid Inventory Available

Dalam proses kalkulasi kebocoran yang terjadi pada inventori peralatan atas fluida yang tersimpan terdapat juga kemungkinan kebocoran pada setiap instrumentasi yang terpasang pada unit yang dilakukan inspeksi, sehingga dilakukan batasan-batasan dalam proses kalkulasi yang akan dilakukan dan hanya melakukan kalkulasi realistis yang menunjukkan jumlah kebocoran pada saat terjadi kebocoran. Panduan lebih lanjut untuk menghitung persediaan fluida yang tersedia pada kebocoran adalah sebagai berikut :

- Langkah 1 – Mengklasifikasi dan mengelompokkan komponen dan peralatan ke dalam inventori grup (*API RBI 581 Annex 3.A*)
- Langkah 2 – Kalkulasi massa fluida,  $mass_{comp}$  dari unit peralatan yang sedang di evaluasi
- Langkah 3 – Kalkulasi massa fluida di masing-masing komponen lain yang termasuk dalam inventaris kelompok,  $mass_{comp,i}$
- Langkah 4 - Kalkulasi massa fluida dalam kelompok inventaris,  $mass_{inv}$ , menggunakan Persamaan :

$$mass_{inv} = \sum_{i=1}^N mass_{comp,i} \quad (2.13)$$

- Langkah 5 – Kalkulasi laju aliran dari lubang dengan diameter 8” (203 mm) ,  $W_{max8}$  menggunakan persamaan sebelumnya yang digunakan untuk menghitung laju kebocoran. Hal ini merupakan aju aliran maksimum yang dapat masuk ke dalam alat dari alat sekitarnya dalam grup inventori.

- Langkah 6 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi penambahan massa fluida  $mass_{add,n}$  untuk setiap ukuran lubang kebocoran hasil dari aliran selama 3 menit dari grup inventori dengan menggunakan persamaan (2.14)

$$mass_{add,n} = 180 \min[W_n W_{max,3}] \quad (2.14)$$

- Langkah 7 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi massa yang tersedia menggunakan persamaan (2.15)

$$mass_{avail,n} = \min[\{mass_{comp} + mass_{avail,n}\}, mass_{inv}] \quad (2.15)$$

### 2.9.5 Kalkulasi Tipe Kebocoran

Dalam menentukan tipe kebocoran dalam metode RBI yang dijelaskan di dalam API RBI 581, terdapat 2 jenis tipe kebocoran yang dijelaskan yaitu tipe *continuous* dan tipe *instaneous*. Kedua tipe kebocoran tersebut didasarkan pada durasi penyebaran fluida terhadap area sekitar, pada tipe *instaneous* laju kebocoran terjadi seketika dan begitu cepat dan tersebar sehingga akan terjadi awan besar atau kolam dari hasil kebocoran fluida, sementara untuk tipe *continuous* pelepasan fluida akibat kebocoran relatif lebih lama dan memungkinkan fluida akan membentuk elips yang memanjang tetapi hal tersebut tergantung pada jenis cuaca. Prosedur untuk mengkalkulasi dan menentukan tipe kebocoran adalah sebagai berikut :

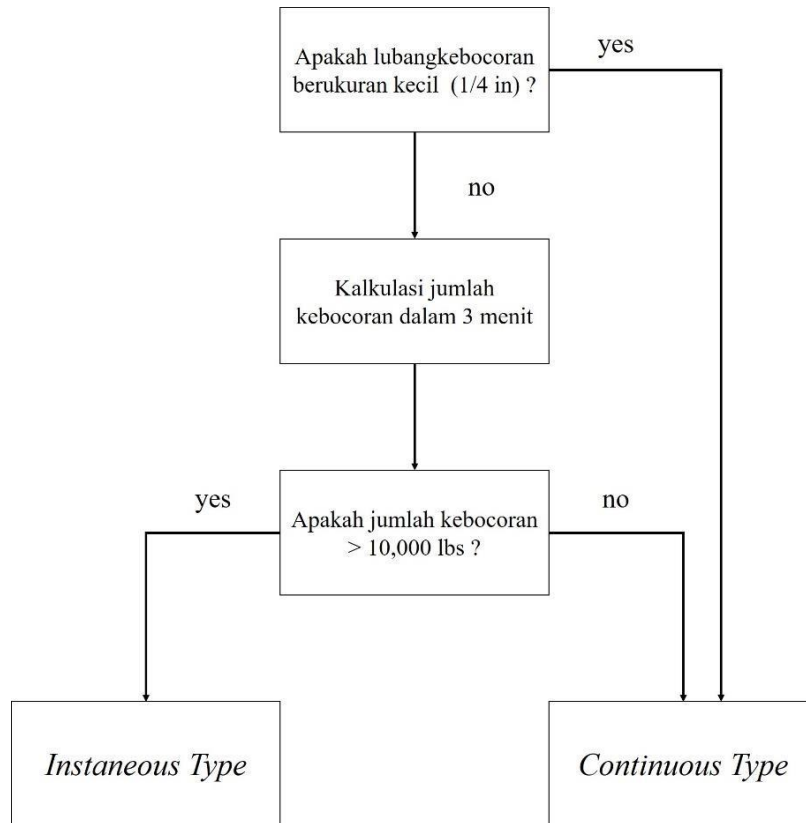
- Langkah 1 – Mengkalkulasi waktu yang dibutuhkan tiap lubang kebocoran untuk melepaskan fluida sebesar 10000 lbs (4,536 kgs) menggunakan persamaan (2.16)

$$t_n = \frac{C_3}{W_n} \quad (2.16)$$

- Langkah 2 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, tentukan tipe kebocoran *instaneous* atau *continuous* menggunakan kriteria dibawah ini :
  - Jika ukuran lubang kebocoran adalah 0,25 “ (6,35 mm) atau lebih kecil maka tipe dari kebocoran adalah tipe *continuous*

- Sementara jika  $tn \leq 180$  detik atau massa dari kebocoran melebihi 10000 lbs (4,536 kgs), maka tipe kebocorannya adalah tipe *Instaneous*

Dalam keterangan dan penjelasan di atas maka dalam proses menentukan tipe kebocoran dapat dengan sederhana di gambarkan dengan diagram alir dibawah ini:



Gambar 2. 7 Proses Menentukan Tipe Kebocoran

### 2.9.6 Estimasi Dampak Sistem Deteksi dan Isolasi

Dalam perusahaan yang sangat kompleks dan memiliki tingkat risiko yang tinggi diperlukan sistem deteksi, isolasi dan mitigasi yang di rancang untuk mengurangi efek dari kecelakaan atau bahkan mereduksi efek dari suatu kecelakaan yang sedang terjadi. Dalam API RBI 581 terdapat metode sederhana yang dapat dipergunakan untuk menilai tingkat efektifitas berbagai tipe sistem deteksi, isolasi dan mitigasi yang dipergunakan. Sistem deteksi, isolasi dan mitigasi di asumsikan dapat mempengaruhi laju kebocoran dengan 2 cara yaitu :

1. Sistem deteksi dan isolasi - Sistem di rancang untuk mendeteksi dan mengisolasi kebocoran dancenderung untuk melakukan reduksi durasi kebocoran dan laju kebocoran
2. Sistem mitigasi – Sistem mitigasi ini di rancang untuk melakukan mitigasi atau mereduksi konsekuensi dari kebocoran

Terdapat prosedur dalam API RBI 581 untuk menentukan dampak dari sistem deteksi dan isolasi dari alat adalah sebagai berikut :

- Langkah 1 – Tentukan sistem deteksi dan isolasi yang tersedia pada unit
- Langkah 2 - Gunakan tabel 2.11 untuk memilih klasifikasi dari sistem deteksi yang tersedia
- Langkah 3 - Gunakan tabel 2.11 untuk memilih klasifikasi dari sistem isolasi yang tersedia

Tabel 2. 11 Penilaian Sistem Deteksi dan Isolasi

<b><i>Type of Detection System</i></b>	<b><i>Detection Classification</i></b>
<i>Instrumentation designed specifically to detect material losses by changes in operating conditions (i.e., loss of pressure or flow) in the system</i>	A
<i>Suitably located detectors to determine when the material is present outside the pressure-containing envelope</i>	B
<i>Visual detection, cameras, or detectors with marginal coverage</i>	C
<b><i>Type of Isolation System</i></b>	<b><i>Isolation Classification</i></b>
<i>Isolation or shutdown systems activated directly from process instrumentation or detectors, with no operator intervention.</i>	A

<i>Isolation or shutdown systems activated by operators in the control room or other suitable locations remote from the leak.</i>	<i>B</i>
<i>Isolation dependent on manually-operated valves</i>	<i>C</i>

- Langkah 4 - Gunakan tabel 2.12 untuk menentukan faktor reduksi kebocoran, *factdi*, berdasarkan hasil dari langkah 2 dan langkah 3

Tabel 2. 12 Pengaturan Kebocoran berdasarkan sistem deteksi dan Isolasi

<i>System Classifications</i>		<i>Release Magnitude Adjustment</i>	<i>Reduction Factor, factdi</i>
<i>Detection</i>	<i>Isolation</i>		
<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Reduce release rate or mass by 25%</i>	<i>0,25</i>
<i>A</i>	<i>B</i>	<i>Reduce release rate or mass by 20%</i>	<i>0,2</i>
<i>A or B</i>	<i>C</i>	<i>Reduce release rate or mass by 10%</i>	<i>0,1</i>
<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Reduce release rate or mass by 15%</i>	<i>0,15</i>
<i>C</i>	<i>C</i>	<i>No adjustment to release rate or mass</i>	<i>0</i>

- Langkah 5 - Gunakan tabel 2.13 untuk menentukan total durasi kebocoran untuk setiap ukuran lubang kebocoran,  $I_{d_{max,n}}$  berdasarkan hasil dari langkah 2 dan langkah 3

Tabel 2. 13 Durasi Kebocoran berdasarkan pada Sistem Deteksi dan Isolasi

<i>Detection System Rating</i>	<i>Isolation System Rating</i>	<i>Maximum Leak Duration, <math>l_{dmax}</math></i>
A	A	20 minutes for 1/4 inch leaks 10 minutes for 1 inch leaks 5 minutes for 4 inch leaks
A	B	30 minutes for 1/4 inch leaks 20 minutes for 1 inch leaks 10 minutes for 4 inch leaks
A	C	40 minutes for 1/4 inch leaks 30 minutes for 1 inch leaks 20 minutes for 4 inch leaks
B	A or B	40 minutes for 1/4 inch leaks 30 minutes for 1 inch leaks 20 minutes for 4 inch leaks
B	C	1 hour for 1/4 inch leaks 30 minutes for 1 inch leaks 20 minutes for 4 inch leaks
C	A, B or C	1 hour for 1/4 inch leaks 40 minutes for 1 inch leaks 20 minutes for 4 inch leaks

### 2.9.7 Menentukan Laju dan Massa Kebocoran Untuk Konsekuensi

Dalam proses menentukan laju dan massa kebocoran perlu diperhatikan bahwa terdapat 2 jenis tipe kebocoran seperti yang sudah di singgung pada penjelasan sebelumnya yaitu tipe *instaneous* dan tipe *continuous*. Tahapan proses untuk menghitung laju kebocoran dan massa kebocoran untuk analisa konsekuensi adalah sebagai berikut :

1. Langkah 1 – Untuk setiap lubang kebocoran, kalkulasi laju kebocoran yang telah disesuaikan  $rate_n$  menggunakan persamaan :

$$rate_n = W_n(1 - fact_{di}) \quad (2.17)$$

2. Langkah 2 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi durasi kebocoran,  $Id_n$ , menggunakan persamaan :

$$Id_n = \min \left[ \left\{ \frac{mass_{avail,n}}{rate_n} \right\}, \{60, Id_{max,n}\} \right] \quad (2.18)$$

3. Langkah 3 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi massa kebocoran,  $mass_n$  menggunakan persamaan (2.19):

$$Id_n = \min \left[ \{rate_n \cdot Id_n\}, mass_{avail,n} \right] \quad (2.19)$$

### 2.9.8 Menentukan Konsekuensi Keterbakaran dan Ledakan

Persamaan untuk mengkalkulasi konsekuensi keterbakaran dan ledakan dapat dilakukan dengan mengembangkan persamaan untuk fluida representatif yang telah dijelaskan di sub bab sebelumnya. Area konsekuensi yang di estimasi dari suatu persamaan sebagai masukan menggunakan persamaan laju kebocoran (untuk kebocoran bertahap) atau kebocoran massa (untuk kebocoran instan). Prosedur untuk mengkalkulasi area konsekuensi dari keterbakaran dan ledakan adalah sebagai berikut :

1. Langkah 1 – Memilih faktor reduksi konsekuensi are mitigasi,  $fact_{mit}$  dari tabel 2.14



Tabel 2. 14 Pengaturan untuk Konsekuensi Keterbakaran dan Mitigasi

Mitigation System	Consequence Area Adjustment	Consequence Area Reduction Factor, $fact_{mit}$
Inventory blowdown, coupled with isolation system classification B or higher	Reduce consequence area by 25%	0,25
Fire water deluge system and monitors	Reduce consequence area by 20%	0,2
Fire water monitors only	Reduce consequence area by 5%	0,05
Foam spray system	Reduce consequence area by 15%	0,15

2. Langkah 2 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi faktor koreksi untuk nilai efisiensi energi,  $eneff_n$ , menggunakan persamaan:

$$eneff_n = 4 \cdot \log_{10}[C_4 mass_n] - 15 \quad (2.20)$$

3. Langkah 3 – Tentukan tipe fluida apakah tipe 1 atau tipe 2 berdasarkan tabel 2.7

4. Langkah 4 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi area konsekuensi kerusakan komponen *Auto-ignition Not Likely*, Kebocoran *Continuous* (AINL-CONT),  $CA_{cmd,n}^{AINL-CONT}$

- Tentukan nilai konstanta  $a$  dan  $b$  dari tabel 2.15. Fasa kebocoran ditentukan dalam sub bab *flammable fluids* yang digunakan untuk memastikan nilai konstanta benar

$$a = a_{cmd}^{AINL-CONT} \quad (2.21)$$

$$b = b_{cmd,n}^{AINL-CONT} \quad (2.22)$$

Tabel 2. 15 Konsekuensi Keterbakaran

Fluid	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
C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>	43.0	0.98			280.0	0.95			41.0	0.67			1079	0.62		
C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub>	49.48	1.00			313.6	1.00			27.96	0.72			522.9	0.63		
C <sub>5</sub>	25.17	0.99	536.0	0.89	304.7	1.00			13.38	0.73	1.49	0.85	275.0	0.61		
C <sub>6</sub> -C <sub>8</sub>	29.0	0.98	182.0	0.89	312.4	1.00	525.0	0.95	13.98	0.66	4.35	0.78	275.7	0.61	57.0	0.55
C <sub>9</sub> -C <sub>12</sub>	12.0	0.98	130.0	0.90	391.0	0.95	560.0	0.95	7.1	0.66	3.3	0.76	281.0	0.61	6.0	0.53
C <sub>13</sub> -C <sub>16</sub>			64.0	0.90			1023	0.92			0.46	0.88			9.2	0.88
C <sub>17</sub> -C <sub>25</sub>			20.0	0.90			861.0	0.92			0.11	0.91			5.6	0.91
C <sub>25</sub> +			11.0	0.91			544.0	0.90			0.03	0.99			1.4	0.99
H <sub>2</sub>	64.5	0.992			420.0	1.00			61.5	0.657			1430	0.618		
H <sub>2</sub> S	32.0	1.00			203.0	0.89			148.0	0.63			357.0	0.61		
HF																
Aromatics	17.87	1.097	103.0	1.00	374.5	1.055			11.46	0.667	70.12	1.00	512.6	0.713	701.2	1.00
Styrene	17.87	1.097	103.0	1.00	374.5	1.055			11.46	0.667	70.12	1.00	512.6	0.713	701.2	1.00
CO	0.107	1.752							69.68	0.667						
DEE	39.84	1.134	737.4	1.106	320.7	1.033	6289	0.649	155.7	0.667	5.105	0.919			5.672	0.919
Methanol	0.026	0.909	1751	0.934					28.11	0.667	1.919	0.900				
PO	14.62	1.114	1295	0.960					65.58	0.667	3.404	0.869				
EEA	0.002	1.035	117.0	1.00					8.014	0.667	69.0	1.00				
EE	12.62	1.005	173.1	1.00					38.87	0.667	72.21	1.00				
EG	7.721	0.973	108.0	1.00					6.525	0.667	69.0	1.00				
EO	31.03	1.069							136.3	0.667						
Pyrophoric	12.0	0.98	130.0	0.90	391.0	0.95	560.0	0.95	7.1	0.66	3.3	0.76	281.0	0.61	6.0	0.53

- Gunakan persamaan dibawah ini untuk mengkalkulasi area konsekuensi

$$CA_{cmd,n}^{AINL-CONT} = a(rate_n)^b \cdot (1 - fact_{mit}) \quad (2.23)$$

$$effrate_n^{AINL-CONT} = rate_n \quad (2.24)$$

- Langkah 5 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi area konsekuensi kerusakan komponen untuk *Auto-Ignition Likely, Continuous Release (AIL-CONT)*,  $CA_{cmd,n}^{AIL-CONT}$

- Gunakan persamaan untuk mengkalkulasi area konsekuensi :

$$CA_{cmd,n}^{AIL-CONT} = a(rate_n)^b \cdot (1 - fact_{mit}) \quad (2.25)$$

$$effrate_n^{AIL-CONT} = rate_n \quad (2.26)$$

6. Langkah 6 - Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi area konsekuensi kerusakan komponen untuk *Auto-Ignition Not Likely, Instantaneous Release* (AINL-INST),  $CA_{cmd,n}^{AINL-INST}$  menggunakan persamaan :

$$CA_{cmd,n}^{AINL-INST} = a(mass_n)^b \cdot \left( \frac{1-fact_{mit}}{eneff_n} \right) \quad (2.27)$$

$$effmass_n^{AINL-CONT} = mass_n \quad (2.28)$$

7. Langkah 7 - Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi area konsekuensi kerusakan komponen untuk *Auto-Ignition Likely, Instantaneous Release* (AIL-INST),  $CA_{cmd,n}^{AIL-INST}$  menggunakan persamaan:

$$CA_{cmd,n}^{AIL-INST} = a(mass_n)^b \cdot \left( \frac{1-fact_{mit}}{eneff_n} \right) \quad (2.29)$$

$$effmass_n^{AIL-CONT} = mass_n \quad (2.30)$$

8. Langkah 8 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi konsekuensi area cedera personil untuk *Auto-Ignition Not Likely, Continuous Release* (AINL-CONT),  $CA_{inj,n}^{AINL-CONT}$  menggunakan persamaan :

$$CA_{inj,n}^{AINL-CONT} = [a. (effrate_n^{AINL-CONT})^b]. (1 - fact_{mit}) \quad (2.31)$$

9. Langkah 9 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi konsekuensi area cedera personil untuk *Auto-Ignition Likely, Continuous Release* (AIL-CONT),  $CA_{inj,n}^{AIL-CONT}$  menggunakan persamaan :

$$CA_{inj,n}^{AIL-CONT} = [a. (effrate_n^{AIL-CONT})^b]. (1 - fact_{mit}) \quad (2.32)$$

10. Langkah 10 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi konsekuensi area cedera personil untuk *Auto-Ignition Not Likely, Instantaneous Release* (AINL-INST),  $CA_{inj,n}^{AINL-INST}$  menggunakan persamaan:

$$CA_{inj,n}^{AIL-INST} = [a. (effrate_n^{AINL-CONT})^b]. \left( \frac{1-fact_{mit}}{Eneff_n} \right) \quad (2.33)$$

11. Langkah 11 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi konsekuensi area cedera personil untuk *Auto-Ignition Likely, Instantaneous Release* (AIL-INST),  $CA_{inj,n}^{AIL-INST}$  menggunakan persamaan :

$$CA_{inj,n}^{AIL-INST} = [a. (effrate_n^{AIL-CONT})^b] \cdot \left( \frac{1-fact_{mit}}{Eneff_n} \right) \quad (2.34)$$

12. Langkah 12 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi *instantaneous/continuous blending*,  $fact_n^{IC}$  menggunakan persamaan :

Untuk tipe kebocoran *continuous*:

$$fact_n^{IC} = \min \left[ \left\{ \frac{rate_n}{c_5} \right\}, 1.0 \right] \quad (2.35)$$

Sementara untuk tipe kebocoran *Instantaneous* :

$$fact_n^{IC} = 1.0 \quad (2.36)$$

13. Langkah 13 – Selanjutnya menghitung *AIT Blending Factor*,  $fact^{AIT}$  menggunakan persamaan yang disesuaikan dengan sifat fluida :

- Untuk  $T_s + C_6 \leq AIT$

$$fact^{AIT} = 0 \quad (2.37)$$

- Untuk  $T_s + C_6 > AIT > T_s - C_6$

$$fact^{AIT} = \frac{(T_s - AIT + C_6)}{2 \cdot C_6} \quad (2.38)$$

- Untuk  $T_s - C_6 \geq AIT$

$$fact^{AIT} = 1 \quad (2.39)$$

14. Langkah 14 – Kemudian menghitung konsekuensi area dari kombinasi *continuous / instantaneous* berdasarkan nilai konsekuensi area yang telah di kalkulasi sebelumnya dan nilai  $fact^{AIT}_n$  dengan menggunakan persamaan persamaan di bawah ini :

$$CA_{cmd,n}^{AIL} = CA_{cmd,n}^{AIL-CONT} \cdot fact_n^{IC} + CA_{cmd,n}^{AIL-INST} \cdot (1 - fact_n^{IC}) \quad (2.40)$$

$$CA_{inj,n}^{AIL} = CA_{inj,n}^{AIL-CONT} \cdot fact_n^{IC} + CA_{inj,n}^{AIL-INST} \cdot (1 - fact_n^{IC}) \quad (2.41)$$

$$CA_{cmd,n}^{AINL} = CA_{cmd,n}^{AINL-CONT} \cdot fact_n^{IC} + CA_{cmd,n}^{AINL-INST} \cdot (1 - fact_n^{IC}) \quad (2.42)$$

$$CA_{inj,n}^{AINL} = CA_{inj,n}^{AINL-CONT} \cdot fact_n^{IC} + CA_{inj,n}^{AINL-INST} \cdot (1 - fact_n^{IC}) \quad (2.43)$$

15. Langkah 15 – Kemudian menghitung konsekuensi area *AIT Blended* berdasarkan hasil kalkulasi Langka 14 dengan menggunakan rumus berikut :

$$CA_{cmd,n}^{flam} = CA_{cmd,n}^{AIL} \cdot fact^{AIT} + CA_{cmd,n}^{AINL-INST} \cdot (1 - fact^{AIT}) \quad (2.43)$$

$$CA_{inj,n}^{flam} = CA_{inj,n}^{AIL} \cdot fact^{AIT} + CA_{inj,n}^{AINL-INST} \cdot (1 - fact^{AIT}) \quad (2.44)$$

16. Langkah 16 – Tentukan nilai akhir konsekuensi area untuk kerusakan komponen dan cedera personil berdasarkan hasil dari langkah 15 dengan menggunakan rumus berikut :

$$CA_{cmd}^{flam} = \left( \frac{\sum_{n=1}^4 gff_n \cdot CA_{cmd,n}^{flam}}{gff_{total}} \right) \quad (2.45)$$

$$CA_{inj}^{flam} = \left( \frac{\sum_{n=1}^4 gff_n \cdot CA_{inj,n}^{flam}}{gff_{total}} \right) \quad (2.46)$$

### 2.9.9 Konsekuensi Racun

Pada dasarnya cairan beracun mirip dengan bahan yang mudah terbakar karena tidak semua pelepasan racun menghasilkan dampak. seperti *hidrogen fluorida (HF)*, *amonia*, dan *klorin* hanya menimbulkan bahaya racun. Di sisi lain, beberapa beracun bahan seperti *hidrogen sulfida (H2S)* beracun dan mudah terbakar. Namun, bahan beracun apapun, jika dicampur dengan hidrokarbon, dapat menimbulkan bahaya yang mudah terbakar dan beracun. Konsekuensi racun di kalkulasi menggunakan analisa bahaya dalam konjungsi dengan model dispersi atmosferic yang sejenis dengan prosedur keterbakaran. Terdapat 10 bahan tambahan dalam kategori kimia beracun yang masuk dalam analisis konsekuensi level 1 yaitu :

1. *Aluminum Chloride (ALCL3) – Powder*
2. *Carbon Monoxide (CO) – Gas only*
3. *Hydrogen Chloride (HCL) – Gas only*
4. *Nitric Acid – Gas or Liquid*
5. *Nitrogen Dioxide (NO2) – Gas or Liquid*

6. *Phosgene – Gas or Liquid*
7. *Toluene Diisocyanate (TDI) – Liquid only*
8. *Ethylene Glycol Monoethyl Ether (EE) – Gas or Liquid*
9. *Ethylene Oxide (EO) – Gas only*
10. *Propylene Oxide (PO) – Gas or Liquid*

Dalam menentukan nilai konsekuensi area dari racun dapat digunakan tahapan-tahapan di bawah ini :

1. Langkah 1 – untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi efektifitas durasi racun yang bocor
2. Langkah 2 – tentukan prosentase racun dalam komponen material fluida yang bocor.
3. Langkah 3 – untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi laju kebocoran dan kebocoran massa menggunakan analisa racun menggunakan persamaan dalam API RBI 581
4. Langkah 4 – Untuk setiap ukuran lubang kebocoran, kalkulasi konsekuensi area racun untuk setiap ukuran lubang kebocoran
5. Langkah 5 – jika terdapat komponen racun tambahan dalam fluida campuran, maka langkah 1 sampai dengan langka 4 harus di ulang dengan setiap fluida yang terdapat pada komponen
6. Langkah 6 – tentukan final konsekuensi area beracun untuk kecelakaan personil

#### **2.9.10 Konsekuensi Tidak Mudah Terbakar dan Tidak Beracun**

Konsekuensi yang terkait dengan kebocoran fluida tidak mudah terbakar dan tidak beracun tidak separah dengan bahan lain, bagaimanapun, hal tersebut masih dapat menyebabkan cedera serius pada personel dan kerusakan peralatan. Konsekuensi tidak mudah terbakar tidak beracun dilakukan untuk material berupa dari uap/*steam*, asam/*acids*, atau *caustics*. Tahapan akhir untuk menentukan konsekuensi area fluida tidak mudah terbakar dan tidak beracun adalah dengan mengkalkulasi kemungkinan rata-rata beban konsekuensi individu untuk setiap ukuran lubang kebocoran.

### 2.9.11 Konsekuensi Kerusakan Area Komponen dan Cedera Personel

Pada tahapan ini area kerusakan komponen dan cedera personel didapat dari perhitungan konsekuensi keterbakaran dan ledakan, racun dan fluida tidak mudah terbakar & tidak beracun. Untuk menentukan nilai akhir area konsekuensi kerusakan komponen didapat dengan menggunakan persamaan :

$$CA_{cmd} = CA_{cmd}^{flam} \quad (2.47)$$

Karena kalkulasi untuk fluida tidak mudah terbakar dan tidak beracun tidak memiliki nilai konsekuensi maka nilai nya hanya di dapat dari nilai konsekuensi keterbakaran dan meledak. Selanjutnya untuk menentukan nilai akhir konsekuensi cedera personel di dapat menggunakan persamaan berikut :

$$CA_{inj} = \max[CA_{inj}^{flam}, CA_{inj}^{tx}, CA_{inj}^{nfnt}] \quad (2.48)$$

Setelah di dapatkan nilai akhir area konsekuensi dari cedera personel dan kerusakan komponen, nilai akhir dari area konsekuensi ditentukan berdasarkan nilai tertinggi antara nilai cedera personel dan kerusakan komponen.

### 2.10 Penentuan Risk Ranking

Pada umumnya untuk menentukan tingkat risiko dari suatu unit atau komponen yang dilakukan analisa risiko harus mendapatkan data dari nilai *Probability of Failure (PoF)* dan nilai *Consequences of Failure (COF)* yang selanjutnya hasil tersebut di tampilkan dalam matriks 5x5. Dalam matriks tersebut akan menjelaskan mengenai beberapa tingkat risiko yaitu *low risk*, *medium risk* dan *high risk*. Dalam menentukan tingkatan risiko tersebut di dapat dari hasil kalkulasi yang di sesuaikan dengan tabel kategori kemungkinan kegagalan dan konsekuensi kegagalan.

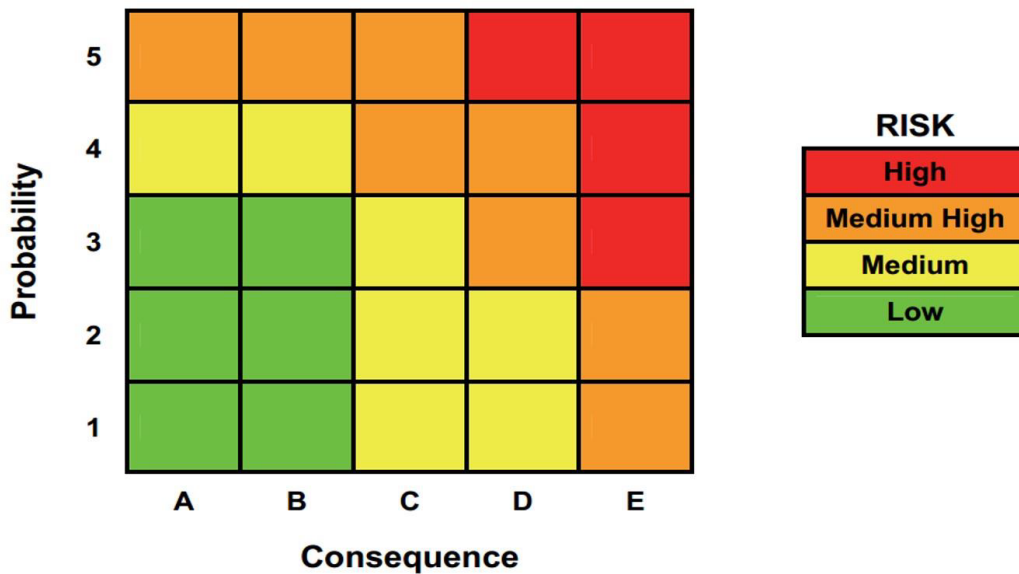
Tabel 2. 16 Kategori Kemungkinan Kegagalan dan Konsekuensi Kegagalan

Category	Probability Category (1,2)		Consequence Category (3)	
	Probability Range	Damage Factor Range	Category	Range (ft <sup>2</sup> )
1	$P_f(t, I_E) \leq 3.06E-05$	$D_{f-total} \leq 1$	A	$CA \leq 100$
2	$3.06E-05 < P_f(t, I_E) \leq 3.06E-04$	$1 < D_{f-total} \leq 10$	B	$100 < CA \leq 1,000$
3	$3.06E-04 < P_f(t, I_E) \leq 3.06E-03$	$10 < D_{f-total} \leq 100$	C	$1,000 < CA \leq 10,000$
4	$3.06E-03 < P_f(t, I_E) \leq 3.06E-02$	$100 < D_{f-total} \leq 1,000$	D	$10,000 < CA \leq 100,000$
5	$P_f(t, I_E) > 3.06E-02$	$D_{f-total} > 1,000$	E	$CA > 100,000$

Notes:

- POF values are based on a GFF of 3.06E-05 and an  $F_{MS}$  of 1.0.
- In terms of POF, see Part 1 Section 4.1.
- In terms of the total DF, see Part 2, Section 3.4.2.
- In terms of consequence area, see Part 3, Section 4.11.4.

Setelah didapatkan nilai kategori dari kemungkinan kegagalan dan konsekuensi kegagalan maka selanjutnya nilai tersebut dimasukkan kedalam matriks risiko untuk mengetahui tingkatan risikonya, seperti yang ditunjukkan gambar 2.8



Gambar 2. 8 Risk Matrix

### 2.11 Penentuan Interval Inspeksi

Tahapan metode untuk menentukan interval inspeksi dalam tahapan metode RBI ini tidak di jelaskan dan tidak di atur secara terperinci oleh *American Petroleum Institute* tetapi di dalam API RBI 581 di jelaskan bahwa untuk permasalahan penentuan interval inspeksi dikembalikan kepada *owner* dalam mengatur dan menjadwalkan proses inspeksi untuk unit tertentu. Karena pada



dasarnya tidak ada kalkulasi formula atau persamaan untuk menghitung jadwal inspeksi.

Perencanaan inspeksi berdasarkan risiko mengasumsikan bahwa di beberapa titik waktu, risiko seperti yang didefinisikan oleh formula dalam metode RBI akan mencapai atau melampaui area yang ditentukan pengguna atau target risiko keuangan. Kapan atau sebelum target risiko yang ditetapkan pengguna tercapai, inspeksi peralatan direkomendasikan berdasarkan mekanisme kerusakan komponen dengan *Damage Factor* tertinggi. Pengguna dapat menetapkan target tambahan untuk memulai inspeksi, seperti POF, DF, COF atau ketebalan. Selain itu, inspeksi dapat dilakukan semata-mata untuk mengumpulkan informasi guna mengurangi ketidakpastian di kondisi komponen atau berdasarkan evaluasi keteknikan dari kesesuaian untuk layanan lanjutan. Hasil RBI meskipun pemeriksaan komponen tidak mengurangi risiko yang melekat, pemeriksaan memberikan pengetahuan yang lebih baik kondisi komponen saat ini dan oleh karena itu dapat mengurangi ketidakpastian. Probabilitas hilangnya penahanan akan terjadi secara langsung berkaitan dengan kondisi komponen yang diketahui berdasarkan informasi dari inspeksi dan kemampuan untuk mengukur kerusakan secara akurat. Pengurangan ketidakpastian dalam keadaan kerusakan suatu komponen merupakan fungsi dari efektivitas inspeksi untuk mengidentifikasi jenis dan mengukur tingkat kerusakan. Rencana inspeksi dirancang untuk mendeteksi dan mengukur jenis kerusakan tertentu yang diharapkan seperti penipisan lokal atau umum, keretakan, dan jenis kerusakan lainnya. Sebuah teknik pemeriksaan yang sesuai untuk pemeriksaan umum tidak akan efektif dalam mendeteksi dan mengukur kerusakan karena penipisan atau retakan lokal. Oleh karena itu, efektivitas inspeksi merupakan fungsi dari metode inspeksi dan luas cakupan yang digunakan untuk mendeteksi jenis kerusakan yang diharapkan.

Jenis inspeksi menurut API 510 *Pressure Vessel Inspection Code* terbagi menjadi 3 jenis yaitu inspeksi internal, *on-stream* dan eksternal. Perbedaan dari ketiga jenis inspeksi tersebut adalah internal inspeksi dilakukan pada saat mesin atau unit dalam kondisi *shut down* sehingga dapat dilakukan pemeriksaan sampai bagian dalam, untuk inspeksi *on-stream* dilakukan pada saat peralatan atau unit sedang beroperasi sedangkan eksternal inspeksi dilakukan hanya menggunakan

*visual* untuk memeriksa apakah kondisi struktural atau eksternal dari alat tersebut dalam kondisi yang baik dan layak digunakan. Dalam API 510 dijelaskan bahwa untuk inspeksi internal dan *on-stream* yang dilakukan pada unit bejana tekan dapat dilakukan maksimal 10 tahun atau setengah dari hasil kalkulasi *remaining life* (sisa umur) dari peralatan. kalkulasi untuk mencari sisa umur pakai dapat menggunakan formula persamaan berikut :

$$\text{Remaining life} = \frac{t_{\text{actual}} - t_{\text{required}}}{\text{Corrosion rate}} \quad (2.49)$$

Sementara untuk jenis inspeksi tipe eksternal pada bejana tekan harus dilakukan maksimal 5 tahun sekali.

## 2.12 Metode Inspeksi

Metode inspeksi merupakan tahapan, cara serta metode yang dipergunakan untuk mendapatkan informasi, suatu nilai dan kondisi alat yang di inspeksi. Dalam pengertian ini metode inspeksi akan sangat berpengaruh terhadap nilai dari penilaian alat tersebut sehingga proses inspeksi haru memiliki nilai dengan tingkat keefektifan yang tinggi. Kategor keefektifan inspeksi untuk tiap faktor kerusakan dijelaskan pada API RBI 581 disertai dengan contohnya. Metode yang umum dipergunakan dalam proses inspeksi antara lain *ultrasonic thickness measurement, radiography, magnetic particle test, liquid penetrant test, visual test, eddy curent test dsb*. Semua metode tersebut bersifat *Non- Destructive Examination (NDE)*. Dalam menentukan metode inspeksi yang tepat semua hal itu harus di dasari pada faktor kerusakan yang mungkin terjadi pada unit atau alat tersebut.

## 2.11 Penelitian Sebelumnya

1. Adi Nugraha (2016), *Studi Aplikasi Risk-Based Inspection (RBI) Menggunakan API 581 Pada Fuel Gas Scrubber*. Dalam penelitian ini metode RBI diaplikasikan pada bejana tekan jenis *Fuel Gas Scrubber* yang di instalasi pada kilang minyak dan gas bumi
2. Moamar Al Qathafi (2015), *Studi Aplikasi Metode Risk Based Inspection (RBI) Semi-Kuantitatif API 581 Pada Production Separator*. Penelitian ini menghasilkan *medium risk* pada 24 bagian *production separator*

3. Ahmad Fauzan R. Azhar (2007), *Analisa Risiko Offshore Pipeline Dengan Menggunakan Metode RBI (Risk Based Inspection)*. Penelitian ini mengimplementasi metode RBI pada pipa penyalur yang di instalasi di lepas pantai dengan melakukan segmentasi pada pipa penyalur tersebut.
4. Dyah Ariana L (2016) *Analisis Remaining Life dan Penjadwalan Program Inspeksi pada Pressure Vessel dengan Menggunakan Metode Risk Based Inspection (RBI)*. Penelitian ini menganalisa 4 unit bejana tekan sekaligus dengan hasil bsear risiko sebesar 17,732 ft<sup>2</sup> dan rencana inspeksi selanjutnya di tahun ke 9
5. James Tinambunan (2013), *Analisis Risiko Pressure Vessel Dengan Risk Based Inspection API 581 dan Studi Eksperimental Karakteristik Korosi Bahan Shell Pressure Vessel Pada Media Gas H<sub>2</sub>S di HESS (Indonesia-Pangkah) Ltd.* Penelitian ini diaplikasikan pada 15 unit bejana tekan yang menghasilkan tingkat risiko medium dan uji coba eksperimen untuk melihat laju korosi.
6. Viktor Naubnome (2019) *Inspeksi Berbasi Risiko dan Penentuan Umur Sisa Lining Reaktor UDC 101 PT Pupuk Kijang*. Penelitian menerapkan metode RBI pada perusahaan non-migas dan menghasilkan nilai risiko medium pada bejana tekan tipe reaktor
7. Renie Adinda Pitalokha (2016) *Kajian Risk Based Inspection untuk Separator dan Heat Exchanger pada Liquefied Natural Gas Plant*. Penelitian ini menghasilkan tingkat risiko rendah pada *separator* dan *heat exchanger* tipe *after cooler*
8. Nisrina Fathnin (2018), *Kategori Risiko, Estimasi Umur Sisa dan Usulan Jadwal Inspeksi pada Storage Tank Menggunakan Metode Risk-Based Inspection pada PT. XYZ*. Penelitian ini dipalिकासikan pada *atmospheric storage tank* yang difungsikan untuk penyimpanan sementara *crude oil*
9. Gunawan Dwi Haryadi (2019), *Penilaian Risiko dan Penentuan Sisa Umur Terhadap Pipa Gas Tee 24" di PT. X dengan Menggunakan*

*Metode Risk Based Inspection*. Penelitian ini menggunakan metode RBI untuk menentukan tingka risiko pada pipa gas dengan pembagian segmentasi pada pipa tersebut.

10. Putri Ratnasari (2019), *Penilaian Risiko, Estimasi Interval Inspeksi dan Metode Inspeksi pada Hydrocarbon Piping Menggunakan Metode Risk Based Inspection (RBI)*. Penelitian ini menerapkan metode RBI pada pipa hidrokarbon dengan hasil 16 % risiko pada *low-risk* dan 84% pada *medium-risk*.
11. K. Elaya Perumal (2014) *Corrosion Risk Analysis, Risk Based Inspection and a Case Study Concerning a Condensate Pipeline*. Penelitian ini diterbitkan di jurnal internasional dengan memfokuskan literatur pada pipa penyalur yang di fungsikan untuk fluida berjenis *condensate*.
12. Guanjun Wang, et. al (2011), *Risk Based Inspection on the Equipment of Low Density Polyethylene*. Aplikasi RBI dapat menghasilkan dan memperkirakan ada 90% bejana tekan dan pipa berada pada kategori risiko tinggi (*high-risk*).
13. Huy Truong Ba, et. al (2020) *Condition-Based Inspection Policies for Boiler Heat Exchangers*. Penelitian yang dilakukan di Australia ini mengkombinasikan antara *risk based* dan *condition based* untuk *boiler* dan *heat exchangers*.
14. N. Defteraios, et. al (2019) *Hydrogen Explosion Incident Mitigation in Steam Reforming Units Through Enhanced Inspection and Forecasting Corrosion Tools Implementation*. Penelitian ini merupakan hasil mitigasi atas insiden ledakan hidrogen pada *steam units*.
15. Rustam Abubakirov, et. al (2019) *A Risk Based Approach to Determination of Optomal Inspection Intervals for Buried Oil Pipeline*. Merupakan hasil pendekatan literatur RBI untuk pipa penyalur dalam kondisi terkubur.

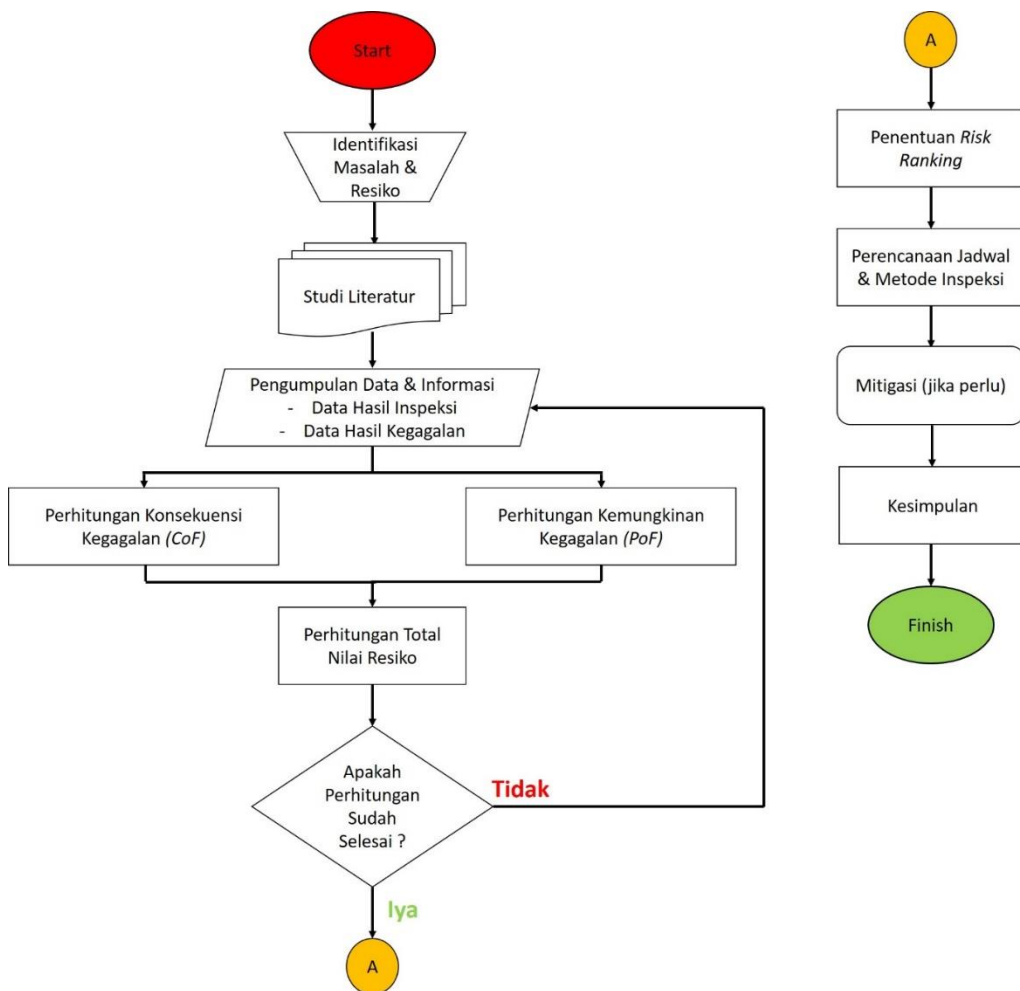
16. Thomas Ying-Jeh Chen, et al. (2019) *Optimizing Inspection Routes in Pipelines Networks* . Penelitian ini mengoptimalisasi metode untuk pipa penyalur yang memiliki percabangan yang rumit.
17. Karan Bhatia, et. al (2019) *Dynamic Risk-Based Inspection Methodology*. Hasil Penelitian ini membahas dinamika perkembangan metodologi RBI pada aplikasi tertentu.
18. Abdul Hameed (2015) *A Risk-based Shutdown Inspection and Maintenance Interval Considering Human Error*. Merupakan hasil penelitian dari implementasi RBI dengan mempertimbangkan kesalahan manusia.

# BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

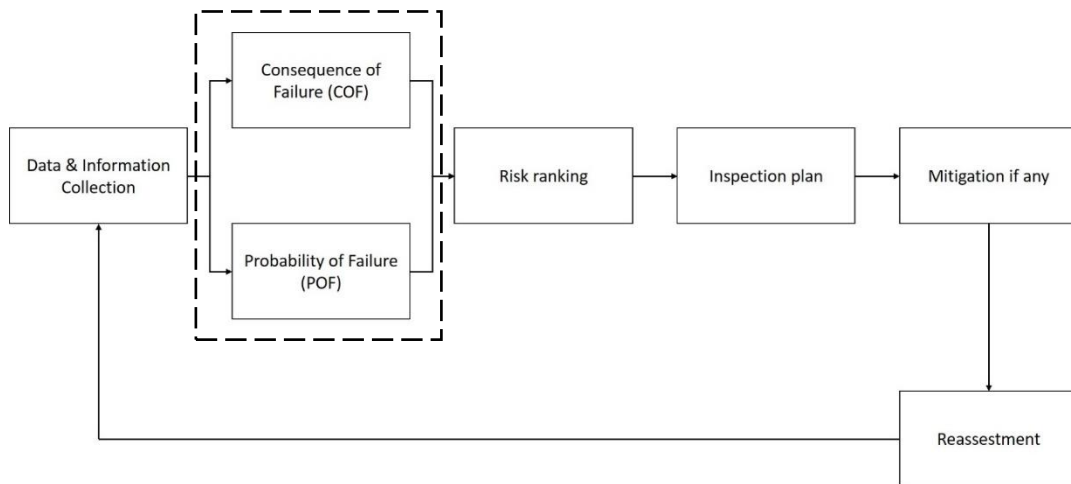
### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Metodologi penelitian yang dipergunakan dalam penelitian ini tergambar dalam diagram alir di bawah ini :



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Pada umum nya diagram alir penelitian di atas mengadopsi diagram alir penelitian general untuk proses penelitian *Risk Based Inspection* seperti diagram dibawah ini :



Gambar 3. 2 Alur Kerja RBI

Proses kalkulasi dan analisa pada dasarnya menggunakan alur kerja di atas, baik itu untuk kualitatif, semi kuantitatif atau kuantitatif.

### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat penelitian ini dilakukan di Stasiun Pengisian Bulk Elpiji (SPBE) yang berlokasi di Langsa, Aceh Timur dan di Institut Sains dan Teknologi Nasional (ISTN) Jakarta yang dilakukan selama durasi 6 bulan penelitian.

### 3.3 Time Schedule Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama rentang durasi 6 bulan dengan tahapan – tahapan yang di jabarkan dalam tabel time schedule di bawah ini :

Tabel 3. 1 Time Schedule Penelitian

No	Kegiatan	Waktu Penelitian																							
		Bulan ke 1				Bulan ke 2				Bulan ke 3				Bulan ke 4				Bulan ke 5				Bulan ke 6			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Penyusunan dan uji proposal Tesis	█	█	█	█																				
2	Pengurusan administrasi penelitian					█	█	█	█																
3	Identifikasi Masalah & Pengumpulan data									█	█	█	█												
4	Observasi Lapangan													█	█	█	█								
5	Analisis dan Penafsiran Data													█	█	█	█								
6	Penyusunan Laporan Akhir Tesis																	█	█	█	█				
7	Seminar Hasil & Publikasi																					█	█	█	█
8	Perbaikan Hasil Penelitian																								
9	Sidang Tesis																					█	█	█	█
10	Perbaikan Hasil Sidang Tesis																								
11	Pengumpulan Tesis																								

### **3.4 Kerangka Penelitian**

#### **3.4.1 Identifikasi Masalah & Risiko**

Dalam Tahapan ini proses dimana seluruh aspek permasalahan di telusuri dan pengembangan aspek-aspek teknis lainnya untuk menunjang proses penelitian disertai penjelasan mengenai aspek kebermanfaatan, tujuan serta batasan batasan penelitian.

#### **3.4.2 Studi Literatur**

Di tahap ini semua literatur pendukung dan informasi terkait proses penelitian seperti jurnal penelitian mengenai RBI, *Probability of Failure (PoF)*, *Consequence of Failure (CoF)*, Evaluasi risiko, serta data inspeksi pada *LPG Storage Tank* dikumpulkan dan di pelajari agar mendapat dasar keilmuan untuk menunjang proses penelitian mengenai evaluasi risiko.

#### **3.4.3 Observasi (Pengumpulan Data & Informasi)**

Pada tahapan ini proses observasi ke lapangan dilakukan, hal itu bertujuan untuk mendapatkan data teknis seaktual mungkin berdasarkan hasil observasi dilapangan. Data data yang di ambil dalam proses observasi ke lapangan antara lain:

- *Piping & Intrument Diagram*
- *Process Flow Diagram*
- *As Built Drawing*
- *Historical Inspection Report*
- *UT Thickness Measurement*
- *Visual Documentation.*

#### **3.4.4 Kalkulasi *Probability of Failure (PoF)* dan Kalkulasi *Consequence of Failure (CoF)***

Dalam tahapan ini proses kalkulasi terbagi menjadi 2 macam yaitu kalkulasi dari aspek kemungkinan terjadi nya kegagalan (PoF) dan kalkulasi dari aspek konsekuensi kegagalan (CoF). Data data yang dipergunakan untuk proses kalkulasi di dapat dari hasil observasi dan inspeksi ke lapangan. Proses kalkulasi kemungkinan kegagalan (PoF) yang terjadi dapat berdasarkan pada salah satu atau beberapa faktor kerusakan yang tercantum dalam API RBI 581, diantaranya:



- *Stress Corrosion Cracking (SCC)*
- *High Temperature Hydrogen Attack*
- *Mechanical Fatigue*
- *Thinning*
- *Component Lining*
- *External Damage*
- *Brittle Fracture*
- *Dsb.*

Faktor faktor kerusakan yang terdapat pada API RBI 581 di sesuaikan dengan kondisi alat seaktual mungkin agar hasil kalkulasi dapat merepresentasikan faktor kerusakan pada alat yang dilakukan observasi. Sementara untuk proses kalkulasi Konsekuensi Kegagalan menggunakan API RBI 581 didapatkan dengan menganalisis aspek-aspek dibawah ini :

- *Representative Fluid*
- *Selecting a Set of Hole Size*
- *Estimating the Total Amount*
- *Estimating Release Rate*
- *Determining the Type of Release*
- *Determining impact from detection system and isolation*
- *Calculation Consequences of burning and explosion*
- *Determining Toxic and Non Toxic Fluids (if Any)*
- *Determining Consequences of Failure Componen and Personeel Injury*
- *Determining the Final Phase of Fluid*
- *Evaluating Post-Leak Responsibilities*
- *Determining of Consequences of the Release*
- *Financial Risk Evaluation (if needed)*

### **3.4.5 Kalkulasi Total Risiko**

Dalam tahapan ini data hasil kalkulasi dari *Probability of Failure (PoF)* dan *Consequence of Failure* digunakan untuk proses kalkulasi dan menentukan tingkat risiko yang di dapat dan di sesuaikan dalam matriks risiko.

### **3.4.6 Penentuan Risk Ranking**

Dalam tahapan ini hasil kalkulasi sebelumnya dari *probability of failure*, *consequence of failure* dan *risk total* di gunakan untuk menentukan *risk ranking* dengan *output* penilaian berupa level risiko yaitu *low risk*, *medium risk*, atau *high risk*.

### **3.4.7 Penentuan Jadwal dan Metode Inspeksi**

Tujuannya adalah menentukan jadwal dan metode yang cocok dengan hasil analisa dan kalkulasi dari tahapan-tahapan sebelumnya. Sehingga di dapat metode inspeksi yang cocok dan jadwal inspeksi yang sesuai dengan tingkat risiko pada alat yang di analisis.

### **3.4.8 Mitigasi**

Tahapan ini bersifat opsional ketika hasil kalkulasi dan analisis menunjukkan tingkat risiko yang tinggi dan berbahaya maka perlu dilakukan upaya-upaya dan tindakan mitigasi, tetapi jika hasil kalkulasi menunjukkan *risk ranking* yang rendah maka tindakan mitigasi tidak perlu dilakukan hanya perlu dilakukan inspeksi berkala dan program pemeliharaan yang berdasarkan hasil analisis risiko.

### **3.4.9 Kesimpulan**

Berisi tentang hasil penelitian dan pencapaian hasil serta rekomendasi dan anjuran peneliti atas penelitian ini untuk bahan rekomendasi atas tindakan pemeliharaan dan inspeksi selanjutnya berdasarkan tingkat risiko nya.

## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Observasi & Inspeksi

Setelah melakukan studi literatur yang cukup dan merumuskan permasalahan yang ada selanjutnya dilakukan proses observasi dan inspeksi ke lapangan agar mendapatkan data-data yang cukup untuk proses Analisa RBI Semi-Kuantitatif. Dari hasil observasi dan inspeksi di lapangan maka di dapat data teknis dari *LPG Storage Tank* adalah sebagai berikut :

*Tabel 4. 1 Data Teknis*

<i>Design Data</i>		
<i>No.</i>	<i>Description</i>	<i>Results</i>
1	<i>Service</i>	<i>LPG Storage Tak Cap. 50 T</i>
2	<i>Standard &amp; Code</i>	<i>ASME Sec. VIII Div. 1 Lat. Edition</i>
3	<i>Capacity</i>	<i>50 Ton</i>
4	<i>Fluid</i>	<i>LPG</i>
5	<i>Design Pressure (Psi)</i>	<i>250,33</i>
6	<i>Design Temperature (°F)</i>	<i>122</i>
7	<i>Operating Pressure (Psi)</i>	<i>120,89</i>
8	<i>MAWP</i>	<i>250,33 Psi.G @ 122 °F</i>
9	<i>MDMT</i>	<i>21,2 °F @ 250,33 Psi.G</i>
10	<i>Test Pressure (Psi)</i>	<i>327,14</i>
11	<i>Pneumatic Test (Psi)</i>	<i>-</i>
12	<i>Post Weld Heat Treatment</i>	<i>None</i>
13	<i>Radiograph</i>	<i>Full RT</i>
14	<i>Corrosion Allowance (mm)</i>	<i>0</i>
15	<i>Joint Efficiency (shell/head)</i>	<i>1,0 / 1,0</i>

16	<i>Painting</i>	<i>Surface Only</i>
17	<i>Insulation (in)</i>	<i>None</i>
18	<i>Year Built</i>	<i>2008</i>
19	<i>Year Use</i>	<i>2009</i>
20	<i>Year of Last Inspection</i>	<i>2017</i>
21	<i>Size (in)</i>	<i>128,19 in (ID) x 432,28 in (S/S)</i>
22	<i>Radius (in)</i>	<i>64,41</i>
23	<i>Factor K</i>	<i>1</i>
24	<i>Material of Shell</i>	<i>SA-516 Gr. 70</i>
25	<i>Material of Head</i>	<i>SA-516 Gr. 70</i>
26	<i>Material of Nozzle</i>	<i>SA-106 Gr. B</i>
27	<i>Material of Flange</i>	<i>SA-105</i>
28	<i>Nominal Thickness (mm)</i>	<i>0,87 (shell) / 0,55 (head)</i>
29	<i>Previous Thickness (mm)</i>	<i>0,86 (shell) / 0,55 (head)</i>
30	<i>Max. Allowable Stress (Psi)</i>	<i>20000 (shell &amp; head)</i>

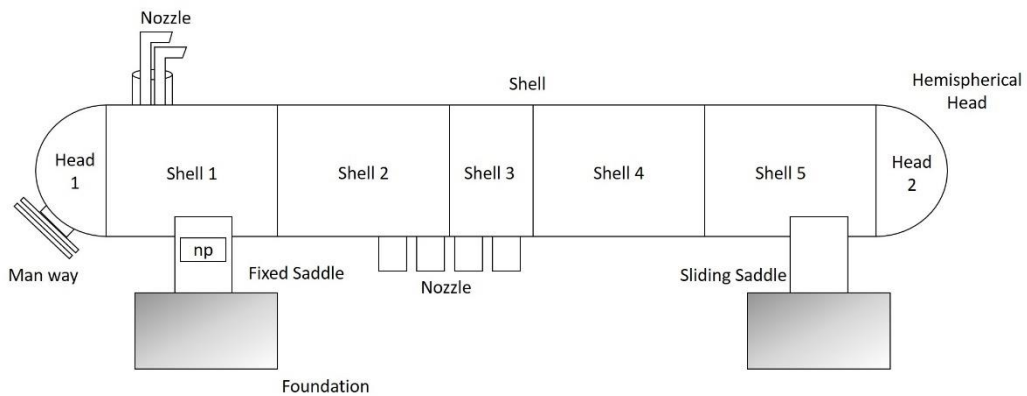
Selain melakukan observasi dan inspeksi terhadap *LPG Storage Tank 50 Ton*, proses lainnya yaitu penelaahan dokumen yang bertujuan untuk mendapatkan data dan informasi pendukung dari *LPG Storage Tank*. Data dan informasi pendukung yang dimaksud adalah data *mechanical properties & chemical composition*. Data tersebut di dapat dari sertifikat material dari *LPG Storage Tank*, data hasil telaah adalah sebagai berikut :

Tabel 4. 2 Data komposisi kimia dan mekanikal properti

Komposisi %	Head (SA-516 Gr. 70)	Shell (SA-516 Gr. 70)	Nozzle (SA-106 Gr. B)
C	0,22	0,23	0,30 max
Si	0,27	0,26	0,10 min
Mn	1,07	1,04	0,29 – 1,06
P	0,017	0,012	0,035 max
S	0,008	0,008	0,035 max
Nb	< 0,010	< 0,010	-

Cu	0,02	0,03	0,40 max
Cr	0,03	0,04	0,40 max
Ni	0,01	0,02	0,40 max
Mo	< 0,01	< 0,01	0,15 max
V	< 0,005	< 0,005	0,08 max
Al	0,036	0,035	-
Ti	< 0,005	< 0,005	-
N	0,006	0,005	-
CE	0,41	0,42	-
Yield Stress	350 N/mm <sup>2</sup>	329 N/mm <sup>2</sup>	-
Tensile Stress	519 N/mm <sup>2</sup>	520 N/mm <sup>2</sup>	-
Elongation Break	28 % (on 200 mm)	28 % (on 200 mm)	-

Selain melakukan observasi dan inspeksi pada *LPG Storage Tank* dilakukan pula pengujian ketebalan menggunakan *ultrasonic thickness test*. Proses pengukuran dilakukan pada setiap *pressure part* dengan 4 sudut yang berbeda yaitu 0°, 90°, 180° dan 270°. Titik pengujian ketebalan di tampilkan dalam gambar di bawah ini :



Gambar 4. 1 Sketsa LPG Storage Tank 50 T

Dari sketsa di atas terdapat 5 *shell* dan 2 *head* yang perlu di ambil data pengujian ketebalannya sehingga jika di total terdapat 28 titik pengujian ketebalan pada *shell* & *head* serta terdapat 13 titik pegujian ketebalan pada *nozzle*. Data pengujian ketebalan tersebut di tampilkan dalam table di bawah ini :

Tabel 4. 3 Data Ketebalan Pemeriksaan Aktual

Spot Thickness	Ketebalan					
	Nominal (in)	Aktual (mm)				
		0°	90°	180°	270°	Tengah
Head 1	0,551181	0,54921	0,55078	0,55039	0,55	0,55
Head 2	0,551181	0,55078	0,55	0,55039	0,55039	0,54960
Shell 1	0,86614	0,86574	0,86535	0,86496	0,86535	-
Shell 2	0,86614	0,86574	0,86220	0,86456	0,86456	-
Shell 3	0,86614	0,86496	0,86535	0,86535	0,86535	-
Shell 4	0,86614	0,86535	0,86574	0,86496	0,86496	-
Shell 5	0,86614	0,86574	0,86417	0,86574	0,86417	-
Manhole	0,551181	0,55039	0,55	0,55039	0,55039	-
Nozzle 1	1,76496	1,76377	1,76574	1,76377	1,76456	-
Nozzle 2	2,63326	2,62992	2,63188	2,62992	2,63188	-
Nozzle 3	1,97736	1,97637	1,97637	1,97677	1,97637	-
Nozzle 4a	1,69763	1,69685	1,69685	1,69724	1,69842	-
Nozzle 4b	1,69763	1,69685	1,69724	1,69763	1,69842	-
Nozzle 5	1,97736	1,97637	1,97677	1,97716	1,97677	-
Nozzle 6	2,63326	2,62992	2,62992	2,63031	2,63307	-
Nozzle 7	2,26673	2,26574	2,26771	2,26574	2,26574	-
Nozzle 8	1,69763	1,69685	1,69724	1,69763	1,69803	-
Nozzle 9	1,69763	1,69842	1,69881	1,69881	1,69803	-
Nozzle 10	1,69763	1,69842	1,69763	1,69724	1,69724	-

#### 4.2 Inspeksi Berbasis Risiko

Dalam proses penelitian ini metode inspeksi berbasis risiko yang dipergunakan mengacu pada teori dan tahapan yang terdapat pada *API RBI 581 Latest Edition*. Yang berfungsi untuk mendapatkan nilai dari *Probability of Failure (PoF)* yang terdapat pada *Part 2 – Determination of Probability of Failure in An API RBI Assessment* dan *Consequence of Failure (CoF)* yang di dapatkan dari bagian *Part 3 – Consequence of Failure Analysis in An API RBI Assessment*. Sehingga diharapkan dari kedua tahapan dan analisis tersebut didapatkan nilai estimasi risiko dari *LPG Storage Tank*

### 4.3 Analisa Kemungkinan Kegagalan (*Probability of Failure – PoF*)

Berdasarkan teori dan persamaan yang terdapat pada *API RBI 581*, variable-variabel yang harus di tentukan terlebih dahulu sebelum mendapatkan nilai dari PoF adalah Frekuensi Kegagalan Umum (*gff*), Faktor Kerusakan (*DFm*) dan nilai dari Sistem Manajemen Faktor (*Fms*). Hal tersebut juga sesuai dengan dasar teori yang telah tercantum dalam BAB II dalam tugas akhir tesis ini.

#### 4.3.1 Kalkulasi Frekuensi Kegagalan Umum (*Generic Failure Frequency*)

Untuk menentukan nilai dari frekuensi kegagalan umum (*Generic Failure Frequencies*) harus terlebih dahulu menentukan jenis unit atau *equipment* yang dilakukan proses analisa RBI, berdasarkan hasil observasi dan inspeksi yang telah dilakukan di dapat bahwa *LPG Storage Tank* adalah berjenis bejana tekan atau *Pressure Vessel* sehingga menurut tabel 2.1 pada BAB II maka di dapat bahwa nilai untuk Frekuensi Kegagalan Umum (*gff*) adalah :

Tabel 4. 4 Hasil Nilai GFF Total untuk *LPG Storage Tank*

<i>Service</i>	<i>Type</i>	Nilai <i>Generic Failure Frequencies</i> ( <i>Failure/year</i> )
<i>LPG Storage Tank</i>	<i>Pressure Vessel</i>	0,0000306

#### 4.3.2 Kalkulasi Faktor Kerusakan (*Damage Factor - Df*)

Selanjutnya adalah menentukan dan mengkalkulasi nilai dari *Damage Factor* atau faktor kerusakan yang kemungkinan terjadi pada *LPG Storage Tank*. Data di dapat dari hasil observasi dan inspeksi visual terhadap *LPG Storage Tank*. Dalam menentukan faktor kerusakan pada suatu unit *equipment* tertentu maka harus dilakukan proses *screening* pada material tersebut dengan jenis kerusakan yang di jelaskan pada API antara lain:

- *Stress Corrosion Cracking* merupakan jenis kerusakan atau kegagalan getas yang terjadi relative pada *tensile stress* konstan pada paduan yang terpapar dalam lingkungan korosif, karena *LPG Storage Tank* ini tidak

berada dalam lingkungan korosif maka dapat di pastikan bahwa potensi kerusakan SCC tidak terjadi sehingga jenis kerusakan ini dapat di abaikan.

- *Component Lining* adalah jenis kerusakan yang terjadi pada unit *equipment* yang mendapatkan *lining* pada internal *part* agar tidak korosif, sehingga *LPG Storage Tank* dapat dipastikan tidak termasuk dalam jenis potensi kerusakan ini karena unit *LPG Storage Tank* tidak mendapatkan perlakuan *lining* pada bagian internal nya.
- *External Damage* adalah jenis kerusakan yang diakibatkan oleh faktor eksternal yang kuat dalam mempengaruhi proses kimiawi dan mengakibatkan terjadi korosi seperti halnya suatu *plant* yang terletak berdekatan dengan pesisir pantai sehingga potensi terjadi nya *external damage* kemungkinan tinggi terjadi, sehingga jika melihat lokasi dari *plant LPG Storage Tank* yang memiliki jarak cukup jauh dengan pesisir pantai atau daerah industri yang menghasilkan udara korosif maka dapat dipastikan bahwa faktor kerusakan *external damage* tidak terjadi
- *High Temperature Hydrogen Attack* adalah jenis kerusakan yang terjadi pada unit yang beroperasi dengan temperatur yang cukup tinggi dan didukung dengan jenis fluida yang operasikan adalah *hydrogen* yang merupakan salah satu jenis fluida yang bersifat korosif, jika meninjau temperatur kerja dan jenis fluida yang dipergunakan maka dapat dipastikan bahwa jenis kerusakan HTHA tidak terjadi pada *LPG Storage Tank*.
- *Mechanical Fatigue* menurut API RBI 581 jenis kerusakan ini merupakan jenis kerusakan yang hanya terjadi pada sistem perpipaan seperti *piping process* atau *pipeline* sehingga dalam rujukan seperti itu maka jenis kerusakan ini merupakan jenis kerusakan yang tidak terjadi pada unit *LPG Storage Tank*
- *Brittle Fracture* merupakan jenis kerusakan yang terjadi pada suatu material yang beroperasi pada temperature rendah melebihi nilai dari MDMT nya sehingga terjadi getas dan terjadi patahan, sehingga dapat



dipastikan bahwa potensi jenis kerusakan ini tidak terjadi pada *LPG Storage Tank*.

Dari hasil observasi dapat di simpulkan bahwa faktor kerusakan yang dominan dan kemungkinan terjadi adalah faktor kerusakan penipisan (*thinning damage factor*) hal ini dikarenakan *LPG Storage Tank* berada pada *LPG Plant* yang jauh dari pantai sehingga potensi eksternal korosi dapat diabaikan dan *LPG Plant* ini jauh dari industri-industri yang menghasilkan polusi udara sehingga potensi eksternal korosi pun dapat diabaikan. Sehingga faktor kerusakan yang terjadi pada *LPG Storage Tank* kemungkinan besar adalah *thinning damage factor* atau faktor kerusakan yang berupa penipisan material.

Sebelum melakukan kalkulasi *thinning damage factor* diharuskan terlebih dahulu untuk melakukan kalkulasi dan menentukan nilai efektifitas inspeksi dan jumlah inspeksi yang telah dilakukan pada alat tersebut. Berdasarkan data hasil observasi dan *field inspection* yang telah dilakukan yang kemudian di lakukan verifikasi dengan data dari tabel 2.3 dan tabel 2.4 maka di dapat bahwa inspeksi yang telah dilakukan selama ini masuk dalam kategori *highly effective*, hal tersebut dikarenakan pengukuran ketebalan dilakukan dengan metode *ultrasonic thickness measurement* dan metode *radiography examination* untuk proses deteksi setiap *joint welding* yang di lakukan.

Kemudian mencari nilai dari umur layan dari *LPG Storage Tank* dengan mencari nilai laju korosi atau *corrosion rate* terlebih dahulu. Dengan menggunakan persamaan dari API 510 *section 7.1* untuk *pressure vessel in service* dalam proses kalkulasi nya terbagi menjadi *short term condition* & *long-term condition*. Pengukuran *corrosion rate* dilakukan pada bagian *head & shell* yaitu :

- *Short Term Corrosion Rate*

$$CR = \frac{(t_{prev} - t_{act})}{(year_{prev} - year_{act})} \quad (4.1)$$

- *Long Term Corrosion Rate*

$$CR = \frac{(t_{nom} - t_{act})}{(year_{nom} - year_{act})} \quad (4.2)$$

Dari persamaan di atas maka di dapat nilai *corrosion rate* dari *shell & head LPG Storage Tank* adalah sebagai berikut :

Tabel 4. 5 Hasil Kalkulasi Laju Korosi

No	Shell	Head	Keterangan
1	0,86614	0,55118	Nominal Thickness 2008 (in)
2	0,86417	0,55039	Previous Thickness 2017 (in)
3	0,86220	0,55	Actual Thickness (in)
4	0,00051	0,000098	Short Term Corrosion Rate (in/yr)
5	0,00031	0,00007	Long Term Corrosion Rate (in/yr)

Dari nilai *corrosion rate* yang telah di didapatkan selanjutnya nilai tertinggi akan di pergunakan untuk kalkulasi nilai ketebalan minimum ( $t_{min}$ ). Untuk mendapatkan nilai dari ketebalan minimum ( $t_{min}$ ) dapat menggunakan persamaan dari ASME Sect. VIII Div. 1 yaitu :

- Ketebalan minimum untuk *shell*

$$t_{min} = \frac{P(Ri+CA)}{S E - 0,6 P} \quad (4.3)$$

- Ketebalan minimum untuk *head tipe hemispherical head*

$$t_{min} = \frac{P(L)}{2 S E - 0,2 P} \quad (4.4)$$

- Ketebalan minimum untuk *nozzle*

$$t_{min} = \frac{P(Rn)}{S E 1 + 0,4 P} \quad (4.5)$$

Dengan menggunakan persamaan di atas hasil dari ketebalan minimum ( $t_{min}$ ) bagi setiap *pressure part* di tampilkan dalam tabel 4.6 di bawah ini:

Tabel 4. 6 Hasil Kalkulasi Ketebalan yang disyaratkan (treq)

No	Part	Thickness Minimum ( $t_{min}$ ) - in
1	Shell	0,80826
2	Head	0,40354
3	M1	0,113
4	N1	0,038
5	N2	0,063
6	N3	0,041
7	N4a	0,038
8	N4b	0,038
9	N5	0,041
10	N6	0,063
11	N7	0,052
12	N8	0,041
13	N9	0,009
14	N10	0,009

Selanjutnya adalah menghitung nilai parameter faktor kerusakan ( $A_{rt}$ ) dari setiap bagian. Setelah sebelumnya telah menghitung nilai ketebalan minimum ( $t_{min}$ ) dari setiap *pressure part*. Persamaan yang dipergunakan dalam proses kalkulasi ini adalah dengan menggunakan persamaan berikut :

$$A_{rt} = \max \left[ \frac{1 - (t_{rd} - CR \cdot age)}{t_{min} + CA}, 0.0 \right] \quad (4.6)$$

Dari persamaan di atas maka harus ditentukan terlebih dahulu nilai dari umur inspeksi (*age*) dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

$$age = RBI \text{ date} - \text{current insp.}$$

Analisa RBI di asumsikan dilakukan pada tahun 2021 dan berdasarkan data teknis hasil observasi di dapatkan informasi bahwa tahun inspeksi terakhir dilakukan pada tahun 2007. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai umur inspeksi (*age*) adalah 4 tahun. Dengan menggunakan persamaan di atas maka di dapat nilai dari parameter faktor kerusakan ( $A_{rt}$ ) yang di tampilkan dalam tabel berikut :

Tabel 4. 7 Hasil Kalkulasi Faktor Kerusakan ( $A_{rt}$ )

No	Part	Thickness Minimum ( $t_{min}$ ) - in	Trd	CR	age	CA	Art	Art Used
1	Shell	0,80826	0,86220	0,00051	4	0,00	-0,0642	0,00
2	Head	0,40354	0,55	0,00051	4	0,00	-0,3579	0,00
3	M1	0,113	0,55	0,00051	4	0,00	-3,8491	0,00
4	N1	0,038	1,76377	0,00051	4	0,00	-45,361	0,00
5	N2	0,063	2,62992	0,00051	4	0,00	-40,712	0,00
6	N3	0,041	2,17322	0,00051	4	0,00	-47,154	0,00
7	N4a	0,038	1,69685	0,00051	4	0,00	-43,6	0,00
8	N4b	0,038	1,97637	0,00051	4	0,00	-50,956	0,00
9	N5	0,041	1,97637	0,00051	4	0,00	-47,154	0,00
10	N6	0,063	2,62992	0,00051	4	0,00	-40,712	0,00
11	N7	0,052	2,26574	0,00051	4	0,00	-42,533	0,00
12	N8	0,041	1,69685	0,00051	4	0,00	-40,337	0,00
13	N9	0,009	1,69803	0,00051	4	0,00	-187,44	0,00
14	N10	0,009	1,69724	0,00051	4	0,00	-187,36	0,00

Sehingga berdasarkan tabel hasil kalkulasi faktor kerusakan di atas, hasil  $A_{rt}$  bernilai kurang dari nol sehingga digunakan lah nilai nol sebagai hasil nya ( $A_{rt}$  Used). Kemudian hasil dari kalkulasi nilai parameter kerusakan digunakan untuk menentukan nilai *base damage factor for thinning* ( $D^{thin}_{fb}$ ) dengan memasukan nilai tersebut kedalam tabel 2.5 *thinning damage factor* sehingga berdasarkan kategori tingkat efektifitas inspeksi yang masuk dalam kategori *highly effective* dan jumlah inspeksi yang telah dilakukan lebih dari 4 kali maka nilai *damage factor for thinning* ditampilkan dalam tabel 4.8 di bawah ini:

Tabel 4. 8 Nilai *Damage Factor for Thinning*

No	Part	Tingkat Efektifitas Inspeksi	Jumlah Inspeksi	Nilai $D^{thin}_{fb}$
1	Head	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
2	Shell	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
3	M1	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
4	N1	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
5	N2	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
6	N3	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
7	N4a	<i>Highly Effective</i>	4	1,00

8	N4b	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
9	N5	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
10	N6	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
11	N7	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
12	N8	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
13	N9	<i>Highly Effective</i>	4	1,00
14	N10	<i>Highly Effective</i>	4	1,00

Dari hasil kalkulasi yang terdapat pada tabel 4.8 maka nilai tersebut digunakan untuk mencari nilai *damage factor for thinning*. Nilai tersebut didapat berdasarkan instruksi dan penjelasan pada *API RBI 581* dengan menggunakan persamaan 2.5. Sementara nilai *On-Line Monitoring (Fom)* tidak dipergunakan karena nilai dari  $D^{thin}_{fb} = 1$ , untuk nilai poin injeksi ( $F_{IP}$ ) dan poin factor *dead leags* ( $F_{DL}$ ) juga bernilai 1 karena *LPG Storage Tank* tidak memiliki titik injeksi. Sementara itu nilai dari factor *welded construction* ( $F_{WD}$ ), *factor API Maintenance* ( $F_{AM}$ ) dan *factor settlement* ( $F_{SM}$ ) juga tidak dipergunakan karena jenis *equipment* yang di analisa merupakan jenis bejana tekan bukan jenis dari *atmospheric storage tank*. Sehingga nilai keseluruhan dari persamaan adalah 1 maka nilai  $D^{thin}_f$  sama dengan nilai  $D^{thin}_{fb}$ . Maka nilai dari *damage factor for thinning* pada *LPG Storage Tank* ini adalah sebesar 1,00.

#### 4.3.3 Kalkulasi Faktor Sistem Manajemen (Management System Factor - FMS)

Selanjutnya menentukan nilai dari *management system factor* yang dilakukan dengan cara melakukan observasi dan *interview* terhadap pihak-pihak terkait dengan jenis pertanyaan yang terdapat pada *API RBI 581*. Tetapi karena peneliti bukan bagian dari karyawan atau pegawai perusahaan tersebut sehingga data yang di dapatkan bersifat terbatas dan rahasia karena menyangkut rahasia internal perusahaan dalam menangani kondisi peralatan. Daftar pertanyaan yang di tanyakan pada pihak manajemen perusahaan terlampir pada lampiran. Nilai *pscore* hasil *interview* digunakan dalam memproses data data lain dan menentukan tingkat probabilitas dari penggunaan *LPG Storage Tank*. Data tersebut sudah di olah dan menghasilkan angka yang di tampilkan dalam tabel 4.9.

Setelah di dapatkan nilai dari semua variable yang diperlukan untuk proses kalkulasi *Probability of Failure (PoF)* maka di dapatkan lah nilai dari PoF seperti yang ditampilkan dalam tabel 4.9 dibawah ini:

Tabel 4. 9 Nilai *Probability of Failure*

No	Variabel	Nilai	Nilai PoF
1	<i>Generic Failure Frequencies – GFF</i>	0,0000306	0,00002813 fail/yr
2	<i>Damage Factor - DF</i>	1,00	
3	<i>Factor Management System - FMS</i>	0,919316	

Sehingga dalam proses kalkulasi kemungkinan terjadinya kegagalan (*Probability of Failure*) atau PoF, nilai yang di dapatkan adalah sebesar 0,00002813 fail/yr. selanjutnya data ini akan dipergunakan untuk menentukan tingkat resiko dari penggunaan *LPG Storage Tank*.

#### 4.4 Analisa Konsekuensi Kegagalan (*Consequence of Failure – CoF*)

Di dalam *API RBI 581* dalam menentukan konsekuensi kegagalan pada suatu alat bertekanan maka harus di tentukan terlebih dahulu level analisis pada kasus tersebut. Hal demikian harus di dasari pada jenis fluida yang di pergunakan, terdapat 2 jenis analisis level yaitu analisis level 1 dan analisis level 2. Proses dalam menentukan analisis level didasari pada jenis fluida representatif yang terdapat pada metodologi RBI, jika fluida representatif terdapat pada API RBI 581 maka analisis level yang dipergunakan adalah analisis level 1 tetapi jika fluida representatif yang dipergunakan atau yang di asumsikan tidak menghasilkan kalkulasi yang tidak valid maka dapat dipergunakan analisis level 2. Dalam penelitian ini fluida yang di pergunakan dalam proses operasional adalah LPG yang mana fluida tersebut terdapat dalam fluida representatif analisis level 1 sehingga metodologi yang di pergunakan adalah analisis level 1, hal tersebut sesuai dengan tabel fluida representatif 2.7 yang terdapat pad bab 2 dengan struktur hidrokarbon C<sub>3</sub> dan C<sub>4</sub> dan termasuk kedalam fluida type 0.

API 581 juga dapat memberikan kalkulasi untuk menghitung konsekuensi berdasarkan area yang berdampak dan konsekuensi berdasarkan biaya. Proses

Analisa dalam penelitian ini hanya berfokus pada analisi konsekuensi yang berpotensi berdampak pada area kerja.

#### 4.4.1 Penentuan Fluida Representatif

Fluida yang di pergunakan dalam proses operasional dalam *LPG Storage Tank* adalah fluida LPG. Menurut tabel 2.7 pada bab 2 dijelaskan bahwa fluida tersebut merupakan termasuk dalam fluida representatif C<sub>3</sub> – C<sub>4</sub> dan berada dalam fasa liquid dan mayoritas hidrokarbon yang terkandung dalam LPG adalah butana. Adapun sifat dari fluida berdasarkan tabel fluida representatif adalah sebagai berikut :

Tabel 4. 10 Properties Fluida LPG berdasarkan kategori fluida C3-C4

No	<i>Properties</i>	<i>Results</i>
1	<i>Molecular weight (lb/lb-mol)</i>	51
2	<i>Constant Pressure Specific Heat Capacity (Cp)</i>	<i>Equation Note 1</i>
3	<i>Nominal Boiling Point (NBP - °F)</i>	-6,3
4	<i>Liquid density (lb/ft<sup>3</sup>)</i>	33,61
5	<i>Auto-Ignition Temperature (AIT – PoPF)</i>	696

Fase fluida yang tersimpan dalam bejana tekan ialah cair atau *store liquid* kemudian menentukan fasa fluida stabil setelah terlepas ke atmosfer / udara terbuka. Fluida yang di lakukan proses analisa tersimpan dalam bentuk cair dan akan berubah kedalam bentuk gas pada saat terlepas ke udara hal tersebut terjadi karena fluida LPG memiliki nilai NBP sebesar -6,3 °F atau di bawah 80 °F sehingga fasa fluida stabil di modelkan dalam bentuk fasa gas.

#### 4.4.2 Penentuan *Release Hole Size*

Dalam API RBI 581 proses untuk menentukan laju ukuran kebocoran atau *release hole size* didasarkan pada jenis peralatan sehingga perlu di lakukan telaah dengan mengacu kepada bagian 3 Annex API 581 untuk kategori *pressure vessel* atau bejana tekan menggunakan 4 ukuran lubang kebocoran dalam mengestimasi terjadi nya suatu kegagalan. 4 ukuran lobang kebocoran yang dipergunakan dalam proses kalkulasi dijelaskan pada tabel 4.11 dibawah ini :

Tabel 4. 11 Tabel Kalkulasi Laju Lubang Kebocoran

<i>Release Hole Number</i>	<i>Release Hole Size</i>	<i>Range of Hole Diameter (in)</i>	<i>Release Hole Diameter, <math>d_n</math> (in)</i>
1	Small	0 – 1/4	$d_1 = 0,25$
2	Medium	$> 1/4 - 2$	$d_2 = 1$
3	Large	$> 2 - 6$	$d_3 = 4$
4	Rupture	$> 6$	$d_4 = 16$

Jika terdapat suatu bejana tekan dengan diameter yang lebih dari 16 in maka dalam proses kalkulasi nya tetap menggunakan nilai 16 in untuk dijadikan dalam proses kalkulasi laju ukuran kebocoran. Dalam penelitian ini nilai frekuensi kegagalan *generic* berdasarkan tabel *gff* pada bab 2 untuk masing-masing lubang kebocoran adalah sebagai berikut :

- *Small* =  $8,00E-06$
- *Medium* =  $2,00E-05$
- *Large* =  $2,00E-06$
- *Rupture* =  $6,00E-07$
- *GFF Total* =  $3,60E-05$

#### 4.4.3 Penentuan Laju Kebocoran

Dalam metode dan analisis RBI menggunakan API RBI 581 untuk kalkulasi laju kebocoran harus dilakukan terlebih dahulu ialah mengkalkulasi luas dari tiap-tiap lubang kebocoran,  $A_n$ , dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada bab 2 yaitu persamaan 2.12

Dalam menentukan laju kebocoran terdapat beberapa parameter yang harus di perhitungkan seperti sifat fisik material (fluida), fase awal kondisi proses pengoperasian dan ukuran lubang kebocoran yang telah ditentukan. Sehingga harus ditentukan terlebih dahulu nilai dari ukuran lubang kebocoran

Hasil proses kalkulasi pada setiap ukuran lubang kebocoran ditampilkan dalam tabel 4.12 di bawah ini :



Tabel 4. 12 Luas Area Lubang Kebocoran

Release Hole Number	Release Hole Size	Release Hole Diameter, $d_n$ (in)	Release Hole Area, $A_n$ (in <sup>2</sup> )
1	Small	$d_1 = 0,25$	$A_1 = 0,049$
2	Medium	$d_2 = 1$	$A_2 = 0,79$
3	Large	$d_3 = 4$	$A_3 = 12,56$
4	Rupture	$d_4 = 16$	$A_4 = 200,96$

Di dalam *LPG Storage Tank* terdapat fluida LPG yang berbentuk *liquid* maka persamaan yang digunakan dalam proses kalkulasi adalah kalkulasi untuk jenis fluida liquid. Selanjutnya adalah menentukan nilai tekanan transisinya,  $P_{trans}$ , Hal ini bertujuan untuk menentukan apakah jenis kebocoran bersifat *sonic* atau *sub-sonic* sehingga persamaan yang dipergunakan dapat disesuaikan dengan jenis kebocoran. Sebelum menghitung nilai dari laju kebocoran dan dalam proses menentukan nilai jenis kebocoran maka harus di hitung terlebih dahulu nilai dari *constant pressure specific heat capacity* dengan menggunakan persamaan 2.7 yang terdapat pada bab 2, berikut persamaan untuk menghitung *constang pressure heat capacity* :

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3$$

Dimana :

$$A = 2,632$$

$$B = 0,3188$$

$$C = -0.0001347$$

$$D = 1,47$$

$$T = 171,111 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Sehingga :

$$C_p = 2,632 + (0,3188 \times 171,11) + (-0,0001347) \times (171,11)^2 + (1,47) \times (171,11)^3$$

$$C_p = 2,632 + 54,55 + (-3,94) + (7364504,10)$$

$$C_p = 7364557,34$$

Setelah mendapatkan nilai dari *constant pressure specific heat capacity* ( $C_p$ ) selanjutnya adalah melakukan kalkulasi untuk mendapatkan nilai *Ideal Gas Specific Heat Capacity Ratio* dengan menggunakan persamaan 2.8 di bawah ini, dengan nilai konstanta gas universal sebesar 8,314472 J/mol-K :

$$k = \frac{C_p}{C_p - R}$$

$$k = \frac{7364557,34}{7364557,34 - 8,314472}$$

$$k = 1,000001129$$

Selanjutnya adalah menghitung tekanan transisi yang bertujuan untuk menentukan tipe *flow regime* dari jenis pelepasan fluida bertipe *sonic* atau *sub-sonic*. Tekanan transisi dihitung menggunakan persamaan 2.9 yang terdapat pada bab 2 berikut ini:

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

$$P_{trans} = 14,5 \left( \frac{1,000001129+1}{2} \right)^{\frac{1,000001129}{1,000001129 - 1}}$$

$$P_{trans} = 23,906 \text{ Psi}$$

Dari proses kalkulasi diatas maka dapat ditarik kesimpulan bahwa tekanan di dalam *LPG Storage Tank* adalah sebesar 256,02 Psi dan dapat dipastikan bahwa tekanan di dalam *LPG Storage Tank* lebih besar di bandingkan tekanan transisi maka persamaan yang dipergunakan dalam kalkulasi adalah *sonic*. Nilai konstanta gravitasi bernilai 32,2 lb<sub>m</sub>-ft/lb<sub>f</sub>-sec<sup>2</sup> dan dipergunakan dalam proses kalkulasi untuk menentukan laju kebocoran. Dan persamaan yang dipergunakan dalam kalkulasi ini adalah persamaan 2.10 berikut ini :

$$W_g(\text{sonic}) = C_d \cdot A \cdot P_s \sqrt{\left( \frac{k \cdot m \cdot g \cdot c}{R \cdot T_s} \right) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

Dengan mempergunakan persamaan di atas maka hasil kalkulasi untuk menentukan laju kebocoran pada 4 ukuran lubang kebocoran dengan tipe laju aliran *sonic* ditampilkan dalam tabel 4.13 dengan nilai *discharge coefficient* yang di rekomendasikan untuk bejana tekan adalah sebesar 0,9

Tabel 4. 13 Nilai Laju Kebocoran tiap Ukuran Lubang

Ukuran Lubang	¼ in	1 in	4 in	16 in
Laju kebocoran (lb/s)	1,884	30,379	482,984	7727,745

#### 4.4.4 Kalkulasi Laju Kebocoran Massa Tersedia (Available Mass for Release)

Dalam metode API RBI 581 diperlukan juga proses kalkulasi untuk memperkirakan jumlah massa fluida yang terlempar keluar dari inventory atau penampungan alat tersebut. Karena dalam penelitian ini nilai laju kebocoran sudah di perhitungkan sehingga selanjutnya adalah mengkalkulasi ketersediaan massa kebocoran. Berdasarkan metode API RBI 581 dijelaskan bahwa untuk alat yang fluida nya adalah gas perhitungan *mass inventory* nya berdasarkan pada *flow rate* fluida yang menuju tempat penyimpanan atau suatu system selang waktu tertentu, patokan yang sering di pergunakan adalah durasi 1 jam. Data operasional dari *LPG Storage Tank* memiliki data *flow rate* yang beragam per hari nya sehingga tidak dapat di jadikan suatu patokan dalam proses kalkulasi nya sehingga dalam proses kalkulasi ini mengacu kepada data *design basis* dari *LPG Storage Tank* untuk mendapatkan nilai *mass inventory*. Dari data *design basis* maka di dapat massa operasi maksimum dalam proses penerimaan fluida dalam konteks *flow rate* ini adalah sebesar 170500 lbs.

Selanjutnya adalah menghitung nilai *maximum flow rate* yang beroperasi pada *LPG Storage Tank* dalam *inventory group* dengan sebelumnya mengklasifikasikan dan mengelompokan jenis peralatan dalam proses mengklasifikasikan tersebut maka didapatkan nilai diameter nya adalah 8 inch dan luasnya adalah 50,3 in<sup>2</sup> . selanjutnya menggunakan persamaan 2.10 untuk mendapatkan nilai  $W_{max8}$  , sehingga nilai dari  $W_{max8}$  berdasarkan pada persamaan 2.10 adalah sebesar 1934,24 lb/s. Langkah selanjutnya adalah menghitung massa fluida hasil dari setiap laju kebocoran pada sertiap ukuran lubang  $m_{add.n}$  tetapi yang dalam kasus ini diperlukan asumsi yang berdasarkan pada keterangan dalam metode RBI bahwa durasi kebocoran adalah 3 menit dengan ukuran maksimum yang di izinkan adalah 8 in sehingga kalkulasi yang dipergunakan menggunakan persamaan 2.14

$$mass_{add,n} = 180 \times \min[WnW_{max,8}]$$

Sehingga dari persamaan di atas di dapatkan nilai massa fluida dari setiap ukuran dan di sajikan dalam tabel dibawah ini :

Tabel 4. 14 Massa Fluida tiap Ukuran Lubang

Ukuran Lubang	¼ in	1 in	4 in	Max 8 in
Laju kebocoran, $Wn$ (lb/s)	1,884	30,379	482,984	7727,745
Massa Fluida (lbs)	339,12	5468,22	86937,12	348163,2

Setelah di dapatkan nilai massa fluida dari setiap ukuran lobang kebocoran maka selanjutnya adalah mengkalkulasi massa fluida maksimum yang tersedia menggunakan persamaan 2.15. Karena proses kalkulasi massa *inventory* pada fluida gas menggunakan perhitungan laju aliran atau *flow rate* maka nilai massa fluida dalam alat sama dengan massa fluida *inventory* sehingga nilai massa fluida yang tersedia dan di jadikan acuan dalam proses analisis pada setiap lubang adalah sama dengan  $mass_{inv}$  yaitu sebesar 170500 lbs.

#### 4.4.5 Penentuan Tipe Kebocoran

Selanjutnya dalam metodologi RBI di haruskan untuk menentukan Tipe Kebocoran sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan nilai *Consequence of Failure (COF)*. Tipe kebocoran dalam RBI terbagi menjadi 2 tipe yaitu tipe *Continuous* dan tipe *Instantaneous* sehingga setiap lubang kebocoran akan di tentukan tipe kebocorannya. Dalam proses untuk menentukan tipe kebocoran tahap pertama yang harus di lakukan adalah menghitung waktu yang dibutuhkan untuk mengeluarkan fluida seberat 10000 lbs. Setelah mendapatkan nilai kalkulasi dari semua lubang kebocoran selanjutnya menentukan apakah bertipe *continuous* atau *instantaneous* dengan cara menyesuaikan dengan kategori tipe kebocoran, tipe *continuous* memiliki ukuran lubang kebocoran sama dengan atau dibawah 0,25 in atau waktu yang dibutuhkan untuk mengeluarkan fluida sebesar 10000 lbs dalam waktu lebih dari 2 menit dan jika kriteria tersebut tidak terpenuhi maka tipe kebocoran adalah *instantaneous*. Hasil perhitungan dari setiap tipe kebocoran dari lubang kebocoran ditampilkan pada tabel 4.15

Tabel 4. 15 Tipe Kebocoran tiap Lubang Kebocoran

Ukuran Lubang	¼ in	1 in	4 in	Max 8 in
Laju kebocoran, $W_n$ (lb/s)	1,884	30,379	482,984	7727,745
Massa Fluida (lbs)	339,12	5468,22	86937,12	348163,2
<i>Time required to release 1000 lbs (s)</i>	5307,85	329,17	20,704	1,29
<i>Release type</i>	<i>Continuous</i>	<i>Continuous</i>	<i>Instantaneous</i>	<i>Instantaneous</i>

#### 4.4.6 Perkiraan Dampak Kebocoran

Setelah menentukan tipe kebocoran yang terjadi dari setiap lubang kebocoran maka selanjutnya adalah memperkirakan dampak kebocoran yang terjadi pada area kerja *LPG Storage Tank* tersebut. Di dalam metode RBI Teknik yang dipergunakan untuk memperkirakan dampak kebocoran yang terjadi mengacu pada kondisi aktual di lapangan yang di kombinasikan dengan sistem proteksi yang di pergunakan. Dalam penelitian ini sistem deteksi dini pada stasiun pengisian bulk elpiji hanya mengandalkan *gas detector* dan adanya *pressure safety valve* (PSV) pada peralatan *LPG Storage Tank* sedangkan system isolasi nya masih manual yaitu berupa operator yang dapat mengisolasi dan mematikan peralatan dari dalam *control room*. Dengan mengacu pada tabel 2.11

Maka di ketahui bahwa system deteksi pada alat termasuk kategori B dan system isolasi nya termasuk dalam kategori B. Sehingga dari keterangan tersebut pengaruh terhadap *release magnitude adjustment*, *reduction factor* ( $fact_{di}$ ) dan *maximum leak duration* ( $ldm_{ax}$ ) dapat dijabarkan dalam tabel 4.16 berikut :

Tabel 4. 16 Pengaruh sistem deteksi dan isolasi terhadap kebocoran

Klasifikasi Sistem		<i>Release Magnitude Adjustment</i>	<i>Reduction Factor, Fact<sub>di</sub></i>	<i>Maximum Leak Duration, ldm<sub>ax</sub></i>
Deteksi	Isolasi			
B	B	<i>Reduce release rate or mass by 15%</i>	0,15	<i>40 minutes for ¼ in leaks 30 minutes for 1 in leaks 20 minutes for 4 in leaks</i>

Perlu dicatat bahwa untuk tipe kebocoran *rupture* tidak memiliki nilai durasi kebocoran karena di asumsikan kebocoran tipe tersebut terjadi seketika dan tidak memerlukan cukup waktu yang banyak.

#### 4.4.7 Kalkulasi Laju Massa Kebocoran

Dalam Analisa RBI terdapat juga proses kalkulasi untuk menentukan laju kebocoran, durasi kebocoran dan massa kebocoran yang mana kondisi tersebut telah di sesuaikan juga dengan nilai factor dari system deteksi dan isolasi suatu plant, hal tersebut di maksud untuk dapat menentukan Analisa konsekuensi pada peralatan yang dilakukan Analisa RBI

Setiap lubang kebocoran perlu dilakukan kalkulasi terkait nilai dari laju, durasi dan massa kebocoran nya yang mengacu pada persamaan 2.17, 2.18 dan 2.19

Dan hasil perhitungan ditampilkan dalam tabel 4.17 di bawah ini :

Tabel 4. 17 Nilai Laju, Durasi dan Massa Kebocoran tiap Lubang Kebocoran

Lubang Kebocoran	Release Hole Size	<i>Adjusted Release Rate, Rate<sub>n</sub> (lb/s)</i>	<i>Leak Duration, ld<sub>n</sub> (s)</i>	<i>Release Mass mass<sub>n</sub> (lbs)</i>
1	Small	1,6014	2400	3843,36
2	Medium	25,822	600	15493,2
3	Large	410,536	400	164214,4
4	Rupture	6568,58	~	170500

Nilai dari *Leak Duration* diambil nilai tertinggi berdasarkan tabel 4.16 sementara nilai kategori *rupture* termasuk dalam kebocoran seketika sehingga nilai durasi nya tidak ada. Sehingga menurut persamaan didapatkan nilai massa kebocorannya sama dengan nilai massa yang tersedia dari alat .

#### 4.4.8 Menentukan Konsekuensi Kebakaran dan Ledakan

Selanjutnya dalam penelitian ini juga mengkalkulasi potensi terjadi nya kebakaran dan ledakan yang terjadi akibat penggunaan *LPG Storage Tank*. Langkah pertama yang dilakukan untuk menghitung konsekuensi kebakaran dan ledakan adalah dengan menghitung factor reduksi dan mitigasi area konsekuensi. Untuk menentukan nilai tersebut acuan yang dipergunakan adalah nilai yang ada pada tabel 2.14. Berdasarkan tabel tersebut didapatkan bahwa system mitigasi yang

dipergunakan pada *LPG Storage Tank* adalah “*inventory blowdown, coupled with isolation system classification B or higher*” hal tersebut dikarenakan terdapat *pressure safety valve (PSV)* yang dipergunakan untuk menjaga agar tekanan operasi di dalam *LPG Storage Tank* tidak melebihi tekanan desain nya. Selain itu terdapat gas detector yang akan mengaktifkan *system water sprinkler* jika terdapat indikasi kebocoran pada area *LPG Storage Tank*. Kemudian berdasarkan system isolasi yang telah dibahas sebelumnya di dapatkan bahwa system isolasi ini termasuk kategori B. dengan demikian didapatkan bahwa nilai factor reduksi mitigasi area konsekuensi,  $fact_{mit}$  berdasarkan tabel adalah sebesar 0,25.

Kemudian dengan di dapatkan nya nilai factor reduksi selanjutnya adalah menghitung factor koreksi efisiensi energi,  $eneff_n$  dari masing masing ukuran lubang kebocoran. Nilai dari  $eneff_n$  didapat menggunakan persamaan 2.20 dan hasil perhitungannya di tampilkan dalam tabel 4.18 di bawah ini :

Tabel 4. 18 Nilai Laju, Durasi dan Massa Kebocoran tiap Lubang Kebocoran

<i>Release hole Number</i>	<i>Release Hole Size</i>
<i>Small</i>	<i>1</i>
<i>Medium</i>	<i>1,76</i>
<i>Large</i>	<i>5,86</i>
<i>Rupture</i>	<i>6,00</i>

Dimana nilai CA adalah 1 dan kalkulasi di atas pada dasarnya di khusukan untuk jenis tipe pelepasan *instantaneous*. Tahapan selanjutnya adalah menentukan tipe fluida. Berdasarkan Analisa RBI tipe fluida yang di operasionalkan dalam *LPG Storage Tank* adalah LPG sehingga jika merujuk pada tabel 2.7 maka fluida representative untuk gugus C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub> adalah TYPE 0.

Tahapan selanjutnya dalam penelitian ini adalah mengkalkulasi konsekuensi kerusakan komponen serta cedera personil untuk kondisi-kondisi di bawah ini :

- *Auto-Ignition Not Likely, Continuous Release (AINL-CONT)*
- *Auto-Ignition Likely, Continuous Release (AIL-CONT)*
- *Auto-Ignition Not Likely, Instantaneous Release (AINL-INST)*
- *Auto-Ignition Likely, Instantaneous Release (AIL-INST)*

Parameter di atas di perhitungkan dengan menentukan terlebih dahulu nilai konstanta  $a$  dan  $b$  yang berdasarkan pada tabel 2.15 pada bab studi literatur, selanjutnya perhitungan area konsekuensi kerusakan komponen serta cedera personil dijabarkan sebagai berikut :

a) Area Konsekuensi Kerusakan Komponen pada *AINL-CONT*,  $CA^{AINL-CONT}_{cmd,n}$ . Dalam Analisa di atas disebutkan bahwa fluida dalam TYPE 0 sehingga persamaan yang dipergunakan untuk mencari area konsekuensi dan laju kebocoran efektif adalah persamaan 2.23 dan 2.24. Tetapi sebelum itu harus terlebih dahulu menentukan nilai konstanta  $a$  dan  $b$  pada tabel 2.15 dan dari tabel tersebut di dapat bahwa nilai  $a$  adalah 49,48 dan nilai  $b = 1$  sehingga hasil perhitungan di tampilkan dalam tabel di bawah ini :

Tabel 4. 19 Hasil Kalkulasi Area Kerusakan Komponen AINL-CONT

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Componen Damage Consequence Area for AINL-CONT, <math>CA^{AINL-CONT}_{cmd,n}</math> (ft<sup>2</sup>)</i>	<i>Effective Release Rate, <math>effrate^{AINL-CONT}_n</math> (lb/s)</i>
<i>Small</i>	59,47	1,6014
<i>Medium</i>	958,25	25,822
<i>Large</i>	15234,9	410,536
<i>Rupture</i>	243760	6568,58

b) Area Konsekuensi Kerusakan Komponen pada *AIL-CONT* ( $CA^{AIL-CONT}_{cmd,n}$ ). karena fluida termasuk dalam TYPE 0, maka persamaan yang digunakan untuk mengkalkulasi dan mengkalkulasi laju kebocoran efektif adalah dengan menggunakan persamaan 2.25 dan 2.26. Hasil perhitungan kalkulasi tersebut di sajikan pada tabel 4.20



Tabel 4. 20 Hasil Kalkulasi Area Kerusakan Komponen AIL-CONT

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Componen Damage Consequence Area for AIL-CONT, <math>CA^{AIL-CONT}_{cmd,n}</math> (ft<sup>2</sup>)</i>	<i>Effective Release Rate, <math>effrate^{AIL-CONT}_n</math> (lb/s)</i>
<i>Small</i>	376,64	1,6014
<i>Medium</i>	6073,33	25,822
<i>Large</i>	96558,06	410,536
<i>Rupture</i>	1544930	6568,58

c) Area Konsekuensi Kerusakan Komponen pada *AINL-INST*,  $CA^{AINL-INST}_{cmd,n}$  karena fluida termasuk dalam TYPE 0, maka persamaan yang digunakan untuk mengkalkulasi dan mengkalkulasi laju kebocoran efektif adalah dengan menggunakan persamaan 2.27 dan 2.28. Hasil perhitungan kalkulasi tersebut di sajikan pada tabel 4.21

Tabel 4. 21 Hasil Kalkulasi Area Kerusakan Komponen AINL-INST

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Componen Damage Consequence Area for AINL-INST, <math>CA^{AINL-INST}_{cmd,n}</math> (ft<sup>2</sup>)</i>	<i>Effective Release Rate, <math>effmass^{AINL-INST}_n</math> (lb/s)</i>
<i>Small</i>	7061,68	3843,36
<i>Medium</i>	22610,42	15493,2
<i>Large</i>	158989,59	164214,4
<i>Rupture</i>	163441,4	170500

d) Area Konsekuensi Kerusakan Komponen Pada *AIL-INST*,  $CA^{AIL-INST}_{cmd,n}$  karena fluida termasuk dalam TYPE 0, maka persamaan yang digunakan untuk mengkalkulasi dan mengkalkulasi laju kebocoran efektif adalah dengan menggunakan persamaan 2.29 dan 2.30. Hasil perhitungan kalkulasi tersebut di sajikan pada tabel 4.22

Tabel 4. 22 Hasil Kalkulasi Area Kerusakan Komponen AIL-INST

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Componen Damage Consequence Area for AIL-INST, <math>CA^{AIL-INST}_{cmd,n}</math> (ft<sup>2</sup>)</i>	<i>Effective Release Rate, <math>effmass^{AIL-INST}_n</math> (lb/s)</i>
<i>Small</i>	79996,44	3843,36
<i>Medium</i>	225934,40	15493,2

<i>Large</i>	1008934,96	164214,4
<i>Rupture</i>	1033685,61	170500

e) Area Konsekuensi Cedera Personil pada *AINL-CONT*,  $CA^{AINL-CONT}_{inj,n}$ . Selanjutnya mengkalkulasi nilai area konsekuensi nya di dapat dengan menggunakan persamaan 2.31 dengan menggunakan *effrate* nya dari hasil kalkulasi perhitungan sebelumnya pada bagian (a). sehingga hasil kalkulasi ditampilkan dalam tabel 4.23

Tabel 4. 23 Hasil Kalkulasi Nilai Area Cedera Personil AINL-CONT

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Personnel Injury Consequence Area for AINL-CONT</i> , $CA^{AINL-CONT}_{inj,n} (ft^2)$
<i>Small</i>	150,37
<i>Medium</i>	2424,68
<i>Large</i>	38549,33
<i>Rupture</i>	616789,66

f) Area Konsekuensi Cedera Personil pada *AIL-CONT*,  $CA^{AIL-CONT}_{inj,n}$ . Selanjutnya mengkalkulasi nilai area konsekuensi nya di dapat dengan menggunakan persamaan 2.32 dengan menggunakan *effrate* nya dari hasil kalkulasi perhitungan sebelumnya pada bagian (b). sehingga hasil kalkulasi ditampilkan dalam tabel 4.24

Tabel 4. 24 Hasil Kalkulasi Nilai Area Cedera Personil AIL-CONT

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Personnel Injury Consequence Area for AIL-CONT</i> , $CA^{AIL-CONT}_{inj,n} (ft^2)$
<i>Small</i>	1004,91
<i>Medium</i>	16203,95
<i>Large</i>	257621,60
<i>Rupture</i>	4121948,16

g) Area Konsekuensi Cedera Personil pada *AINL-INST*,  $CA^{AINL-INST}_{inj,n}$ . Selanjutnya mengkalkulasi nilai area konsekuensi nya di dapat dengan menggunakan persamaan 2.33 dengan menggunakan *effrate* nya dari hasil

kalkulasi perhitungan sebelumnya pada bagian (c). sehingga hasil kalkulasi ditampilkan dalam tabel 4.25

Tabel 4. 25 Hasil Kalkulasi Nilai Area Cedera Personil AINL-INST

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Personnel Injury Consequence Area for AINL- INST, <math>CA^{AINL-INST}_{inj,n} (ft^2)</math></i>
<i>Small</i>	21131,04
<i>Medium</i>	60116,46
<i>Large</i>	353139,26
<i>Rupture</i>	363229,29

h) Area Konsekuensi Cedera Personil pada *AIL-INST*,  $CA^{AIL-INST}_{inj,n}$   
Selanjutnya mengkalkulasi nilai area konsekuensi nya di dapat dengan menggunakan persamaan 2.34 dengan menggunakan *effrate* nya dari hasil kalkulasi perhitungan sebelumnya pada bagian (d). sehingga hasil kalkulasi ditampilkan dalam tabel 4.26

Tabel 4. 26 Hasil Kalkulasi Nilai Area Cedera Personil AIL-INST

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Personnel Injury Consequence Area for AIL- INST, <math>CA^{AIL-INST}_{inj,n} (ft^2)</math></i>
<i>Small</i>	1628259,46
<i>Medium</i>	3131828,58
<i>Large</i>	8039386,23
<i>Rupture</i>	8163075,86

Dari hasil kalkulasi di atas di dapatkan bahwa nilai kerusakan are dan cedera personil memiliki nilai yang sama, hal tersebut memberikan informasi bahwa tingkat kecelakaan pada personil sama tinggi nya dengan area terdampak. Selanjutnya adalah mengkalkulasi *instantaneous/continuous blending factor*,  $fact^{IC}_n$  untuk setiap lubang kebocoran. Berdasarkan persamaan 2.36 nilai untuk *instantaneous* adalah 1 untuk nilai  $fact^{IC}_n$  nya sementara untuk nilai *continuous* nilai  $fact^{IC}_n$  harus di lakukan proses kalkulasi terlebih dahulu menggunakan persamaan 2.35. Hasil dari kalkulasi perhitungan nilai  $fact^{IC}_n$  untuk tiap lubang kebocoran dipaparkan pada tabel 4.26

Tabel 4. 27 Nilai *Blending factor*

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Blending Factor, fact<sup>C</sup><sub>n</sub></i>
<i>Small</i>	0,03
<i>Medium</i>	0,46
<i>Large</i>	1
<i>Rupture</i>	1

Dengan catatan bahwa nilai C sebagai pembagi merupakan nilai konstanta yang berdasarkan titik transisi *instantaneous* (4,536 kgs) 10000 lbs selama 3 menit atau laju pelepasan 25,2 kg/s (55,6 lbs).

Langkah selanjutnya adalah mengkalkulasi nilai AIT *blending factor, fact<sub>AIT</sub>* berdasarkan persamaan 2.37 dan 2.38 atau 2.39 berdasarkan nilai AIT dan  $T_s$  yang merupakan hasil dari nilai *Auto Ignition Temperatur* dan Temperatur Operasi ( $T_s$ ) dalam satuan reamur. Nilai dari  $T_s$  adalah sebesar 28°R dan nilai dari AIT adalah sebesar 295,11°R sehingga jika menggunakan persamaan yang telah di jelaskan dalam bab 2 tentang studi literatur di dapat bahwa nilai  $T_s + C_4$  jumlah nya masih lebih kecil dibandingkan dengan nilai AIT, sehingga dapat dipastikan nilai *fact<sub>AIT</sub>* nya adalah sama dengan 0/.

Kemudian Langkah selanjutnya adalah dengan menghitung area konsekuensi *continuous/instantaneous blended* dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada bab 2 studi literatur yaitu persamaan 2.40, 2.41, 2.42, dan 2.43 shingga di dapatkan bahwa nilai dari kalkulasi tersebut ditampilkan dalam tabel 4.27 dibawah ini :

Tabel 4. 28 Hasil Kalkulasi Nilai *Continuous / Instantaneous Blended Consequences Area*

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Component Damage Consequences Areas for AIL, CA<sup>AIL</sup><sub>cmdn</sub> (ft<sup>2</sup>)</i>	<i>Personnel Injury Consequences Areas for AIL, CA<sup>AIL</sup><sub>inj,n</sub> (ft<sup>2</sup>)</i>	<i>Component Damage Consequences Area for AINL, CA<sup>AINL</sup><sub>cmd,n</sub> (ft<sup>2</sup>)</i>	<i>Personnel Injury Consequences Areas for AINL, CA<sup>AINL</sup><sub>Inj,n</sub> (ft<sup>2</sup>)</i>
Small	77607,84	1579441,82	6851,61	20501,61
Medium	124798,30	1698641,25	12650,42	33578,24
Large	96558,06	257621,6	15234,9	38549,33
Rupture	1544930	4121948,16	243760	616789,66

Kemudian dari data tabel di atas selanjutnya melakukan kalkulasi untuk mencari nilai konsekuensi keterbakaran dari setiap ukuran lubang kebocoran dengan menggunakan persamaan 2.44 dan 2.45 sehingga hasil dari kalkulasi tersebut di tampilkan dalam bentuk tabel 4.28 berikut ini :

Tabel 4. 29 Hasil Kalkulai Nilai *Flammable Consequence Area*

Ukuran Lubang Kebocoran	<i>Component Damage Consequences Areas, CA<sup>flam</sup><sub>cmdn</sub> (ft<sup>2</sup>)</i>	<i>Personnel Injury Consequences Areas, CA<sup>flam</sup><sub>inj,n</sub> (ft<sup>2</sup>)</i>
Small	8974,30	67269,82
Medium	64238,44	799507,22
Large	96558,06	257621,6
Rupture	1544930	4121948,16

Kemudian dari hasil kalkulasi di atas maka selanjutnya adalah menghitung nilai konsekuensi keterbakaran tiap ukuran lubang tersebut dengan cara menjumlahkan semua nilai area konsekuensi tiap lubang yang kemudian di bagi dengan nilai total *generic failure frequencies, gff total* sesuai dengan persamaan 2.46 dan 2.57 Hasil kalkulasi tersebut ditampilkan dalam tabel 4.29 dibawah ini :

Tabel 4. 30 Hasil Kalkulasi Nilai *Consequence Area for Component Damage and Personal Injury*

<i>Final Component Damage Consequence Area, CA<sup>flam</sup>cmd (ft<sup>2</sup>)</i>	<i>Final Personnel Injury Consequence Areas, CA<sup>flam</sup>inj (ft<sup>2</sup>)</i>
5043237,677	15430431,8

#### 4.4.9 Menjustifikasi Konsekuensi Keracunan

Dalam proses metodologi API RBI 581 terdapat proses untuk menjustifikasi tingkat keracunan atau konsekuensi keracunan yang mungkin terjadi pada unit yang di lakukan analisis, berikut tabel 4.30 analisa yang di jadikan rujukan

Tabel 4. 31 Hasil Analisa Konsekuensi Keracunan

No	Jenis Kandungan	Ada/Tidak
1	Hidrogen Fluorida (HF)	Tidak
2	Hidrogen Sulfida	Tidak
3	Ammonia	Tidak
4	Klorida	Tidak

Dari hasil Analisa tabel di atas dapat di nyatakan bahwa *LPG Storage Tank* tidak memiliki kandungan/fluida berbahaya hal tersebut di karenakan fluida kerja dari *LPG Storage Tank* adalah berupa LPG sehingga kalkulasi atau pertimbangan aspek konsekuensi keracunan dapat diabaikan

#### 4.4.10 Menjustifikasi Konsekuensi Tidak Mudah Terbakar dan Tidak Beracun

Selanjutnya melakukan penentuan kategori fluida mudah terbakar dan tidak beracun (*non-flammable & non-toxic*). fluida kerja yang di operasikan dalam *LPG Storage Tank* ini adalah berjenis LPG dengan kata lain fluida LPG tidak berwarna namun mudah terbakar sehingga tidak masuk dalam kategori dan perhitungan ini sehingga proses ini pun dapat di abaikan.

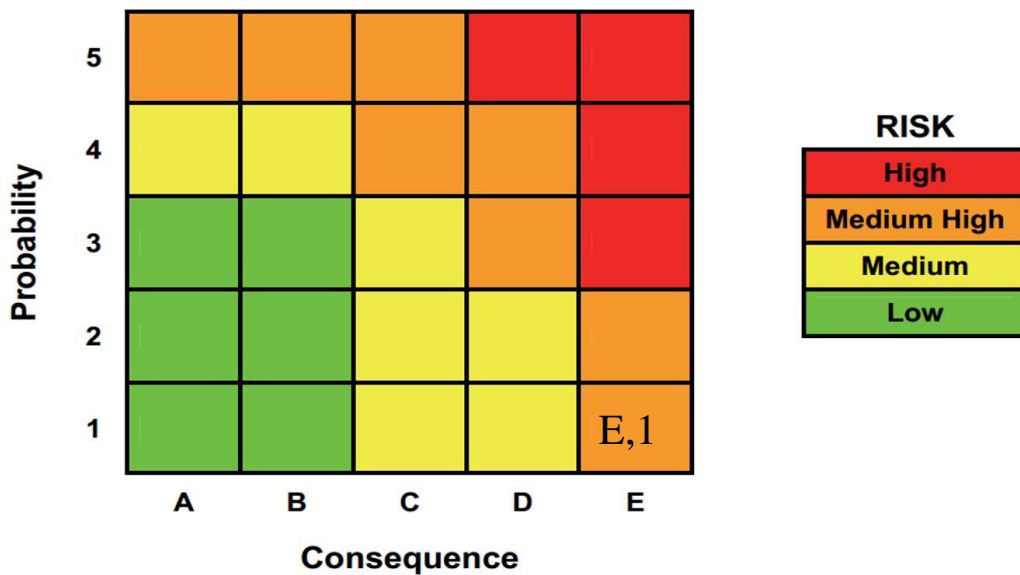
#### 4.4.11 Menentukan Nilai Akhir Konsekuensi

Dalam penelitian ini aspek konsekuensi yang di pertimbangkan dalam proses analisa hanya berdasarkan aspek keterbakaran dan ledakan sehingga nilai akhir

konsekuensi di tentukan dengan perbandingan aspek tersebut. Dari perbandingan tersebut di ambilah nilai konsekuensi tertinggi untuk proses kalkulasi selanjutnya, sehingga nilai tertinggi dalam konsekuensi keterbakaran dan ledakan, yaitu 15430431,8 ft<sup>2</sup> yang di hasilkan dari konsekuensi akhir cedera personel.

#### **4.4 Tingkat Risiko**

Langkah selanjutnya adalah mengkalkulasi nilai dari tingkat risiko dari penggunaan *LPG Storage Tank* dengan mengkalikan nilai *Probability of Failure & Consequences of Failure* sehingga kemudian di dapat nilai risikonya adalah sebesar 43,408. Kemudian dari perhitungan kemungkinan kegagalan (*probability of failure*) dihasilkan nilai  $Df_{total}$  sebesar 1,00 sehingga kategori kemungkinan kegagalannya pada *LPG Storage Tank* menurut tabel 2.16 bernilai 1 dengan Batasan  $Df_{total} < 2$ . Sehingga berdasarkan hasil kalkulasi sebelumnya di ketahui bahwa tingkat kegagalannya dari penggunaan *LPG Storage Tank* rendah hal tersebut dikarenakan laju korosi pada *LPG Storage Tank* yang rendah dan hasil pengujian ketebalan juga masih jauh dari tebal minimum nya. Sementara itu untuk konsekuensi kegagalan (*consequences of failure*) didapatkan bahwa nilai *consequence area (CA)* bernilai lebih dari 10000 ft<sup>2</sup> (>10000 ft<sup>2</sup>) yaitu sebesar 15430431,8 sehingga kategori konsekuensi kegagalannya menurut tabel 2.16 bernilai E. Dari hasil peninjauan kalkulasi mengenai nilai konsekuensi kegagalan yang bernilai sangat tinggi hal tersebut di sebakn oleh fluida kerja yang di operasikan pada *LPG Storage Tank* tersebut ialah LPG yang merupakan fluida mudah terbakar dan meledak selain dari pada itu *LPG Stotrage Tank* memiliki kapasitas penuh yang cukup banyak yaitu sebesar 50 ton dan hal itu salah satu penyebab nilai koneskuensi nya sangat tinggi. Berdasarkan nilai kalkulasi yang telah di dapatkan maka laporan hasil matriks risikonya adalah seperti yang di tampilkan dalam gambar 4.2 di bawah ini



Gambar 4. 2 Matrik Risiko dari Hasil Kalkulasi LPG Storage Tank

Berdasarkan keterangan matrik risiko di atas dapat diketahui bahwa tingkat risiko dari penggunaan *LPG Storage Tank* dengan kapasitas maksimum adalah sebesar 50 ton memiliki tingkat resiko yang berada pada *medium-high*

#### 4.5 Menentukan Jadwal Inspeksi

Salah satu manfaat dari menerapkan metode *risk based inspection* dalam proses menentukan interval inspeksi yang tepat yang berdasarkan pada tingkat risiko dari penggunaan alat tersebut. Penjadwalan inspeksi adalah kegiatan yang dilakukan untuk menentukan interval inspeksi yang di perlukan yang akan di implementasikan pada alat tersebut berdasarkan hasil analisis berbasis API RBI 581. Berdasarkan API 581 pembahasan mengenai jadwal inspeksi untuk bejana tekan merujuk kepada hasil Analisa risiko namun untuk interval nya tidak di jelaskan secara pasti sebab API 581 tidak mendeskripsikan secara pasti masalah tersebut dan mengembalikan masalah interval inspeksi kepada pemilik *unit equipment*. Dalam membantu proses menentukan interval inspeksi dan karena keterbatasan risiko yang dapat di terima oleh pemilik sehingga dipergunakan lah metode yang mengacu pada API 510 yang berkaitan dengan *pressure vessel inspection code* untuk unit bejana tekan yang telah terpasang (*existing*)

Didalam API 510 proses inspeksi yang akan dilakukan pada bejana tekan secara internal atau *on-stream* wajib dilakukan inspeksi maksimal 10 tahun atau pada saat umur bejana tekan telah mencapai dari umur setengah *remaining life* nya,



tergantung nilai mana yang terendah. Sehingga untuk mengetahui umur pakai dari bejana tekan maka di pergunakan persamaan untuk menentukan hal tersebut. Berdasarkan hasil kalkulasi di atas mengenai sisa umur layan maka di ketahui bahwa nilai umur pakai dari bejana tekan *LPG Storage Tank* masih berkisar sebesar 54 tahun. Karena umur layan masih tergolong lama sehingga Batasan usia yang dipergunakan adala 10 tahun sebagai maksimal interval nya.

Selanjutnya berdasarkan hasil Analisa risiko yang menempatkan hasil analisis risiko pada *LPG Storage Tank* pada keadaan *medium-high* dan meninjau bahwa maksimum interval 10 tahun tersebut adalah untuk alat beresiko rendah maka kami mengasumsikan bahwa resiko tertinggi memiliki interval 2 tahun (mengacu kepada masa berlaku sertifikat inspeksi) sehingga dengan kondisi peralatan pada keadaan *medium-high* sangat di rekomendasikan dengan interval inspeksi tersebut. Selain itu dalam metodologi API 510 untuk bejana tekan yang telah terpasang di sarankan untuk melakukan internal inspeksi dan eksternal inspeksi dengan rentang waktu maksimal adalah 5 tahun. Sehingga di dapatkan bahwa penjadwalan inspeksi untuk alat ini adalah setiap 5 tahun sekali dengan kondisi internal dan eksternal inspeksi.

#### **4.6 Menentukan Metode Inspeksi**

Tahap terakhir adalah menentukan metode inspeksi yang tepat pada *LPG Storage Tank* hal tersebut dapat dilihat dari *damage factor* yang di alami oleh *LPG Storage Tank*. *Damage factor* yang di dapatkan pada *LPG Storage Tank* adalah berupa *thinning* atau penipisan. Berdasarkan API 581 didapatkan bahwa data yang dibutuhkan untuk mencari nilai penipisan adalah dengan melakukan *thickness measurement check* pada permukaan bejana tekan. Selain hal tersebut juga di jelaskan sebagai salah satu metode inspeksi yang sangat efektif penambahan metode visual pada bejana tekan juga menambah tingkat efektifitas dari proses inspeksi.

Dengan demikian metode inspeksi yang tepat pada unit bejana tekan *LPG Storage Tank* adalah *visual examination & thickness measurement check*. *Visual examination* berfungsi untuk melakukan pengecekan kondisi actual bagian *pressure part* serta bagian kritical lainnya seperti *support, saddle, nozzle* dsb, sementara itu

pengujian ketebalan dipergunakan sebagai pertimbangan untuk mengkalkulasi nilai *corrosion ratem remaining life, thickness required dsb.*

Selain itu metode inspeksi API 572 dipergunakan untuk pengecekan kondisi pondasi, penunjang/*support, coating, ladder platform* serta elemen kritikal lainnya untuk memastikan semuanya berfungsi dengan baik dan tidak terdapat kegagalan atau pun kelainan major yang dapat mengganggu jalannya operasional dan mengancam keselamatan dan keamanan plant serta operator.

# BAB V

## KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil Analisa dan kalkulasi menggunakan metode *risk based inspection* yang mengacu kepada API RBI 581 maka di dapatkan hasil sebagai berikut :

1. Penggunaan *LPG Storage Tank* pada Stasiun Pengisian Bulk Elpiji (SPBE) memiliki nilai tingkat risiko pada kondisi *medium-high* dengan *probability of Failure (POF)* berada pada kategori 1 dan nilai *consequences of failure (COF)* berada pada kategori E yang artinya bahwa tingkat konsekuensi risiko pada penggunaan *LPG Storage Tank* berada pada level berbahaya jika abai dalam proses pemeliharaan dan SOP kerja.
2. Dari hasil Analisa RBI di dapat bahwa metode inspeksi yang tepat pada unit *LPG Storage Tank* adalah inspeksi internal dan eksternal berupa *visual examination* dan *thickness measurement check* dengan interval maksimum (yang di rekomendasikan) setiap 5 tahun sekali walaupun actual inspeksi yang di lakukan setiap 3 tahun sekali karena mengacu kepada aturan pemerintah dan asosiasi perusahaan inspeksi teknis Indonesia (APITINDO)

### 5.2 Saran

Setelah melakukan analisis pada unit *LPG Storage Tank* dengan metodologi *risk based inspection* dengan mengacu kepada API RBI 581, maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut :

1. Mengimplementasikan system proteksi dan dekteksi dini pada area area kritikal agar dapat segera melakukan mitigasi dan antisipasi kebocoran yang mungkin terjadi sehingga potensi tersebut dapat di kurang
2. Menerapkan system Kesehatan dan keselamatan kerja pada setiap elemen yang bersinggungan langsung dengan unit *LPG Storage Tank*

3. Melakukan pemeriksaan internal secara berkala pada unit *LPG Storage Tank* salah satu di antaranya adalah melakukan *thickness measurement check*

## **BAB VI**

### **REFERENSI PENELITIAN**

1. Lillah, D. A. W., & Priyanta, D. (2017). Analisis Remaining Life dan Penjadwalan Program Inspeksi pada Pressure Vessel dengan Menggunakan Metode Risk Based Inspection (RBI). *Jurnal Teknik ITS*, 5(2).
2. Al Qathafi, M. (2015). *Studi aplikasi metode Risk Based Inspection (RBI) semi-kuantitatif API 581 pada production separator* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
3. Ramli, S. (2017). Manajemen Keselamatan Proses Berbasis Risiko (Risk Based Process Safety Management) untuk Industri Migas dan Petrokimia. *Jakarta: Yayasan Pengembangan Keselamatan Prosafe Institute.*
4. Ariady, D. S. (2017). *Analisa Manajemen Inspeksi Berbasis Risiko Pada Separator Vessel di PT. YZ* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
5. *Risk Based Inspection* . Pattel, Ramesh J. 7, Doha : 3rd Middle East Non-Destructive Testing Convergence & Exhibition , 2005, Vol. III
6. *Risk Based Approach to Integrity Assessment of a Large Spherical Pressure Vessel*. Sedmak, Aleksandar and al, et. 6, Serbia : Elsevier, 2016, Vol. EFC 21. 3654-3659
7. *American Petroleum Institute 580 – Risk Based Inspection Methodology Latest Edition*
8. *American Petroleum Institute 581 – Risk Based Inspection Base Resource Document Latest Edition.*
9. *American Society of Mechanical Engineers VIII Div.1 – Boiler and Pressure Vessel Code Latest Edition*

10. *American Petroleum Institute 510 Pressure Vessel Inspection Code Latest Edition*
11. *American Society of Mechanical Engineers V – Non Destructive Examination Latest Edition*
12. *American Society of Mechanical Engineers Section II – Material American Petroleum Institute Recommended Practice 571 – Damage Mechanism Latest Edition*
13. Druķis, P., Gaile, L., & Pakrastiņš, L. (2017). Inspection of public buildings based on risk assessment. *Procedia Engineering*, 172, 247-255.
14. Truong-Ba, H., Cholette, M. E., Borghesani, P., Ma, L., & Kent, G. (2020). Condition-based inspection policies for boiler heat exchangers. *European Journal of Operational Research*
15. Defteraios, N., Kyranoudis, C., Nivolianitou, Z., & Aneziris, O. (2020). Hydrogen explosion incident mitigation in steam reforming units through enhanced inspection and forecasting corrosion tools implementation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63, 104016.
16. Abubakirov, R., Yang, M., & Khakzad, N. (2020). A risk-based approach to determination of optimal inspection intervals for buried oil pipelines. *Process Safety and Environmental Protection*, 134, 95-107.
17. Chen, T. Y. J., Riley, C. T., Van Hentenryck, P., & Guikema, S. D. (2020). Optimizing inspection routes in pipeline networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 195, 106700.
18. Bhatia, K., Khan, F., Patel, H., & Abbassi, R. (2019). Dynamic risk-based inspection methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62, 103974.
19. Perumal, K. E. (2014). Corrosion risk analysis, risk based inspection and a case study concerning a condensate pipeline. *Procedia Engineering*, 86, 597-605.

20. Hameed, A., Khan, F., & Ahmed, S. (2016). A risk-based shutdown inspection and maintenance interval estimation considering human error. *Process Safety and Environmental Protection*, *100*, 9-21.
21. Helsloot, I., Scholtens, A., & Haen, J. (2020). Some observations on the troublesome implementation of risk-based inspections in the Netherlands. *Safety science*, *122*, 104507.
22. Kamsu-Foguem, B. (2016). Information structuring and risk-based inspection for the marine oil pipelines. *Applied Ocean Research*, *56*, 132-142.
23. Mancuso, A., Compare, M., Salo, A., Zio, E., & Laakso, T. (2016). Risk-based optimization of pipe inspections in large underground networks with imprecise information. *Reliability Engineering & System Safety*, *152*, 228-238.
24. Marlow, D. R., Beale, D. J., & Mashford, J. S. (2012). Risk-based prioritization and its application to inspection of valves in the water sector. *Reliability Engineering & System Safety*, *100*, 67-74.
25. Mohamed, R. B., Hassan, C. R. B. C., & Hamid, M. D. (2018). Developing a risk-based inspection practices maturity model for Malaysian industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *56*, 217-230.
26. Wang, G., Yan, T., Zhang, J., & Chen, J. (2011). Risk Based Inspection on the equipment of low density polyethylene. *Procedia Engineering*, *15*, 1145-1148.
27. Shishesaz, M. R., Bajestani, M. N., Hashemi, S. J., & Shekari, E. (2013). Comparison of API 510 pressure vessels inspection planning with API 581 risk-based inspection planning approaches. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *111*, 202-208.
28. Vianello, C., Milazzo, M. F., Guerrini, L., Mura, A., & Maschio, G. (2016). A risk-based tool to support the inspection management in chemical plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *41*, 154-168.

29. Vinod, G., Sharma, P. K., Santosh, T. V., Prasad, M. H., & Vaze, K. K. (2014). New approach for risk based inspection of H<sub>2</sub>S based process plants. *Annals of Nuclear Energy*, 66, 13-19.
30. Zwetsloot, G., van Kampen, J., Steijn, W., & Post, S. (2020). Ranking of process safety cultures for risk-based inspections using indicative safety culture assessments. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 64, 104065.
31. Tan, Z., Li, J., Wu, Z., Zheng, J., & He, W. (2011). An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection. *Safety science*, 49(6), 852-860.
32. Baskoro, A. (2010). Penerapan Metode Inspeksi Berbasis Risiko Pada Peralatan Fasilitas Produksi Migas Lepas Pantai PT. X dengan Service Crude.
33. Pitalokha, R. A., Hamdani, M. R., Taufik, A., & Mulyana, C. Kajian Risk Based Inspection untuk Separator dan Heat Exchanger pada Liquefied Natural Gas Plant.
34. Haryadi, G. D., Suprihanto, A., Sephanya, A., & Haryanto, I. Penilaian Risiko Dan Penentuan Sisa Umur Terhadap Pipa Gas Tee 24" Di Pt. X Dengan Menggunakan Metode Risk Based Inspection.





YAYASAN PERGURUAN CIKINI  
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

Jl. Moh. Kahfi II, Bhumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640  
Telp. 021-7270080 (hunting), Fax. 021-7888985, hp. 081291030024  
Email: [humas@istn.ac.id](mailto:humas@istn.ac.id) Website: [www.istn.ac.id](http://www.istn.ac.id)

Nomor : 10/02.2/Gmm/I/2021

Lamp. :

Hal : Penunjukan Dosen Pembimbing

Kepada Yth,  
Prof. Dr. Ir. DN. Adnyana, APU  
Dosen Pembimbing Tesis  
Program Studi Magister Teknik Mesin  
Jakarta

Dengan hormat,

Bersama ini disampaikan nama mahasiswa yang mengambil tugas penelitian/tesis :

Nama Mahasiswa : Zendi Zakaria

No. Pokok : 19510001

Judul Penelitian/Tesis : *Analisa Kegagalan Crankshaft Compressor Piston High Pressure*

Mohon kesediaan Bapak untuk membimbing mahasiswa tersebut diatas.

Dosen Pembimbing berhak mengubah judul dan topik penelitian apabila dinilai tidak sesuai.

Demikian atas perhatian dan kerjasamanya disampaikan terima kasih.

Jakarta, Januari 2021

Program Studi  
Magister Teknik Mesin-ISTN

Kepala,

  
Dr. Ir. Kostwara, MSc

Tembusan Yth.

- 1 Mahasiswa ybs
- 2 Arsip

**ANALISA KEGAGALAN PADA *CRANKSHAFT* KOMPRESOR  
PASCA *REPAIR***

**ZENDI ZAKARIA  
NIM : 19510001**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS PASCASARJANA  
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL  
JAKARTA  
AGUSTUS 2021**



**ANALISA KEGAGALAN PADA CRANKSHAFT KOMPRESOR  
PASCA REPAIR**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister**

**ZENDI ZAKARIA  
NIM : 19510001**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS PASCASARJANA  
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL  
JAKARTA  
AGUSTUS 2021**

## **HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

Tugas Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri dan semua sumber yang baik dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : ZENDI ZAKARIA

NPM : 19510001

Tanggal : 21 Agustus 2021

**TTD diatas materai**

## HALAMAN PERNYATAAN NON PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Zendi Zakaria

NPM : 19510001

Mahasiswa : Teknik Mesin

Tahun : 2021

Menyatakan bahwa saya tidak melakukan kegiatan plagiat dalam penulisan tugas akhir ini yang berjudul “ ANALISA KEGAGALAN PADA *CRANKSHAFT* KOMPRESOR PASCA *REPAIR* “

Apabila suatu saat nanti terbukti saya melakukan plagiat , maka saya akan menerima sanksi yang telah ditetapkan.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Jakarta, 21 Agustus 2021

Zendi Zakaria

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Zendi Zakaria  
NPM : 19510001  
Program Studi : Teknik Dan Manajemen Pemeliharaan  
Judul Tesis : Analisa Kegagalan Pada *Crankshaft* Kompresor Pasca *Repair*

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik Mesin pada Program Studi Teknik Dan Manajemen Pemeliharaan Fakultas Pascasarjana, Institut Sains Dan Teknologi Nasional.**

## DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. DN. Adnyana, APU ( ..... )

Penguji : Dr. Ir Koswara ( ..... )

Penguji : Dr. Ir. Triwibowo ( ..... )

Penguji : Prof. Dr. Ir. Bambang Teguh P.DEA ( ..... )

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 21 Agustus 2021

## **KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH**

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Program Studi Teknik Dan Manajemen Perawatan (TMP) pada Fakultas Teknik Mesin Institut Sains Dan Teknologi Nasional. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- a) Prof, Dr, Ir, DN. Adnyana, APU, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- b) Kepada PT. Nichirin Indonesia dan PT. Master Selam telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- c) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
- d) Sahabat, maintenance tim, mustika insani, dimas ansori, ari yusmihardi yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Jakarta, 21 Agustus 2021

Penulis

Zendi Zakaria



## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sebagai sivitas akademika Institut Sains Dan Teknologi Nasional, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Zendi Zakaria

NPM : 19510001

Program studi : Teknik Dan Manajemen Perawatan (TMP)

Fakultas : Teknik Mesin

Jenis karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Institut Sains dan Teknologi Nasional **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Nonexclusive Royalty- Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

“Analisa Kegagalan Pada *Crankshaft* Kompresor Pasca *Repair*”, beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Institut Sains dan Teknologi Nasional berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*) *soft copy* dan *hard copy*, merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 21 Agustus 2021

Yang Menyatakan

Zendi Zakaria

## ABSTRAK

Nama : Zendi Zakaria

Program : Teknik Mesin

Judul : Analisa Kegagalan Pada *Crankshaft* Kompresor Pasca *Repair*.

Analisa kegagalan yang dilakukan pada *crankshaft* kompresor pasca *brazing repair* tujuan penelitian ini untuk mengetahui penyebab kegagalan pasca *brazing repair*, nilai kekuatan pada material *crankshaft* dan menyarankan metode *repair* yang benar. Kompresor ini termasuk jenis *reciprocating single acting* dengan menggunakan 3 *Stage*, kompresor ini terjadi kegagalan saat jam operasi mencapai 3298 jam dengan tekanan maksimum 330 bar. Sejumlah spesimen diambil *crankshaft* kompresor yang patah pasca *brazing repair* untuk dilakukan pemeriksaan meliputi pemeriksaan visual, makrostruktur, analisa kimia, pemeriksaan struktumikro dan kekerasan. Dari hasil analisa makro kondisi lokasi awal permukaan berasal dari sudut tegak lurus terhadap poros diameter 30 mm, hasil analisa komposisi kimia C > 1,80, Si 1,56 S 0,0295 maka material *crankshaft* termasuk besi cor nodular SAE J434, hasil pengujian *metalografi* terdapat struktur ferit, perlit dan grafit nodular dan hasil pengujian kekerasan yang terbesar 682 HV dan yang terendah 110 HV. Hasil analisa kegagalan menunjukkan bahwa *crankshaft* mengalami patah getas yang disebabkan oleh penyambungan *crankshaft* pasca *brazing repair* menggunakan material CuNi menunjukkan kekuatan mutunya rendah serta mengingat titik cair material besi cor dengan material las CuNi berbeda sehingga tidak dapat menyatu dengan baik dan terdapat *solidification cracking* pada saat proses pengelasan SMAW dengan elektroda RB-26 dan jenis kompresor bertekanan tinggi sehingga beban yang diterima oleh *crankshaft* kompresor cukup tinggi.

**Kata kunci:** Analisa kegagalan; *Crankshaft*; *Brazing*; *Welding*; patah getas; perawatan berkala, *solidification cracking*.

## **ABSTRACT**

*Failure analysis carried out on the compressor crankshaft after brazing repair aims of this study to determine the cause of failure after brazing repair, the value of the strength of the crankshaft material and suggest the correct repair method. This compressor is a single acting reciprocating type using 3 stages, this compressor fails when the operation reaches 3298 hours with a maximum pressure of 330 bar. A number of specimens were taken from the broken compressor crankshaft after brazing repair for inspection including visual inspection, macrostructure, chemical analysis, structural and hardness inspection. From the results of the macro analysis of the initial location conditions originating from an angle perpendicular to the shaft diameter of 30 mm, the results of the analysis of the chemical composition C > 1.80 Si 1.56 S 0.0295, the crankshaft material including SAE J434 nodular cast iron, the results of metallographic testing are structure of ferrite, pearlite and nodular graphite and the highest hardness test results are 682 HV and the lowest is 110 HV. The results of the failure analysis showed that the crankshaft experienced brittle fracture caused by connecting the crankshaft after brazing repair using CuNi material, showing low quality strength and considering the melting point of cast iron material with different CuNi welding materials so that it cannot blend properly and there is solidification cracking when SMAW welding process with RB-26 electrode and high pressure compressor type so that the load received by the crankshaft is sufficient for the compressor.*

*Keywords: Failure analysis; Crankshaft; Brazing; Welding; brittle fracture; periodic maintenance, solidification cracking.*

## **PERNYATAAN MENGENAI LAPORAN TESIS DAN SUMBER INFORMASI**

Dengan ini saya menyatakan Laporan Tesis dengan judul Analisa Kegagalan Pada *Crankshaft* Kompresor Pasca *Repair* adalah benar karya saya sendiri dengan arahan komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk laporan apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir laporan ini.

Jakarta, 21 Agustus 2021

Zendi Zakaria  
NIM 19510001

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Zendi Zakaria

NPM : 19510001

Program Studi : Magister Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik dan Manajemen Pemeliharaan

Judul Tesis : Analisa Kegagalan Pada *Crankshaft* Kompresor Pasca *Repair*.

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan dewan penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik Mesin pada Program Studi Teknik Dan Manajemen Pemeliharaan Fakultas Pascasarjana, Institut Sains dan Teknologi Nasional.**

## DAFTAR ISI

<b>BAB I</b> .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah .....	3
1.3 Batasan masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Sistematika penulisan.....	4
<b>BAB II</b> .....	7
LANDASAN TEORI .....	7
2.1 Tinjauan pustaka .....	7
2.2. Kegagalan .....	10
2.2.1 Analisis Kegagalan .....	11
2.2.2 Kemungkinan yang terjadi kegagalan <i>Crankshaft</i> .....	13
2.3 Jenis kompresor .....	15
2.4 Komponen kompresor piston.....	18
2.5. Besi Cor .....	20
2.5.1 Klasifikasi Besi Cor.....	21
2.5.2 Pengaruh elemen paduan .....	24
2.6 Heat treatment besi cor nodular.....	28
2.6.4 Tempering pada Besi Cor Nodular .....	29
2.8 Mekanisme kegagalan <i>crankshaft</i> .....	30
2.8.1 Pengelasan.....	32
2.8.2 Paduan tembaga-nikel sebagai logam pengisi <i>welding</i> .....	36
2.8.3 <i>Repair Welding</i> .....	37
2.8.4 <i>Oxyfuel gas welding</i> (OFW) .....	39
2.8.5 Fenomena retak terkait proses pengelasan.....	41
2.8.6 <i>Solidification Cracking</i> ( <i>Hot Cracking</i> ).....	41
2.8.7 Retak zona yang terkena panas (HAZ) .....	44

2.8.8 Retak yang diinduksi hidrogen (retak dingin) .....	46
2.9. Kegagalan casting .....	48
2.9.1 Kegagalan poros.....	49
2.9.2 Sifat kelelahan pada besi cor.....	57
2.10 Perpatahan.....	58
2.10.1 Perpatahan ulet ( <i>ductile fracture</i> ).....	59
2.10.2 Perpatahan rapuh ( <i>Brittle fracture</i> ).....	60
2.11 Pengujian material .....	61
2.11.1 Pengujian struktur mikro .....	63
2.11.2 Pengujian komposisi kimia.....	66
2.11.3 Pengujian kekerasan .....	66
2.12 Karakteristik perpatahan rapuh .....	71
2.13 Strukturmikro besi cor nodular .....	74
2.14 Penelitian terdahulu .....	76
<b>BAB III</b> .....	79
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	79
3.2 Konstruksi <i>Crankshaft</i> kompresor piston .....	80
3.3 Pengamatan Visual .....	81
3.4 Pemeriksaan makro.....	81
3.5 Pengamatan strukturmikro.....	82
3.6 Analisa pengujian komposisi kimia.....	83
3.7 Pengujian kekerasan .....	84
3.8 Skema perpatahan.....	85
3.9 Kronologi terjadinya patah <i>crankshaft compressor</i> .....	85
3.10 Spesifikasi kompresor.....	87
3.11 Riwayat servis.....	88
3.12 Rencana waktu pengerjaan .....	89
<b>BAB IV</b> .....	90
4.1 Pengujian komposisi kimia.....	90
4.2 Pengujian kekerasan <i>hardness Vickers</i> .....	91
4.3 Pengujian <i>macrostructure test</i> .....	93

4.4	<i>Microstructure test</i> .....	95
4.5	Pengamatan secara visual <i>crankshaft compressor</i> .....	102
4.6	Analisa beban yang diterima <i>crankshaft</i> terjadi .....	103
<b>BAB V</b> .....		109
5.1	<b>KESIMPULAN</b> .....	109
5.2	<b>Saran</b> .....	111
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		116



## DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 1. 1 KOMPRESOR PISTON .....	2
GAMBAR 2. 1 BLOCK MACHINE .....	12
GAMBAR 2. 2 FISHBONE DIAGRAM .....	13
GAMBAR 2. 3 CRANKSHAFT KOMPRESOR PATAH .....	15
GAMBAR 2. 4 TYPE KOMPRESOR .....	15
GAMBAR 2. 5 KOMPRESOR CENTRIFUGAL .....	18
GAMBAR 2. 6 HEAT TREATMENT .....	29
GAMBAR 2. 7 FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KERETAKAN PANAS PADA LOGAM LAS .....	43
GAMBAR 2. 8 FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KERETAKAN PANAS PADA BASE METAL .....	44
GAMBAR 2. 9 PENYEBAB DAN KERETAKAN TERINDUKSI HYDROGEN PADA LOGAM LASAN .....	47
GAMBAR 2. 10 PENYEBAB KERETAKAN YANG DIINDUKSI HYDROGEN PADA BASE METAL .....	47
GAMBAR 2. 11 DIAGRAM BENDA BEBAS YANG MENUNJUKKAN ORIENTASI TEGANGAN NORMAL DAN TEGANGAN GESER .....	52
GAMBAR 2. 12 SIFAT MATERIAL DAN JENIS KEGAGALAN BEBAN BERLEBIH MEMPENGARUHI PENAMPILAN PERMUKAAN PATAHAN .....	53
GAMBAR 2. 13 RASIO PERBANDINGAN KEKUATAN FATIGUE, TENSILE .....	58
GAMBAR 2. 14 ALAT UJI METALOGRAFI .....	65
GAMBAR 2. 15 PENGUJIAN KEKERASAN BRINELL .....	67
GAMBAR 2. 16 PERUMUSAN PENGUJIAN BRINELL .....	67
GAMBAR 2. 17 PENGUJIAN KEKERASAN VICKERS .....	69
GAMBAR 2. 18 PENGUJIAN KEKERASAN ROCKWELL .....	70
GAMBAR 2. 19 MACROSTRUCTURE KERUKSAKAN PADA CRANKSHAFT .....	73
GAMBAR 2. 20 STRUKTUR MIKRO CRANKSHAFT KOMPRESOR .....	75
GAMBAR 3. 1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN ANALISA KEGAGALAN PASCA WELDING REPAIR PADA CRANKSHAFT KOMPRESOR .....	79
GAMBAR 3. 2 KONSTRUKSI CRANKSHAFT KOMPRESOR PISTON .....	81
GAMBAR 3. 3 KONDISI VISUAL CRANKSHAFT PASCA BRAZING REPAIR YANG PATAH .....	81
GAMBAR 3. 4 PENGAMATAN PATAHAN SECARA MAKRO .....	82
GAMBAR 3. 5 STRUKTUR MIKRO DAERAH REKONDISI BRAZING .....	83
GAMBAR 3. 6 STRUKTUR MIKRO JAUH DARI TITIK BRAZING .....	83
GAMBAR 3. 7 ALAT UJI KEKERASAN VICKERS HARDNESS TESTER (FRANK FINOTEST) .....	84
GAMBAR 3. 8 SKEMA PERPATAHAN .....	85

GAMBAR 4. 1 TITIK PENGUJIAN KEKERASAN .....	91
GAMBAR 4. 2 DIMENSI DAN POSISI AWAL PATAH.....	93
GAMBAR 4. 3 CACAT DAN GURATAN PADA CRANKSHAFT .....	93
GAMBAR 4. 4 MAKROSTRUKTUR ALUR AWAL MULA PERPATAHAN.....	94
GAMBAR 4. 5 ILUSTRASI PROSES PENJALARAN PATAH .....	95
GAMBAR 4. 6 PEMOTONGAN DAN PENGAMBILAN SAMPEL UNTUK PENGUJIAN.....	96
GAMBAR 4. 7 HASIL PENGUJIAN STRUKTURMIKRO SAMPEL PERPATAHAN .....	97
GAMBAR 4. 8 STRUKTURMIKRO DAERAH LAS SMAW.....	98
GAMBAR 4. 9 STRUKTURMIKRO BRAZING MATERIAL CUNI .....	100
GAMBAR 4. 10 STRUKTURMIKRO JAUH DARI DAERAH PATAH DAN LASAN .....	101
GAMBAR 4. 11 PENGAMATAN VISUAL CRANKSHAFT YANG DIREKONDISI.....	103
GAMBAR 4. 12 FREEBODY DIAGRAM CRANKSHAFT KOMPRESOR .....	103
GAMBAR 4. 13 CRANKSHAFT KOMPRESOR 3 DIMENSI AKTUAL DAN DRAWING .....	106
GAMBAR 4. 14 ANALISA TEGANGAN CRANKSHAFT SOFTWARE ANSYS .....	107
GAMBAR 4. 15 DAERAH YANG KRITIKAL KETIKA CRANKSHAFT MENERIMA TEKANAN. ....	107
GAMBAR 4. 16 DAERAH YANG KRITIKAL KETIKA CRANKSHAFT MENERIMA TEKANAN TERLIHAT DARI DEPAN .....	108

## DAFTAR TABEL

TABEL 2. 1 PERBANDINGAN SOLDERING, BRAZING DAN WELDING .....	33
TABEL 2. 2 TEMPERATUR PENGGABUNGAN UNTUK LOGAM PENGISI PADA BRAZING.....	36
TABEL 2. 3 BRAZING FILLER.....	36
TABEL 2. 4 SKALA KEKERASAN ROCKWELL.....	71
TABEL 3. 1 SPESIFIKASI KOMPRESOR.....	87
TABEL 3. 2 RIWAYAT PERAWATAN BERKALA .....	88
TABEL 3. 3 WAKTU Pengerjaan.....	89
TABEL 4. 1 UNSUR KOMPOSISI KIMIA BESI COR NODULAR PERSENTASE DALAM SATUAN BERAT .....	90
TABEL 4. 2 TABEL PENGUJIAN KEKERASAN CRANKSHAFT COMPRESSOR .....	92
TABEL 4. 3 SPESIFIKASI MATERIAL CRANKSHAFT.....	103
TABEL 5. 1 FILLER BESI COR NODULAR .....	112
TABEL 5. 2 KOMPOSISI KIMIA FILLER .....	112
TABEL 5. 3 UKURAN STANDAR FILLER.....	113
TABEL 5. 4 UKURAN PANJANG FILLER ELEKTRODA SMAW .....	113
TABEL 5. 5 WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) .....	115

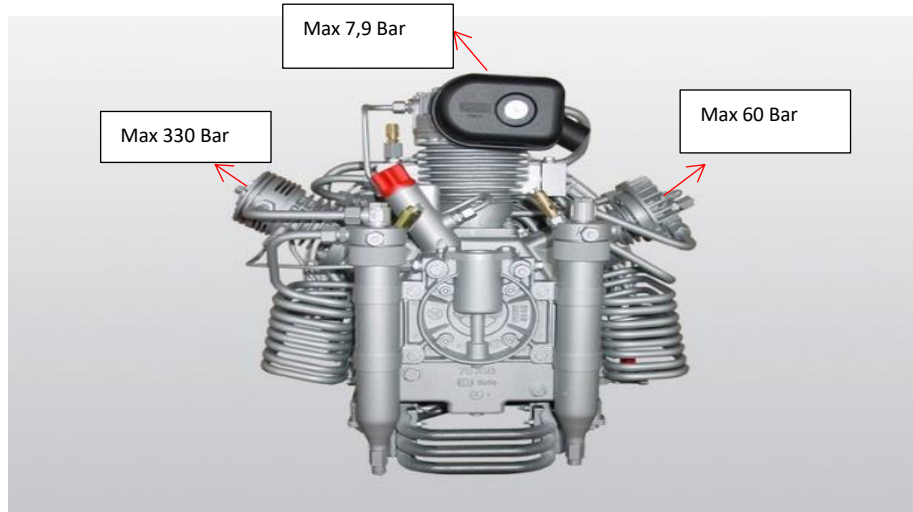
# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Kompresor adalah alat mekanik yang berfungsi untuk meningkatkan tekanan fluida yang mampu memampatkan gas atau udara. Dalam keseharian, kita sering memanfaatkan udara mampat baik secara langsung atau tidak langsung. Pada dunia industri penggunaan kompresor sangat penting, baik sebagai penghasil udara mampat atau sebagai satu kesatuan dari mesin-mesin. Kompresor banyak dipakai untuk mesin *pneumatic*, sedangkan yang menjadi satu dengan mesin yaitu turbin gas, mesin pendingin dan macam lainnya.

Dalam kaitannya jenis kompresor yang digunakan haruslah sesuai dengan keperluan dan penempatannya dalam suatu proses. Salah satu yang digunakan dalam hal ini adalah kompresor torak. Dimana pada proses dari udara luar yang telah dikompresikan akan diturunkan suhunya. Pada dasarnya kompresor torak dilengkapi dengan sebuah motor sebagai penggerak kompresor melalui sebuah sabuk V- belt transmisi daya. Dimana kompresor torak ini bekerja dengan prinsip tekanan bolak balik dari piston yang digerakkan oleh poros engkol, Dalam Analisa ini kompresor torak memakai 3 *stage* / tingkatan, Udara yang dikompresikan ke silinder melalui katub isap ( *Suction Valve* ) dan dikeluarkan melalui katub buang ( *Discharge Valve* ). Kedua katub kompresor ini bekerja sendiri dengan waktu yang tidak bersamaan. Oleh karna itu ada perbedaan tekanan yang terjadi pada aliran gas yang dikompresikan dalam silinder tersebut. Tekanan yang masuk pada katub isap ( *Suction Valve* ) akan dibuka, apabila tekanan dalam silinder lebih besar dibandingkan dengan tekanan pada katub buang , maka katub buang akan terbuka. Demikianlah katub ini bekerja secara kontinu.



**Gambar 1. 1 Kompresor Piston**

Sumber: Manual Book Kompresor

Poros penghubung (*crankshaft*) ini tidak luput juga dari kerusakan selama pemakaiannya. Oleh sebab itu untuk meneliti gangguan kerusakan yang terjadi pada kompresor piston ini dengan mengambil 2 contoh kerusakan yaitu pada poros (*crankshaft*) dan pada bantalan (*Bearing*). Kegagalan poros yang menerjemahkan gerakan berputar menjadi gerakan linier ataupun sebaliknya, poros beroperasi dalam berbagai kondisi termasuk atmosfer yang terdapat debu atau bersifat korosif dan suhu yang bervariasi dari sangat rendah hingga sangat tinggi, selain itu poros itu dapat dikenakan beban secara umum torsi, kompresi, lentur atau kombinasi kedua-duanya. Poros juga terkadang mengalami tekanan, getaran dan keausan, penyebab paling umum dari kegagalan poros adalah kelelahan logam. Karena kegagalan dimulai dari titik yang paling rentan di area yang mengalami tekanan dinamis biasanya pemicu stres yang mungkin saja mekanis, metalurgi atau kombinasi keduanya.

Sebagian besar kegagalan meningkatnya stres di wilayah lokal, nilai tegangan dinaikan di atas nilai dimana material mampu menahan jumlah pembebanan siklus yang sesuai dengan masa pakai yang memuaskan. Hanya satu area kecil yang perlu ditekan berulang kali diatas kekuatan fatik material memulai retakan. Ketidaksempurnaan yang tampak tidak signifikan, seperti ketidakteraturan permukaan kecil dapat sangat mengurangi kekuatan kelelahan poros jika tingkat

tegangan diketidaksempurnaan itu tinggi dan zona paling rentan yaitu kelelahan torsi dan lentur pada poros. Oleh karena salah satunya penyebab kerusakan kompresor khususnya di jenis piston atau *reciprocating* adalah kegagalan poros (*crankshaft*) yaitu kelebihan beban. (ASM Metals Handbook Volume 11, Failure analysis and Preven).

Bantalan (*Bearing*) dipasang pada poros (*crankshaft*) dipasang pada bodi kompresor (*crankcase*) pemeriksaan daerah kompresor menunjukkan bahwa rumah pada bantalan rusak dan terdapat cacat. Kondisi terburuk adalah rumah bantalan (*bearing*) permukaan luarnya dibandingkan dengan permukaan luar bantalan lainnya terlihat bantalan yang mengalami kerusakan salah satunya retak dan telah mengalami deformasi, pada hasil penampang terlihat jelas menunjukkan indikasi tekanan tinggi yang diderita bantalan (*bearing*) yang mengalami kerusakan. Sebelum mengalami kerusakan terjadi keausan yang berlebihan dari komponen bantalan, material rumah bantalan yang menempel diantara bola dan menghasilkan kerusakkan yang parah. (Failure analysis case studies II, D.R.H. Jones).

## **1.2 Rumusan masalah**

Pembahasan kompresor sistem kerja torak atau piston, pada sistem kompresor torak digerakan oleh motor listrik diteruskan dengan *pully* dan dihubungkan melalui v-belt ke kompresor. Pada kompresor torak terutama pada *crankshaft* yang dapat dijadikan pembahasan utama diantaranya,

- a. Faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi kegagalan pasca *brazing repair* pada *crankshaft* kompresor.
- b. Memberikan saran cara metode repair yang benar pada *crankshaft* kompresor.

## **1.3 Batasan masalah**

Untuk mendapatkan hasil pembahasan maksimal, maka penulis perlu membatasi masalah yang akan dibahas, adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. *Crankshaft* yang digunakan sebagai penelitian adalah kompresor *reciprocating* 3 tingkat / *stage*.
2. Analisa kegagalan fokus pada *crankshaft* yang patah pasca *brazing repair*.

3. Pemeriksaan visual, pemeriksaan fraktografi, pengujian metalografi, pengujian kekerasan dan pengujian komposisi.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini diantaranya adalah :

1. Mengetahui penyebab kegagalan pasca *brazing repair* pada *crankshaft*, sehingga dapat mengurangi kesalahan pada proses *repair*, agar perbaikan tidak memakan waktu yang tidak terlalu lama.
2. Menambah khasanah ilmu pengetahuan di bidang teknik dan dapat dijadikan sebagai tambahan pustaka bagi dunia pendidikan dan teknologi.
3. Mengetahui kekuatan *crankshaft* pasca *brazing repair* dan tipe material yang digunakan.

#### **1.5 Sistematika penulisan**

Sistematika penulisan yang dilakukan meliputi beberapa bagian :

#### **BAB I PENDAHULUAN**

- 1.1 Latar Belakang
- 1.2 Rumusan Masalah
- 1.3 Batasan Masalah
- 1.4 Tujuan Penelitian
- 1.5 Sistematika Penulisan

#### **BAB II LANDASAN TEORI**

- 2.1. Tinjauan Pustaka
- 2.2. Kegagalan
  - 2.2.1. Analisis kegagalan
  - 2.2.2. Kemungkinan yang terjadi kegagalan *crankshaft*
- 2.3. Jenis Kompresor
- 2.4. Komponen kompresor piston
- 2.5. Besi cor
  - 2.5.1. Klasifikasi besi cor
  - 2.5.2. Pengaruh elemen paduan
- 2.6. Heat Treatment besi cor nodular

- 2.6.1. *Tempering* pada besi cor nodular
- 2.7. Mekanisme Kegagalan pada *Crankshaft*
  - 2.7.1. *Brazing*
  - 2.7.2. Paduan tembaga-nikel sebagai logam pengisi *brazing*
  - 2.7.3. *Repair brazing*
  - 2.7.4. *Torch brazing* memakai metode *oxyfuel gas welding* (OFW)
  - 2.7.5. Fenomena retak terkait proses pengelasan
  - 2.7.6. *Solidification cracking* (*hot cracking*)
  - 2.7.7. Retak zona yang terkena panas HAZ
  - 2.7.8. Retak yang diinduksi hydrogen (retak dingin)
- 2.8. Kegagalan *casting*
  - 2.8.1. Kegagalan poros
    - 2.8.1.2 Penyebab perpatahan diporos akibat kelebihan beban
  - 2.9.1 Sistem kelelahan Sifat kelelahan pada besi cor
- 2.10 Perpatahan
  - 2.10.1 Perpatahan ulet (*ductile fracture*)
  - 2.10.2. Perpatahan rapuh (*Brittle fracture*)
- 2.11 Pengujian material
  - 2.11.1 Pengujian strukturmikro
  - 2.11.2 Pengujian komposisi kimia
  - 2.11.3 Pengujian kekerasan
- 2.12 Karakteristik perpatahan rapuh
- 2.13 Strukturmiko besi cor nodular
- 2.14 Penelitian terdahulu

### BAB III METODE PENELITIAN

- 3.1. Diagram alir penelitian
- 3.2. Konstruksi *crankshaft* kompresor piston
- 3.3. Pengamatan visual
- 3.4. Pemeriksaan makro
- 3.5. Pemeriksaan strukturmikro



- 3.6. Analisa pengujian komposisi kimia
- 3.7. Pengujian kekerasan
- 3.8. Skema perpatahan
- 3.9. Kronologi terjadinya patah crankshaft kompresor
- 3.10. Spesifikasi kompresor
- 3.11. Riwayat servis
- 3.12. Rencana waktu pengerjaan

#### BAB IV HASIL DAN PENGUJIAN

- 4.1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia
  - 4.2. Hasil Pengujian Kekerasan *hardness vickers*
  - 4.3. Hasil Pengujian *macrostructure test*
  - 4.4. Hasil Pengujian *microstruktur test*
  - 4.5. Pengamatan secara visual *crankshaft* kompresor
  - 4.6. Analisa tegangan yang terjadi
5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN
- 5.1 Kesimpulan analisa dan observasi dari penelitian yang dilakukan mengarah pada tujuan yang diharapkan dari penulisan ini.
  - 5.2 Saran

#### DAFTAR PUSTAKA

Berisikan referensi-referensi dalam penulisan penelitian tesis ini

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan pustaka

Kompresor adalah mesin untuk memampatkan udara atau gas. Kompresor udara biasanya mengisap udara dari atmosfer. Namun ada pula yang mengisap udara atau gas yang bertekanan lebih dari tekanan atmosfer. Dalam hal ini kompresor bekerja sebagai penguat (*booster*). Sebaliknya ada pula kompresor yang mengisap gas yang bertekanan lebih rendah dari pada tekanan atmosfer. Dalam hal ini kompresor disebut pompa vakum (Sularso, 2000) .

Kompresor adalah alat pemampat atau pengkompresi udara dengan kata lain kompresor adalah penghasil udara mampat. Karena proses pemampatan, udara mempunyai tekanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tekanan udara lingkungan (1atm). Dalam keseharian, kita sering memanfaatkan udara mampat baik secara langsung atau tidak langsung. Sebagai contoh, udara mampat yang digunakan untuk mengisi ban mobil atau sepeda motor, udara mampat untuk membersihkan bagian-bagian mesin yang kotor di bengkel-bengkel dan manfaat lain yang sering dijumpai sehari-hari. Pada industri, penggunaan kompresor sangat penting, baik sebagai penghasil udara mampat atau sebagai satu kesatuan dari mesin-mesin. Kompresor banyak dipakai untuk mesin pneumatik, sedangkan yang menjadi satu dengan mesin yaitu turbin gas, mesin pendingin dan lainnya. Dengan mengambil contoh kompresor sederhana, yaitu pompa ban sepeda atau mobil, prinsip kerja kompresor dapat dijelaskan sebagai berikut. Jika torak pompa ditarik keatas, tekanan di bawah silinder akan turun sampai di bawah tekanan atmosfer sehingga udara akan masuk melalui celah katup hisap yang kendur. Katup terbuat dari kulit lentur, dapat mengencang dan mengendur dan dipasang pada torak. Setelah udara masuk pompa kemudian torak turun kebawah dan menekan udara, sehingga volumenya menjadi kecil (Sunyoto, 2008).

Penelitian terhadap kegagalan, mungkin mempunyai berbagai/bermacam sasaran. Pada setiap penelitian, mungkin dibuat suatu kesalahan untuk kegagalan, tetapi dasar dari inti kegagalan suatu produk yang pertama dapat dicegah. Analisa dari kegagalan bisa diibaratkan seperti bermain detektif dengan benda-benda mati/diam. Kerumitan atau kesulitan dari penyelidikan (penelitian) menjadi suatu ketidak sanggupaan untuk mencari jalan pintas / alternative. Dimana mengikuti suatu panduan sangat membantu para peneliti dalam upaya mencapai/ menemukan sumber dari penyebab suatu kegagalan panduan tersebut adalah sebagai berikut :

1. Latar belakang informasi yang menyediakan peranan apa yang terjadi pada waktu terjadinya kegagalan, sejarah dari manufaktur, dan hasil diskusi yang terkait dengan kegagalan dari beberapa pakar.
2. Pemeriksaan yang nyata termasuk kunjungan langsung melihat berbagai jenis kegagalan, membuat uraian ringkas dan menetapkan suatu acuan/ukuran, catatan dan data foto itu sangat membantu di dalam menyeleksi.
3. Pengujian yang bersifat tidak merusak benda kerja untuk mendapatkan informasi tentang kerusakan/cacat pada permukaan.
4. Pengujian Fractographic adalah identifikasi pada tipe kerusakan/patahan secara alami.
5. Pengujian terhadap semua data bisa disimpulkan dari penyebab terjadinya kegagalan dan muncullah suatu rekomendasi untuk pencegahannya.

Diantara semua panduan yang disebutkan di atas farctography merupakan istilah untuk logam yang muncul pada tahun 1944 untuk menggambarkan pembelajaran sains tentang kegagalan pada permukaan yang juga merupakan kunci dalam menetapkan teknik dan tipe dari suatu patahan /retakan / kegagalan (Suarsana, 2017).

Poros engkol atau *crankshaft* adalah jantung mesin dan biasanya komponen yang paling mahal. Dipasang untuk beban penyeimbang timbal balik massa *crosshead* dan piston. Jika piston bergerak *crankcase* itu akan menyebabkan membuka dan menutup setiap. Gerakan seiring berjalannya waktu part tersebut mempunyai umur pakai mengakibatkan kelelahan dan kerusakan. Oleh karena itu

untuk pemeriksaan umur pakai *crankshaft* diadakan pemeriksaan tahunan (*Compressor and modern process applications* Heinz P. Bloch ).

*Frame, crankshaft, connecting rod* dan *piston rod* harus ditentukan kekuatan atau kemampuan tenaga kuda (HP) kompresor ini, secara keseluruhan kekuatan atau kemampuan tenaga kuda (HP) digabungkan menjadi satu pengukuran itu beban batang. Poros engkol atau *crankshaft* biasanya terbuat dari baja tempa, terdiri dari crankpins dan jurnal bantalan sedangkan poros engkol sudah kecil mesin dari satu ditempa, sebagian besar poros engkol dibuat dari 3 bagian yaitu jurnal bantalan, *crankpins* dan potongan interkoneksi. *Crankshaft* mengubah gerakan berputar menjadi gerakan linier bolak balik melalui batang penghubung jurnal poros engkol terhubung ke jurnal bantalan pada ujung engkol batang penghubung dan poros engkol terhubung ke bantalan jurnal (*Handbook compressor, tony giampaolo*).

Mesin proses sangat penting untuk profitabilitas proses. Aman efisien dan mesin yang andal diperlukan untuk mempertahankan proses manufaktur yang dapat diandalkan yang dapat membuat produk yang dapat dijual, sesuai spesifikasi tepat waktu yang produksi inginkan. Pemecahan masalah lapangan suatu proses penentuan penyebab permasalahan mesin, yaitu gejala masalah pada saat masih beroperasi pada proses yang sebenarnya kondisi. Upaya pemecahan masalah cenderung berfokus pada mesin-mesin tertentu. Pemecahan masalah lapangan mengevaluasi integritas mekanis mesin dalam layanan proses untuk menentukan apakah gejala adalah akibat dari kesalahan mesin yang sebenarnya atau masalah proses terkait (*Failure analysis case studies II, Jones* ).

Analisis kegagalan adalah proses penting dalam menentukan akar penyebab fisik masalah. Prosesnya adalah kompleks, mengacu pada banyak teknis yang berbeda dan menggunakan berbagai pengamatan inpeksi dan laboratorium. Adapun penyebab kegagalan dari banyak hal salah satunya adalah dari manufaktur atau instalasi manufaktur yang meliputi :

1. Proses peleburan logam

Contoh kegagalan : kecepatan pendinginan terlalu singkat, retak tegangan sisa karena terlalu panas.

2. Proses pengerjaan logam

Contoh kegagalan : retak korosi atau tegangan dikarenakan penggunaan pelumas kurang tepat, kerusakan mikro karena geser, *blanking* dan *piercing*.

3. Proses pemanasan

Contoh kegagalan : Strukturmikro tidak homogen, martensit tidak ditempa.

4. Pengelasan

Contoh kegagalan : retak akibat tegangan sisa dan kontur logam pengisi diluar spesifikasi.

5. Proses pembersihan

Contoh kegagalan : korosi karena pembersihan kurang maksimal sebelum pengecatan.

6. Proses *assembly*

Contoh kegagalan : ketidaksejajaran dan pemasangan yang tidak tepat (ASM *Metal Handbook Vol. 11 Failure analysis and prevention*).

## 2.2. Kegagalan

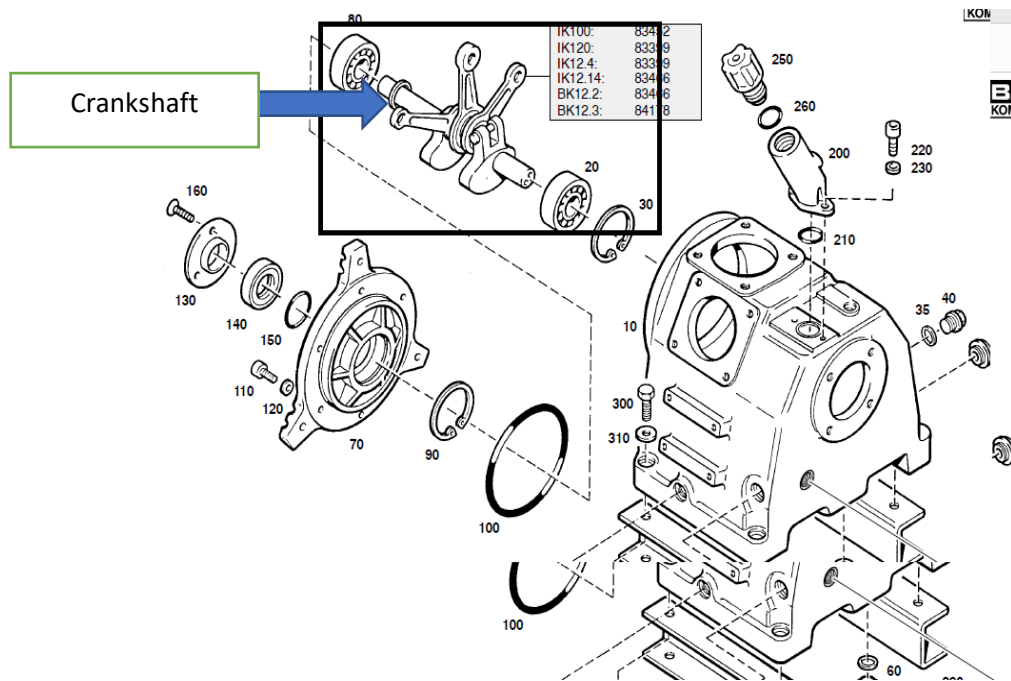
Kegagalan mekanik dapat didefinisikan sebagai perubahan ukuran, bentuk atau struktur properti material mesin atau part mesin itu sendiri yang pengaruh pada fungsi pada mesin tersebut. (Collins, 1993). Dalam analisa kegagalan sangat perlu dilakukan pengetahuan kegagalan itu sendiri, prediksi kegagalan maupun pencegahan akan kegagalan tersebut. Setiap rancangan dilakukan dengan tujuan menciptakan dan optimasi yang diinginkan. Mengenai perancangan mesin yang baik maka suatu rancangan mesin meskipun mengalami kegagalan dapat memberikan *life time* yang terbaik. Suatu perancangan mesin biasanya mengikuti beberapa faktor.

1. *Part* mesin harus mampu menghasilkan suatu gaya dan *performance* yang efisien dan ekonomis
2. Part mesin harus sesuai fungsinya tanpa mengganggu fungsi dari part yang lain
3. Kegagalan dari tiap *part* dapat ditentukan berdasarkan *life time*
4. Rancangan dapat di *maintain* sesuai dengan *design life time*

5. Kritikal point dari suatu design diketahui saat perakitan, oleh karena itu kegagalan awal dapat terdeteksi sebelum menjadi bahaya
6. Harga dari rancangan sebanding dengan fungsi yang diharapkan
7. Mesin yang dihasilkan tidak hanya menghasilkan fungsi dan keamanan namun dapat dijual di pasaran (*part shop*)
8. Mesin yang dihasilkan tidak hanya menghasilkan fungsi dan keamanan namun dapat dijual di pasaran (*part shop*)

### **2.2.1 Analisis Kegagalan**

Analisis kegagalan dapat memiliki tiga tujuan luas yaitu menentukan mode, penyebab, atau akar penyebab. Kegagalan Penyebabnya ditentukan dari studi dan pengetahuan tentang komponen, bebannya Pengambilan sampel komparatif atau duplikasi kegagalan diperlukan untuk menentukan penyebabnya. Penyebab kegagalan/*root cause* adalah ditentukan dengan menggunakan pengetahuan tentang mode, penyebab dan proses atau sistem tertentu. Menentukan kegagalan memerlukan informasi lengkap tentang desain peralatan, operasi, lingkungan, cuaca dan pemeliharaan. Analisis kegagalan adalah proses mengumpulkan dan menganalisis data untuk menentukan pencegahan agar tidak berulang. Analisis dan pencegahan kegagalan adalah fungsi penting untuk semua rekayasa disiplin ilmu. Komponen atau produk gagal dalam layanan atau jika terjadi kegagalan dalam produksi atau selama produksi pengolahan. Dalam setiap kasus, seseorang harus menentukan penyebab kegagalan untuk mencegah kejadian di masa depan, dan / atau meningkatkan kinerja perangkat, komponen atau struktur. Dimungkinkan untuk *fatigue fracture* sebagai akibat dari kegagalan berganda mekanisme atau *root cause*. Analisis kegagalan dapat memberikan informasi untuk mengidentifikasi *root cause* yang tepat dari kegagalan.

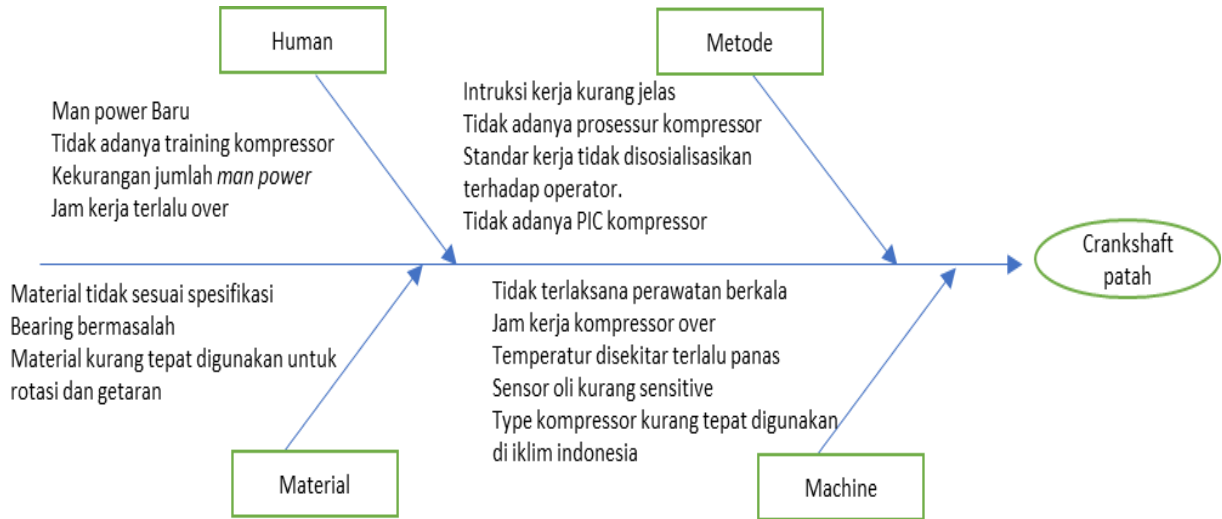


**Gambar 2. 1 Block Machine**

Sumber : Handbook manual compressor bauer

Penyebab Kegagalan Mesin dalam bentuk yang paling sederhana, kegagalan dapat didefinisikan sebagai setiap perubahan pada bagian mesin atau komponen yang menyebabkannya tidak dapat menjalankan fungsi yang diinginkan memuaskan. Tahapan umum sebelum kegagalan akhir adalah kegagalan yang baru jadi kerusakan yang baru terjadi kesusahan kerusakan dan kerusakan semuanya akhirnya membuat bagian atau komponen tersebut tidak dapat diandalkan atau tidak aman untuk digunakan secara berkelanjutan. Klasifikasi yang berarti dari penyebab kegagalan adalah: (Machinery Failure Analysis and Traoubleshooting, Heinz P)

1. Desain salah.
2. Cacat material.
3. Pengolahan dan kekurangan manufaktur.
4. Cacat perakitan atau pemasangan.
5. Kondisi layanan yang tidak disengaja atau tidak diinginkan.
6. Defisiensi pemeliharaan (kelalaian, prosedur).
7. Operasi yang tidak tepat



**Gambar 2. 2 Fishbone Diagram**

Diagram fishbone merupakan metode yang diciptakan oleh Kaoru Ishikawa untuk mengidentifikasi sebab dan akibat dari suatu permasalahan. Cabang utama dari diagram fishbone menandakan permasalahan yang dihadapi, sedangkan cabang-cabang lainnya yang akan berujung pada cabang utama adalah penyebab dari permasalahan yang biasanya dikategorikan menjadi orang, material, peralatan, manajemen, dan lingkungan. Diagram fishbone sangat berguna dalam perbaikan kualitas dikarenakan dapat memvisualisasikan akar-akar permasalahan yang banyak ke dalam format yang sederhana (Lighter & Fair, 2000).

### **2.2.2 Kemungkinan yang terjadi kegagalan *Crankshaft***

Kemungkinan kegagalan patah pada *crankshaft* kompresor sudah ada tanda-tanda yang terlihat dimesin kompresor. Akan tetapi operator tidak memahami bahwa sudah ada tanda kompresor sudah tidak berjalan dengan normal, salah satu gejala yang sudah terlihat yaitu kompresi yang dihasilkan sedikit lambat dari spesifikasi kompresor, adapun getaran pada mesin sudah mulai terlihat tidak normal lebih besar dari biasanya ketika kompresor beroperasi.

Hal ini dapat ditentukan bahwa yang terjadi kegagalan patah pada *crankshaft* kompresor sudah terlihat tanda-tanda akan tetapi operator hanya mengira hal itu

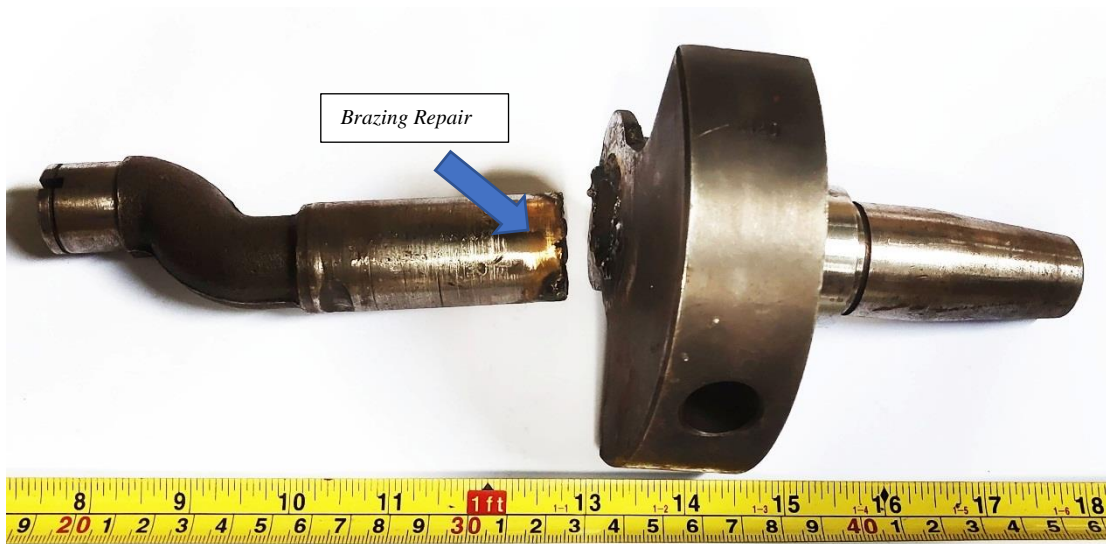


kerusakan ringan tidak menyebabkan kegagalan patah atau tidak sampai *breakdown*. Dari hasil investigasi dilapangan dan informasi dari operator dilapangan awal mula sepertinya kompresor kekurangan pelumas atau oil tetapi posisi masih diatas sedikit standar minimal berhubung kompresor tersebut harus beroperasi untuk memenuhi kebutuhan plant produksi dipaksakan untuk beroperasi dan juga tidak ada alarm pelumasan kurang karena posisi masih diatas standar minimal. Hal ini menyebabkan kompresor yang kekurangan pelumas beroperasi dalam jangka lama, oleh karena itu mulai timbul gejala adanya kompresi lambat dan getaran pada mesin meningkat dalam jangka waktu yang lama sehingga bearing *crankshaft* sudah mulai mengalami keausan sehingga putaran *crankshaft* sudah mulai *center* dan terjadi kegagalan patah karena kelelahan dalam jangka waktu lama.

Adapun ada beberapa faktor pendukung bukan hanya efek kekurangan pelumasan :

- a. Operator tidak memahami kompresor abnormal
- b. Terlalu memaksakan untuk memenuhi plant produksi
- c. Temperatur dan kandungan udara kurang bagus
- d. Kurangnya perawatan terhadap kompresor
- e. Adanya kemungkinan cacat material tidak sesuai spesifikasi
- f. Kesalahan desain atau part pendukung.
- g. Kesalahan metode pengelasan terhadap *crankshaft*

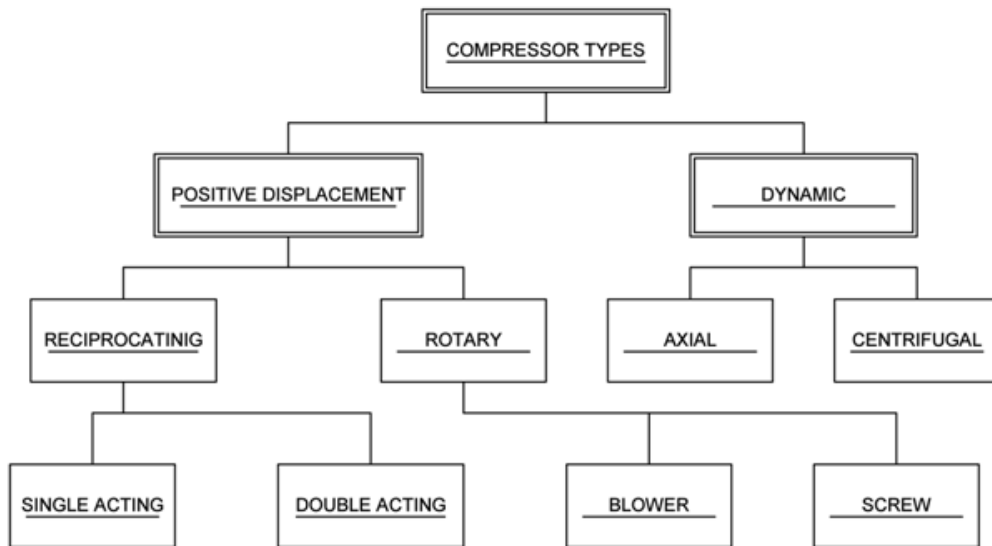
Oleh karena itu dari hasil analisa dilapangan dan hasil patahan pasca *welding repair* yang terjadi kemungkinan adalah kegagalan kelelahan *fatigue*. Data ini akan dibandingkan dengan hasil pengecekan dilaboraturium agar mengetahui akar penyebab kegagalan kompresor *crankshaft*.



**Gambar 2. 3 Crankshaft Kompresor Patah**

### 2.3 Jenis kompresor

Adapun beberapa type kompresor meliputi :



**Gambar 2. 4 Type kompresor**

Sumber : Handbook compressor, tony giampaolo

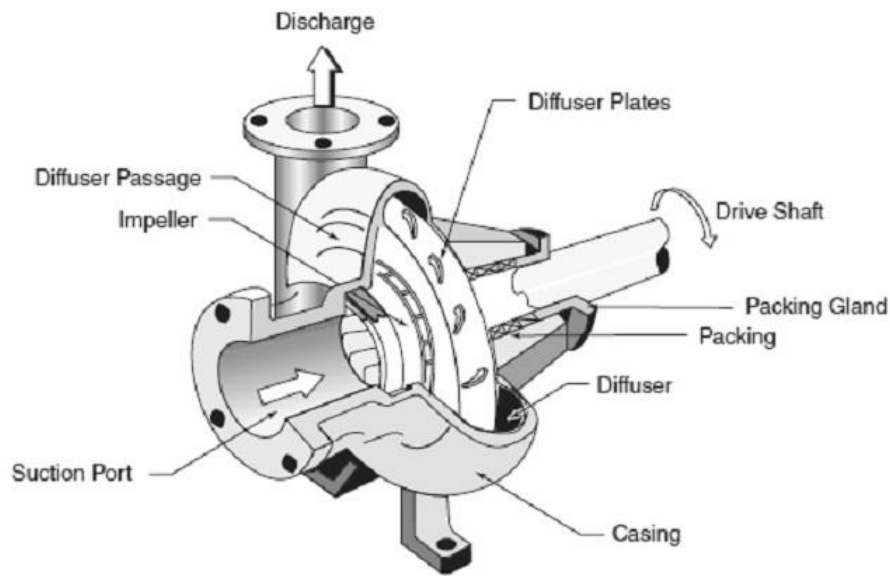
*Positive displacement* adalah kompresor perpindahan positif adalah sistem yang memampatkan udara dengan perpindahan tautan mekanis yang mengurangi volume.

1. Kompresor *reciprocating* bolak-balik atau disebut juga kompresor piston adalah perpindahan positif kompresor yang menggunakan pergerakan piston didalam silinder memindahkan gas dari satu tingkat tekanan ke tingkat tekanan lainnya yang lebih tinggi.
  - A. Kompresor *single acting* adalah kompresor yang bekerja untuk *suction* dan *discharge* pada satu sisi ujung silinder dengan dua kali gerakan torak menghasilkan satu kali *discharge*.
  - B. Kompresor *double acting* adalah kompresor yang bekerja untuk *suction* dan *discharge* terjadi pada kedua sisi ujung silinder dengan dua gerakan torak menghasilkan dua kali *discharge*.
2. Kompresor *rotary* istilah putar menggambarkan kelas kompresor yang beroperasi pada prinsip perpindahan positif dan menggunakan putaran gerakan untuk mentransfer energi yaitu untuk memampatkan gas. (compressor and modern process applications, Heinz P. Bloch).
  - A. Blower adalah kompresor perpindahan positif. Awalnya memang dimaksudkan sebagai pompa gas yang digunakan ditanur sembur. Desain blower terdiri dari dua elemen angka delapan atau lobus. Lobus ini diarahkan untuk masuk berlawanan arah. Karena lobus berputar perlu menjaga jarak antara masing-masing dari lobus blower satu tahap hanya mendapatkan tekanan yang terbatas, namun mampu mengompresi volume besar gas dengan efisiensi hingga 70% oleh karena itu blower adalah sering digunakan sebagai penguat dalam berbagai aplikasi kompresi. (compressor handbook principle and practice, Tony Giampaolo ).
  - B. Screw adalah kompresor screw salah satu yang paling awal, kompresor diklarifikasikan sebagai perpindahan positif perangkat karena volume gas terperangkap diruang tertutup dan dari volume berkurang. Didalam casing kompresor ada 2 scerew dan tipe satu screw nya berbeda ada yang berbentuk lobus cekung dan lobus cembung screw ini berputar ke arah berlawanan dengan menerima daya dari luar dan mentransmisikan

daya ke screw ke dua melalui satu set roda gigi sinkronisasi saat screw berputar, gas proses ditarik ke saluran masuk atau hisap. Gas dikompresi dengan Gerakan berputar dari dua jenis screw. Gas bergerak disekitar bagian luar screw mulai dari atas dan berjalan ke bawah saat sedang dipindahkan secara aksial dari port hisap ke port pembuangan.

Kompresor dinamis adalah aliran kontinu adalah kompresor yang ditandai dengan penggerak berputar untuk menambah kecepatan dan tekanan fluida.

1. Aksial kompresor adalah gas yang mengalir di atas airfoil yang bergerak memberikan gaya angkat dan gaya hambat. Jika aliran diberikan kecepatan putaran (rpm) adalah berkurang, arah gas yang mendekati setiap bilah diubah begitu untuk meningkatkan sudut serang ini menghasilkan lebih banyak pengangkatan dan tekanan. (*Handbook compressor*, tony giampaolo)
2. Kompresor centrifugal adalah sebagai kompresor dinamis atau hanya sebagai mesin turbin berbeda dengan kompresor perpindahan positif, kompresor dinamis mencapai kenaikan tekankannya dengan transfer energy dinamis ke aliran fluida yang terus mengalir. Ada peningkatan besar dalam radius melintasi baris pisau berputar dari kompresor sentrifugal yang merupakan utama fitur yang membedakan dari kompresor aksial dapat mencapai banyak hal dalam laju aliran yang lebih besar. (*centrifugal compressor*, Ronald H. Augier )



**Gambar 2. 5 Kompresor centrifugal**

#### **2.4 Komponen kompresor piston**

1. Rangka (*Frame*)
2. Piston
3. Silinder
4. Poros engkol (*Crankshaft*)
5. Batang penghubung (*Connecting Rod*)
6. *Crosshead*

Rangka, poros engkol, batang penghubung dan batang piston ditentukan kekuatan atau kemampuan tenaga kuda kompresor. Ini secara keseluruhan kekuatan atau kemampuan tenaga kuda digabungkan dengan satu pengukuran dan itu adalah beban batang. Beban batang adalah jumlah aljabar gaya inersia yang bekerja pada rangka kompresor, poros engkol, batang penghubung, *crosshead*, piston dan batang piston dan beban gas. Oleh karena itu beban batang harus memperhitungkan inersia gaya dari komponen bolak-balik dan beban gas dihitung pada kenaikan sudut engkol biasanya kenaikan  $10^\circ$ . Beban batang adalah didefinisikan sebagai beban <sup>d</sup>atau keseluruhan beban kompresi dan beban tegangan.

*Frame* atau rangka umumnya terbuat dari besi cor sekalipun dalam beberapa kasus itu dibuat dari pelat baja. Bentuk rangka mesin dasarnya tempat poros engkol ditopang. *Crankcase* berfungsi sebagai tempat penampungan oli atau bisa disebut juga penampungan pelumasan untuk kompresor.

Poros engkol atau *crankshaft* biasanya terbuat dari besi cor Sedangkan poros engkol sudah kecil mesin dari satu tempa, sebagian besar poros engkol dibuat dari tiga bagian yaitu : jurnal bantalan, pin engkol dan potongan interkoneksi. Poros engkol mengubah gerakan berputar menjadi linier bolak-balik melalui batang penghubung. Jurnal poros engkol terhubung ke jurnal bantalan pada ujung engkol batang penghubung dan poros engkol terhubung ke bantalan jurnal.

Tegangan tekan pada batang =  $0,785 \times [Dp^2 \times (Pd - Ps) + Dr^2 \times Ps]$

Tegangan tarik pada batang =  $0,785 \times [Dp^2 \times (Pd - Ps) - Dr^2 \times Ps]$

Keterangan :

Dp = Piston Diameter (Inchi)

Dr = Rod Diameter (Inchi)

Pd = Discharge pressure (psia)

Ps = Suction pressure (psia)

*Crosshead* bergerak linier dalam arah bergantian dengan setiap putaran poros engkol *crankshaft* batang piston menghubungkan *crosshead* ke piston. Karena itu dengan setiap rotasi poros engkol *crankshaft* piston bergerak secara linier dalam arah bolak balik. Batang piston memberikan gerakan vertikal di atasnya akibatnya bersentuh secara bergantian dengan permukaan bantalan bawah dan atas permukaan bantalan. Harus diperhatikan bahwa batang piston yang terlukai masih dapat diterima membatasi agar tidak mengakibatkan *crosshead* memiringkan secara berlebihan.

*Connecting rod* atau bisa disebut juga batang piston memiliki ulir di kedua ujungnya dan bahkan mungkin memiliki kerah di ujung yang terhubung ke piston, menghubungkan batang piston adalah prosedur yang cukup rumit. Piston harus diamankan ke batang sehingga pembebanan inersia bolak-balik yang tercipta dengan percepatan, perlambatan dan penghentian piston dengan masing-masing poros engkol tidak memberikan tekanan yang tidak semestinya pada batang atau piston berakhir.

Ini dilakukan dengan meregangkan batang di antara kerah ujung engkol dan mur batang piston ujung kepala sekaligus mengkompresi ujung piston. Untuk meregangkan batang dan menekan piston sambil tetap berada di dalam batas elastis bahan kedua bagian.

Piston dapat beraksi tunggal atau akting ganda. Piston akting tunggal kompres gas proses saat piston bergerak keujung kepala silinder. Piston kerja ganda menekan proses gas saat piston bergerak dikedua arah piston juga dapat dilemparkan satu bagian atau dirakit dari beberapa part. Meski keseimbangan piston belum ditangani oleh kebanyakan pabrikarn ada beberapa kasus dimana ketidakseimbangan piston menyebabkan kegagalan batang.

Silinder ada dua jenis sistem kerja kompresor silinder katup masuk dan katup keluar. Katup dalam desain lubang memiliki katup kompresor terletak secara radial di sekitar lubang silinder didalam Panjang lubang silinder. Silinder ini memiliki presentase tertinggi pembersihan ujung lubang silinder untuk memungkinkan masuk dan keluarnya proses gas.

## **2.5. Besi Cor**

Besi cor, seperti istilah baja, mengidentifikasi keluarga besar paduan besi. Besi tuang adalah paduan besi multikomponen, yang mengeras dengan eutektik. Mereka mengandung unsur-unsur mayor (besi, karbon, silikon), kurang dari ( $<0,1\%$ ), dan seringkali paduan ( $> 0,1\%$ ). Besi tuang memiliki kandungan karbon dan silikon yang lebih tinggi daripada baja. Karena kandungan karbon yang lebih tinggi, struktur besi tuang, sebagai lawan dari baja, menunjukkan fasa karbon yang banyak. Bergantung terutama pada komposisi, laju pendinginan, dan perlakuan leleh, besi cor dapat mengeras sesuai dengan sistem Fe-Fe<sub>3</sub>C yang dapat metastabil secara termodinamika atau sistem Fe-Gr yang stabil. Jika jalur menstabil diikuti, fasa karbon yang banyak di eutektik adalah besi karbida; ketika jalur pemadatan stabil diikuti, fase karbon adalah grafit. Mengacu hanya pada sistem Fe-Fe<sub>3</sub>C atau Fe-Gr biner, besi cor dapat didefinisikan sebagai paduan besi-karbon dengan lebih dari 2% C. Pembaca diperingatkan bahwa silikon dan elemen paduan lainnya dapat sangat

mengubah kelarutan maksimum karbon dalam austenit ( $\gamma$ ). Oleh karena itu, dalam kasus ini, paduan dengan kurang dari 2% C dapat mengeras dengan struktur eutektik dan oleh karena itu masih termasuk dalam keluarga besi tuang. Pembentukan eutektik yang stabil atau menstabil merupakan fungsi dari banyak faktor termasuk potensial nukleasi cairan, komposisi kimia, dan laju pendinginan. Dua faktor pertama menentukan potensial grafitisasi besi. Potensi grafitisasi yang tinggi akan menghasilkan besi dengan grafit sebagai fasa karbon kaya, sedangkan potensi grafitisasi yang rendah akan menghasilkan besi dengan karbida besi. Skema struktur jenis umum dari besi cor komersial, serta proses yang diperlukan untuk mendapatkannya.

### **2.5.1 Klasifikasi Besi Cor**

Secara historis, klasifikasi pertama besi cor didasarkan pada patahannya. Dua jenis besi awalnya dikenali:

- a) Besi putih (White Iron): Menampilkan permukaan patahan kristal berwarna putih karena patahan terjadi di sepanjang pelat besi karbida; ini adalah hasil dari solidifikasi menstabil ( $Fe_3C$  eutektik).
- b) Besi Tuang Kelabu (Grey iron): Menunjukkan permukaan patahan berwarna abu-abu karena patahan terjadi di sepanjang pelat grafit (serpihan); itu adalah hasil pemadatan stabil (Gr eutektik). Dengan munculnya metalografi, dan seiring dengan meningkatnya pengetahuan yang berkaitan dengan besi tuang.
- c) Besi Cor Nodular (Ductile Cast Iron), yang sebelumnya dikenal sebagai besi cor nodular atau spheroidal-graphite (SG) cast iron (istilah internasionalnya adalah besi ulet), adalah besi cor yang grafitnya hadir sebagai bulatan kecil (nodular). Pada besi ulet, grafit eutektik terpisah dari besi cair selama pemadatan dengan cara yang mirip dengan pemisahan grafit eutektik dalam besi tuang abu-abu. Namun, karena aditif yang dimasukkan ke dalam besi cair sebelum pengecoran, grafit tumbuh sebagai bola, bukan sebagai serpihan dari salah satu bentuk karakteristik besi abu-abu. Besi tuang yang mengandung grafit spheroidal jauh lebih kuat dan memiliki elongasi lebih tinggi dari besi



abu-abu atau besi lunak. Ini dapat dianggap sebagai komposit alami di mana grafit sferoidal memberikan sifat unik pada besi ulet. Kekuatan dan ketangguhan yang relatif tinggi dari besi ulet memberikan keunggulan dibandingkan besi abu-abu atau besi lunak dalam banyak aplikasi struktural. Juga, karena besi ulet tidak memerlukan perlakuan panas untuk menghasilkan nodular grafit (seperti halnya dapat dibentuk menjadi lunak. besi untuk menghasilkan nodular temper-karbon), dapat bersaing dengan besi lunak meskipun memerlukan proses perawatan dan inokulasi. Hasil cetakan biasanya lebih tinggi dibandingkan dengan besi lunak. Besi ulet dapat diproduksi dengan standar sinar-X karena porositas tetap berada di pusat termal. Besi lunak tidak dapat mentolerir porositas karena rongga bermigrasi ke permukaan titik panas seperti fillet dan muncul sebagai retakan. Biasanya, komposisi besi ulet yang tidak bercampur berbeda dari besi abu-abu atau besi lunak. Bahan baku yang digunakan untuk besi ulet harus memiliki kemurnian yang lebih tinggi. Semua besi tuang dapat dilebur dalam kubah, tungku busur listrik, atau tungku induksi. Besi ulet, sebagai cairan, memiliki fluiditas tinggi, kemampuan castability yang sangat baik, tetapi tegangan permukaan tinggi. Peralatan pasir dan cetakan yang digunakan untuk besi ulet harus menyediakan cetakan kaku dengan kepadatan tinggi dan perpindahan panas yang baik.

Klasifikasi lain berdasarkan fitur mikrostruktur menjadi mungkin:

- Bentuk grafit: Grafit lamelar (serpihan), grafit bulat (nodular) (SG), grafit padat (vermikular) (CG), dan grafit temper (TG); grafit temper dihasilkan dari reaksi solid-state (malleabilisasi)
- Matriks: Feritik, perlit, austenitik, martensitik, bainitik (austempered).

Besi Tuang Mampu Tempa (Malleable cast iron) adalah jenis besi cor yang karbonnya paling banyak berupa bintik-bintik grafit berbentuk tidak beraturan. Bukan serpihan, seperti pada besi abu-abu, atau sferulit grafit kecil, seperti pada besi ulet. Besi lunak diproduksi dengan pengecoran pertama besi sebagai besi putih dan

kemudian perlakuan panas besi cor putih untuk mengubah karbida besi menjadi nodular berbentuk tidak beraturan grafit. Bentuk grafit dalam besi lunak ini disebut karbon temper karena terbentuk dalam keadaan padat selama pemanasan. Besi lunak, seperti besi ulet, memiliki keuletan dan ketangguhan yang cukup besar karena kombinasi grafit nodularnya dan matriks logam karbon rendah. Karenanya, besi lunak dan besi ulet cocok untuk beberapa aplikasi yang sama membutuhkan keuletan dan ketangguhan yang baik, dengan pilihan antara besi lunak dan besi ulet berdasarkan ekonomi dan ketersediaan daripada properti. Namun, karena pemadatan besi putih di seluruh bagian sangat penting dalam produksi besi lunak, besi ulet memiliki keuntungan yang jelas bila bagian tersebut terlalu tebal untuk memungkinkan pemadatan seperti besi putih. Lunak pengecoran besi diproduksi dengan ketebalan bagian mulai dari sekitar 1,5 hingga 100 mm (1/16 hingga 4 inci) dan dalam berat kurang dari 0,03 hingga 180 kg (1/16 hingga 400 lb) atau lebih. Besi ulet juga memiliki keunggulan yang jelas dibandingkan besi lunak ketika diperlukan penyusutan solidifikasi rendah. Dalam aplikasi lain, akan tetapi, besi lunak memiliki keunggulan yang berbeda dibandingkan besi ulet. Besi lunak lebih disukai dalam aplikasi berikut:

1. Pengecoran bagian tipis
2. Bagian yang akan ditusuk, dibentuk, atau dibentuk dingin
3. Bagian yang membutuhkan kemampuan mesin maksimum
4. Bagian yang harus mempertahankan ketahanan benturan yang baik pada suhu rendah
5. Bagian yang memerlukan ketahanan aus (hanya besi lunak martensitik) Besi lunak (dan juga besi ulet) juga menunjukkan ketahanan tinggi terhadap korosi, kemampuan mesin yang sangat baik, daya magnet yang baik permeabilitas, dan retensi magnetik rendah untuk cengkeraman magnet dan rem. Kekuatan kelelahan yang baik dan kapasitas redaman besi lunak juga berguna untuk servis lama di bagian yang sangat tertekan.

### 2.5.2 Pengaruh elemen paduan

Baja merupakan salah satu kelompok paduan paling kompleks yang umum digunakan. Efek sinergis dari paduan elemen dan panas pengobatan menghasilkan berbagai macam mikrostruktur dan sifat karakteristik. Perlu diperhatikan bahwa efek elemen paduan tunggal dimodifikasi oleh pengaruh elemen lainnya, berbagai elemen paduan yang tercantum dibawah ini akan di bahas terpisah.

#### 1) Karbon (C)

Jumlah karbon yang dibutuhkan dalam baja jadi membatasi jenis baja yang akan dibuat sebagai kandungan karbon baja berbingkai meningkat, kualitas permukaan menjadi rusak. Baja mengandung karbon sekitar 0,15 % hingga 0,30 % mungkin memiliki kualitas permukaan yang lebih buruk dan memerlukan proses tambahan khusus untuk mencapai kualitas yang sebanding dengan baja kualitas tinggi atau rendah kandungan karbon. Karbon memiliki kecenderungan sedang untuk segregasi, dan segregasi karbon seringkali lebih signifikan daripada pemisahan elemen lainnya. Karbon yang memiliki pengaruh besar pada sifat baja merupakan elemen pengerasan utama disemua baja. Kekuatan dan kekerasan meningkat sebanding dengan meningkatnya kandungan karbon maksimal 0,85% . keuletan dan kemampuan dilas menurun jika kadar karbonnya meningkat.

#### 2) Mangan (Mn)

Mangan memiliki kecenderungan yang lebih kecil ke arah makro daripada elemen umum lainnya. Baja diatas 0,60 % Mn tidak bisa langsung berbingkai. Mangan bermanfaat bagi kualitas permukaan disemua rentang karbon (kecuali baja karbon yang sangat rendah). Ini berkontribusi pada kekuatan dan kekerasan, tetapi untuk yang lebih rendah daripada jumlah karbon. Jumlah meningkatnya tergantung pada kandungan karbon. Meningkatkan kandungan mangan menurunkan keuletan dan kemampuan dilas, tetapi pada tingkat yang lebih rendah daripada karbon. Mangan berpengaruh kuat terhadap peningkatan kekerasan baja.

3) Fosfor

Memisahkan tetapi pada tingkat yang lebih rendah dari karbon dan balerang. Meningkatkan fosfor meningkatkan kekuatan dan kekerasan dan mengurangi keuletan dan ketangguhan impak takik. Penurunan keuletan dan ketangguhan lebih besar pada baja karbon tinggi yang didinginkan dan ditempa. Kandungan fosfor yang lebih tinggi biasanya digunakan untuk komponen mesin atau *machining* biasanya jenis baja karbon rendah.

4) Sulfur

Peningkatan kandungan sulfur menurunkan keuletan dan ketangguhan impak takik tetapi hanya memiliki sedikit efek sifat mekanik longitudinal. Kemampuan las menurun dengan meningkatnya kandungan sulfur. Unsur ini sangat merugikan kualitas permukaan terutama dengan baja karbon rendah dan mangan rendah. Untuk itu hanya batasan maksimum ditentukan untuk sebagian tipe baja. Akan tetapi ada pengecualian adalah grup baja permesinan atau *machining steel* yang kandungan sulfurnya bebas, dimana sulfur ditambahkan untuk meningkatkan kualitas kemampuan mesin.

5) Silicon

Salah satu penghilang oksidator dalam pembuatan baja oleh karena itu jumlah silicon yang ada terkait dengan jenis bajanya. Baja berbingkai tidak mengandung silicon dalam jumlah yang signifikan. Baja semikilled mungkin mengandung sejumlah silikon sedang, meskipun ada jumlah maksimum tertentu yang dapat ditoleransi pada baja. Baja karbon terburuh mungkin mengandung apapun jumlah silikon hingga maksimum 0,60 %. Silikon agak kurang efektif dibandingkan mangan dalam meningkatkan kekuatan dan kekerasan. Silikon hanya memiliki sedikit kecenderungan untuk memisahkan. Pada baja karbon rendah silikon biasanya merusak kualitas permukaan.

6) Tembaga

Memiliki kecenderungan sedang untuk dipisahkan. Tembaga dalam jumlah yang cukup besar merugikan operasi kerja panas. Tembaga mempengaruhi pengelasan tempa secara merugikan, tetapi tidak secara serius

mempengaruhi pengelasan busur atau oksiasitelin. Tembaga merugikan kualitas permukaan dan memperbesar cacat permukaan yang melekat resulturisasi pada baja. Tembaga bermanfaat bagi atmosfer korosi bila ada jumlah melebihi 0,20 %. Baja yang mengandung tingkat tembaga ini disebut juga baja tahan cuaca.

#### 7) Boron

Boron ditambahkan ke baja yang dimatikan sepenuhnya untuk meningkatkan kemampuan pengerasan. Baja yang diolah boron diproduksi dengan kisaran 0,003%. Setiap kali boron diganti sebagian dengan paduan lain, itu harus dilakukan dengan mempertimbangkan kemampuan pengerasan karena kandungan paduan yang diturunkan mungkin berbahaya untuk diaplikasikan bidang tertentu. Untuk itu boron paling efektif yaitu untuk baja karbon rendah.

#### 8) Timbal

Timbal terkadang ditambahkan ke karbon dan baja paduan melalui dispersi mekanis selama penumpukan untuk tujuan tersebut meningkatkan karakteristik dipemesinan baja atau *machining*. Untuk penambahan pada umumnya kisaran 0,15% hingga 0,35%.

#### 9) Kromium

Kromium ditambahkan ke baja untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan oksidasi untuk meningkatkan kemampuan pengerasan, untuk memperbaiki kekuatan suhu tinggi atau untuk meningkatkan ketahanan abrasi dalam komposisi baja karbon tinggi. Kromium adalah suatu kandungan yang pembentuk karbida yang kuat, karbida besi-krom kompleks masuk kedalam larutan di austenite secara perlahan. Oleh karena itu waktu pemanasan yang cukup sebelum *quenching* atau pendinginan adalah perlu. Kromium dapat digunakan sebagai elemen pengerasan dan sering digunakan dengan elemen pengeras seperti nikel menghasilkan sifat mekanik yang superior.

Pada suhu yang lebih tinggi kromium yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan itu biasanya digunakan untuk aplikasi seperti ini dalam hubungannya dengan molibdenum.

#### 10) Nikel

Nikel bila digunakan sebagai elemen paduan pada baja konstruksi, merupakan penguat ferit. Karena nikel tidak berbentuk apapun senyawa karbida dalam baja, tetap berada pada didalam larutan ferit, sehingga memperkuat dan memperkuat fasa ferit. Baja nikel mudah dipanaskan karena nikel bersifat menurunkan fase laju pendinginan kritis. Dalam kombinasi dengan kromium nikel menghasilkan baja paduan dengan kekerasan yang lebih besar kekuatan benturan yang lebih tinggi, dan ketahanan Lelah yang lebih besar dari pada yang dicapai baja karbon.

#### 11) Molibdenum

Molibdenum ditambahkan ke baja konstruksi dalam jumlah normal 0,10 % hingga 1,00 %. Saat molibdenum dalam bentuk padat larutan dalam austenit sebelum *quenching* laju reaksi transformasi menjadi jauh lebih lambat dibandingkan dengan baja karbon. Molibdenum dapat menyebabkan pengerasan sekunder selama penempaan baja yang dipadamkan dengan meningkatkan creep kekuatan baja paduan rendah pada suhu tinggi. Baja paduan yang mengandung 0,15 % hingga 0,3 % Mo.

#### 12) Niobium

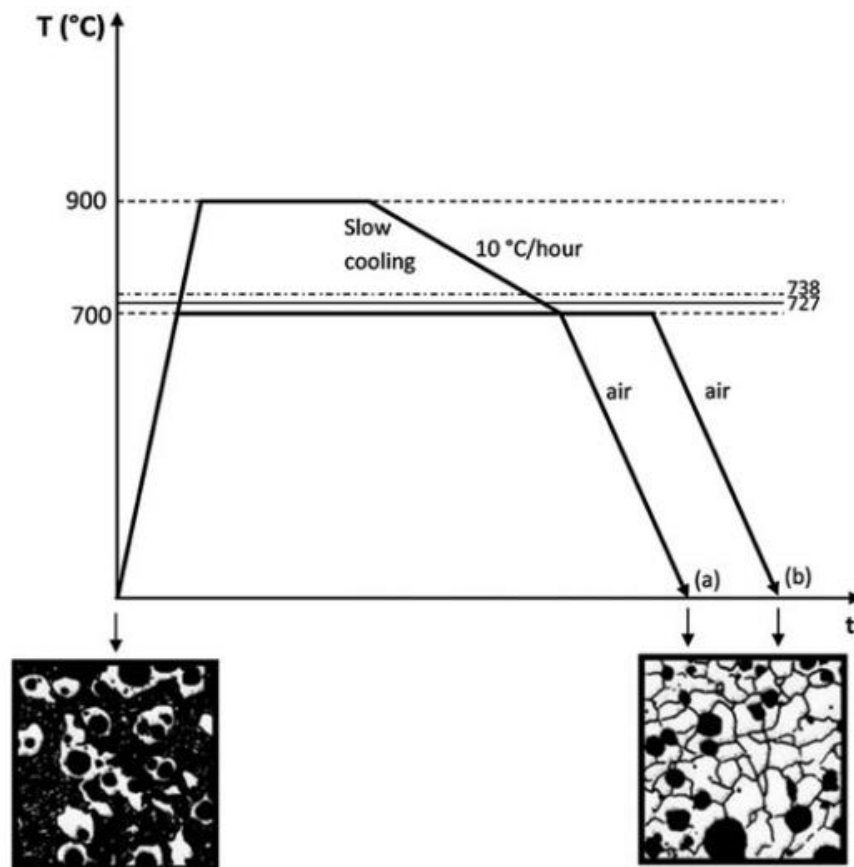
Penambahan kecil niobium meningkatkan kekuatan luluh dan pada tingkat yang lebih rendah kekuatan tarik baja karbon penambahan niobium 0,02% dapat meningkatkan kekuatan luluh baja karbon sedang sebesar 70 hingga 100 Mpa. Ini meningkat kekuatan dapat disertai dengan ketangguhan takik yang sangat terganggu kecuali ada tindakan khusus digunakan untuk memperbaiki butiran selama pengerolan panas melibatkan teknik pemrosesan termomekanis khusus seperti praktik pengerolan terkontrol, suhu penyelesaian rendah untuk lintasan reduksi akhir. (ASM Volume 1)

## 2.6 Heat treatment besi cor nodular

Sifat-sifat besi cor kelabu, baik lamellar atau spheroidal, bergantung pada keduanya penyusun matriks dan morfologi grafit. Harus diingat bahwa struktur konstituen matriks, untuk meningkatkan laju pendinginan dari austenitic, bisa feritik, feritik-pearlitik, perlit, bainitik atau martensit. Pada bagian yang sama kekerasan, kekuatan tarik dan ketahanan aus meningkat. Di samping itu, keuletan, ketangguhan dan machinability berkurang. Besi cor abu-abu grafit bulat dapat mengalami perlakuan panas dengan: tujuan memodifikasi struktur matriks logam. Kami mengingat besi abu-abu itu sebagai komposit matriks logam. Namun, besi cor grafit pipih menghadirkan kerugian yang nyata karena: perlakuan panas, terutama karena dua alasan: risiko retak karena efek takik dari grafit serpihan selama perubahan dimensi yang berasal dari pemanasan dan pendinginan; dan kesulitan yang melekat—umum pada semua jenis besi tuang, terlepas dari morfologi grafit—hingga kandungan karbon tinggi dalam matriks.

Dari semua perlakuan panas yang mungkin diterapkan pada cor grafit bulat besi paduan menengah dan rendah, beberapa di antaranya memerlukan pemanasan hingga suhu austenisasi. Dan untuk alasan itu, penggunaan tungku garam cair atau tungku atmosfer terkendali diperlukan, dengan tujuan menghindari pada suhu risiko yang melekat pada dekarburisasi matriks austenitik karena tingginya kandungan karbon. *Treatment* Feritik Untuk mencapai matriks feritik dari struktur (as-cast) feritik-pearlitik, dua jenis feritisasi tidak langsung (yang dasar-dasarnya dijelaskan dalam dapat digunakan perlakuan panas. *Treatment* disebut supercritical annealing oleh literatur Inggris full ferritizing annealing dan subcritical annealing. Besi cor grafit bulat dipanaskan hingga suhu yang memungkinkan untuk austenisasi penuh dari matriks. Tujuannya adalah melakukan superkritis anil, Gambar. Umumnya perlakuan dilakukan pada suhu 900 °C. Setelah memegang bagian pada suhu ini sampai austenisasi tercapai, pendinginan lambat dilakukan keluar pada 10 °C per jam turun ke suhu yang hampir selalu 700 °C, lebih rendah dan dekat dengan eutektoid metastabil. Seperti itu, austenit diubah menjadi ferit dan grafit (diagram stabil), dan

risiko munculnya perlit dihindari (metastabil). diagram). Akhirnya, dari suhu ini (700 °C), besi cor didinginkan dengan udara. Derajat yang diperoleh biasanya. Dimungkinkan juga untuk mencapai melalui subkritis anil, tanpa austenisasi, dengan memanaskan hingga suhu 700 °C, yang lebih rendah tetapi mendekati suhu eutektoid. Kemudian, bagian itu diadakan pada suhu tersebut hingga mencapai ferritisasi, kemudian bagian tersebut didinginkan dengan udara. Jose Antonio pero-sans elors (2018).



**Gambar 2. 6 Heat Treatment**

### 2.6.1 Tempering pada Besi Cor Nodular

Proses dimana baja yang sebelumnya telah mengeras atau dinormalisasi biasanya dipanaskan hingga suhu dibawah suhu kritis yang lebih rendah dan didinginkan pada tingkat yang sesuai terutama untuk meningkatkan keuletan dan



ketangguhan, tetapi juga untuk meningkatkan ukuran butir matriks. Baja ditempa dengan pemanasan ulang setelah pengerasan untuk diperoleh nilai spesifik dari sifat mekanik dan juga untuk menghilangkan tekanan *quenching* dan untuk memastikan stabilitas dimensi. Tempering biasanya mengikuti *quenching* dari atas suhu kritis atas, namun temper juga bisa digunakan mengurangi tegangan dan mengurangi kekerasan yang timbul selama pengelasan dan untuk menghilangkan tegangan yang disebabkan oleh pembentukan dan pemesinan.

Variable utama variable yang berhubungan dengan temper yang mempengaruhi mikro struktur dan sifat mekanik dari baja temper termasuk :

- a. Temperatur temper
- b. Waktu pada suhu
- c. Laju pendinginan dari suhu temper
- d. Komposisi baja, termasuk kandungan karbon dan unsur lainnya

Dalam baja yang dipadamkan ke struktur yang pada dasarnya terdiri dari martensite, kisi besi diikat oleh atom karbon, menghasilkan kekerasan tinggi dari baja yang dipadamkan. Setelah pemanasan atom karbon berdifusi dan bereaksi dalam serangkaian berbeda Langkah-langkah yang membentuk Fe<sub>3</sub>C atau paduan karbida dalam maktriks ferit tingkat tegangan yang menurun secara bertahap.

## **2.7 Mekanisme kegagalan *crankshaft***

Pengahantar menganalisis kegagalan yang tak terhindarkan yang terjadi selama pengujian, produksi dan servis adalah penting proses rekayasa untuk peningkatan berkelanjutan dalam keandalan produk. Menjelaskan secara umum prosedur teknik dan tindakan pencegahan yang digunakan dalam penyelidikan dan analisis kegagalan metalurgi itu terjadi dalam pelayanan. Karakteristik kegagalan dijelaskan untuk perpatahan, korosi dan kegagalan keausan, mekanisme perpatahan korosi dan kerusakan keausan .Analisa kegagalan komponen logam telah menjadi perhatian utama dalam dunia metalurgi. Kegagalan yang sering terjadi dan penyebabnya :

1. Deformasi dan distorsi
2. *Fracture*

- a) *Ductile fractures*
  - b) *Brittle fractures*
  - c) *Fatigue fracture*
  - d) *Environmentality affected fractures*
3. Perubahan permukaan dan material korosi
    - a) Korosi seragam
    - b) Korosi lubang
    - c) Korosi interglanular
  4. Retak korosi tegangan
  5. Kerusakan hydrogen
  6. Kelelahan korosi
  7. Kegagalan suhu yang meningkat
    - a) Retak
    - b) Stress pecah

Analisis rinci dari komponen mesin ini terletak pada metalurgi inspeksi, bidang yang sangat terspesialisasi untuk diskusi mendalam tentang analisis. Namun lebih dari 90 % kasus industri orang yang terlatih dapat menggunakan teknik dasar analisis untuk kegagalan mendiagnosis penyebab mekanis dibalik kegagalan tanpa harus meminta sumber luar dan alat analisis yang mahal contohnya mikroskop electron, kemudian dengan mengetahui bagaimana kegagalan terjadi penyelidik dapat mencari tahu asal muasal mengapa hal itu terjadi. Namun ada akurasi 90 % tidak cukup baik. Untuk menafsirkan kegagalan secara akurat, analisis harus mengupulkan semua fakta terkait dan kemudian putuskan apa yang menyebabkan kegagalan.

Jenis kegagalan analisis yang berbeda, tetapi cara paling praktis bagi pekerja untuk pabrik mengkategorikan kegagalan adalah dengan kelebihan beban, kelelahan, kelelahan yang dipengaruhi korosi, keausan dan kesalahan metode *repair*.

- a) Kelebihan beban menerapkan satu beban menyebabkan bagian tersebut berubah bentuk atau patah sebagai beban di terapkan.
- b) Kelelahan beban yang berfluktuasi dalam waktu yang lama menyebabkan jenis kegagalan dan biasanya meninggalkan petunjuk yang jelas.

- c) Kelelahan yang dipengaruhi oleh korosi, korosi secara substansial mengurangi kekuatan kelelahan dari sebagian besar logam dan akhirnya menyebabkan kegagalan pada beban relatif ringan.
- d) Korosi kegagalan adalah akibat tindak elektrik atau biologis dari korosi yang menyebabkan hilangnya material.
- e) Memakai berbagai mekanisme mengakibatkan hilangnya material dengan pemindahan mekanis.
- f) Banyak dilapangan bahwa kegagalan dalam suatu mesin atau *part* bukan karena kelebihan beban, kelelahan dan korosi akan tetapi didukung juga dari kesalahan metode maintenance atau *repair* sehingga umur pakai atau *part* tersebut berkurang bahkan mengalami kerusakan juga.

### **2.7.1 Brazing**

*Brazing* adalah menyolder memerlukan penerapan sejumlah keterampilan ilmiah dan teknik untuk menghasilkan sambungan kualitas dan keandalan yang memuaskan. Mematri menggunakan suhu yang lebih tinggi daripada menyolder, tetapi konsep dasarnya serupa, terutama sehubungan dengan metalurgi dan kimia permukaan (Tabel 1). Namun, desain bersama, bahan yang harus bergabung, logam pengisi dan pemilihan fluks, metode pemanasan, dan persiapan sambungan dapat sangat bervariasi antara kedua proses. Pertimbangan ekonomi yang melibatkan logam pengisi dan teknologi proses juga bervariasi, terutama dalam kaitannya dengan: teknik otomatis dan inspeksi dan pengujian. Mematri dan menyolder dilakukan di banyak industri, mulai dari yang eksotis aplikasi di bidang elektronik dan kedirgantaraan hingga aplikasi perpipaan sehari-hari. (ASM *handbook metal* Vol. 6)

Brazing adalah suatu proses penyambungan dua atau lebih logam oleh logam pengisi dengan memanaskan daerah sambungan di atas 450°C (temperatur cair logam pengisi) tanpa mencairkan logam induknya. Brazing adalah proses penyambungan unik yang telah terbukti merupakan metode yang paling berguna untuk menyambungkan material yang berbeda seperti logam atau keramik. Sambungan brazing yang kuat dapat dicapai dengan pemilihan logam pengisi yang sesuai,

pembersihan permukaan logam sebelum dibrazing dan mempertahankan kebersihannya selama proses berlangsung, serta perancangan sambungan yang tepat (Kay, 2003).

**Tabel 2. 1 Perbandingan Soldering, Brazing dan Welding**

Parameter	Process		
	Soldering	Brazing	Welding
Joint formed	Mechanical	Metallurgical	Metallurgical
Filler metal melt temperature, °c (°f)	<450 (<840)	>450 (>840) <sup>(a)</sup>	>450 (>840) <sup>(b)</sup>
Base metal	Does not melt	Does not melt	...
Fluxes used to protect and to assist in wetting of base-metal surfaces	Required	Optional	Optional
Typical heat sources	Soldering iron; ultrasonics; resistance; oven	Furnace; chemical reaction; induction; torch; infrared	Plasma; electron beam; tungsten and submerged arc; resistance; laser
Tendency to warp or burn	Atypical	Atypical	Potential distortion and warpage of base-metal likely
Residual stresses	...	...	Likely around weld area

Keuntungan dari *brazing* yaitu adalah :

- Fabrikasi ekonomis dan rakitan kompleks dan multi komponen.
- Metode sederhana untuk penyambungan luas atau memanjang.
- Kemampuan suhu hampir mendekati suhu logam dasar.
- Distribusi tegangan sangat baik dan sifat transfer panas.
- Kemampuan menyatukan logam dengan non logam.
- Kemampuan untuk menyatukan dengan perbedaan logam.
- Kemampuan untuk mengabungkan komponen logam berporos yang *stress* nya rendah.

Kekurangan *brazing* yaitu adalah :

- Kurangnya kekuatan sambungan pada *brazing* jika dibandingkan dengan metode pengelasan.
- Kekuatan sambungan *brazing* lebih rendah dibandingkan dengan *basse metal*.
- Sambungan *brazing* akan rusak jika terkena suhu tinggi.
- *Brazing* memerlukan kebersihan yang sangat tinggi sebelum dilakukan penyambungan *brazing*.

Dalam praktiknya, interaksi biasanya diminimalkan dengan memilih logam pengisi brazing yang tepat; menjaga mematri suhu serendah mungkin, tetapi cukup tinggi untuk menghasilkan aliran; dan menjaga waktu mematri suhu pendek dan mendinginkan sambungan brazing secepat mungkin tanpa menyebabkan retak atau distorsi. Ketika mematri difusi diinginkan, suhu mematri yang lebih tinggi dan waktu yang lebih lama pada suhu mematri digunakan. Karakteristik Logam Dasar. Logam dasar memiliki efek utama pada kekuatan sambungan. Logam dasar berkekuatan tinggi menghasilkan sambungan dengan kekuatan lebih besar daripada sambungan yang dibuat dengan logam dasar yang lebih lunak (faktor lain dianggap sama). Ketika logam yang dapat dikeraskan adalah dibrazing, kekuatan sambungan menjadi kurang dapat diprediksi. Ini karena reaksi metalurgi yang lebih kompleks antara hardenable logam dasar dan logam pengisi mematri terlibat. Reaksi-reaksi ini dapat menyebabkan perubahan dalam hardenability logam dasardan dapat menimbulkan tegangan sisa.

Dalam kasus di mana bahan yang berbeda membentuk rakitan dan celah dapat terbuka atau tertutup saat pemanasan berlanjut ke penyambungan temperatur, koefisien muai panas menjadi sangat penting. Beberapa fenomena metalurgi mempengaruhi perilaku sambungan brazing dan, dalam beberapa kasus, memerlukan penanganan khusus Prosedur. Efek logam dasar ini termasuk paduan dengan pengisi mematri; presipitasi karbida; retak stres; hidrogen, belerang, dan penggetasan fosfor; dan stabilitas oksidasi. Tingkat interaksi sangat bervariasi, tergantung pada komposisi (logam dasar dan logam pengisi mematri) dan termal siklus. Selalu ada beberapa interaksi, kecuali dalam kasus ketidaklarutan timbal balik. Kekuatan logam dasar memiliki efek mendalam pada kekuatan sambungan brazing. Oleh karena itu, properti ini harus dipertimbangkan dengan cermat ketika merancang sambungan untuk memiliki sifat tertentu. Beberapa logam dasar juga lebih mudah dibrazing daripada lain, terutama dengan proses mematri tertentu. Karakteristik Pengisi-Logam. Bahan kedua yang terlibat dalam struktur sambungan adalah logam pengisi mematri. Sayangnya, itu tidak dapat dipilih untuk memberikan kekuatan sambungan tertentu. Sebenarnya, sambungan yang kuat dapat dibrazing dengan hampir semua barang

bagus logam pengisi mematri komersial jika metode mematri dan desain sambungan yang benar diterapkan.

Kekuatan sambungan brazing tidak secara langsung berhubungan dengan metode peleburan logam pengisi. Untuk contoh, jika logam konstruksi diproduksi dengan peleburan vakum, maka ada hubungan yang pasti antara praktek peleburan vakum dan kekuatan akhir dari ingot, bar, atau lembaran gulung. Namun, dengan logam pengisi mematri, sambungan kekuatan tergantung pada desain sambungan, suhu mematri, jumlah logam pengisi mematri yang diterapkan, lokasi dan metode aplikasi, laju pemanasan, dan banyak faktor lain yang membentuk teknik mematri. Sejauh mana logam pengisi mematri berinteraksi dengan dan menembus logam dasar selama mematri tergantung pada: intensitas proses difusi timbal balik yang terjadi antara kedua bahan tersebut. Dalam aplikasi yang membutuhkan sambungan yang kuat untuk suhu tinggi, kondisi layanan tegangan tinggi (seperti rakitan rotor turbin dan komponen mesin jet), ini umumnya bijaksana untuk menentukan logam pengisi mematri yang memiliki difusi tinggi dan sifat larutan dengan logam dasar. Kapan rakitan dibuat dari logam dasar yang sangat tipis (seperti pada struktur sarang lebah dan beberapa penukar panas), bagus praktek memerlukan menentukan logam pengisi mematri yang mengandung unsur-unsur dengan karakteristik difusi rendah relatif terhadap logam dasar yang digunakan.

Difusi, bagian normal dari proses metalurgi, dapat berkontribusi pada sambungan brazing yang baik ketika: mematri, misalnya, logam suhu tinggi dengan logam pengisi mematri berbasis nikel. Suhu mematri. Saat memilih logam pengisi mematri, kriteria pemilihan pertama adalah suhu mematri. Beberapa rentang suhu mematri diberikan pada Tabel 5. Sangat sedikit logam pengisi mematri yang memiliki rentang leleh yang sempit. Mematri logam pengisi di mana suhu solidus dan liquidus berdekatan biasanya tidak menunjukkan kekuatan yang kuat kecenderungan untuk hidup berdampingan sebagai campuran fase cair dan padat atau cair. Mereka mengalir dengan mudah dan harus digunakan dengan yang kecil izin bersama. Ketika suhu solidus dan liquidus berbeda, kecenderungan untuk mencair meningkat, membutuhkan

lebih besar tindakan pencegahan dalam aplikasi logam pengisi mematri. Campuran logam padat dan cair dapat membantu mengisi celah. (ASM *handbook metal* Vol. 6)

**Tabel 2. 2 Temperatur penggabungan untuk logam pengisi pada brazing**

BRAZING FILLER-METAL GROUPS	JOINING TEMPERATURE	
	°C	°F
NI, CO, AND PD ALLOYS	[GES]1100	[GES]2012
CU, NI, AND AU ALLOYS	[GES]1100	[GES]2012
CU-ZN, CU-SN, NI-P, NI-CR-P, PD-AG-CU	[GES]900	[GES]1652
CU-P, CU-AG-P	600-800	1112-1472
AG-CU-ZN, AG-CU-ZN-CD	600-800	1112-1472
AL-SI	580-600	1076-1112
MG-AL-ZN	585-615	1085-1139

### 2.7.2 Paduan tembaga-nikel sebagai logam pengisi *brazing*

Mematri atau *Brazing* paduan Cu-Ni paling sering dibrazing dengan paduan brazing berbasis perak. Pengisi Klasifikasi AWS A5.8 BAg-1a, BAg-2, BAg-18 dan BAg-5 biasanya digunakan. Paduan BCuP-5 dan BCuP-3 dapat digunakan dengan Cu-Nis dari 10% atau kurang nikel. Nomor UNS yang sesuai ditunjukkan pada Tabel 5. Nomor tersebut tidak boleh digunakan untuk paduan dengan kandungan nikel tinggi karena kemungkinan akan terbentuk nikel fosfida. Paduan mematri tembaga-fosfor tidak boleh dipilih untuk layanan di atmosfer belerang.

**Tabel 2. 3 Brazing filler**

AWS A5.3 Classification	BAg-1a	BAg-1	BAg-2	BAg-5	BAg-18	BCuP-3	BCuP-5
UNS Number	P07500	P07450	P07350	P07453	P07600	C55281	C55284

Sumber : Cooper Development Association

Fluks tipe AWS FB3-A, C, E memuaskan untuk sebagian besar aplikasi. Untuk pematrian tungku, gas inert, eksogas, endogas atau amonia terdisosiasi cocok. Titik embun tidak boleh melebihi 20°F (-7°C). Untuk mematri obor, api netral digunakan. Jarak bebas pematrian 0,001 inci hingga 0,005 inci (0,03 mm hingga 0,13 mm) menghasilkan kekuatan dan kesehatan sambungan maksimum. Paduan braze cair dapat menembus dan retak paduan Cu-Ni yang tidak stres lega sebelum mematri. Juga permukaan harus dibersihkan secara mekanis atau kimiawi sebelum mematri.

Kertas ampelas biasanya memuaskan pada pipa dan tabung. Pelarut atau pembersih alkali harus digunakan untuk menghilangkan lemak dan minyak. Prosedur yang efektif untuk pengawetan untuk menghilangkan oksida adalah sebagai berikut: celupkan ke dalam asam sulfat 5% pada suhu 180°F hingga 200°F (82°C hingga 93°C) dan segera bilas. Setelah mematri, residu fluks harus dihilangkan dengan mencuci dengan air panas. Oksida dapat dihilangkan dengan larutan pengawet yang sama yang digunakan untuk pembersihan sebelum mematri.

### ***2.7.3 Repair Brazing***

Persyaratan dan teknik perbaikan yang dibahas dalam proses pengelasan busur dan oxyfuel. Bahan bisa apapun yang biasanya berhasil disambung menggunakan proses pengelasan busur atau oxyfuel. Umumnya, prosedur pengelasan perbaikan akan berlaku apakah struktur dibangun di bawah spesifikasi konstruksi kode atau tidak. Banyak kode konstruksi memerlukan bahwa prosedur tertulis disiapkan sebelum setiap perbaikan pengelasan. Kode atau persyaratan kontrak menggantikan semua pernyataan yang dibuat dalam artikel ini. Jika komponen yang akan diperbaiki awalnya adalah fabrikasi yang dilas, maka data dan informasi tentang proses aslinya adalah: penting untuk perbaikan yang berhasil. Jika akses ke informasi ini tidak praktis, maka analisis bahan dasar, termasuk deposit las sebelumnya, menjadi wajib. Jika dimensi membutuhkan toleransi yang dekat atau jika kerataan sangat penting, maka tolok ukur yang akan membantu perbaikan tanpa menyebabkan kerusakan yang berlebihan dan mahal pada benda kerja harus mapan.

Besi Cor Besi tuang adalah keluarga paduan besi-berbasis karbon tinggi yang mengandung dari 2 hingga 4% C, 0,50 hingga 2% Si, dan jumlah yang bervariasi dari menambahkan penguat mangan dan kromium, di samping elemen lain yang mengontrol pembentukan grafit. Anggota yang paling umum dari keluarga ini adalah besi cor kelabu (grafit serpihan) yang dijelaskan dalam spesifikasi ASTM A 48. Mereka terutama mengandung karbon-mangan-silikon dan tidak ada elemen lain yang sengaja ditambahkan. Bahan-bahan ini memiliki kekuatan tarik mulai dari 140 hingga 415 MPa (20 hingga 60 ksi) dengan daktilitas dan elongasi hasil nihil kurang dari



0,5%. Karena karakteristik ini, mereka paling sulit untuk dilas dan biasanya mengalami retak garis fusi, karena: adanya karbida yang dibentuk oleh grafit serpihan. Jika area yang rusak (retak) dapat ditempatkan dalam kompresi, maka kemungkinan perbaikan yang berhasil meningkat secara signifikan. Besi tuang ulet, yang diidentifikasi dengan jelas oleh keberadaan grafit nodular dalam struktur mikronya, kadang-kadang disebut besi nodular atau besi cor sferoidal-grafit. ASTM A 536 nilai 60-40-18 hingga 120-90-02 (sebutan menunjukkan kekuatan tarik dalam satuan ksi, kekuatan luluh dalam ksi, dan perpanjangan dalam persen, masing-masing) memiliki daktilitas yang lebih baik, yang membuatnya lebih mudah dilas oleh logam pengisi berkekuatan lebih tinggi. Besi yang dapat ditempa, dijelaskan dalam spesifikasi ASTM A 47 (coran besi yang dapat ditempa feritik), A 220 (besi yang dapat ditempa dengan mutiara besi), dan A 602 (coran besi lunak otomotif), umumnya dapat dilas dan tidak mengalami masalah yang sama seperti besi abu-abu memiliki.

Proses pengelasan yang sesuai untuk pekerjaan perbaikan diidentifikasi dalam spesifikasi AWS D11.2 ("Panduan untuk Pengelasan Besi Pengecoran):

- A. Pengelasan busur logam terlepas.
- B. Pengelasan busur gas logam.
- C. Pengelasan busur *flux cored*.
- D. Pengelasan busur gas tungsten.
- E. Pengelasan busur terendam.

Proses gas yang digunakan untuk perbaikan besi tuang adalah oxyfuel welding (OFW) dan braze welding, yang memanfaatkan logam pengisi spesifik dari spesifikasi AWS A5.8 logam pengisi untuk mematri. Kelompok elektroda las yang digunakan untuk pengelasan busur besi cor dijelaskan dalam spesifikasi AWS A5.15 elektroda dan batang pengelasan untuk besi cor.

Dari banyak tipe pengelasan diatas untuk penelitian ini saya berfokus pada pengelasan *Oxyfuel gas welding* (OFW) karena pada *crankshaft compressor* yang mengalami kegagalan patah menggunakan pengelasan OFW. (ASM *handbook metal* Vol. 6)

#### **2.7.4 Torch brazing memakai metode *Oxyfuel gas welding (OFW)***

*Oxyfuel gas welding*(OFW) adalah proses manual dimana permukaan logam yang akan disambung dilebur secara bertahap oleh panas dari nyala gas, dengan atau tanpa logam pengisi, dan menyebabkan mengalir bersama dan memadat tanpa penerapan tekanan ke bagian yang disambung. Sumber panas terpenting untuk OFW adalah *oxyacetylene welding* (OAW). Sistem OFW yang paling sederhana dan sering digunakan terdiri dari tabung gas terkompresi, pengatur tekanan gas, selang, dan obor las. Oksigen dan bahan bakar disimpan dalam silinder terpisah. Regulator gas yang terpasang pada setiap silinder, bahan bakar gas atau oksigen, mengontrol tekanan di mana gas mengalir ke obor las. Gas lewat melalui katup kontrol saluran masuk dan ke dalam tubuh obor, melalui tabung atau tabung di dalam pegangan, melalui kepala obor, dan ke dalam ruang pencampuran nosel las atau perangkat lain yang terpasang pada obor las. Gas campuran itu melewati ujung pengelasan dan menghasilkan nyala api di ujung ujung keluar. Peralatan ini dapat dipasang di dan dioperasikan dari gerobak silinder, atau dapat berupa instalasi stasioner. Logam pengisi, bila diperlukan, disediakan dengan pengelasan batang yang meleleh secara bertahap bersama dengan permukaan yang akan disambung.

Pada pengelasan OFW, operator las memiliki kendali yang cukup besar atas suhu logam di zona las. Saat laju panas masukan dari nyala api dikoordinasikan dengan benar dengan kecepatan pengelasan, ukuran, viskositas, dan tegangan permukaan kolam pengelasan dapat dikontrol, memungkinkan tekanan nyala yang akan digunakan untuk membantu dalam posisi dan membentuk lasan. Operator las memiliki kendali atas laju deposisi logam pengisi karena sumber panas dan logam pengisi terpisah. Panas dapat diterapkan secara istimewa pada logam tidak mulia atau logam pengisi tanpa melepaskan salah satu dari selubung api. Dengan kemampuan ini, OFW dapat digunakan untuk menggabungkan lembaran logam tipis, tabung berdinding tipis, pipa kecil, dan rakitan dengan pemasangan, serta untuk menghaluskan atau memperbaiki las busur kasar. Peralatan ini serba guna, murah, banyak dipasaran, dan biasanya portabel. Ini dapat digunakan untuk pemanasan awal, pemanasan, pengelasan, pengelasan braze, dan mematri obor, dan itu mudah diubah

menjadi pemotongan oksigen. Prosesnya bisa disesuaikan produksi singkat, pekerjaan lapangan, perbaikan, dan perubahan.

Logam Yang Dapat Dilas Gas Oxyfuel. Kebanyakan logam besi dan nonferrous dapat dilas dengan gas oxyfuel. Oxyacetylene memasok intensitas panas dan atmosfer api yang diperlukan untuk pengelasan baja karbon, besi tuang, dan lainnya paduan besi, tembaga, dan nikel (Tabel). Paduan aluminium dan seng juga dapat dilas dengan proses oksiasetilen. Pengelasan baja oxyfuel dilakukan hampir secara eksklusif dengan api oksiasetilen. Hidrogen, gas alam, propana, dan beberapa gas berpemilik digunakan sebagai gas bahan bakar pada logam las dengan suhu leleh yang lebih rendah, seperti aluminium, magnesium, seng, timbal, dan beberapa logam mulia. Logam yang tidak cocok untuk OFW adalah logam tahan api, seperti niobium, tantalum, molibdenum, dan tungsten, serta logam reaktif, seperti titanium dan zirkonium.

Gas Oksigen dan asetilen adalah gas utama yang digunakan dalam OFW. Oksigen mendukung pembakaran gas bahan bakar. Asetilen memasok baik intensitas panas maupun atmosfer yang dibutuhkan untuk mengelas baja. Hidrogen, gas alam, propana, dan hak milik gas digunakan hanya dalam batas tertentu dalam pengelasan gas oxyfuel atau mematri logam dengan suhu leleh rendah. Oksigen hanya dengan membakar gas bahan bakar tertentu dengan oksigen dengan kemurnian tinggi dalam api berkecepatan tinggi dapat mentransfer panas tinggi intensitas yang dibutuhkan dalam OFW diperoleh. Oksigen disuplai untuk pengelasan dan pemotongan gas oxyfuel dengan kemurnian 99,5% dan lebih tinggi, karena persentase kecil kontaminan memiliki efek nyata pada efisiensi pembakaran.

Masalah yang timbul dari kesulitan dalam pengendalian panas dalam menyambung bagian tipis dengan OFW kadang-kadang diselesaikan dengan menggunakan proses penggabungan logam lainnya:

1. Pengelasan arc logam gas sirkuit pendek
2. Pengelasan arc pulsed
3. Pengelasan arc tungsten gas
4. Pengelasan arc plasma

5. Las electron beam
6. Pengelasan ultrasonic
7. Pengelasan resistensi
8. Pengelasan braze
9. Preheating dan postheating

Perlakuan panas preweld dan postweld biasanya tidak diperlukan untuk mengurangi kekerasan baja karbon rendah, tetapi baik atau kedua perawatan ini bermanfaat dan efektif dalam menghindari atau mengurangi distorsi. Kebanyakan baja yang merupakan oxyacetylene gas yang dilas termasuk dalam kisaran rendah karbon. Pengelasan gas oxyacetylene mendistribusikan panas dalam jumlah besar ke area yang luas. Ini menghasilkan laju pendinginan yang relatif lambat dan gradien tegangan yang relatif rendah, yang, pada gilirannya, mengurangi tingkat pengerasan dan besarnya tegangan sisa yang biasanya terkait dengan siklus panas pengelasan.

#### **2.7.5 Fenomena retak terkait proses pengelasan**

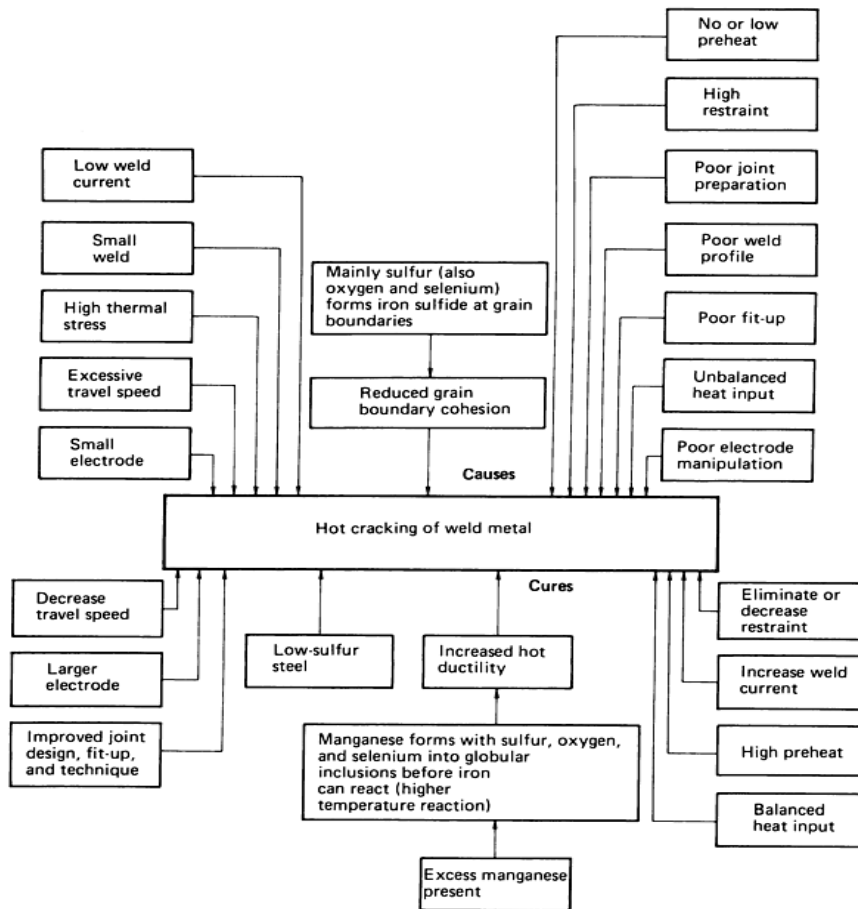
Pembentukan cacat pada material yang telah dilas fusi menjadi perhatian utama dalam desain las majelis. Empat jenis cacat khususnya telah menjadi fokus banyak perhatian karena besarnya berdampak pada kualitas produk. Cacat ini, yang semuanya memanifestasikan dirinya sebagai retakan, adalah karakteristik dari fenomena itu terjadi pada interval suhu tertentu khusus untuk paduan tertentu. Dalam bahasa sehari-hari, keempat jenis cacat ini disebut panas retakan, celah mikro zona yang terpengaruh panas (HAZ), retakan dingin, dan robekan pipih.

#### **2.7.6 *Solidification Cracking (Hot Cracking)***

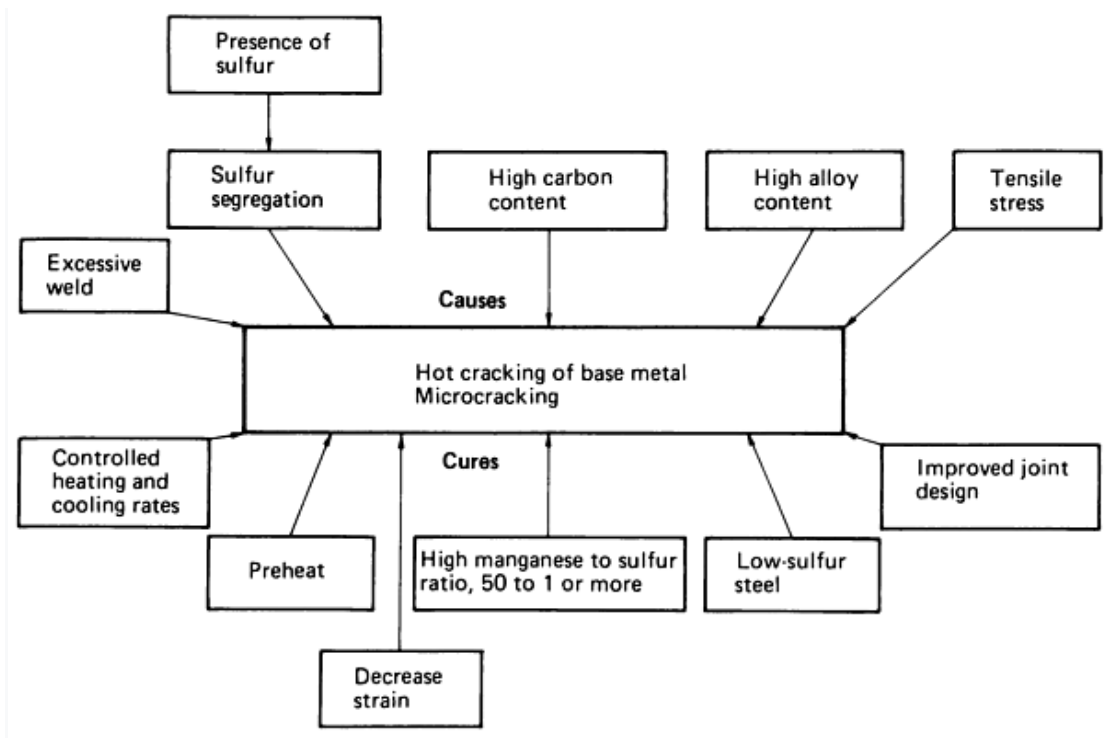
Retakan panas adalah retakan pemadatan yang terjadi di zona fusi dekat akhir pemadatan. Secara sederhana, hasilnya dari ketidakmampuan bahan semipadat untuk mengakomodasi regangan penyusutan termal yang terkait dengan pengelasan pemadatan dan pendinginan. Retakan kemudian terbentuk di situs yang rentan untuk mengurangi ketegangan yang menumpuk. Situs yang rentan adalah antarmuka, seperti batas butir pemadatan dan daerah interdendritik, yang setidaknya sebagian dibasahi.

Retakan solidifikasi membutuhkan penahan mekanis (regangan) yang cukup dan struktur mikro yang rentan. Pengetahuan tentang perkembangan strain penyusutan pada skala mikrostruktur dari dendrit yang mengeras masih sangat terbatas, sehingga hampir tidak mungkin untuk mengukur secara apriori jumlah regangan lokal yang diperlukan untuk memulai pemadatan retak. Lebih lanjut, kecepatan di mana regangan diterapkan dapat mempengaruhi kemampuan paduan untuk bertahan dari pemadatan proses tanpa retak. Pada suhu yang mendekati titik lelehnya, paduan logam dapat dengan mudah menghilangkan beban yang diterapkan proses deformasi yang bergantung pada waktu (yaitu, proses creep). Pada tingkat tegangan yang diterapkan yang tinggi, baik zona fusi maupun HAZ memiliki waktu terbatas untuk mengakomodasi pembebanan mekanis ini. Dalam kondisi pemadatan dan pendinginan yang cepat, tingkat akumulasi regangan cepat, yang menyebabkan peningkatan kerentanan retak. Maka, secara internal, regangan yang diperlukan untuk pemadatan retak lebih mungkin dialami dengan proses pengelasan yang mempromosikan pemadatan cepat dan pendinginan.

Karena pemahaman kuantitatif yang terbatas tentang pengembangan regangan dalam lasan pemadatan, pendekatan praktisnya diambil untuk meminimalkan faktor mekanis adalah untuk mengurangi pengekanan las secara keseluruhan melalui desain sambungan yang bijaksana dan pilihan parameter pengelasan yang tepat. Cara sederhana untuk meminimalkan hambatan pada sambungan las yang mengeras adalah dengan menjaga celah bersama seminimal mungkin dengan merancang perangkat keras dengan kesesuaian yang baik. Pendekatan lain, sangat menarik untuk anak kecil bagian, adalah merancang sambungan las sebagai tepi berdiri. Parameter pengelasan dapat memiliki pengaruh yang besar terhadap kejadian tersebut retak solidifikasi. Kecenderungan alami untuk menggunakan pengelasan berkecepatan tinggi untuk meningkatkan produktivitas dapat merugikan efek. Pembentukan kolam las berbentuk tetesan air mata, yang dapat terjadi jika kecepatan gerak las meningkat, dapat terjadi retakan pemadatan garis tengah. Pola pemadatan yang terkait dengan jenis kolam las ini sedemikian rupa sehingga mengeras butir bertemu di garis tengah las, membentuk situs yang sangat rentan untuk inisiasi retak solidifikasi.



Gambar 2. 7 Faktor yang mempengaruhi keretakan panas pada logam las



**Gambar 2. 8 Faktor yang mempengaruhi keretakan panas pada base metal.**

### 2.7.7 Retak zona yang terkena panas (HAZ)

*Microfissures* adalah retakan yang terjadi di daerah peleburan sebagian dan HAZ yang berdekatan dengan garis fusi. Karena tidak bahan dapat dimurnikan ke keadaan di mana ia benar-benar mengeras sebagai invarian, semua bahan memiliki wilayah suhu koeksistensi dua fase yang stabil dari padat dan cair. Dalam pengelasan fusi, ini memanifestasikan dirinya dalam pembentukan zona sebagian meleleh pada suhu di bawah paduan liquidus. Luasnya zona ini dapat diperbesar dengan adanya ketidakhomogenan kimiawi dalam suatu bahan. Variasi bahan kimia lokal akan menghasilkan variasi lokal pada titik leleh. Pemisahan elemen paduan tertentu ke batas butir dapat menyebabkan penurunan suhu leleh ini daerah. Banyak celah mikro terbentuk dengan cara yang agak analog dengan pembentukan retakan solidifikasi yang rentan situs, umumnya batas butir yang memotong zona fusi, dibasahi dengan cairan dari salah satu dari berbagai sumber. regangan susut yang terakumulasi saat kolam las melewati batas yang dicairkan dapat berkembang ke tingkat yang cukup menyebabkan pemisahan batas (yaitu, retak).

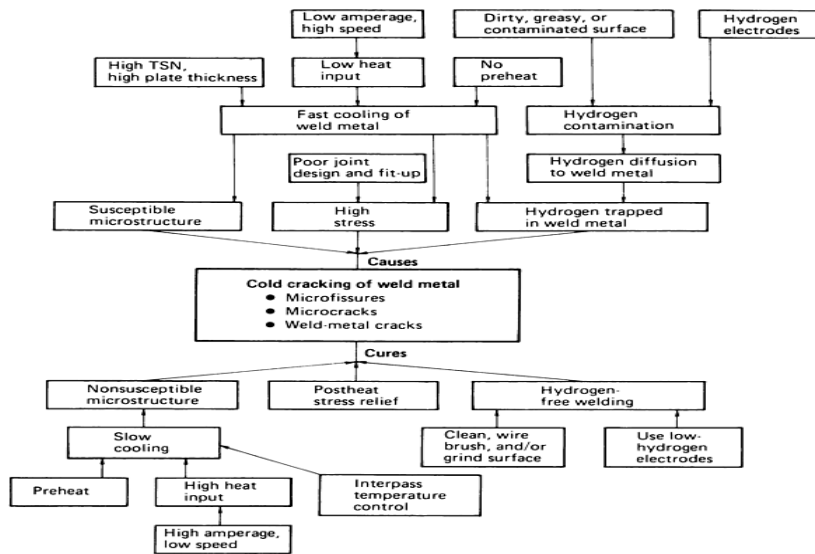
Pengecoran merupakan kasus khusus ketidakhomogenan dalam skala berkelanjutan. Ketidakhomogenan kimia dalam produk tempa lebih terpisah, umumnya melibatkan partikel fase minor. Dalam banyak kasus, fase kecil ini muncul dari pemrosesan termomekanis paduan jauh di bawah solidus, di mana kelarutan untuk elemen paduan tertentu dapat terjadi menurun. Karena potensi laju pemanasan dan pendinginan yang sangat cepat (terutama pemanasan) di HAZ fusi las, sangat mungkin bahwa fasa minor yang tidak stabil secara termodinamika dalam kondisi kesetimbangan dapat berlanjut ada pada suhu mendekati solidus. Dalam kondisi ini, fase minor dapat berinteraksi dengan matriks untuk membentuk produk cair. Reaksi ini, sering disebut sebagai likuidasi konstitusional, dapat menghasilkan cairan yang dibutuhkan untuk basah batas butir menghasilkan mikro yang mungkin rentan terhadap retak.

Pada prinsipnya, masalah retakan reheat sebagian besar bisa dihilangkan jika laju pemanasan melalui presipitasi. Kisaran suhu cukup cepat untuk mencegah pembentukan endapan. Namun, laju pemanasan yang sangat cepat perangkat keras yang dilas kemungkinan besar akan menyebabkan masalah seperti distorsi yang berlebihan; oleh karena itu, paduan yang ditingkatkan (misalnya, paduan 718 di antara superalloy berbasis nikel) telah dikembangkan di mana kinetika pembentukan endapan telah dikembangkan cukup terbelakang untuk memungkinkan perlakuan panas pasca las berhasil. Menangani retakan HAZ, bagaimanapun bentuknya, umumnya lebih sulit daripada menangani masalah pemadatan retak. Mengubah komposisi di HAZ melalui penambahan bahan habis pakai bukanlah pilihan yang layak. Perlakuan panas sebelumnya memungkinkan produksi mikrostruktur awal yang tidak terlalu rentan, tetapi opsi ini umumnya adalah sangat terbatas. Optimasi parameter proses pengelasan untuk meminimalkan tingkat tegangan tarik dan pengembangan regangan harus selalu dipertimbangkan, seperti halnya mengoptimalkan desain sambungan las seperti yang dibahas di atas.

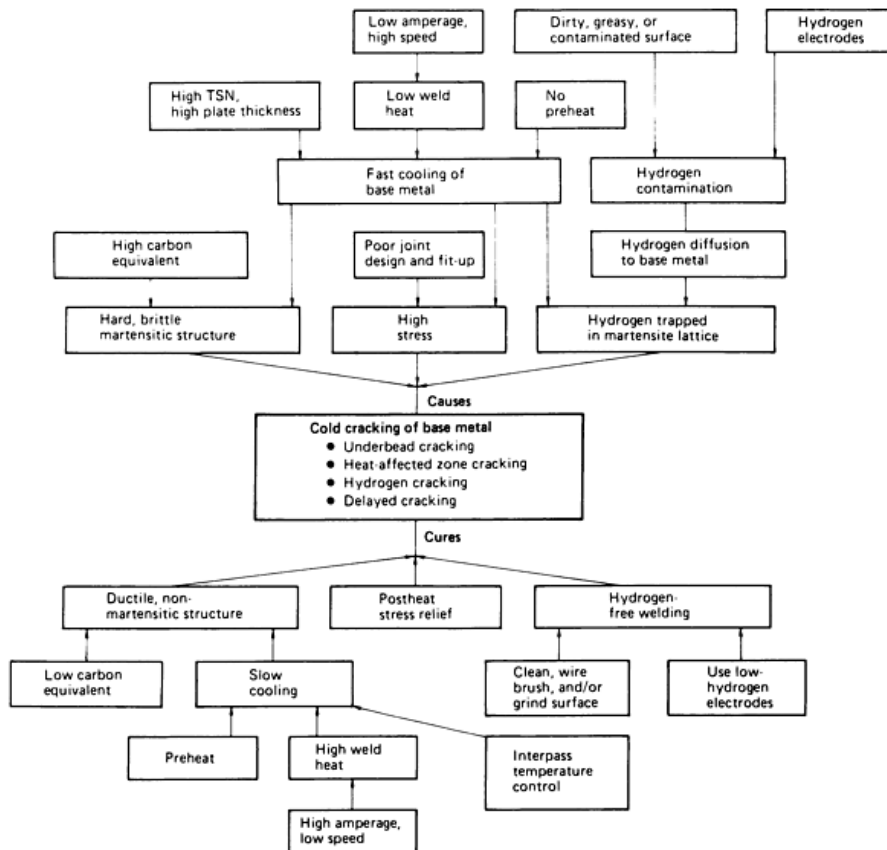


### 2.7.8 Retak yang diinduksi hidrogen (retak dingin)

Retakan dingin adalah cacat yang terbentuk akibat kontaminasi mikrostruktur brazing oleh hidrogen. Sedangkan retak pemadatan dan retak HAZ terjadi selama atau segera setelah proses pengelasan yang sebenarnya, yang diinduksi oleh hidrogen retak biasanya merupakan fenomena tertunda, terjadi mungkin berminggu-minggu atau bahkan berbulan-bulan setelah operasi pengelasan. Itu suhu di mana cacat ini cenderung terbentuk berkisar dari -50 hingga 150 ° C (-60 hingga 300 ° F) pada baja. Frakturnya juga pembelahan intergranular atau transgranular. Seperti bentuk retakan lainnya, retakan yang diinduksi hidrogen melibatkan baik mikrostruktur yang disyaratkan dan tingkat ambang batas stres. Ini juga melibatkan tingkat kritis hidrogen, yang bergantung pada paduan dan struktur mikro. Dalam kasus proses pengelasan yang ideal, retakan yang diinduksi oleh hidrogen paling banyak menjadi perhatian teknik pengelasan kecil. Namun, mengeluarkan hidrogen dari struktur selama pengelasan sangatlah sulit. Meskipun sumber utama hidrogen dalam logam las dianggap sebagai disosiasi uap air dalam busur dan absorpsi gas atau hidrogen terionisasi menjadi cairan, sumber lain juga tersedia. Semua senyawa organik mengandung hidrogen di dalamnya struktur molekul, dan semuanya dapat rusak dalam lingkungan termal yang intens dari sumber panas pengelasan. Organik Senyawa ada di mana-mana di lingkungan pengelasan, dari pelumas di area perakitan hingga minyak tubuh di tangan operator pengelasan. Perangkat keras berlapis mungkin juga mengandung residu hidrogen tingkat tinggi. (ASM *handbook metal vol. 6*)



Gambar 2. 9 Penyebab dan keretakan terinduksi hydrogen pada logam lasan



Gambar 2. 10 Penyebab keretakan yang diinduksi hydrogen pada base metal

## 2.8. Kegagalan casting

Kegagalan casting seperti kegagalan bahan tempa, dapat terjadi dari kondisi layanan, desain dan/atau pemilihan bahan yang tidak tepat, kekurangan manufaktur, atau kombinasi dari semuanya. Sejalan dengan itu, kegagalan terkait cacat adalah salah satu yang dihasilkan dari suatu kondisi yang berada di luar kriteria penerimaan yang ditetapkan bahwa perancang tidak atau tidak bisa mengantisipasi. Kegagalan pada casting ada banyak penyebabnya yaitu :

Diskontinuitas casting ketidaksempurnaan juga mungkin cacat manufaktur, dalam arti menjadi kondisi yang tidak dapat diterima selama rezim inspeksi, tetapi tidak cacat fungsional. Oleh karena itu, penilaian rekayasa kritis dari diskontinuitas diperlukan untuk menentukan apakah suatu ketidaksempurnaan adalah cacat atau diskontinuitas tidak berbahaya yang tidak mengorbankan keandalan atau fungsi yang dimaksudkan dari pengecoran. Meskipun istilah diskontinuitas atau ketidaksempurnaan lebih disukai ketika mengacu pada penyimpangan dalam kurang sempurna coran, istilah cacat pengecoran kadang-kadang digunakan untuk ketidaksempurnaan umum juga. Pengecoran yang tidak menguntungkan praktek dapat mengakibatkan berbagai ketidaksempurnaan casting yang merugikan dalam pelayanan dan yang dapat berkontribusi untuk kegagalan. Komite Internasional Asosiasi Teknis Pengecoran (ICFTA) telah menstandarisasi nomenklatur, dimulai dengan identifikasi tujuh kategori dasar casting ketidaksempurnaan (atau cacat, dalam terminologi yang digunakan oleh skema klasifikasi ICFTA, Tabel 1):

- Proyeksi logam
- Rongga
- Diskontinuitas
- Cacat
- Pengecoran tidak lengkap
- Dimensi salah
- Inklusi atau anomali structural

Komponen cor akan berfungsi sebagai diinginkan, efek diskontinuitas pada properti adalah penting spesifikasi yang berlebihan menyebabkan biaya yang tidak perlu dan dapat dihindari dengan memahami efek diskontinuitas pada kinerja pengecoran dan pengaruh desain pengecoran pada kecenderungan diskontinuitas untuk terbentuk selama proses pengecoran. Keberadaan diskontinuitas pengecoran tidak, dengan sendirinya, menunjukkan bahwa kinerja pengecoran dalam pelayanan akan terpengaruh. Ini memungkinkan pengecoran untuk merancang praktik pengecoran yang menghilangkan diskontinuitas tersebut dengan biaya minimum.

### **2.8.1 Kegagalan poros**

Poros adalah batang logam biasanya berbentuk silinder dan padat, tetapi terkadang berlubang yang digunakan untuk menopang komponen berputar atau untuk mengirimkan daya atau gerakan dengan gerakan putar atau aksial, biasanya dengan gaya tarik tetapi terkadang dikombinasikan dengan gaya lentur atau torsi. Poros dikenakan satu atau lebih beban contohnya tegangan, kompresi atau torsi, selain itu poros sering juga mengalami tegangan getaran yang tinggi. Dengan pengecualian keausan sebagai akibat dari kerusakan bearing paling banyak penyebab umum kegagalan poros adalah kelelahan logam. Kegagalan kelelahan paling banyak dimulai titik rawan di area yang mengalami stress secara dinamis biasanya pemicu stress bersifat metalurgi atau mekanis dan *fatigue fracture* biasanya ditemukan disuhu rendah beberapa *fatigue fracture* diakibatkan oleh benturan atau dengan kelebihan beban. Perpatahan ulet biasanya disebabkan oleh beban berlebih yang tidak sengaja dan relatif jarang terjadi dalam kondisi pengoperasian normal. *Creep* retak suatu bentuk distorsi saat ditinggikan suhu dapatnya menyebabkan stres pecah. Ini juga menyebabkan poros dengan toleransi yang ketat bisa terjadi juga gagal karena perubahan berlebihan dalam dimensi kritis. (Heinz P. Bloch)

Analisis kegagalan harus memiliki salinan gambar detail dan serta material spesifikasi pengujian yang melibatkan poros. Potensi penyebab stress atau titik stress konsentrasi dan perubahan diameter poros harus diperhatikan. Tipe sifat mekanik, perlakuan panas, lokasi pengujian pemeriksaan tidak rusak yang digunakan dan

lainnya. Kondisi mekanis bagaimana sebuah poros ditopang atau dirakit dalam mekanisme kerja dan hubungannya antara bagian yang gagal dan anggota terkait dapat menjadi informasi yang berharga. Jumlah dan lokasi bantalan atau penyangga, serta bagaimana kesejajarannya dapat dipengaruhi oleh defleksi atau distorsi yang dapat terjadi sebagai akibat dari beban mekanis guncangan, getaran atau gradien thermal harus dipertimbangkan. Permukaan komponen yang berdekatan dengan permukaan patahan harus diperiksa apakah ada retakan, lubang atau ketidaksempurnaan. Mode inspeksi yang tidak merusak seperti inspeksi ultrasonic terkadang dapat memberikan informasi yang berguna, metode seperti itu dapat mengungkapkan retakan lain yang belum berkembang menjadi pecah, retakan ini mungkin memiliki retakan lain atau permukaan perpatahan yang tidak rusak parah seperti perpatahan primer dan itu bisa dapat mendiagnosis lebih lanjut. (ASM metals handbook volume 11)

Mekanisme retakan pada perpatahan intergranular adalah pemisahan batas butir. Penyebabnya mungkin karena kehadirannya fase batas butir, batas habis paduan dan faktor lingkungan atau seperti mekanis seperti korosi tegangan retak, kerusakan hydrogen, kerusakan panas dan status stress aksial. Pengujian mekanis dan analisis kimia terkadang menunjukkan penyebab kegagalan sebagai bahan yang salah, perlakuan panas yang tidak tepat atau mengubah properti. Pengujian kekerasan dan analisis spektrokopi harus dilakukan sebagai hal biasa. Uji benturan, uji tarik dan uji mekanis.

Kegagalan elemen berputar karena bagiannya yang besar dalam terjadinya kegagalan pada komponen mekanis, beberapa perhatian akan diberikan pada analisis visual. Pada korosi atmosfer, korosi galvanik dan celah, tegangan korosi, dan penggetasan hidrogen sering menjadi kontributor kegagalan elemen ini tanda pantai pada saat kerusakan akhir. Perhatikan bahwa ini bertepatan dengan tanda ratchet. Hal ini menunjukkan bahwa retak tidak stabil pada saat kedua kelelahan retak bergabung, yang konsisten dengan konsep mekanika patahan untuk kekritisian retakan. Poros bekerja dalam berbagai kondisi, termasuk lingkungan korosif, di suhu yang sangat tinggi atau sangat rendah, dan mungkin mengalami berbagai pemuatan kondisi

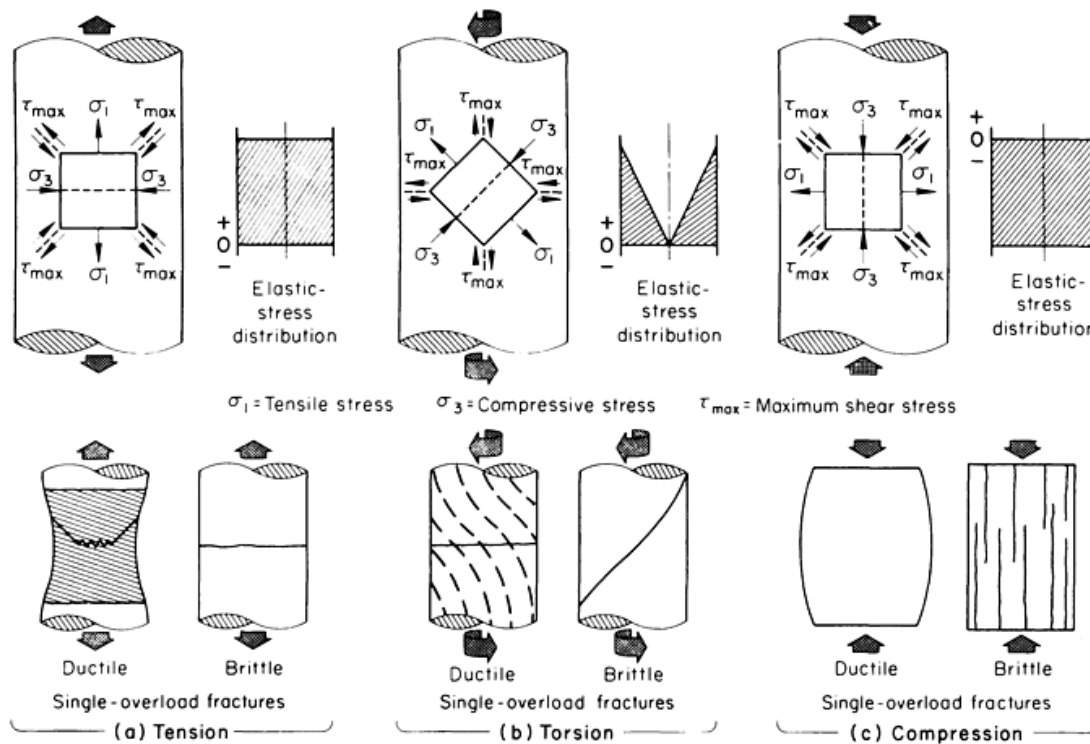
tegangan, kompresi, tekukan, torsi, atau kombinasi dari ini kondisi. Selain itu, mereka mungkin mengalami stres getaran. Yang paling umum penyebab kegagalan adalah:

1. Keausan abrasif: material terlepas dari permukaan padat karena partikel keras atau tonjolan pada permukaan geser. Contoh bahan abrasif adalah pasir, kotoran, partikel logam, dan kotoran lainnya di dalam pelumas.
2. Kelelahan: biasanya dimulai pada konsentrasi tegangan, seperti juga keretakan lainnya mekanisme. Fitur khas dari konsentrator tegangan ini adalah sudut, alur pasak, talang, bentuk tempa, cacat las, torehan, retak, korosi lubang, jarak bebas, dan tikungan.
3. Misalignment: dapat dilakukan setelah perbaikan; getaran yang dihasilkan sering menyebabkan kegagalan kelelahan poros. Setiap penyebab kegagalan dikaitkan dengan karakteristik tertentu dari kedua lokasi kegagalan dan permukaan fraktografinya. Menunjukkan beberapa karakteristik yang terkait dengan bentuk tanda pantai dan hubungannya antara daerah propagasi subkritis dan fraktur akhir.

#### **2.8.1.2 Penyebab perpatahan di poros akibat kelebihan tegangan**

Perpatahan di poros berasal dari titik konsentrasi tegangan baik yang melekat. Dalam desain diperkenalkan selama fabrikasi, tegangan yang selama dihasilkan selama fabrikasi termasuk contohnya gerinda. Tanda atau goresan mesin dan memadamkan retakan akibat perlakuan panas, seringkali tegangan dimasukkan selama poros penempaan. Perpatahan disebabkan oleh ketidaksejajaran bantalan baik yang diperkenalkan saat perakitan atau disebabkan oleh defleksi pendukung yang beroperasi berasal dari tidak kecocokan dan bisa terjadi juga dari penanganan ceroboh dimana porosnya tergores atau cungkil. Pada tingkat yang lebih rendah poros dapat retak karena kesalahan penggunaan material seperti itu retakan terjadi akibat penggunaan material yang memiliki transisi ulet ke getas yang tinggi. Sistem tekanan diporos, sistem tegangan yang bekerja pada poros harus dipahami sebelum penyebab patah diporos itu dapat ditentukan juga. Perilaku ulet dan rapuh dibawah beban statis atau kelebihan beban tunggal dan karakteristik patahan permukaan.

Sistem tegangan yang bekerja pada poros harus dipahami dengan jelas sebelum penyebab keretakan pada poros tersebut dapat diketahui juga perilaku ulet dan dan rapuh/getas dibawah pembenanan statis, serta karakteristiknya permukaan retakan yang dihasilkan oleh jenis perilaku harus dipahami dengan jelas untuk analisis retakan poros yang tepat. Menunjukkan diagram bebas dua dimensi yang disederhanakan yang mengilustrasikan orientasi tegangan normal dan sistem tegangan geser pada titik internal manapun dalam proses yang dibebani tegangan torsi, kompresi murni.

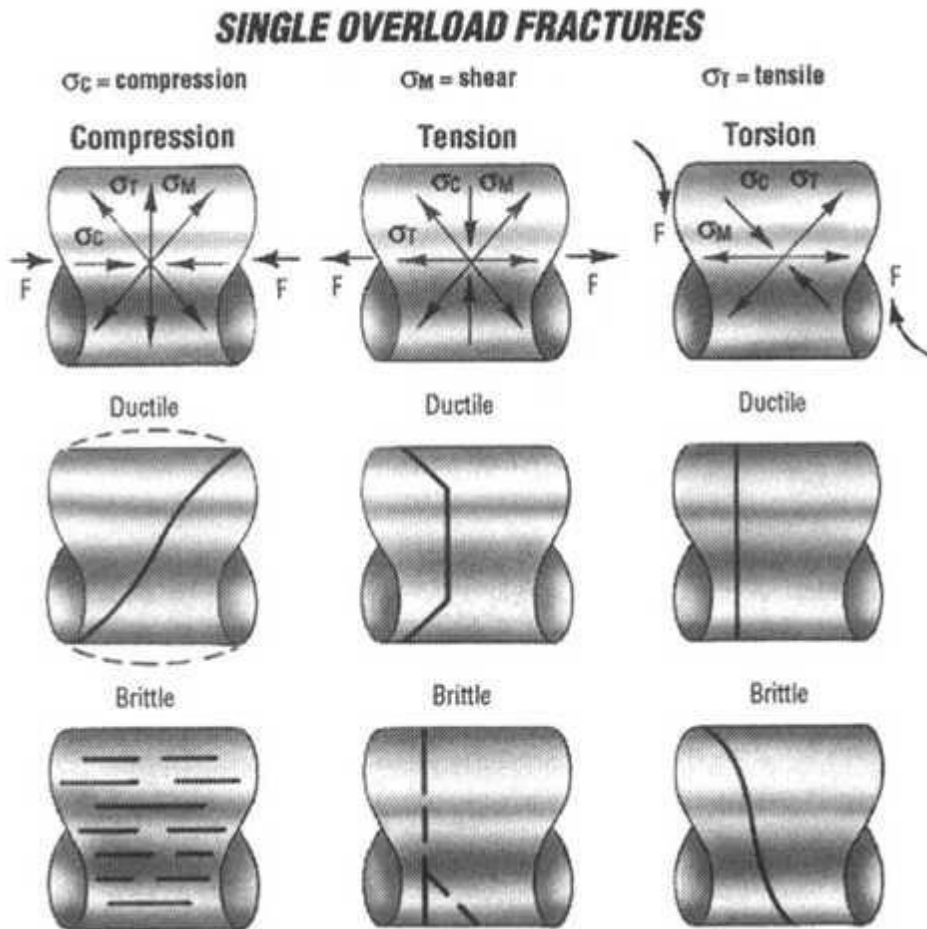


**Gambar 2. 11 Diagram benda bebas yang menunjukkan orientasi tegangan normal dan tegangan geser**

Sumber : ASM Metals Handbook Volume 11

Kelelahan pada poros secara umum dapat diklarifikasikan menjadi tiga subdivisi dasar kelelahan lentur, kelelahan torsi dan aksial kelelahan. Kelelahan tekukan dapat terjadi akibat jenis beban tekuk, searah (satu arah), terbalik (dua arah)

dan berputar. Dalam pembengkokan searah, tegangan pada titik manapun berfluktuasi.



**Gambar 2. 12 Sifat material dan jenis kegagalan beban berlebih mempengaruhi penampilan permukaan patahan**

Sumber : Heinz P. Bloch

Yang dihasilkan oleh jenis perilaku ini harus dipahami dengan jelas untuk analisis yang tepat pada perpatahan poros tersebut. Gambar 2.3 memberikan diagram dua dimensi yang disederhanakan yang menunjukkan orientasi dari sistem tegangan normal dan tegangan geser pada titik internal manapun dalam poros yang dibebani dalam tegangan murni, torsi dan juga kompresi.

**Tension** dibawah pembebanan tegangan, tegangan tarik  $\sigma$  adalah longitudinal sedangkan komponen tegangan tekan  $\tau_c$  melintang ke sumbu poros. Maksimal komponen tegangan geser  $\sigma_m$  berada pada  $45^\circ$  terhadap sumbu poros. Dalam



material ulet yang dikembangkan oleh pembebanan tarik menyebabkan cukup banyak deformasi sebelum patah, yang berasal dari dekat pusat poros dan menjalar kepermukaan diakhiri dengan bibir geser berbentuk kerucut biasanya sekitar  $45^\circ$  ke arah permukaan poros. Dalam material rapuh perpatahan dari satu kelebihan beban tarik secara kasar tegak lurus dengan arah tegangan tarik tetapi melibatkan sedikit permanen deformasi. Permukaan patahan biasanya kasar dan tampak seperti kristal.

**Torsion** sistem tegangan berputar  $45^\circ$  berlawanan arah jarum jam saat poros dibebankan torsi. Baik tegangan tarik maupun tekan adalah  $45^\circ$  terhadap poros dan tetap saling tegak lurus. Satu komponen tegangan geser sejajar dengan poros. Poros yang lainnya tegak lurus dengan sumbu poros. Dalam material ulet yang dibebani hingga gagal dalam torsi, tegangan geser menyebabkan cukup banyak deformasi sebelum patah. Deformasi ini bagaimanapun biasanya tidak terlihat jelas karena bentuk porosnya tidak berubah. Perpatahan kelebihan beban torsi dari bahan ulet biasanya terjadi pada bidang yang melintang tegak lurus dengan sumbu poros. Dalam poros murni daerah patahan akhir berada ditengah poros, adanya sedikit tekukan menyebabkan tidak berada ditengah. Material yang rapuh dalam torsi murni akan patah secara tegak lurus terhadap tegangan tarik yaitu  $45^\circ$  ke poros. Permukaan patah biasanya menghasilkan memiliki bentuk spirial.

**Compression** ketika sebuah poros dibebani dalam tegangan tekan aksial maka sistem tegangan berputar sehingga tegangan tekan  $\tau_c$  adalah tegangan aksial dan tegangan tarik melintang. Tegangan geser  $\tau_m$  adalah  $45^\circ$  terhadap sumbu poros seperti yang terjadi pada selama pemuatan tegangan aksial. Dalam material ulet yang kelebihan beban pada kompresi menyebabkan tegangan geser yang cukup besar deformasi tetapi biasanya tidak menyebabkan patah. Porosnya diperpendek dan menonjol dibawah pengaruh tegangan geser. Jika material rapuh dimuat dengan kompresi murni tidak melengkung, ia akan patah secara tegak lurus terhadap tegangan tarik maksimum. Karena tegangan tarik melintang maka arah patah getas adalah sejajar dengan poros. Distribusi tegangan elastis dalam pembebanan tegangan tekan murni dengan tidak adanya konsentrasi tegangan seragam diseluruh bagian.

Jika perpatahan terjadi kemungkinan besar akan terjadi dalam arah longitudinal karena beban tekan meningkatkan poros diameter dan regangan.

Kegagalan beban dari analisis kegagalan material mengacu pada material ulet atau getas. Patahnya suatu material ketika tegangan melebihi daya dukung beban material baik dari yang berlebihan tegangan yang diterapkan atau penurunan kapasitas penahan beban material dari kerusakan atau lainnya. Namun definisi kegagalan beban berlebih tidak disetujui secara seragam. Banyak yang membatasi definisi kegagalan beban yang berlebih dengan kegagalan dimana tegangan yang diterapkan lebih tinggi dari yang diantisipasi dalam desain. Ini kesalahanpahaman sebagai penyebab kegagalan kelebihan beban karena sebenarnya tidak termasuk kegagalan atau penyebab lainnya mengakibatkan perpatahan pada beban normal.

Tujuan analisis kegagalan teknik adalah untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan komponen atau sistem dan untuk mencegah kejadian serupa. *Underdesain* hanyalah salah satu penyebab potensial dari kegagalan *overload* dan memakan waktu proses desain ulang yang berpotensi mahal mungkin memang diperlukan untuk mencegah lebih lanjut kegagalan dalam kasus ini. Namun dari sudut pandang analisis kegagalan praktis banyak bervariasi karakteristik manufaktur dan material dapat bertindak sendiri-sendiri atau bergabung secara sinergi untuk mengurangi kekuatan, keuletan dan ketangguhan bahan logam. Faktor-faktor ini juga harus dipertimbangkan dalam evaluasi dan pencegahan kegagalan kelebihan beban, istilah kegagalan beban berlebih dimaksudkan untuk patah karena tegangan yang melebihi kapasitas bahan, baik tegangannya lebih tinggi dari maupun tidak diantisipasi oleh desain.

Tujuan dari penulisan ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengilustrasikan jenis kegagalan kelebihan beban :

1. Kegagalan kelebihan beban karena kekuatan material yang tidak mencukupi dan desain yang kurang.
2. Kegagalan kelebihan beban karena konsentrasi tegangan dan cacat metrial.
3. Kegagalan kelebihan beban karena perubahan material.

Langkah-langkah pencegahan untuk mengurangi kemungkinan patah kelebihan beban disertakan secara khusus kegagalan beban berlebih karena karena material perubahan sangat kompleks. Tidak ada komponen teknik yang kebal dari perubahan sifat material ketegangan mekanis, kerusakan parah dan perubahan struktur mikro material. Rekayasa yang rumit kegagalan dapat juga terjadi akibat beberapa perubahan secara bersamaan.

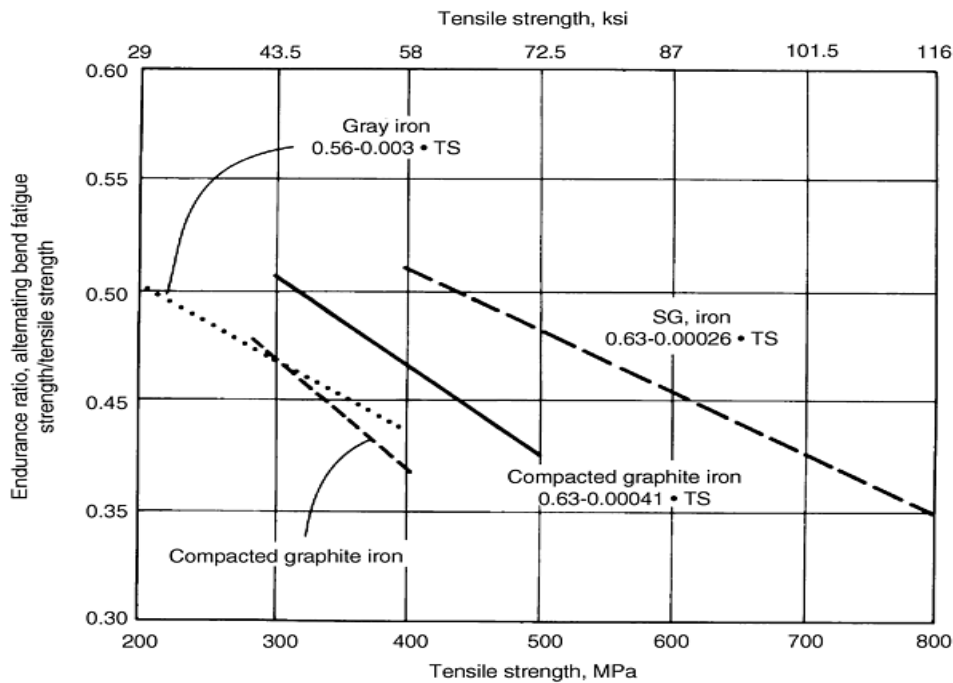
Kegagalan beban berlebih ulet hanya yang menunjukkan deformasi plastis makroskopik yang terlihat signifikan. Stress terapan dan energi dari sumber eksternal diperlukan untuk menyebarkan retakan, bukan tegangan sisa saja. Retakan ulet biasanya berhenti ketika tegangan berkurang secara dinamis dan energi yang tidak cukup untuk membuat distorsi lebih lanjut tetap ada. Ini kemampuan untuk mendeformasi dan untuk menyerap energi di ujung retakan memungkinkan bahan ulet untuk kelelahan retak atau retak dalam suatu stabil (*non critical*) secara berlebihan dalam jangka waktu lebih lama. Garis-garis yang terbentuk dengan baik dan mudah diidentifikasi seringkali terdapat perpatahan kelelahan bahan ulet. Karena necking atau tanda deformasi terlihat lainnya yang dibuktikan dengan bahan yang ulet sebelum kegagalan, beban berlebih seringkali kurang mengejutkan dan membawa bencana dibandingkan kegagalan rapuh. Karena sifatnya kegagalan beban berlebih ulet sering terjadi selama pembuatan atau relatif awal.

Kegagalan *brittle overload* kegagalan kelebihan beban getas, berbeda dengan kegagalan beban berlebih ulet ditandai dengan sedikit atau tidak ada deformasi plastis makroskopis. Itu fitur mekanisme patah tulang pada skala makroskopis mungkin memiliki komponen perambatan retak ulet atau rapuh, tetapi proses makroskopik patah ditandai dengan sedikit atau tidak ada pekerjaan yang dikeluarkan dalam bentuk permanen atau plastik. Perilaku makroskopis pada dasarnya bersifat elastis hingga mencapai titik kegagalan. Energi kegagalan pada prinsipnya adalah diserap oleh pencipta permukaan baru yaitu retakan. Karena alasan ini kerusakan getas seringkali mengandung banyak retakan yang terpisah pemotongan yang lebih jarang terjadi pada kegagalan beban berlebih ulet.

### 2.9.1 Sifat kelelahan pada besi cor

Besi cor memiliki beberapa keunggulan manufaktur dan teknik yang terkenal dibandingkan baja tuang, termasuk 30 hingga 40% biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan baja tuang dan karakteristik kinerja yang lebih diinginkan, seperti keausan yang lebih baik resistensi dan redaman getaran. Keunggulan baja tuang ini didasarkan pada beberapa karakteristik metalurgi besi cor. Pertama, besi tuang memiliki suhu leleh (dan oleh karena itu suhu penuangan) yaitu 300 hingga 350 ° C (540 hingga 630 ° F) lebih rendah dari baja tuang. Kedua, karena konsentrasi karbon bebas yang lebih besar dan silikon yang lebih tinggi, besi cor grafit (abu-abu dan ulet) memiliki fluiditas terbesar dan penyusutan paling sedikit dari semua logam besi. Sebagai contoh, baja tuang umumnya akan mengalami penyusutan volume lebih dari 4% selama pemadatan, sedangkan abu-abu dan ulet penyusutan besi cor bisa kurang dari 1%, tergantung komposisi dan kondisi pemrosesan. Perbedaan ini penyusutan memungkinkan produk dibuat dengan dimensi yang tepat jauh lebih mudah menggunakan besi cor abu-abu dan ulet, dengan sangat sedikit masalah dalam mendapatkan tekanan sesak sebagai akibat dari penyusutan interdendritik yang berkurang. Selain itu, besi tuang adalah lebih bisa dikerjakan daripada baja tuang, dan relatif lebih tahan aus karena grafit bertindak sebagai sistem. Grafit juga melemahkan suara dan getaran mekanis, yang membuat besi cor ideal bagi banyak orang aplikasi mekanis, contohnya seperti rem.

Kinerja kelelahan besi tuang secara umum dipengaruhi oleh morfologi grafit, struktur mikro matriks dan tarik kekuatan, ukuran spesimen, kondisi permukaan, degradasi permukaan seperti korosi, dan jenis tegangan pembebanan (misalnya, aksial, pembengkokan, pembengkokan terbalik, torsi, multiaksial, amplitudo variabel). Pengaruh bentuk grafit pada kelelahan besi cor telah menerima banyak perhatian dan merupakan variabel kunci. Grafit bebas dalam besi tuang bertindak sebagai takik yang melekat itu meningkatkan konsentrasi tegangan untuk inisiasi retak fatik. Oleh karena itu, kinerja kelelahan besi tuang dipengaruhi sangat ditentukan oleh kuantitas, ukuran, dan bentuk fase grafit serta interaksinya dengan matriks.



**Gambar 2. 13 Rasio perbandingan kekuatan fatigue, tensile**

Sumber : ASM vol. 19 Hal. 1679

## 2.10 Perpatahan

Pemisahan atau pemecahan suatu benda padat, menjadi dua bagian atau lebih diakibatkan adanya tegangan. Proses perpatahan terdiri atas dua tahap, yaitu timbul retak dan tahap penjaralan retak. Patah dapat digolongkan dalam dua kategori umum, yakni patah liat dan patah getas. Patah liat ditandai oleh deformasi plastik yang cukup besar, sebelum dan selama proses penjaralan retak. Pada permukaan patahan, biasanya nampak adanya deformasi yang cukup besar. Patah getas pada logam, ditandai adanya kecepatan penjaralan retak tinggi tanpa terjadi deformasi kasar dan sedikit terjadi deformasi mikro. Karena langkah awal dalam analisis kegagalan patah melibatkan visual dan pengamatan makroskopis, kesan harus didasarkan bukti visual yang jelas. Pengamatan yang sederhana dan terpenting berhubungan dengan deformasi jika itu cacat sebelum patah luluh terjadi karena salah satu lebih banyak beban kotor. Ini didominasi oleh perpatahan ulet atau tekanan yang sangat tinggi,

patah kelelahan siklus rendah seperti yang didapat ditunjukkan dengan berulang pembengkokan manual yaitu contohnya adalah kawat.

### **2.10.1 Perpatahan ulet (*ductile fracture*)**

Perpatahan ulet terjadi akibat penerapan gaya yang berlebihan pada logam yang memiliki kemampuan untuk berubah bentuk secara permanen atau secara plastik sebelumnya patah. Jadi sifat keuletan hanyalah kemampuan material. Yang mungkin atau mungkin tidak menyebabkan patah. Tergantung pada besarnya gaya yang ditetapkan. Sifat keuletan agak terkait dengan sifat ketangguhan, meskipun yang terakhir biasanya diukur dengan uji ketangguhan. Adapun karakteristik perpatahan ulet, namun harus diakui bahwa banyak mengandung beberapa karakteristik.

1. Ada deformasi permanen atau plastis yang cukup besar didaerah perpatahan ulet, hal ini mungkin terjadi hanya didaerah pecah terakhir dari perpatahan yang mungkin terjadi berasal dari kelelahan.
2. Patahan ulet adalah retakan yang tegangan geser melebihi gaya geser kekuatan sebelum mode perpatahan lainnya dapat terjadi oleh karena itu mikromekanisme patahan dalam arah geser tetapi ini tidak selalu terlihat jelas pada pemeriksaan makro. Permukaan perpatahan ulet tidak selalu terkait dengan arah tarik utama stres, karena dalam perpatahan rapuh (*brittle fracture*).
3. Tampilan karakteristik permukaan patahan ulet kusam dan berserat. Ini disebabkan oleh deformasi pada permukaan perpatahan.
4. Perpatahan ulet hanya berlangsung selama material sedang tegang yaitu hentikan deformasi dan retakan berhenti dan merambat. Pada ekstrimnya setelah retakan rapuh *brittle fracture* dimulai menyebar material dengan kecepatan mendekati kecepatan suara tidak memungkinkan untuk menangkapnya.

### 2.10.2 Perpatahan rapuh (*Brittle fracture*)

Rapuh berarti sedikit atau tidak ada deformasi permanen sebelum perpatahan biasanya disertai dengan kekerasan dan kekuatan tinggi, tetapi dengan sedikit toleransi untuk diskontinuitas. Logam rapuh digunakan sehari-hari sebagai rekayasa normal bahan dan selama ditangani dengan cara yang benar sangat memuaskan untuk berbagai jenis layanan. Baja perkakas yang diperkeras besi tuang abu-abu dan banyak logam lainnya digunakan secara rutin dalam batasannya memuaskan hasil. Namun jika alat seperti kikir pemotong logam tertekuk itu berarti akan tiba-tiba patah dengan rapuh (*brittle fracture*) akan ada sedikit atau tidak ada yang permanen deformasi dan potongan-potongan dapat ditempatkan kembali bersama dengan sempurna penjajaran. Secara umum ini adalah karakteristik yang sangat keras, kuat, sensitive terhadap takik logam rapuh, meskipun pekerjaan penelitian mencoba untuk meningkatkan kekuatan berguna logam ini tanpa bahaya patah getas sebaliknya secara umum benar logam yang lebih lunak dan lebih lemah biasanya memiliki keuletan. Besi cor abu-abu merupakan pengecualian, logam ini rapuh karena itu mengandung sejumlah serpihan granit yang besar yang bertindak sebagai internal konsentrasi tegangan dan membatasi kemampuan logam untuk mengalir atau berubah bentuk yang diperlukan untuk perlakuan ulet. Ini logam tertentu lainnya diketahui dan diperkirakan rapuh tetapi mereka biasanya digunakan dengan memuaskan dalam aplikasi yang sesuai dimana sedikit atau tidak bahaya patah.

Tentunya lainnya logam umum terutama baja karbon rendah dan karbon menengah yang banyak digunakan pada dunia industri, biasanya dianggap ulet properti dan biasanya digunakan dalam aplikasi dimana kemampuan sesuai dengan deformasi plastik yang diinginkan namun dibawah tertentu dalam keadaan tertentu, baja yang biasanya ulet ini dapat retak secara total cara yang rapuh. Perilaku yang sama sekali tidak terduga ini telah terjadi banyak bencana dimasa lalu, perpatahan rapuh dapat terjadi hanya karena tegangan tarik sisa, tanpa beban yang diterapkan atau kombinasi apapun dari tegangan yang diterapkan dan sisa. Karakteristik perpatahan rapuh, perpatahan rapuh memiliki karakteristik tertentu yang

memungkinkan terjadi identifikasinya, tidak ada deformasi permanen atau plastik kotor dari logam diwilayah perpatahan rapuh dibandingkan retakan getas.

1. Penandaan karakteristik pada Permukaan patahan yang getas tegak lurus dengan tarik utama menekan. Jadi tegangan tarik yang menyebabkan terjadinya retakan terjadi dapat dengan mudah diidentifikasi.
2. permukaan retakan sering tetapi tidak selalu menunjukkan kembali ke lokasi asal perpatahan.

Logam lain dengan struktur kristal kubik berpusat tubuh berperilaku sama tetapi kurang umum. Kebanyakan logam non ferrous seperti paduan aluminium dan tembaga dan baja austenitik memiliki struktur kristal yang tidak rentan terhadap karakteristik transisi ulet/getas logam kubik berpusat tubuh. Perpatahan getas biasanya menyebar dengan salah satu keduanya dari dua patahan mode belahannya bisa dibidang intergranular. Dalam banyak kasus itu perlu dipelajari permukaan perpatahan dengan mikroskop electron. Karena perbesarannya sangat tinggi biasanya tidak diperlukan mikroskop electron scanning biasanya lebih disukai daripada mikroskop electron transmisi. (*fatigue and fracture*, ASM Internasional, F.C Campbell)

1. Deformasi plastis benda tidak dapat kembali seperti ke bentuk semula setelah tegangan yang diberikan dihilangkan.
2. Deformasi elastis benda dapat kembali ke bentuk semula setelah tegangan yang diberikan dihilangkan.

## **2.11 Pengujian material**

Kemampuan suatu logam untuk memenuhi persyaratan ini ditentukan oleh sifat mekanik dan fisik logam tersebut. Sifat fisik adalah sifat yang biasanya diukur dengan metode yang tidak memerlukan penerapan eksternal gaya mekanis (atau beban). Contoh khas dari sifat fisik adalah kepadatan, sifat magnet (misalnya, permeabilitas), konduktivitas termal dan difusivitas termal, sifat listrik (misalnya resistivitas), panas spesifik, dan koefisien muai panas. Sifat mekanis sebagai hubungan antara gaya (atau tekanan) yang bekerja pada suatu material dan resistansi



material terhadap deformasi (yaitu, regangan) dan fraktur. Deformasi ini, bagaimanapun, mungkin atau mungkin tidak terlihat pada logam setelahnya beban yang diterapkan dihapus. Berbagai jenis pengujian, yang menggunakan gaya yang diterapkan, digunakan untuk mengukur sifat, seperti modulus elastisitas, kekuatan luluh, elastisitas dan deformasi plastis (yaitu, perpanjangan), kekerasan, ketahanan lelah, dan ketangguhan patah. Seperti yang akan disoroti selama pembahasan di bawah, sifat mekanik sangat bergantung mikro (misalnya, ukuran butir, distribusi fasa, isi fasa kedua), jenis struktur kristal (misalnya susunan atom), dan komposisi unsur (misalnya, kandungan unsur paduan, tingkat pengotor). Biasanya ilustrasi hubungan antara mikro-struktur dan kinerja mekanik sering diamati peningkatan tegangan hasil dengan penurunan ukuran butir. Hubungan seperti ini antara struktur logam dan kinerja membuat penentuan sifat mekanis penting untuk berbagai macam aplikasi struktural di pengerjaan logam, dalam analisis dan pencegahan kegagalan, dan dalam pengembangan material untuk aplikasi tingkat lanjut. Dirancang untuk secara singkat memperkenalkan hubungan tipikal antara fitur metalurgi (seperti struktur kristal dan mikro) dan perilaku mekanik logam. Menggunakan contoh dasar, mekanisme deformasi dan fraktur diperkenalkan. Sifat khas yang diukur selama pengujian mekanis kemudian terkait dengan mekanisme deformasi dan mikrostruktur logam.

Pengujian bahan dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari suatu bahan pengujian. Pengujian bahan dapat dibagi menjadi 2 macam, yaitu :

1. Pengujian yang merusak benda uji (*destructive test*). Benda uji akan rusak setelah mengalami pengujian, misalnya pada pengujian tarik, lengkung, geser, punter, fatik (kelelahan) dan impak.
2. Pengujian yang tidak merusak benda uji (*non destructive test*). Benda uji tidak mengalami kerusakan yang berarti setelah mengalami pengujian, misalnya pada pengujian kekerasan, *ultrasonic*, *metallografi*. Magnetografi dan lain-lain.

### 2.11.1 Pengujian struktur mikro

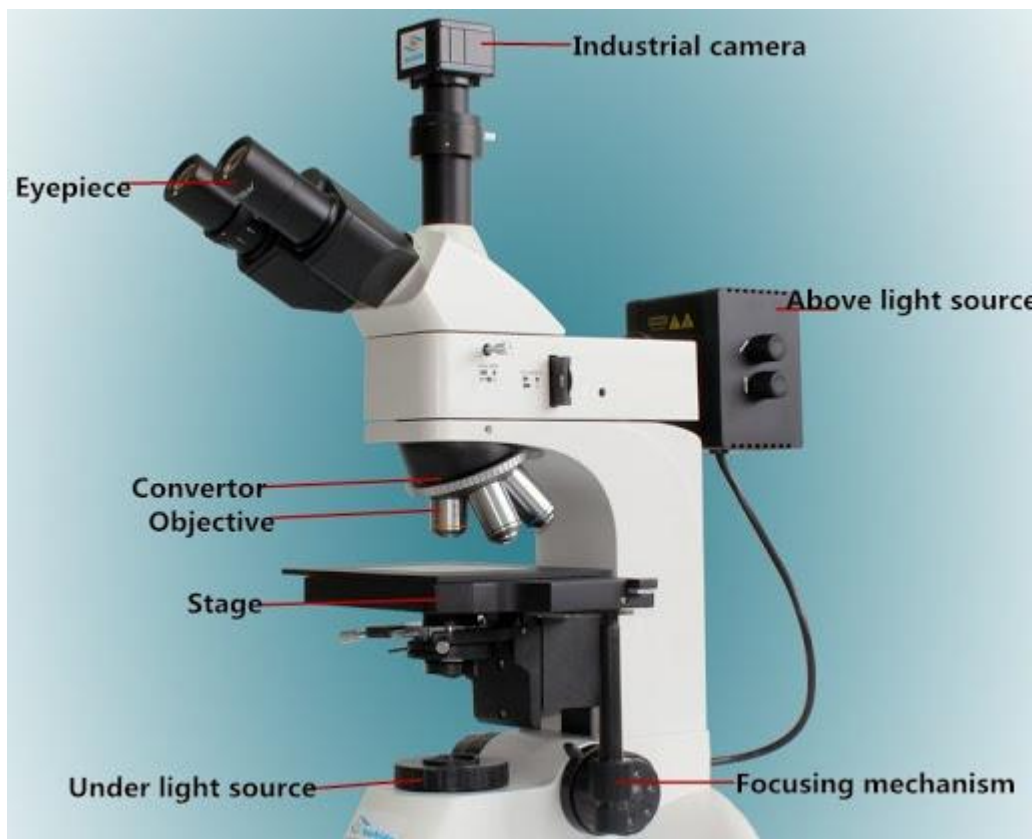
Struktur Logam Pada tingkat yang paling dasar, bahan logam (serta banyak yang bukan logam) biasanya berupa padatan kristal, meskipun dimungkinkan untuk menghasilkan logam amorf (yaitu logam dengan susunan atom acak) secara terbatas jumlah. Blok penyusun dasar kisi kristal adalah sel satuan. Dengan mengulangi pengaturan ini dalam tiga dimensi, kisi kristal terbentuk. Meskipun susunan atom di ruang angkasa dapat terdiri dari empat belas jenis berbeda (atau kisi Bravais), kebanyakan logam memiliki kubik berpusat wajah (fcc) (misalnya, nikel, aluminium, tembaga, timbal), kubik berpusat tubuh (bcc) (misalnya, besi, struktur niobium, tungsten, molibdenum), atau heksagonal tertutup (hcp) (misalnya, titanium, magnesium, seng) sebagai struktur sel satuan. Dalam aplikasi yang sangat spesifik, material dapat digunakan sebagai kristal tunggal dimana keseluruhannya komponen dibuat dengan satu orientasi yang berulang. Namun, lebih sering daripada tidak, bahan teknik biasanya mengandung banyak kristal, atau butiran. Tergantung pada komposisi dan pemrosesan termomekanis, butiran ini biasanya berukuran sekitar 1 hingga 1000  $\mu\text{m}$  (meskipun ukuran butiran yang lebih halus dapat diproduksi melalui teknik lain). Sedangkan kisi kristal dalam sebutir butir konsisten, orientasi kristal bervariasi dari satu butir ke butir lainnya.

Kontinuitas mengasumsikan bahwa struktur tidak mengandung rongga; homogenitas mengasumsikan bahwa mikrostruktur (dalam tampilan pada 100–1000  $\times$ ) dan properti akan identik di semua lokasi; isotropik perilaku mengasumsikan bahwa properti identik di semua orientasi. Sementara asumsi ini telah digunakan di mekanika kontinum untuk mempelajari kekuatan material dan struktur di bawah beban, material teknik adalah seringkali tidak homogen dan anisotropik. Meskipun diinginkan untuk meminimalkan ketidakhomogenan seperti itu, sering kali mustahil untuk sepenuhnya menghilangkannya. Seperti dibahas di atas, evaluasi mikrostruktur biasanya menunjukkan hal itu. Biasanya, bahan memiliki variasi ukuran butir, ukuran dan distribusi fasa kedua, dan komposisi kimia, terutama dalam urutan biner dan orde tinggi paduan. Rute fabrikasi juga dapat memainkan peran kunci dalam

mempengaruhi orientasi kristalografi yang disukai (atau tekstur) dari biji-bijian, selanjutnya berkontribusi pada ketidakhomogenan dan anisotropi dari mikrostruktur. Seperti yang akan terjadi ditunjukkan nanti, semua fitur mikrostruktur ini dapat sangat memengaruhi properti yang diukur selama pengujian mekanis. (ASM vol.8 Hal 22)

Pengambilan gambar secara mikro ini bertujuan untuk melihat dan mengambil bentuk struktur mikro dari spesimen uji. Bentuk struktur mikro ini dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop optik yang selanjutnya gambar struktur mikro tersebut akan diamati dan dianalisa.

Struktur dari suatu logam dapat dilihat melalui pengujian metalografi. Metalografi merupakan ilmu yang mempelajari karakteristik struktur dari logam ataupun paduan.<sup>42</sup> Pengujian metalografi dibagi menjadi dua yaitu pengujian makro dan mikro. Pengujian makro adalah pengujian struktur logam dengan pembesaran 0,5– 50 kali sedangkan pengujian mikro dengan pembesaran diatas 50 kali. (ASM vol.8 Hal 22)



**Gambar 2. 14 Alat uji metalografi**

Besi tuang adalah salah satu paduan yang paling kompleks, jika bukan yang paling kompleks, yang digunakan dalam industri, terutama karena bisa mengeras dengan pembentukan stabil (austenit-grafit) atau eutektik metastabil (austenit-Fe<sub>3</sub>C). Besi pematatan dengan austenit-grafit eutektik memiliki retakan abu-abu, sedangkan yang memadat dengan austenit-Fe<sub>3</sub>C eutektik menunjukkan fraktur putih. Terkadang struktur campuran abu-abu + putih, disebut belang-belang, dapat terjadi. Pemeran besi adalah paduan multikomponen, dengan elemen utamanya adalah besi, karbon, dan silikon. Setara karbon (CE% C + 0,31% Si) dan laju pendinginan adalah variabel utama, yang menentukan apakah pematatan akan terjadi menghasilkan besi abu-abu atau putih, dengan ekuivalen karbon yang lebih tinggi dan laju pendinginan yang lebih rendah yang mendukung pematatan abu-abu. Unsur lain seperti belerang, magnesium, atau serium dapat secara signifikan mengubah morfologi eutektik abu-abu mengubah bentuk grafit dari lamellar (flake, FG), menjadi compacted (CG), atau

spheroidal (SG). Skala panjang (ukuran) butiran eutektik bergantung pada laju pendinginan dan inokulasi, dengan laju pendinginan yang lebih tinggi dan inokulasi meningkatkan jumlah biji-bijian.

### **2.11.2 Pengujian komposisi kimia**

Pengujian komposisi kimia bertujuan untuk mengetahui unsur-unsur yang terdapat pada suatu logam paduan. Karena pada satu logam paduan ada unsur lebih dari satu contohnya ada karbon (C), aluminium (Al), kromium (Cr) dan masih banyak lagi. Untuk suatu penelitian kita harus mengetahui besar kandungannya karena itulah yang mempengaruhi kekuatan suatu logam paduan dan yang akan digunakan dilapangan

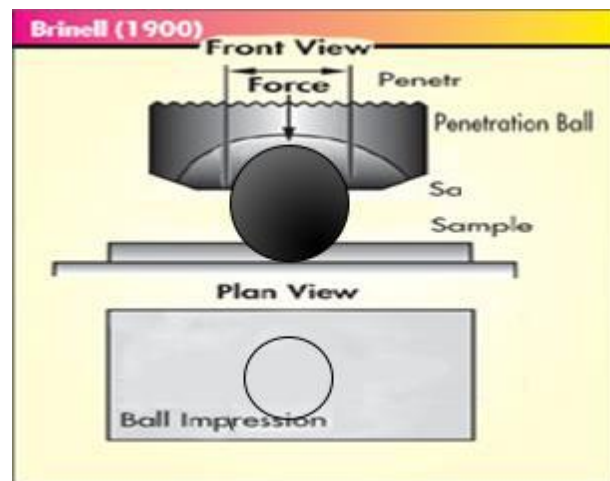
### **2.11.3 Pengujian kekerasan**

Seperti yang digunakan dalam industri, dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk melawan lekukan atau deformasi permanen saat bersentuhan dengan indenter di bawah beban. Umumnya tes kekerasan terdiri dari menekan indenter geometri yang diketahui dan sifat mekanik ke dalam bahan uji. Itu kekerasan material diukur menggunakan salah satu dari berbagai skala yang secara langsung atau tidak langsung menunjukkan tekanan kontak yang terlibat dalam mendefinisikan permukaan uji. Karena indenter ditekan ke bahan selama pengujian, kekerasan juga dipandang sebagai kemampuan suatu material untuk menahan beban tekan. Indenter mungkin (uji Brinell), piramidal (uji Vickers dan Knoop), atau kerucut (uji Rockwell). Di Brinell, Vickers, dan uji Knoop, nilai kekerasan adalah beban yang didukung oleh luas satuan lekukan, dinyatakan dalam kilogram per milimeter persegi ( $\text{kgf} / \text{mm}^2$ ). Dalam pengujian Rockwell, kedalaman lekukan pada beban yang ditentukan adalah ditentukan dan diubah menjadi angka kekerasan (tanpa unit pengukuran), yang berbanding terbalik dengan kedalaman. Uji kekerasan tidak lagi terbatas pada logam, dan alat serta prosedur yang tersedia saat ini mencakup banyak hal berbagai bahan termasuk polimer, elastomer, film tipis, semikonduktor, dan keramik. Kekerasan pengukuran yang diterapkan pada kelas material tertentu menyampaikan aspek fundamental yang berbeda dari material tersebut. Jadi, untuk

logam, kekerasan berbanding lurus dengan tegangan leleh uniaksial pada regangan yang dikenakan oleh lekukan. Pernyataan ini, bagaimanapun, mungkin tidak berlaku dalam kasus polimer, karena tegangan lelehnya buruk ditentukan.

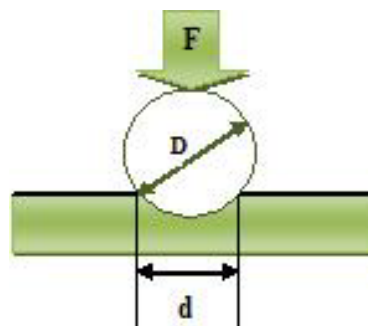
### 1. Metode kekerasan *Brinell*

Kekerasan ini diukur dengan menggunakan alat pengukuran kekerasan *Brinell*. Bola baja keras dengan diameter  $D$  mm ditekan ke permukaan bagian yang diukur dengan beban  $F$  (kg) dapat dilihat pada Gambar 2.15.



**Gambar 2. 15** Pengujian kekerasan Brinell

Sumber : Callister, 2001



**Gambar 2. 16** Perumusan Pengujian Brinell

Sumber : Callister, 2001

$$HB = \frac{2F}{\frac{\pi}{2}D(\sqrt{D^2+d^2})}$$

Dimana :

D = diameter bola (mm)

d = *impression* diameter (mm)

F = *Load* ( beban) (kg)

HB = *brinel result*

Keuntungan pengujian kekerasan *Brinell*, antara lain :

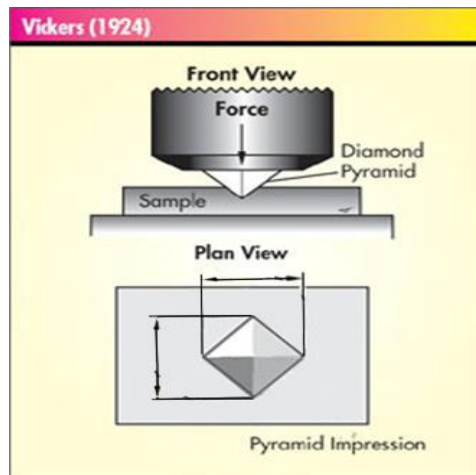
- a. Bahan yang dipakai dan bekas yang ditimbulkan akibat penekanan penetrator kecil.
- b. Pembacaan tingkat kekerasan lebih cepat.
- c. Dapat digunakan untuk pengujian benda yang keras.

Kelemahan pengujian kekerasan *Brinell*, antara lain :

- a) Batas ukuran kecil, sehingga perlu diketahui dahulu berapa kira-kira kekerasan bahan yang akan diuji, untuk memilih dengan tepat jenis penetrator dan beban yang akan digunakan.
- b) Penunjukkan harga kekerasan bahan kurang tepat, karena adanya sedikit debu antar benda uji dengan penetrator. Penetrator terbuat dari bola baja yang berukuran besar dengan beban yang besar, sehingga bahan yang lunak atau keras sekali yang berukuran kecil tidak dapat diukur kekerasannya.

## 2. Metode kekerasan *Vickers*

Penetrator pada *Vickers hardness tester* dibuat dari bahan intan yang berbentuk piramid (piramid intan) yang ditekan pada benda uji rata tanpa kejutan. Dalam pengujian kekerasan *Vickers* dipakai piramid *diamond* dengan sudut puncak  $136^\circ$  sebagai penekan dan dengan alas berbentuk bujur sangkar. Penetrator ditekan kedalam bahan uji dengan beban sebesar F (kg) selama waktu tertentu. Setelah penetrator diangkat, maka diperoleh lekukan dengan diagonal bujur sangkar sebesar D dalam satuan mm yang diukur dengan alat yang sangat teliti.



**Gambar 2. 17 Pengujian kekerasan Vickers**

Sumber : Calister, 2001

Hasil penekanan yang berbentuk bujur sangkar dalam pembacaannya diperbesar dan ditampilkan pada layar. Ada juga alat penguji kekerasan *Vickers* khusus, yaitu untuk mengukur segregasi dalam struktur logam dengan pertolongan sebuah mikroskop. Nilai kekerasan *Vickers* dinyatakan dengan (HV) dapat juga (DPN), (VPN), (DPH) yang merupakan singkatan dari *diamond pyramid number*, *Vickers pyramid number*, *diamond pyramid hardness*, yaitu merupakan perbandingan antara beban tekan F (kg) dengan luas tapak tekan (mm<sup>2</sup>).

Uji kekerasan *Vickers* dirumuskan dengan :

$$\text{VHN} = 1,8544 \frac{P}{D^2}$$

Dimana :

P = beban (kg)

D = diagonal (mm)

$$d = \frac{d1+d2}{2}$$

Pada penekanan pembebanan benda uji, semakin tipis benda uji maka semakin kecil pula pembebanan yang dipilih. Lama penekanan penetrator harus dibatasi agar diperoleh hasil pengujian yang kita harapkan maka bahan-bahan seperti baja, tembaga dan paduannya diperlukan waktu penekanan selama 10-15 detik, sedangkan untuk



bahan-bahan seperti magnesium, aluminium dan paduannya, diperlukan waktu penekanannya selama 28-32 detik

Keuntungan pengujian *Vickers* antara lain :

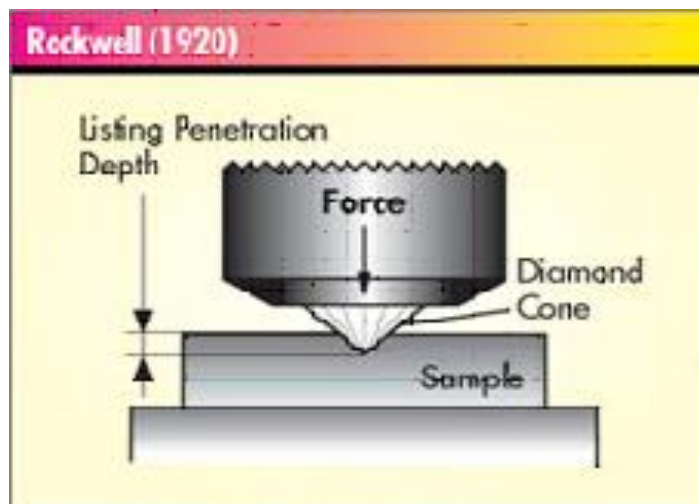
- a) Dengan penetrator yang sama dapat menguji bahan yang sangat keras.
- b) Kerusakan bahan uji lebih kecil.
- c) Pengukuran kekerasan lebih teliti.
- d) Dapat menguji bahan yang tipis dengan memilih beban yang kecil

Kelemahannya pengujian kekerasan *Vickers*, antara lain :

- a) Bahan yang strukturnya tidak homogeny (seperti besi tuang) nilai kekerasannya kurang teliti.
- b) Waktu pengujian yang diperlukan lebih lama.

### 3. Metode kekerasan *Rockwell*

Pengujian ini lebih cepat karena nilai kekerasannya langsung dapat dilihat dari meteran alat uji. Penetrator yang bisa digunakan adalah kerucut intan dengan sudut puncak  $120^\circ$ , bola baja berdiameter  $1/6$  dan  $1/8$  inci.



**Gambar 2. 18 Pengujian kekerasan Rockwell**

Sumber : Calister, 2001

**Tabel 2. 4 Skala kekerasan Rockwell**

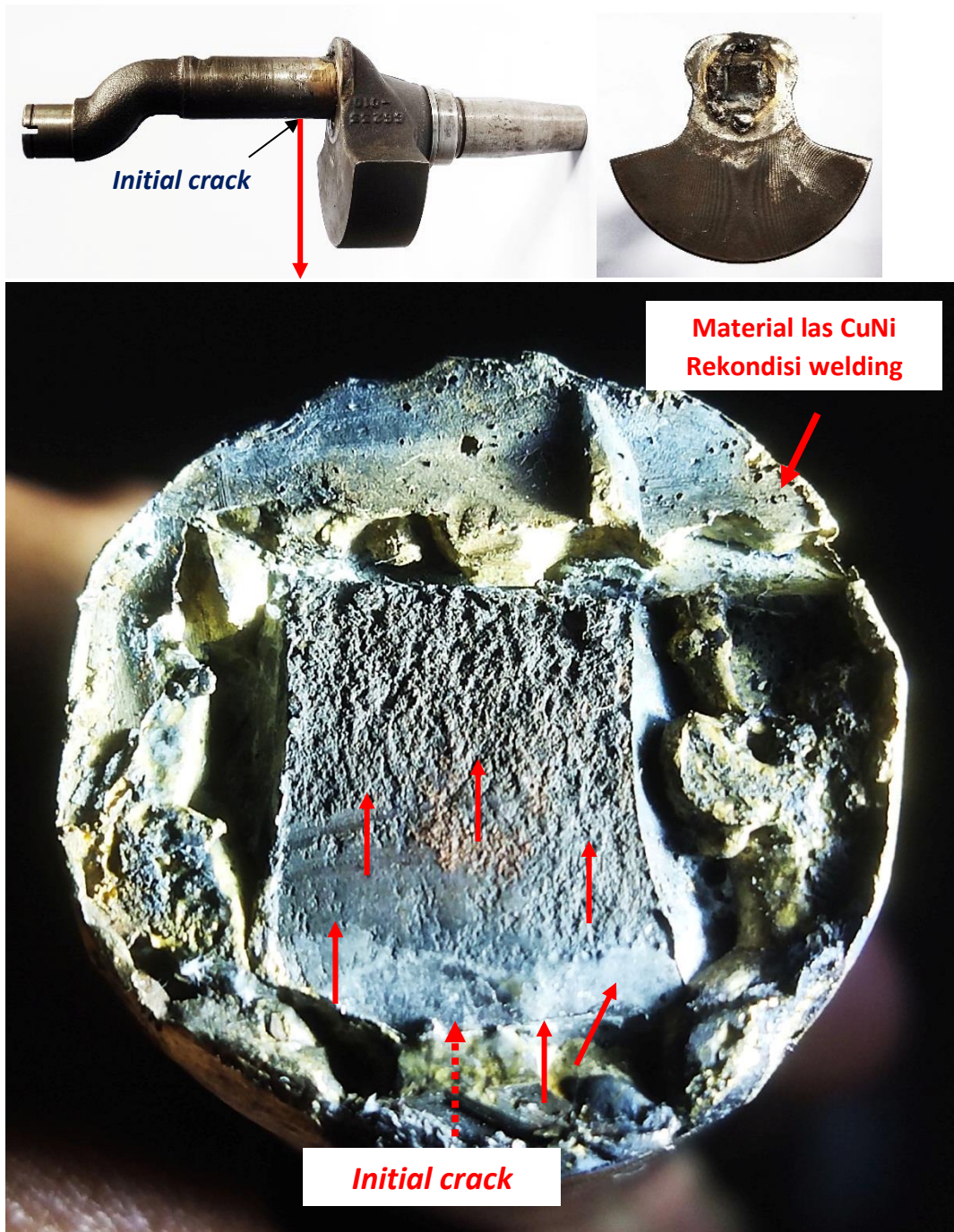
<b>Skala</b>	<b>Penekanan</b>	<b>Beban utama</b>	<b>Dial</b>
B	Bola baja 1/6"	100	Merah
C	Intan	150	Hitam
A	Intan	60	Hitam
D	Bola baja 1/8"	100	Hitam
E	Bola baja 1/16"	100	Merah
F	Bola baja 1/8"	60	Merah
G	Bola baja 1/8"	150	Merah
H	Bola baja 1/8"	60	Merah
K	Bola baja 1/4"	150	Merah
L	Bola baja 1/4"	60	Merah
M	Bola baja 1/4"	100	Merah
P	Bola baja 1/4"	150	Merah
R	Bola baja 1/2"	60	Merah
S	Bola baja 1/2"	100	Merah

Sumber : (Tata Surdia, 2005, Pengetahuan bahan teknik)

## **2.12 Karakteristik perpatahan rapuh**

1. Perpatahan rapuh memiliki karakteristik tertentu yang memungkinkan terjadi identifikasinya, tidak ada deformasi permanen atau plastik kotor dari logam diwilayah perpatahan rapuh bandingkan retakan getas.

2. Permukaan patahan yang getas tegak lurus dengan tarik utama menekan. Jadi tegangan tarik yang menyebabkan terjadinya retakan terjadi dapat dengan mudah diidentifikasi.
3. permukaan retakan sering tetapi tidak selalu menunjukkan kembali ke lokasi asal perpatahan.
4. Terdapat ratchet marks yang merupakan tanda penjalaran retakan yang terjadi.



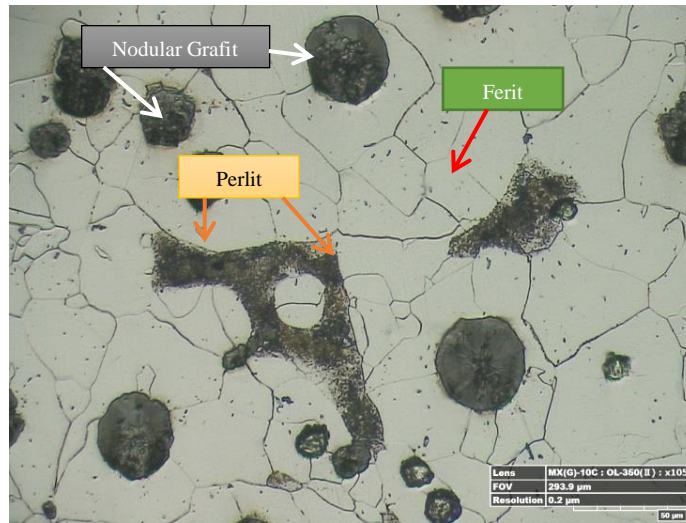
**Gambar 2. 19 Macrostructure kerusakan pada crankshaft**

Pengamatan terhadap patahan material besi cor yang masih tersisa akibat di gerinda untuk proses penyambungan dengan pengelasan menggunakan las kuningan. Permukaan patah mempunyai jenis patah getas dan permukaannya halus. Masih

terlihat tanda alur arah rambatan patah (*Radial mark*) berawal dari bidang tegak lurus Roda gila/penyeimbang putaran. Permukaan patahan material las Cu mempunyai sifat patah getas, hasil pengelasan mutunya sangat rendah, banyak cacat rongga dan tidak homogen mengingat titik leleh material Cu dengan Besi cor berbeda jauh sehingga tidak tersambung dengan sempurna.

### **2.13 Struktur mikro besi cor nodular**

Karakteristik besi cor tergantung pada struktur mikronya. Sedangkan struktur mikro besi cor dipengaruhi oleh komposisi besi, karbon dan temperturnya. Untuk menunjukkan jenis fasa yang terjadi dalam keadaan setimbang antara suhu dan komposisi maka diperlukan diagram fasa besi-karbon (Fe-C). Diagram fasa besi-karbon dapat menunjukkan daftar rangkaian operasi yang menunjukkan fasa yang terbentuk pada paduan besi-karbon dengan komposisi karbon dan temperatur tertentu. Besi cor dengan kadar silikon yang tinggi (2% Si) dan kadar mangan yang rendah dapat membentuk grafit dengan mudah, sehingga Fe<sub>3</sub>C tidak terbentuk. Serpih grafit terbentuk dalam logam sewaktu membeku. Dinamakan besi cor kelabu karena pada waktu terjadi perpatahan sebagian besar permukaan perpatahan tersebut melintasi grafit, sehingga permukaan berwarna kelabu. Besi cor kelabu mempunyai sifat mampu las yang buruk, ketahanan korosi rendah, dan ketahanan aus yang juga rendah. Namun demikian besi cor ini memiliki sifat mampu mesin yang baik dan mampu cor yang sangat baik. Dari hasil pengamatan metalografi terhadap *gray cast iron* daerah titik pengelasan menunjukkan ada beberapa fasa yaitu feritik (putih) dan perlit (sedikit hitam) ada kandungan grafit nodular dengan etsa Nital 2 %.



**Gambar 2. 20 Struktur mikro crankshaft kompresor**

Ferit merupakan modifikasi struktur dari besi murni pada suhu ruang. Ferit bersifat lunak dan ulet dalam keadaan murni, kekuatan tariknya kurang dari 310 MPa. Ferit juga bersifat feromagnetik pada suhu dibawah 770oC. Berat jenis ferit adalah 7,88 g/cm<sup>3</sup> . Ferit mempunyai 8 struktur kubik pemusatan ruang (BCC, body center cubic), seperti terlihat pada Gambar 2.19. Ferit juga memiliki ruang antar atom yang kecil dan rapat sehingga tidak dapat menampung atom karbon yang kecil sekalipun. Oleh sebab itu daya larut karbon dalam ferit rendah (< 1 karbon per 1000 atom besi), dan larutan karbon maksimum 0,025% (pada 723oC) dan hanya 0,008% pada temperatur kamar.

Perlit adalah campuran khusus terdiri dari dua fasa dan terbentuk sewaktu austenite dengan komposisi eutectoid bertransformasi menjadi ferit dan karbida besi secara bersamaan. Struktur dasar perlit adalah struktur lamellar yang tersusun dari lapisan ferit dan sementit. Perlit hanya terjadi temperatur 723 °C. Perlit mempunyai sifat diantara ferit dan sementit, yaitu kuat dan cukup keras. Kandungan karbon dalam perlit untuk paduan besi karbon 0,8 %. Perlit memiliki kekuatan tarik sekitar 120 psi dan kekuatan luluh 20 % dengan kekerasan sekitar 300 HRB.

Grafit adalah suatu bentuk kristal karbon yang lunak dan rapuh, mempunyai berbagai bentuk dan ukuran dari potongan-potongannya yaitu halus dan besar, serpih, atau asteroid, bergumpal atau bulat. Untuk besi cor kelabu grafitnya tersebar

berbentuk serpih, untuk besi cor bergrafit bulat bentuk grafitnya bulat untuk besi cor putih semua karbon terikat dalam sementit. Keadaan potongan-potongan grafit ini memberikan pengaruh yang besar terhadap sifat-sifat mekanik besi cor.

#### **2.14 Penelitian terdahulu**

(Farra Nabila Murti, Nunung Nurhasanah, Teknik Industri, Universitas Al Azhar Indonesia, **ANALISA RESIKO KEGAGALAN KOMPRESOR K-3-02B DIPLANT 3C PT.PERTAMINA RU V BALIKPAPAN MENGGUNAKAN FMEA DAN FTA**). Pertamina RU Balikpapan terdiri dari kilang Balikpapan II dengan kapasitas desain 200.000 barel/hari. Kapasitas yang relatif tinggi mendorong pemeliharaan mesin pendukung aktivitas produksi yang berfokus pada keandalan untuk mencegah kerusakan, meminimalisir maupun resiko penyebab kerusakan. Salah satu kondisi kegagalan mesin kerap terjadi kerusakan komponen kritis yang bersifat critical terhadap produksi. Dari data yang telah dianalisis, maka dapat ditarik kesimpulan yang menjawab permasalahan yang telah diidentifikasi serta tujuan penelitian yang sebelumnya telah ditetapkan. Dengan melihat hasil perhitungan menggunakan mode FMEA, dapat diketahui bahwa mode kegagalan pada compressor K-3-02 yang dapat dikatakan paling kritis ialah kebocoran valve akibat ring lumer dikarenakan menghasilkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) terbesar dengan nilai yakni sebesar 324. Dengan mengambarkan FTA, dapat ditentukan kombinasi *Basic events*/akar permasalahan yang menyebabkan terjadinya mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi, kebocoran *valve* akibat ring lumer pada compressor K-3-02B. berdasarkan penggambaran FTA dengan penentuan *minimal cut sets* didapatkan 10 kombinasi *basic events* yakni torsi tidak diukur dan tidak terpenuhi, kurangnya skill dari pekerja, proses pemasangan *valve* yang tidak sempurna, desain dari *valve* yang kurang cocok, material *valve* yang tidak kuat *manufacturer* tidak menjaga kebersihan *valve* setelah melalkuakn uji coba, *quality control* yang kurang baik oleh *manufacturer*, jumlah tetesan oli pelumas yang tidak sesuai standar, pompa gagal menghisap oli pelumas.

(Asyari Darius\* Fakultas Teknik Universitas Darma Persada © 2011, **ANALISIS KERUSAKAN PADA POROS PENGHUBUNG KOMPRESOR TORAK**). Dari pengamatan terhadap kerusakan pada poros penghubung kompresor daya besar yang digunakan untuk mengkompresi gas hidrogen, dijumpai bahwa sering terjadi perpatahan pada poros penghubung tersebut. Perpatahan yang terjadi biasanya dijumpai pada poros yang dipabrikasi sendiri, sementara poros orisinil dari pabrik pembuatnya dapat bertahan lama. Bahan poros pabrikasi ini biasanya menggunakan material baja AISI 4043. Setelah dilakukan analisis, dapat disimpulkan: 1. Poros tidak kuat menahan beban operasi dimana tegangan geser yang terjadi pada poros mencapai 77,26 MPa, sedangkan tegangan geser ijin material hanya 41,7 MPa. 2. Untuk meningkatkan kekuatan poros supaya tidak terjadi perpatahan, maka dapat dilakukan dengan menambah diameter poros. Dari perhitungan, maka diameter poros yang aman harus melebihi 210 mm. Sementara diameter awal poros adalah 168 mm. 3. Kekuatan poros juga dapat ditingkatkan dengan menggunakan material dengan tegangan geser ijin yang lebih tinggi daripada tegangan geser yang terjadi. 4. Perlu diperhatikan kondisi kompresor dalam beroperasi untuk mencegah kerusakan yang mungkin terjadi. Perhatikan kemacetan-kemacetan yang terjadi pada bantalan poros dan vibrasi, karena kondisi ini dapat menaikkan tegangan geser pada poros.

(Angga Setiawan, dan Witantyo Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), **Analisa Kegagalan Poros Pompa Centrifugal Multistage (GA101A) Sub Unit Sintesa Urea PT. Petrokimia Gresik** ). Penggantian jenis material ring, dari stainless steel 410 menjadi 304, menjadi salah satu faktor penyebab patahnya poros, karena jika ditinjau dari thermal expansion material, stainless steel 304 memiliki thermal expansion lebih tinggi daripada 410. Vibrasi yang terdeteksi pada pompa merupakan akibat dari massa unbalance pada sudu-sudu pompa (impeller), karena setelah dilakukan modal analysis pada poros, antara frekuensi beban yang diberikan dengan frekuensi natural poros masih dalam kategori aman. Vibrasi yang terdeteksi pada pompa menyebabkan komponen poros dan ring saling bergesekan, sehingga

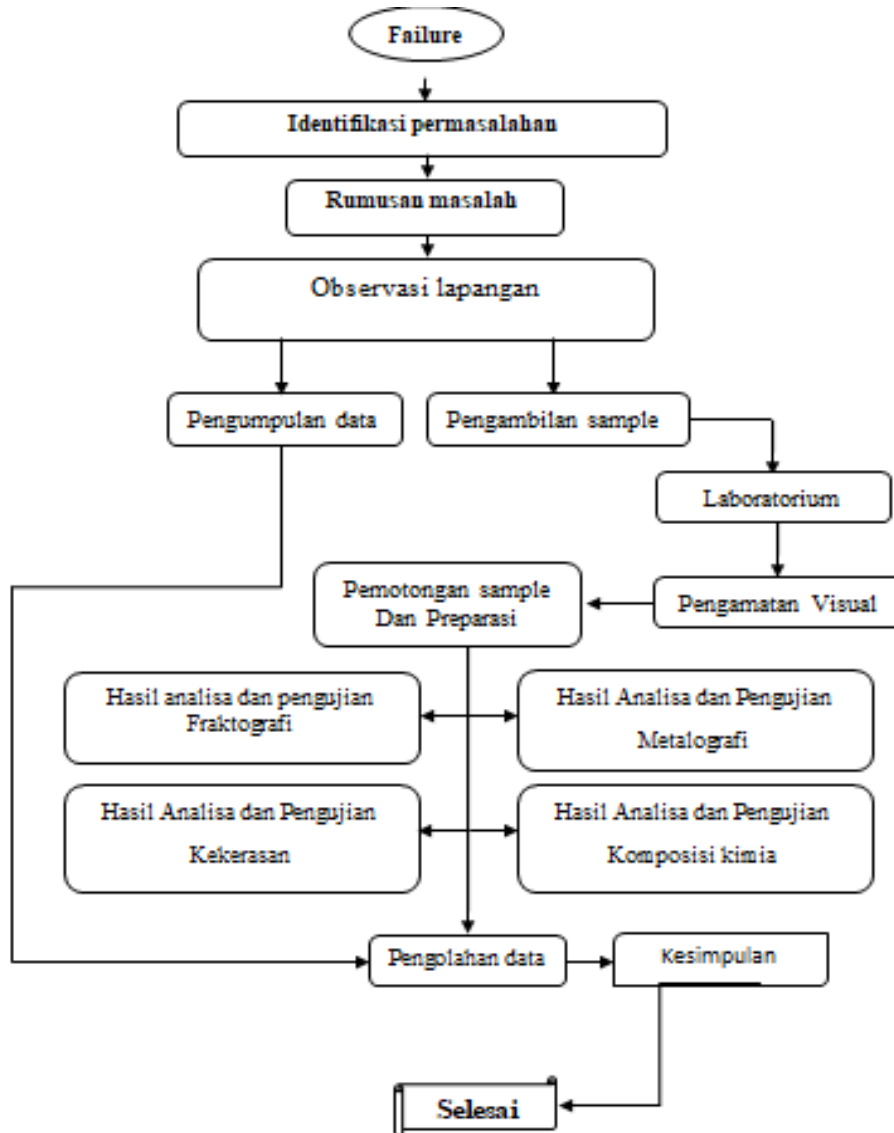


temperatur di sekitar komponen tersebut meningkat drastis. Dari hasil pengamatan, terlihat adanya spektrum warna disekitar patahan, yang merupakan indikasi terjadinya temperature berlebih. Mengacu pada Kelvin Temperature chart, temperatur pada area patahan dapat mencapai kisaran 1200-2700K. Berdasarkan simulasi, solusi yang dapat dilakukan adalah memodifikasi clearance ring dan poros, dengan minimal besarnya adalah 0.40 mm dengan material 304 yang ada, sedangkan apabila menggunakan material 410, maka minimal clearance ring-poros yang dibutuhkan adalah sebesar 0.35 mm.

**(Farid Majedi, Indah Puspitasari, Prodi Mesin Otomotif Fakultas Teknik, Politeknik Negeri Madiun, Optimasi Daya dan Torsi pada Motor 4 Tak dengan Modifikasi Crankshaft dan Porting pada Cylinder Head).** Performa mesin motor 4 stroke dapat ditingkatkan. Proses untuk meningkatkan performa adalah memperpanjang langkah torak dan meningkatkan volume udara dan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar. Proses tersebut dilakukan dengan melakukan overstroke yaitu memperbesar volume langkah dengan cara menambah panjang langkah piston sehingga perbandingan kompresi meningkat, dan Porting adalah membentuk kembali lubang intake dan exhaust cylinder head. Porting dapat meningkatkan volume udara dan bahan bakar yang meningkat maka semakin mudah terjadi pembakaran. Tujuan penelitian untuk meningkatkan performa mesin yang dilihat data daya dan torsi yang didapat dari pengujian dengan dynamometer chasis type inertia dynamometer. Dalam penelitian ini dilakukan dengan menguji langsung pada Dynamometer chasis, dengan dua kondisi yaitu Kondisi mesin dengan crankshaft standar dan cylinder head standar; Kondisi mesin dengan crankshaft dan cylinder head modifikasi. Hasil pengujian dengan dynamometer chasis menunjukkan daya motor modifikasi lebih besar daripada daya motor standard, Daya rata-rata motor modifikasi naik 47% dibanding dengan daya rata-rata motor standar. Torsi motor modifikasi lebih besar daripada Torsi motor standard. Torsi rata-rata motor modifikasi naik 49,97 % dibanding dengan torsi rata-rata motor standar.

**BAB III**  
**METODE PENELITIAN**

**3.1 Diagram Alir Penelitian**



**Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian analisa Kegagalan pasca welding repair pada *crankshaft* kompresor**

Kegagalan patahnya *crankshaft* kompresor merupakan kejadian abnormal dikarenakan dari riwayat mesin kompresor tersebut ini adalah pertama kalinya yang terjadi. Dari diagram alir diatas kita mulai untuk melakukan identifikasi permasalahannya, menyusun rumusan masalah agar lebih terperinci, observasi lapangan dan pengumpulan data pendukung. Oleh karena itu mulai dari pengamatan visual jenis material apa dan mengapa terjadi kegagalan pada *crankshaft*.

Ada 3 (tiga) metode yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut :

**a. Metode wawancara. (interview)**

Pengumpulan data penelitian dan juga dengan cara wawancara langsung terhadap team maintenance maupun pembimbing yang berkaitan langsung dengan materi penelitian.

**b. Metode observasi lapangan dan pengujian material.**

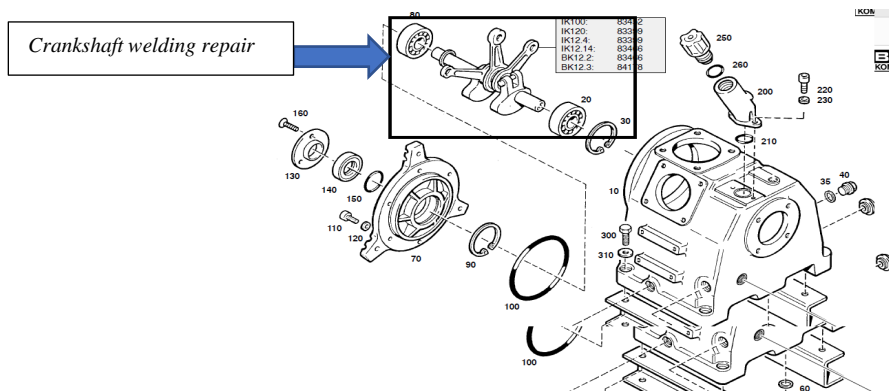
Metode ini dilakukan dengan cara mengobservasi dan pengamatan langsung operasi kerja kendaraan melalui service history dan mencatat semua data hasil observasi, selain itu dilakukan pengujian material yang terkait dengan *crankshaft* yang dilakukan untuk penelitian.

**c. Metode studi pustaka.**

Melakukan pengumpulan data studi pustaka dengan mempelajari dan membandingkan hasil observasi, pengujian dan wawancara dengan literature terkait.

### **3.2 Konstruksi *Crankshaft* kompresor piston**

Berikut adalah jenis kompresor *positive displacement* dibagi menjadi 2 yaitu *reciprocating* dan *rotary* konstruksi dibawah termasuk jenis *reciprocating* dengan spesifikasi *single acting*, khusus kompresor ini adalah termasuk tekanan tinggi dengan *flow* ratenya rendah hanya 200 L/menit. Berikut ini konstruksi kompresor *reciprocating single acting*.



**Gambar 3. 2 Konstruksi crankshaft kompresor piston.**

### 3.3 Pengamatan Visual

Pengamatan visual dimaksudkan untuk melihat sementara mengapa terjadinya *crankshaft* mengalami kerusakan/patah pada batang *shaft*, untuk mengetahui penyebab utama (*Root cause*) kerusakannya maka dilakukan pemeriksaan dan pengujian di laboratorium.



**Gambar 3. 3 Kondisi visual crankshaft pasca brazing repair yang patah**

### 3.4 Pemeriksaan makro

Dari hasil pengamatan foto makro dapat terlihat posisi patah dan sempat mengalami rekondisi melalui pengelasan dengan material *copper* namun jenis

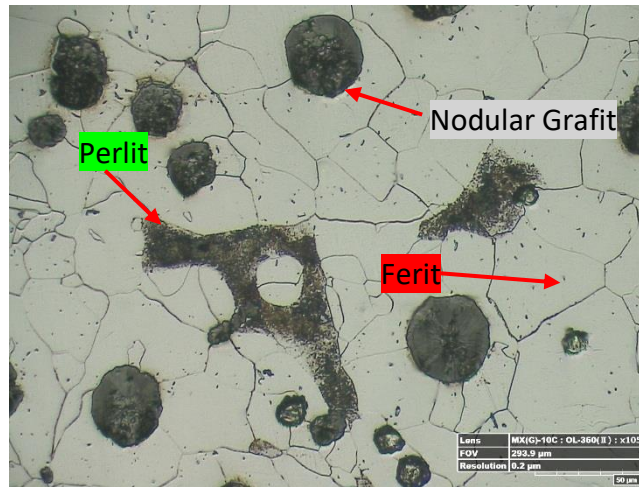
pengelasan *brazing* tersebut tidak bertahan lama penggunaannya karena patah, mengingat jenis dan mutu pengelasan tidak sesuai. Dari permukaan patahan material dasar kompresor *crankshaft* piston masih dapat dianalisa walaupun telah rusak akibat digerinda dan pengaruh *brazing* rekondisi.



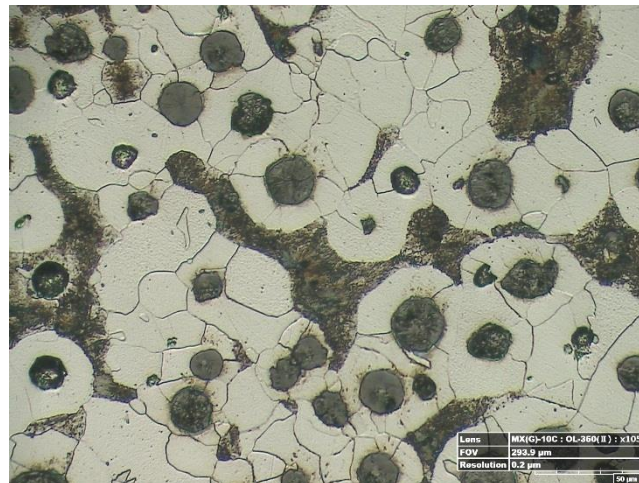
**Gambar 3. 4** Pengamatan patahan secara makro

### **3.5 Pengamatan strukturmikro**

Pengamatan strukturmikro dilakukan untuk mengetahui kondisi mikro dari suatu logam. Pengamatan ini biasanya melibatkan batas butir dan fasa-fasa yang ada dalam logam atau paduan tersebut. Dari hasil pengamatan strukturmikro ada 3 fasa yang terdapat pada *crankshaft* yaitu ferit, perlit dan nodular grafit, sebagai contoh mengambil 2 perbandingan yang pertama didaerah rekondisi *brazing* dan yang kedua jauh dari titik *brazing*.



**Gambar 3. 5 Struktur mikro daerah rekondisi brazing**



**Gambar 3. 6 Struktur mikro jauh dari titik brazing**

Dari kedua gambar dan diambil dari dua titik yang berbeda fase yang terlihat hampir sama keduanya ada fase ferit, perlit dan grafit nodular maka dari itu pengujian struktur mikro bisa dapat disimpulkan bahwa rekondisi *brazing* tidak mempengaruhi terhadap struktur mikro pada *crankshaft* tersebut.

### 3.6 Analisa pengujian komposisi kimia

Pengujian komposisi kimia berfungsi untuk mengetahui unsur kimia yang terkandung didalam *crankshaft*. Unsur – unsur yang terkandung pada material ini

sangat mempengaruhi sifat mekanis dan strukturmikro material. Pengujian ini juga sangat penting karena akan mengetahui spesifikasi material *crankshaft* termasuk kelas besi cor yang biasanya disebut baja yang kandungan karbonnya sangat tinggi bisanya lebih dari 2 % C. Pengujian ini menggunakan mesin *optical emission spectroscopy* (OES) untuk mengetahui kandungan presentase kimia.

### 3.7 Pengujian kekerasan

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat yang disebut *hardness tester* dengan metode uji *hardness Vickers (HV)*, alat yang dinamakan adalah *frank finotest* dengan beban 5 Kgf dengan sudut  $136^\circ$  dengan waktu 15 detik dan standar uji adalah SNI 19-0409-1989. Dengan posisi pengujian yang dilakukan adalah disekitar patahan *crankshaft compressor*. Uji kekerasan ini bertujuan untuk mengetahui sifat mekanis *crankshaft compressor* dari pengujian sebelumnya sudah bisa diketahui kisaran kekuatan pada *crankshaft compressor* akan tetapi akan lebih akurat dilakukan pengujian kekerasan.

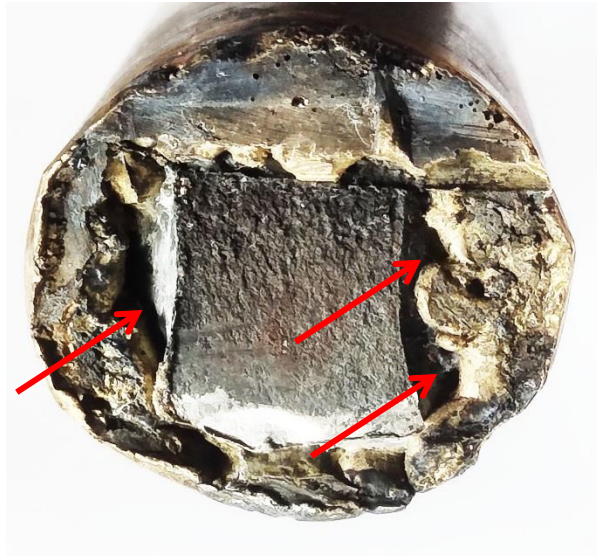


**Gambar 3. 7** Alat uji kekerasan Vickers hardness tester (frank finotest)



### 3.8 Skema perpatahan pasca *brazing repair*

Pada permukaan patahan *crankshaft* setelah dilakukan metode *repair brazing* tidak memperlihatkan adanya bentuk patah lelah tetapi jenis patah getas dikarenakan sudah direkondisi memakai *repair brazing*, mengingat material *crankshaft* besi cor nodular SAE J434 dilakukan *repair brazing* yang menyambung kedua logam dengan melelehkan logam pengisi, dengan metode penyambungan ini *crankshaft* tidak mempunyai umur panjang karena *brazing* itu sendiri kekuatannya rendah sehingga menyebabkan patah getas, serta pada penyambungan *brazing* terlihat *operator* tidak berpengalaman terlihat dari hasil patahannya pada proses *brazing repair operator* sangat mendominasi untuk hasil *repair brazing*.



**Gambar 3. 8 Skema perpatahan**

### 3.9 Kronologi terjadinya patah *crankshaft compressor*

Kondisi awal mulanya terjadinya kegagalan *crankshaft* sebagai berikut :

1. Kompresor Start shift 1 produksi jam 7:15 WIB.
2. Operator melakukan *daily preventive maintenance* secara keseluruhan kondisi kompresor ok.
3. Karena disini standar pengecekannya adalah kenaikan tekanan sehingga ketika tekanannya naik kompresor dianggap ok atau bagus.



4. Maka dari itu operator setelah melaksanakan pengecekan dianggap ok lalu meninggalkan kompresor untuk melakukan *daily preventive maintenance* ke unit mesin lainnya .
5. Tepatnya pada pukul 11:00 WIB *maintenance* tim mendapatkan informasi bahwa angin *diline* produksi kurang tekanannya atau *pressure drop maintenance* tim lalu pergi ke unit kompresor.
6. Terlihat dilayar *display* kompresor *rotary problem* kita melakukan pengecekan dimotor dahulu karena sumber kompresornya berputar adalah motor, oleh karena itu melakukan pengecekan menggunakan voltmeter dari secara keseluruhan dimotor tidak ada masalah.
7. Pengecekan selanjutnya *crankshaft* yang disambungkan oleh pully dihubungkan oleh v-belt diteruskan kemotor, pada pengecekan *crankshaft* terjadi keanehan ketika pully yang disambungkan oleh *crankshaft* kita coba putar manual terlihat seperti tidak ada beban piston dan kompresi sehingga *crankcase* atau blok mesin kita buka melihat *crankshaft* sudah patah oleh karena itu ketika pully diputar manual lebih terasa ringan.
8. Karena *crankshaft* patah pertama kalinya terjadi di pabrik kami dan tidak memungkinkan untuk berhenti dikarenakan produksi harus tetap berjalan oleh karena itu kami mencoba untuk menyambungkan *crankshaft* yang patah itu untuk dilas dengan mesin las yang kita punya.
9. Setelah dilas lalu kita pasang kembali mencoba untuk dijalankan ternyata tidak sampai 1 menit kompresor *alarm rotary problem* sudah diduga *crankshaft* mengalami patah untuk kedua kalinya dikarenakan tidak bisa dilas, dan akhirnya memutuskan untuk membeli unit baru.
10. Dari informasi operator sebelumnya ternyata unit tersebut sudah ada tanda tanda terjadi kerusakan yaitu getaran dan suara mulai lebih bising dari biasanya, kompresi lebih lambat pengisiannya tetapi tekanan tetap naik, udara dan suhu kurang bagus terlalu panas yang mempengaruhi kinerja kompresor dalam waktu jangka Panjang.

11. Dari kronologi diatas bahwa mesin kompresor sebelum mengalami kerusakan sudah ada tanda-tanda akan tetapi dikarenakan tidak ada standar pengecekan tentang getaran, suhu, kelembaban dan suara maka dari itu operator menganggap kompresor itu ok atau tidak ada masalah.

### 3.10 Spesifikasi kompresor

Kompresor ada berbagai macam jenisnya salah satunya kompresor *reciprocating single acting* oleh karena itu berikut ini spesifikasi kompresor :

Kompresor Bauer mini verticus MV-120-4-3 Kompresor *unit*

**Tabel 3. 1 Spesifikasi kompresor**

<i>Output air</i>	200 l/min
<i>Pressure setting, final pressure safety</i>	Max. 330 bar
<i>Speed</i>	1270 min <sup>-1</sup>
<i>Drive input</i>	3,96 KW
<i>Weight approx.</i>	255 kg
<i>Compressor Block : lk 120 mod. 7</i>	
<i>No. of stages</i>	3
<i>No. of cylinders</i>	3
<i>Cylinder bore 1<sup>st</sup> stage</i>	88 mm
<i>Cylinder bore 2<sup>nd</sup> stage</i>	36 mm
<i>Cylinder bore 3<sup>rd</sup> stage</i>	14 mm
<i>Piston stroke</i>	40 mm
<i>Intermediate pressure 1<sup>st</sup> stage</i>	6,1 -7,9 bar
<i>Safety valve 1<sup>st</sup> stage</i>	9 bar
<i>Intermediate pressure 2<sup>nd</sup> stage</i>	31 – 50 bar
<i>Safety valve 2<sup>nd</sup> stage</i>	60 bar
<i>Compressor block oil capacity</i>	2,8 l
<i>Oil pressure</i>	3-6 bar
<i>Direction of rotary (viewing at flywheel)</i>	Counter – clockwise
<i>Max. ambient temperature</i>	5 °C – 45 °C
<i>Electric drive motor</i>	
<i>Model</i>	3 phase
<i>Operating voltage</i>	380 V – 440 V , 50-60 Hz
<i>Control voltage</i>	24 V, 50-60 Hz
<i>Power</i>	4 kW
<i>Speed</i>	2815 min <sup>-1</sup>

### 3.11 Riwayat servis

Dari hasil riwayat perawatan berkala di ambil dari data dilapangan untuk beroperasi unit awal adapun riwayat perawatan berkala :

- Beroperasi pada tanggal 20 Maret 2017
- Jam beroperasi sudah mencapai 3298 Jam
- Terjadi kegagalan pada tanggal 19 Mei 2019
- Untuk rata rata *running* satu hari nya sekitar 7 Jam

**Tabel 3. 2 Riwayat perawatan berkala**

Tanggal	Jam Actual	Standar perawatan satuan jam	Jenis perawatan yang dilakukan	Keterangan	Standar manual Book
20 Maret 2017	0 hours			OK	OK
8 Juni 2017	510 hours	500 hours	Intake Filter	Diganti	Diganti
3 Oktober 2017	1050 hours	1000 hours	Intake Filter	Dibersihkan	Diganti
6 febuari 2018	1457 hours	1500 Hours	Intake Filter	Diganti	Diganti
6 febuari 2018	1457 hours		Penambahan oli	Penambahan oli diatas	Diatas standar minimum
5 Juni 2018	2023 hours	2000 hours	Intake Filter	Diganti	Diganti
5 Juni 2018	2023 hours	2000 hours	Pergantian oli	Diganti	Dikuras
22 Juni 2018	2079 hours		Pengecekan libur panjang	pengecekan	OK
10 Oktober 2018	2503 hours	2500 hours	Intake Filter	Dibersihkan	Diganti
10 Oktober 2018	2503 hours	4000 hours	Penambahan oli	Penambahan oli	Standar diatas minimal
23 Januari 2018	2940 hours	3000 hours	Intake Filter	Dibersihkan	Diganti
23 Januari 2019	2940 hours	4000 hours	Pengecekan oli	Tidak ada pengecekan	Harusnya ditambahkan
19 mei 2019	3298 hours			<i>Crankshaft patah</i>	

Dari hasil data dilapangan *preventive maintenance* bukannya tergantung jam beroperasi akan tetapi juga ada dilakukan *daily preventive maintenance* setelah di telurusi pada tanggal 6 febuari 2018 sudah ada gejala yaitu untuk pengisian ke tangki lambat dan suara getaran mesin juga lebih bising dari biasanya berhubung kita selama ini tidak ada standar pengecekan getaran dan kecepatan alir maka di anggap normal sampai terjadinya kegagalan bahwa ternyata sudah ada tanda-tanda tetapi karena kami tidak ada pengecekan standar maka itu kami abaikan.

Oleh karena itu di buku manual *preventive maintenance* dianjurkan setiap 500 jam untuk pergantian filter intake, pergantian oli setiap 2000 jam dan pembersihan *valve* dan dilakukan *service* besar pada 4000 jam. Informasi yang didapat setelah dianalisa adanya kegagalan bahwa panduan dimanual *book* adalah suhu eropa sedangkan suhu di Indonesia adalah panas tropis sehingga dianjurkan untuk perawatan rutin setengah dari perawatan yang telah dianjurkan contohnya 250 jam,1000 jam, dan 2000 jam dan juga diruangan *compressor* kadar udara juga kurang baik itupun mepengaruhi umur pakai *compressor* tersebut.

### 3.12 Rencana waktu pengerjaan

Tabel 3. 3 Waktu pengerjaan

No	Bulan 2020	Desember		Januari				Febuari				Maret				April				Mei			
		III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	
1	Pengajuan Proposal	●																					
2	Presentasi Proposal		●																				
3	Revisi Proposal			●	●																		
4	Proses bimbingan			●	→																		
5	Pengujian laboratorium						●	→															
6	Pengolahan Data dan penyusunan										●	→											
7	Pendaftaran Draft tesis																						
8	Presentasi seminar tesis																						
9	revisi tesis																						
10	Sidang tesis																						
11	Revisi tesis																						
12	Penyerahan tesis																						●

## BAB IV

### HASIL DAN PENGUJIAN

#### 4.1 Pengujian komposisi kimia

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui unsur kandungan kimia pada material tersebut. Untuk melakukan pengecekan menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy (OES)* yang hasilnya kandungan persentase dalam satuan berat.

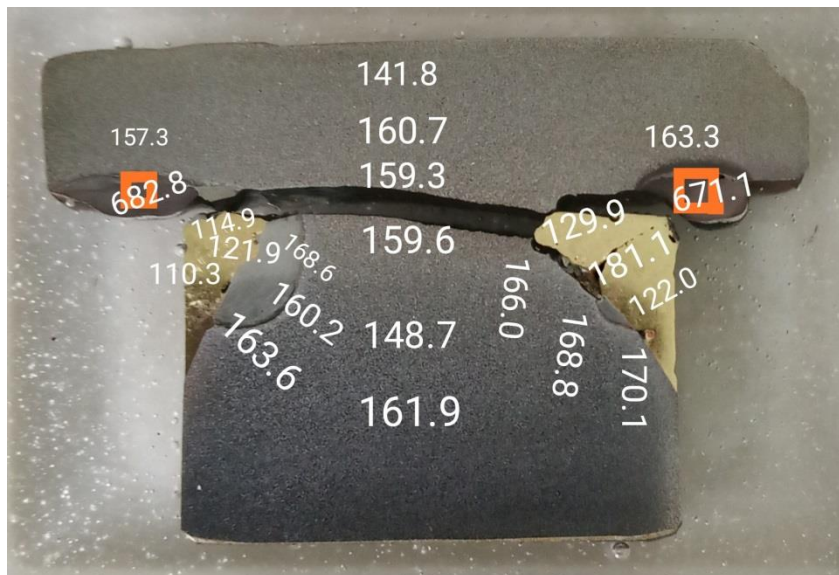
**Tabel 4. 1 Unsur komposisi kimia besi cor nodular persentase dalam satuan berat**

Fe	84,6	Ni	0,0050	Pb	0,0195						
C	>1,80	Al	0,0054	Sn	0,0179						
Si	1,824	Co	0,0231	B	0,0074						
Mn	0,196	Cu	0,199	Zr	0,0020						
P	0,0501	Nb	0,0939	As	0,0069						
S	0,024	Ti	0,0168	Bi	0,128						
Cr	0,0362	V	0,0115	CE	1,728						
Mo	0,022	W	0,0250								
Komposisi %											
Jenis	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ce	Mg
Besi cor	3,60-	0,15-	1,80-	0,03-	0,05-	0,01-	0,15-			0,005-	0,03-
nodular(ASTM)	3,80	1,00	2,80	0,07	0,20	0,10	1,00	0,03 max	0,002 max	0,20	0,06

Dari hasil pengujian komposisi kimia sudah terlihat bawah material *crankshaft* kompresor yang patah termasuk dalam spesifikasi besi cor atau *cast iron* dengan jenis besi cor nodular SAE J434 dilihat dari kandungan C cukup besar dan juga kandungan Si lebih besar dari standar unsur kimia baja karbon. Dari hasil pengamatan data table di atas sudah terlihat bahwa material ini termasuk material yang ulet karena kandungan C dan Si cukup tinggi oleh karena itu ketika *crankshaft compressor* mengalami beban berlebih salah satunya getaran dan gesekan deformasi pada *crankshaft* sangat kecil karena sifat materialnya getas sehingga dalam waktu singkat mengalami kegagalan yaitu patah pada *crankshaft compressor*.

## 4.2 Pengujian kekerasan *hardness Vickers*

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode uji kekerasan *Vickers*. Penetrator piramida intan dengan  $\alpha = 136^\circ$ , ditekankan ke permukaan bagian yang diukur dengan beban (P) = 5 Kg. Pengujian kekerasan ini dilakukan secara acak pada setiap benda uji, kemudian dianalisis kekerasan pada setiap titik dan dicari nilai kekerasan rata-ratanya.



**Gambar 4. 1 Titik pengujian kekerasan**

**Tabel 4. 2 Tabel pengujian kekerasan crankshaft compressor**

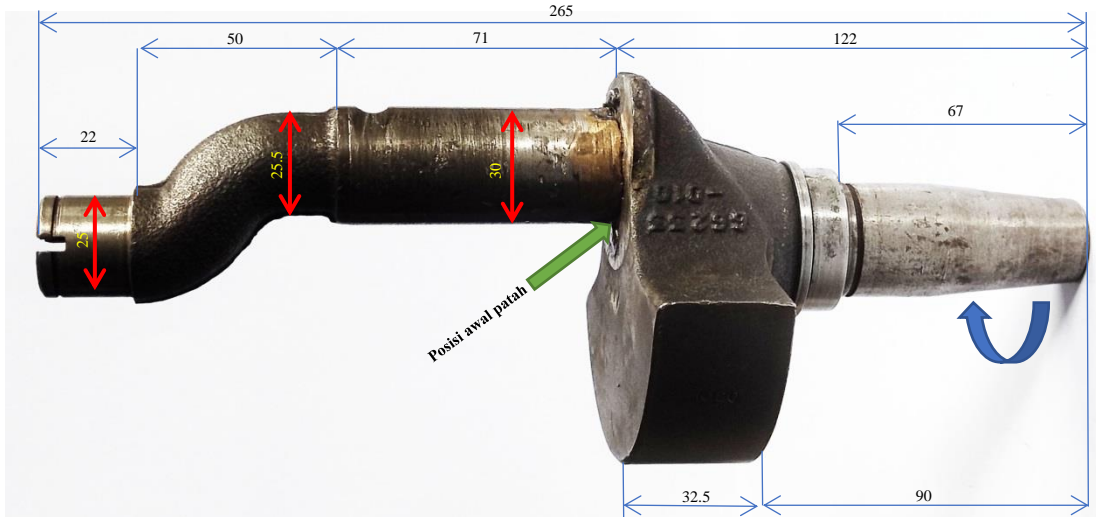
No	Nilai kekerasan <i>Hardness Vickers</i>			Sample 1
	Logam lasan <i>Weld metal</i>	<i>Heat Affected Zone</i> <i>HAZ</i>	Logam induk <i>Parent metal</i>	
1	114,9	168,6	159,6	Sample 1
2	121,9	160,2	148,7	
3	110,3	163,6	161,9	
4	129,9	166		
5	181,1	168,8		
6	122	170,1		
No	Nilai kekerasan <i>Hardness Vickers</i>			Sample 2
	Logam lasan <i>Weld metal</i>	<i>Heat Affected Zone</i> <i>HAZ</i>	Logam induk <i>Parent metal</i>	
1	671,1	157,3	141,8	Sample 2
2	682,8	163,3	160,7	
			159,3	

Pengujian kekerasan *hardness Vickers* dilakukan pada sampel A yaitu daerah patahan yang dilakukan *brazing repair* dengan metode *brazing* dengan logam pengisi CuNi dan pengelasan SMAW dengan logam pengisi elektroda RB-26, dari hasil pengujian kekerasan nilai tertinggi pada logam las SMAW (*weld metal*) 682,8 Hv terjadi karena strukturmikronya martensit sehingga mencapai kekerasan yang sangat tinggi serta metode yang digunakan pengelasan SMAW dengan elektroda RB-26. Nilai kekerasan terendah 114,9 Hv pada daerah rekondisi *brazing (weld metal)* yang penyambungannya menggunakan metode *oxyfuel gas welding (OFW)* dengan material logam pengisi CuNi yang disebabkan oleh gagalnya dikarenakan perbedaan material serta kekuatan *brazing* yang rendah.

Nilai kekerasan pada logam induk (*parent metal*) 141-162 Hv sudah memenuhi spesifikasi SAE J434 sehingga material *crankshaft* kompresor tidak ada kesalahan pada saat pengecoran yang sudah sesuai spesifikasi (ASM *metal handbook* hal. 69).

### 4.3 Pengujian *macrostructure test*

Pengamatan visual dan makro terhadap permukaan lokasi awal patah pada kompresor *crankshaft* berasal dari sudut tegak lurus terhadap poros ØD 30 mm.

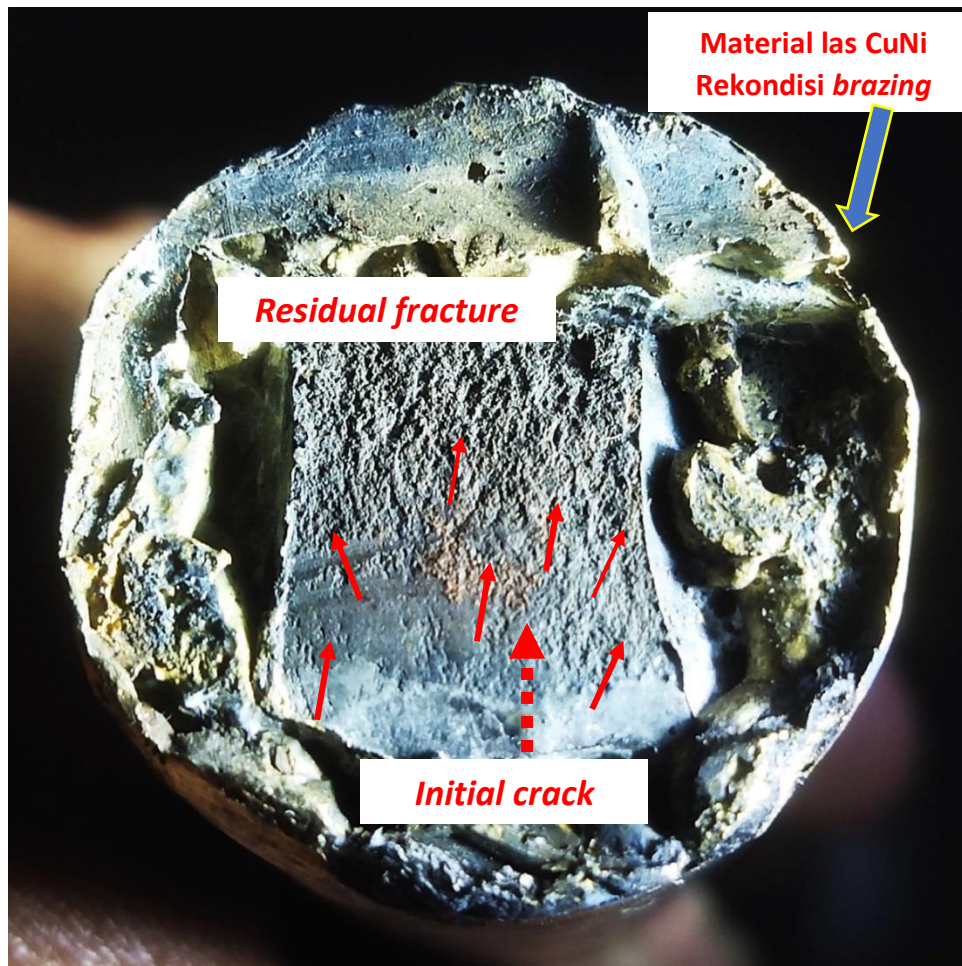


**Gambar 4. 2 Dimensi dan posisi awal patah**



**Gambar 4. 3 Cacat dan guratan pada crankshaft**

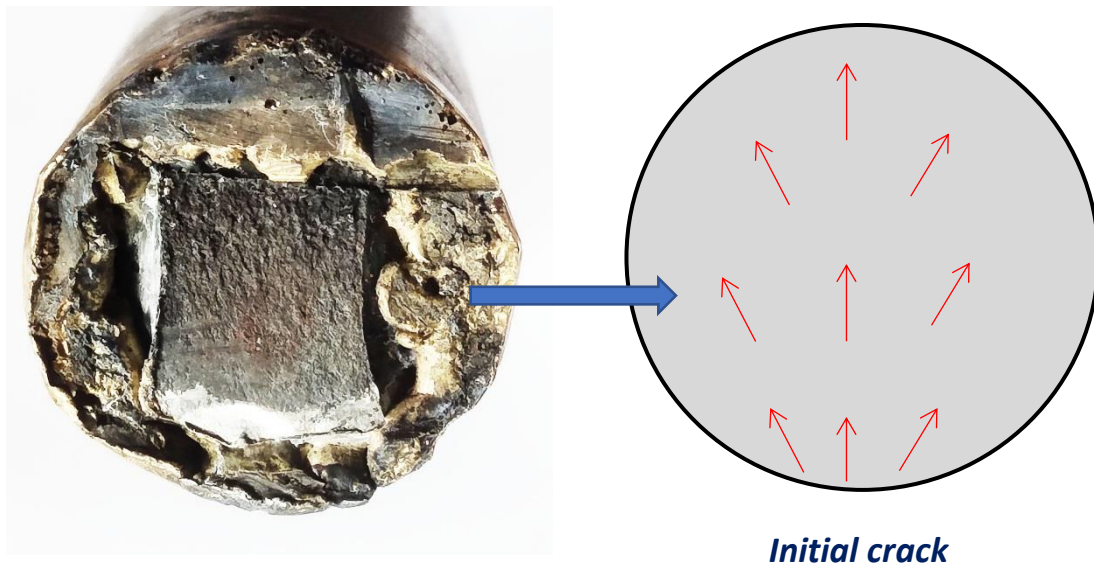




**Gambar 4. 4 Makrostruktur alur awal mula perpatahan**

Selain itu patahan sangat jelas (Gambar 4.3) alur patahan *intial crack* berawal dari bawah yang menuju atas *residual fracture*, terlihat juga *brazing repair* CuNi kurang baik ada beberapa rongga terlihat dan juga patahan tidak rata terlihat bergelombang, Dengan beban penyeimbang (Gambar 4.3) dan dilihat dari permukaan poros tersebut banyak ditemukan cacat guratan melingkar akibat gesekan dengan bearing sehingga putaran *crankshaft* tidak normal (Gambar 4.3), dengan adanya cacat permukaan pada poros tersebut diduga pelumasan tidak normal atau kondisi pelumas kotor, sehingga putaran atau bekerjanya piston terganggu. Permukaan patahan *crankshaft* mempunyai bentuk patah getas yang dimulai dari bagian sudut (Gambar 33), mengingat permukaan patahan telah dilakukan penggrindaan dan pengelasan

maka tidak terlihat jelas namun masih terlihat dari alur atau radial mark yang dimulai dari permukaan halus menuju permukaan kasar (Gambar 4.3) dan sebagai ilustrasi penjalaran patah di Gambar 4.3. Penyambungan *crangshaft* yang patah menggunakan metode *brazing* material CuNi menunjukkan mutu yang kurang bagus mengingat tiik cair material besi cor kelabu dengan material *brazing* CuNi berbeda sehingga tidak menyatu dengan baik. Sebagai info bahwa dilakukannya proses repair disebabkan oleh kondisi ketersediannya kompresor untuk produksi.

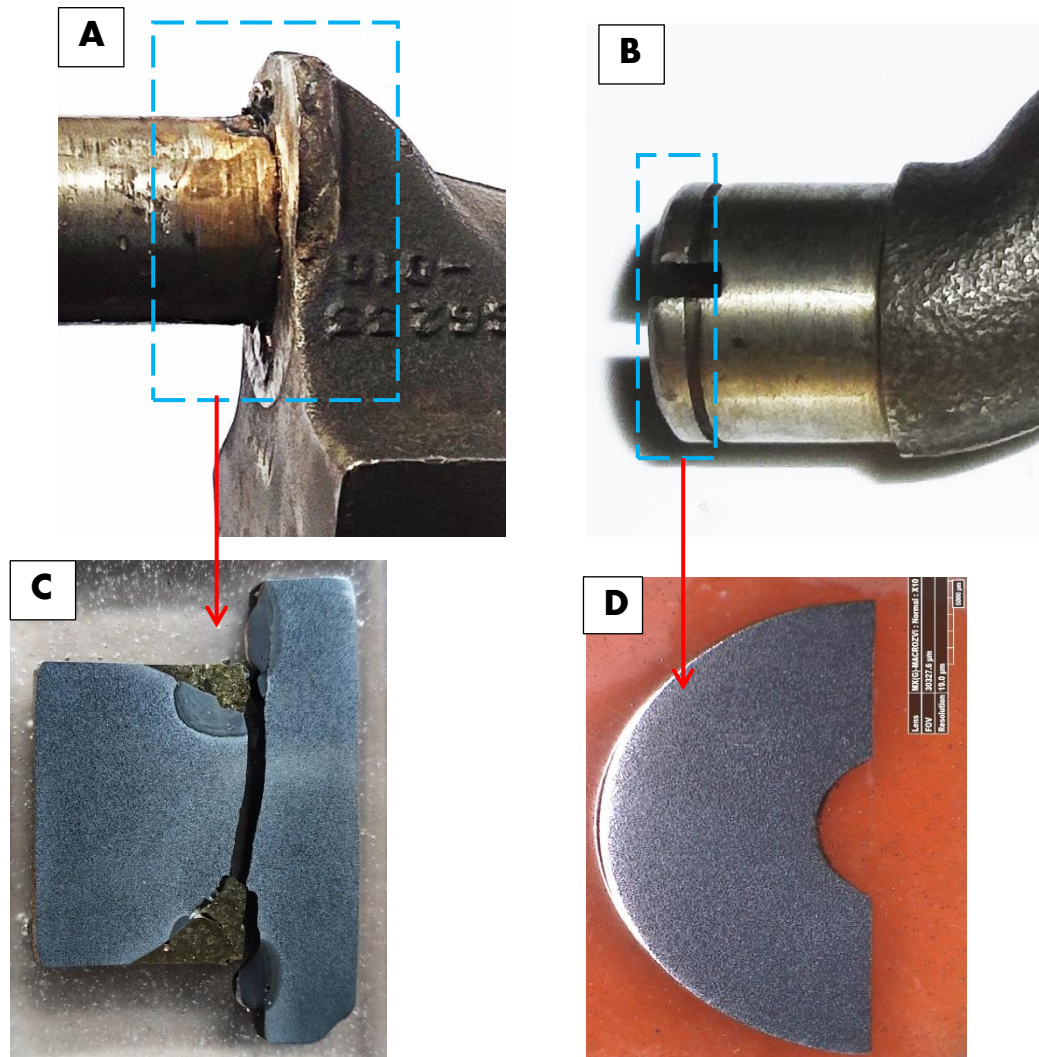


**Gambar 4. 5 Ilustrasi proses penjalaran patah**

#### **4.4 Microstructure test**

*Microstructure test performance* dilakukan dengan *Metallurgical Microscope Olympus GX 41* dengan pembesaran 350 kali sampai dengan 1050 kali pada objek. *Microstructure test* ini dilakukan untuk menganalisis pembentukan fase dan memastikan proses *welding repair* dilakukan dengan sempurna atau tidak. Pengambilan sampel 2 titik yang pertama daerah perpatahan yang sudah direkondisi dan yang kedua jauh dari titik perpatahan pemeriksaan struktur mikro patahan *crankshaft* diambil pada potongan memanjang *shaft* dan dibagian normal sebagai perbandingan. Material *crankshaft* berupa besi cor nodular SAE J434 dan struktur mikro berupa ferit (putih) dan perlit (hitam) dengan grafit bulat (Nodular graphyte)

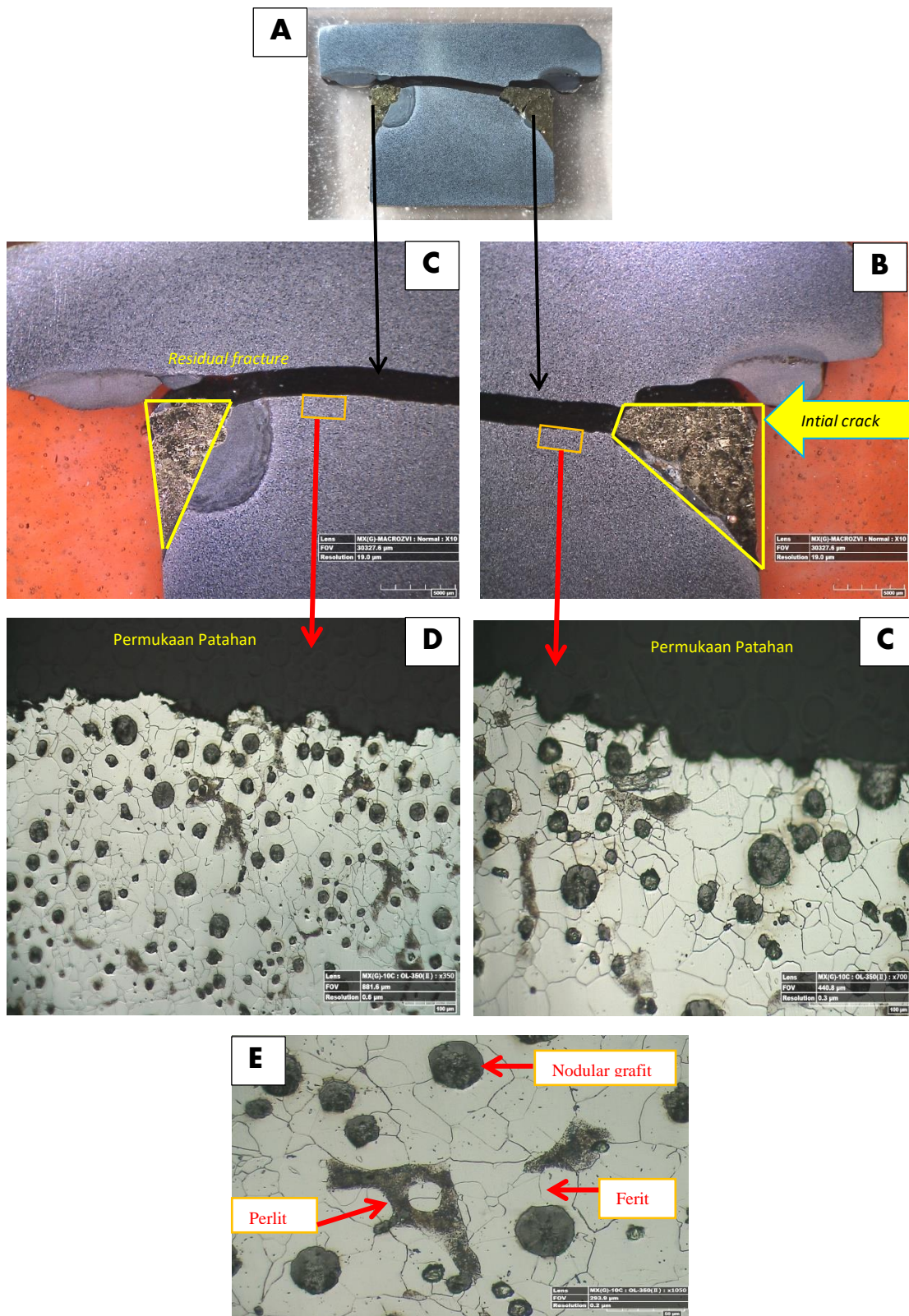
dan pada daerah patahan tidak ditemukan adanya cacat. Sudah memenuhi spesifikasi menurut (*ASM Metal Handbook, 2005*) tidak ada cacat terhadap proses pengecoran sehingga kegagalan yang terjadi bukan karena material yang tidak sesuai spesifikasi.



**Gambar 4. 6 Pemotongan dan pengambilan sampel untuk pengujian**

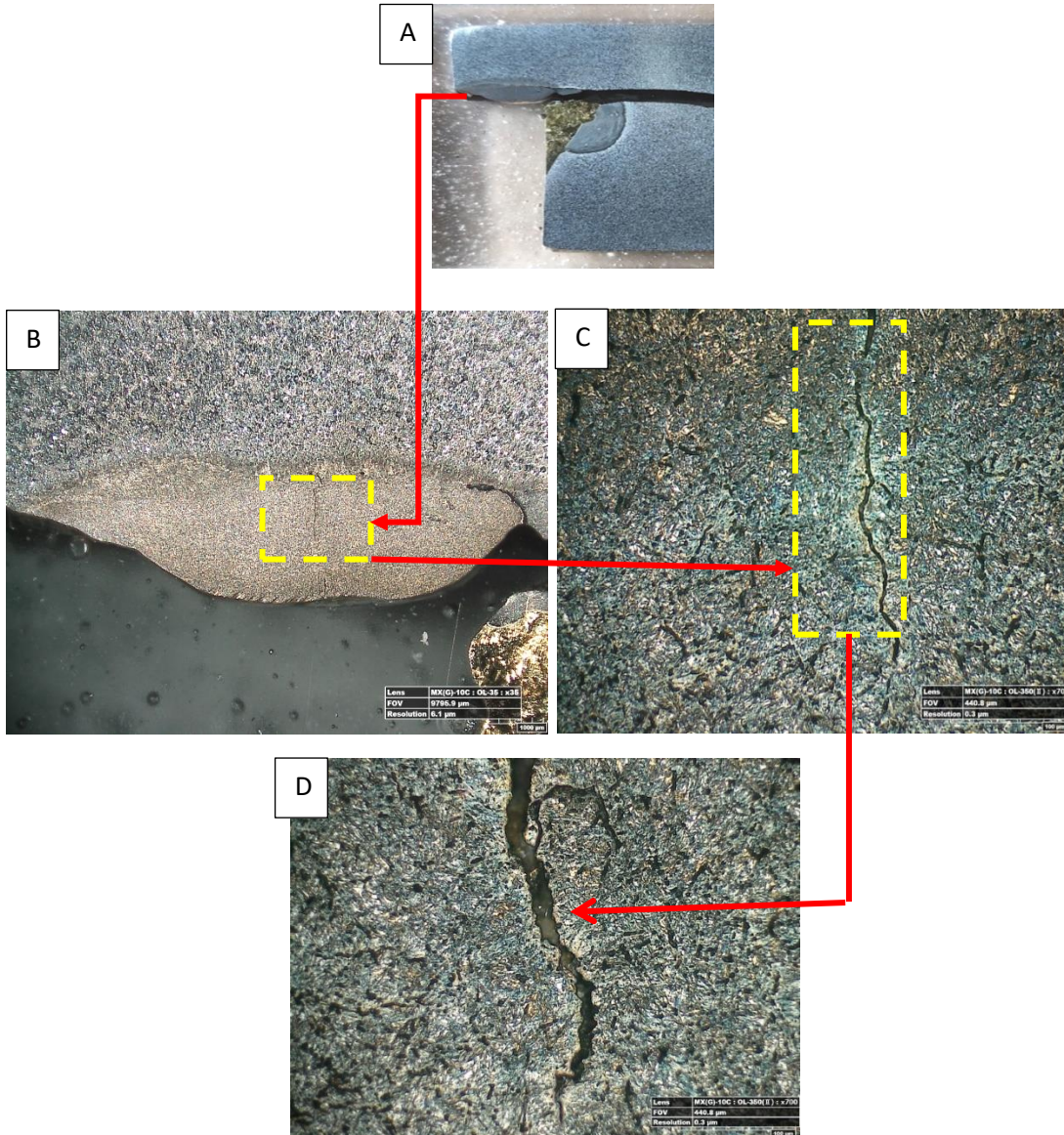
Pengambilan sampel pengujian strukturmikro pada (Gambar A) daerah patahan pengelasan yang belum dipotong, sampel B disisi paling kiri yang jauh dari daerah potongan, terlihat pada (Gambar C) terdapat rongga terbukti bahwa buruknya pengelasan, (Gambar D) pengambilan sampel potongan.





Gambar 4. 7 Hasil pengujian strukturmikro sampel perpatahan

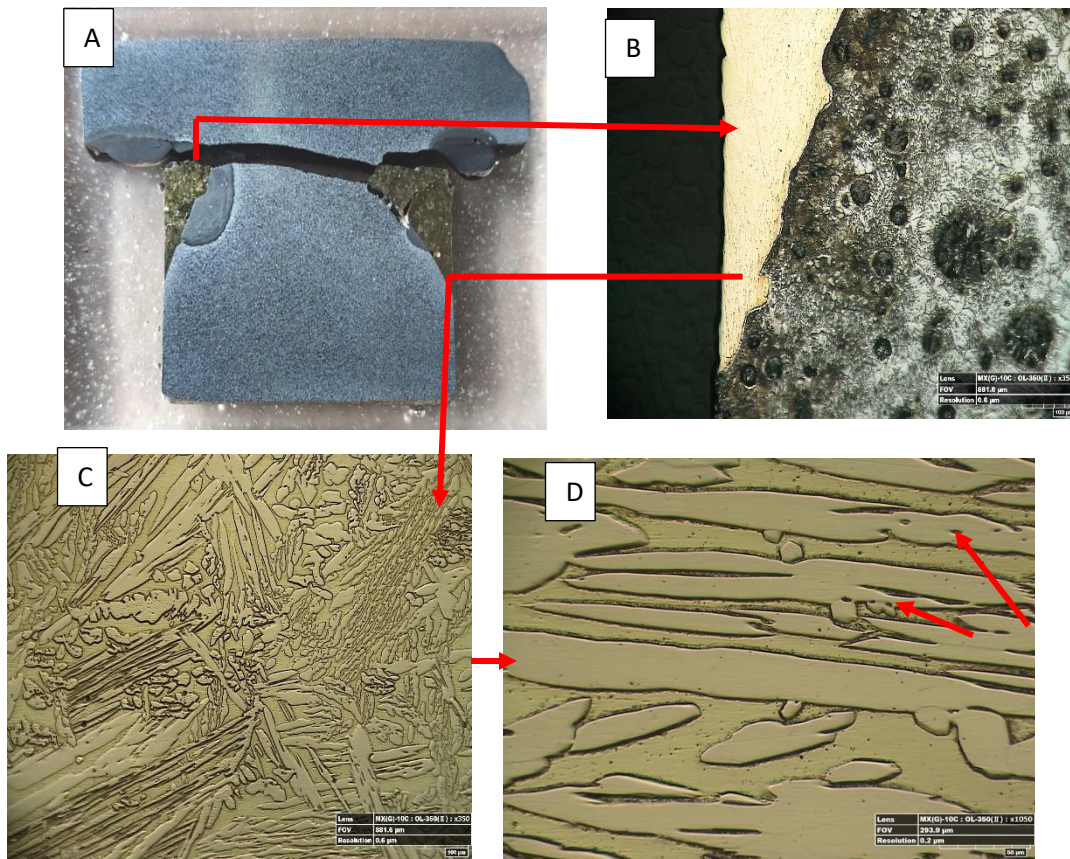
Gambar 4.7 Ilustrasi bentuk awal patah material besi cor nodular SAE J434 sebelum dilakukan penggerindaan untuk *brazing repair*, Initial crack dimulai dari bidang yang rata (Gambar 4.7 B). Strukturmikro pada daerah patah berupa besi cor kelabu grafit nodular dengan matriks feritik (putih) dan sedikit perlit (hitam). Etsa: Nital 2%. Dengan pembesar bervariasi yaitu 350 kali, 700 kali dan 1050 dilihat dari hasil pengujian strukturmikro bahwa sifat karakteristik besi cor nodular mempunyai mampu *brazing* yang buruk dibandingkan dengan baja karbon, ketahanan korosi rendah dan ketahanan aus yang juga rendah.



**Gambar 4. 8 Strukturmikro daerah las SMAW**

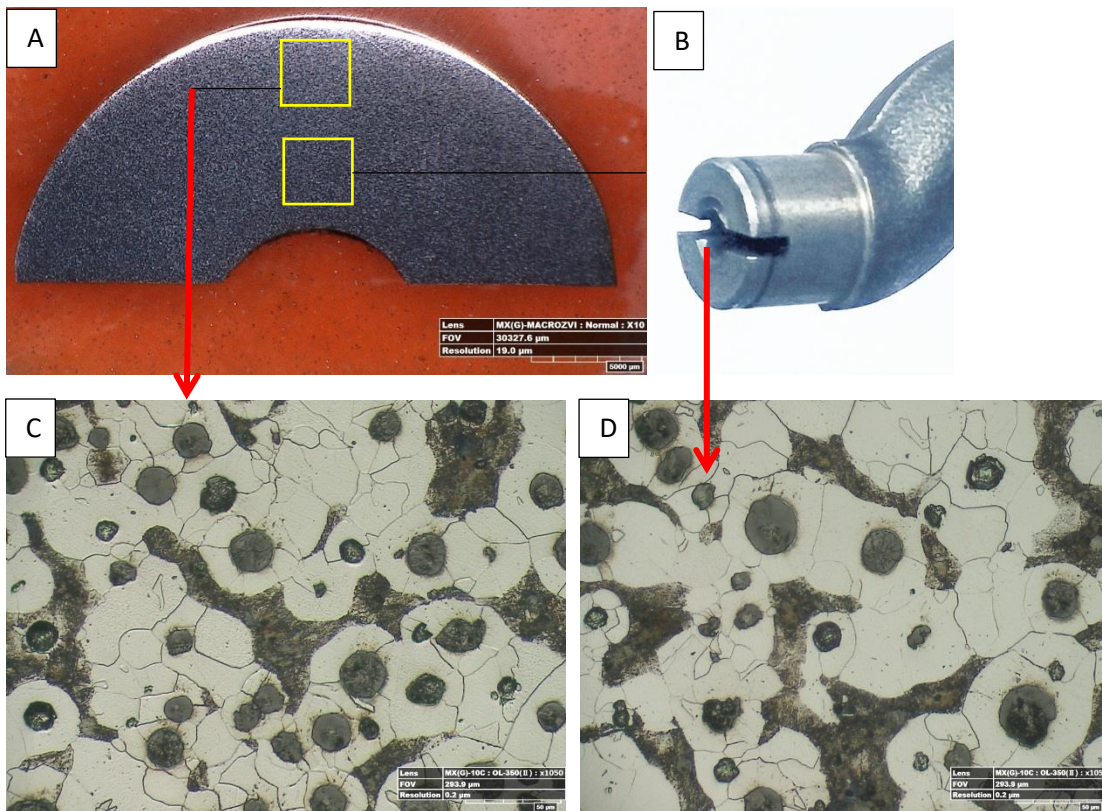


Struktur mikro (Gambar 37) material las SMAW jenis baja yang berfungsi untuk sebagai *centering* sebelum melakukan penyambungan *brazing* yang tujuannya untuk mendapatkan *center* pada patahan dengan struktur mikronya adalah martensit, dengan nilai kekerasan 683 HV dengan menggunakan etsa : Nital 2 % dengan pembesaran 35 kali, 700 kali dan 1050 kali. Terlihat (Gambar 37 B) daerah *residual fracture* terdapat retak di logam lasan (*weld metal*) diperbesar (Gambar 37C) terlihat bahwa banyak sekali retak sehingga membuat kekuatan lasan menurun. Dari hasil pengujian struktur mikro daerah *residual fracture* dengan pemebesaran 350 kali dan 750 kali pada material las CuNi. Penyebab terjadinya retak antar butir (*intergranular cracking*) adalah *Hot cracking* terbentuk pada saat temperatur lasan yang tinggi dan biasanya berhubungan dengan solidifikasi. *Hot cracking* yang muncul selama pendinginan dekat dengan temperatur solidus memiliki karakteristik intergranular cracking. Jenis dari hot cracking adalah *solidification cracking*, *liquation cracking*, *ductility dip cracking* dan *reheat cracking*. *Crack* biasanya timbul pada logam lasan atau HAZ base metal ([Kemal Arthur Uktolseja, 2017](#)). Penyebab terjadinya *hot cracking* pemelihan logam pengisi atau elektroda kurang tepat karena titik leleh besi cor nodular berbeda dengan CuNi serta tidak melakukan *post weld heat treatment* (PWHT) untuk mencegah terjadinya *hot cracking* memilih logam pengisi atau elektroda yang sesuai spesifikasi material dan melakukan perlakuan panas (PWHT) dan *preheat*.



**Gambar 4. 9 Strukturmikro brazing material CuNi**

Hasil pengujian strukturmikro pada daerah *brazing* dengan pembesaran 350 kali dan 700 kali dengan nilai kekerasan berkisar 110-130 HV dengan metode etsa :  $K_2CrO_7$  (kalium dikromat) yang memiliki karakteristik tidak larut dalam air, viskositas dan densitas kalium dikromat akan mengalami penurunan seiring adanya kenaikan suhu. Pada proses penyambungan *crankshaft* dengan metode *brazing* menggunakan CuNi penambahan unsur *Nickel* bertujuan untuk menaikkan kekerasan.



**Gambar 4. 10** Strukturmikro jauh dari daerah patah dan lasan

Pada sampel B yang diambil diujung *crankshaft* atau jauh dari daerah patahan dan rekondisi *brazing* hal ini untuk perbandingan daerah perpatahan dan daerah jauh dari perpatahan dari hasil yang diatas bahwa rekondisi pengelasan CuNi tidak pengaruh terhadap kekuatan asli atau *original* karena dilihat dari struktur mikro tidak ada perubahan signifikan terlihat bahwa ada beberapa fase strukturmikro ferit, perlit dan *grafit nodular* dikedua sampelnya. Untuk kekuatan kekerasan rangenya di 141 sampai dengan 161 HV untuk material *crankshaft original* adapun kekerasan yang terlihat sangat tinggi pada daerah lasan logam yang mencapai nilai 671 HV. Dari hasil analisa pengujian bisa ditarik kesimpulan sementara bahwa *crankshaft* kedua strukturmikro hampir sama akan tetapi pada proses rekondisi *brazing* dengan material CuNi kurang tepat sehingga terjadi patah untuk kedua kalinya karena sifat material dan jenis material *brazing* serta kekuatan sambungan pada proses *brazing* sangat rendah masih dibawah kekuatan pengelasan, walaupun terlihat secara visual *brazing*



bagus tidak ada retak akan tetapi jika dilihat dari stukturmikronya terlihat tidak menyambung karena proses *brazing* itu sendiri hanya melelehkan logam pengisi saja (*filler*) dan juga karena material *base metal* dan *filler* keduanya kurang tepat.

#### 4.5 Pengamatan secara visual *crankshaft compressor*

Terlihat pada posisi patah dan sempat mengalami rekondisi melalui *brazing* dengan material CuNi jenis *brazing* tersebut tidak bertahan lama penggunaannya karena patah, mengingat metode penyambungan jenis dan mutu tidak sesuai. Dari permukaan patahan material dasar *compressor crankshaft* piston masih dapat dianalisa walaupun telah rusak akibat digerinda dan pengaruh las rekondisi.



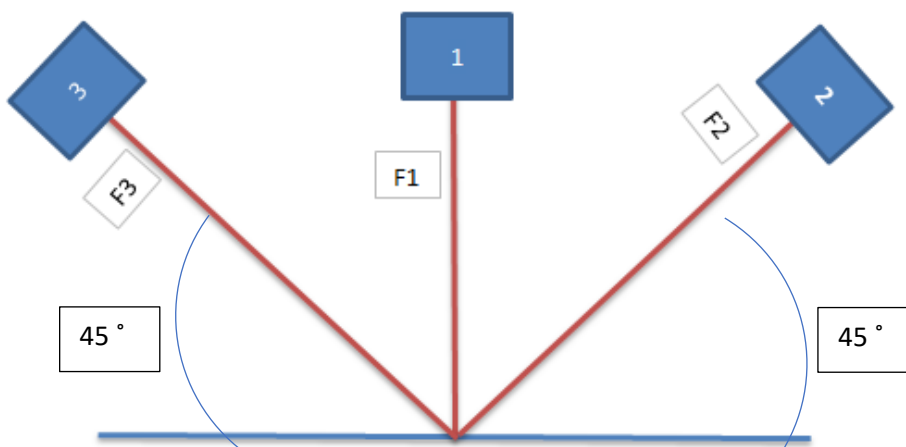


**Gambar 4. 11 Pengamatan visual crankshaft yang direkondisi**

#### 4.6 Analisa beban yang diterima *crankshaft* terjadi

**Tabel 4. 3 Spesifikasi material crankshaft**

Material <i>Crankshaft</i>	Besi cor nodular ( SAE J434)
<i>Shear</i> modulus	41000 Mpa
Elastisitas modulus	152000 Mpa
<i>Tensile strength</i>	450 Mpa
<i>Yield strength</i>	285 Mpa
<i>Density</i>	6,8 – 7,8 g/cm <sup>3</sup>
<i>Elongation</i>	6 %
<i>Hardness</i>	156 – 217 HB



**Gambar 4. 12 Freebody diagram crankshaft kompresor**

Motor Elektrikal (P) : 3,96 KW = 5,31 HP / 3 silinder = 1,77 HP per silinder

Putaran motor (n) : 1270 min<sup>-1</sup> (dikompresor)

$$P = n.T/9545 \text{ (KW)}$$

$$T = \frac{5250HP}{n}$$

$$T = \frac{5250 \times 5,31}{1270}$$

T = 21,950 N.m sehingga nilai torsi pada *crankshaft* 21,950 N.m

$$P = m \times a$$

$$P = 255 \text{ Kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$P = 2501,55 \text{ N}$$

Beban yang terjadi pada setiap titik piston

Diketahui :  $\varnothing_1 = 88 \text{ mm}$

$$\varnothing_2 = 36 \text{ mm}$$

$$\varnothing_3 = 14 \text{ mm}$$

Kapasitas mesin

Volume Langkah = Luas lingkaran x Panjang langkah

$$= \frac{\pi}{4} \times D^2 \times s$$

Dimana :

V<sub>langkah</sub> = volume langkah (cc)

D = Diameter silinder (mm)

S = Langkah piston (mm)

$$\begin{aligned} \text{Volume langkah}_1 &= \frac{\pi}{4} \times 88^2 \times 40 \\ &= 243,284 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume langkah}_2 &= \frac{\pi}{4} \times 36^2 \times 40 \\ &= 40715 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume langkah}_3 &= \frac{\pi}{4} \times 14^2 \times 40 \\ &= 6147,52 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Menghitung gaya yang bekerja pada setiap piston

Hukum newton : F = P x a

$$\begin{aligned} \text{Dimana : } P &= \text{Tekanan maks (pa)} && = 7,9 \text{ Pa} \\ F &= \text{Gaya yang bekerja pada piston (N)} && = ? \\ a &= \text{Luas piston (m}^2\text{)} && = 0,088 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Gaya yang bekerja pada piston nomer 1

$$\begin{aligned} F &= P \times a && a = \pi r^2 = 3,14 \times 0,044 = 0,1382 \text{ m}^2 \\ F &= 7,9 \times 0,1382 = 1,09178 \text{ N} \end{aligned}$$

Gaya yang bekerja pada piston nomer 2

$$\begin{aligned} \text{Dimana : } P &= \text{Tekanan maks (pa)} && = 50 \text{ Pa} \\ F &= \text{Gaya yang bekerja pada piston (N)} && = ? \\ a &= \text{Luas piston (m}^2\text{)} && = 0,036 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Gaya yang bekerja pada piston nomer 2

$$\begin{aligned} F &= P \times a && a = \pi r^2 = 3,14 \times 0,018 = 0,0565 \text{ m}^2 \\ F &= 50 \times 0,0565 = 2,826 \text{ N} \end{aligned}$$

Gaya yang bekerja pada piston nomer 3

$$\begin{aligned} \text{Dimana : } P &= \text{Tekanan maks (pa)} && = 330 \text{ Pa} \\ F &= \text{Gaya yang bekerja pada piston (N)} && = ? \\ a &= \text{Luas piston (m}^2\text{)} && = 0,014 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Gaya yang bekerja pada piston nomer 2

$$\begin{aligned} F &= P \times a && a = \pi r^2 = 3,14 \times 0,007 = 0,002198 \text{ m}^2 \\ F &= 330 \times 0,002198 = 0,72534 \text{ N} \end{aligned}$$

Dari analisa gaya yang bekerja pada masing masing piston menurut hukum newton yang terbesar pada stage 2 atau piston nomer 2, untuk  $F_{\text{total}} = F_1 + F_2 + F_3$

$$F_{\text{total}} = 1,09178 \text{ N} + 2,826 \text{ N} + 0,72534 \text{ N} = 4,64312 \text{ N}$$

Gaya yang bekerja pada piston, dapat dihitung dengan persamaan momen torsi yaitu  $M = F \times L$ . Data yang diketahui pada tiap motor standard hanya torsi dan langkah piston. Maka gaya yang bekerja adalah :

$$F = \frac{M}{L}$$

Dimana :  $M = \text{Torsi (N.m)}$

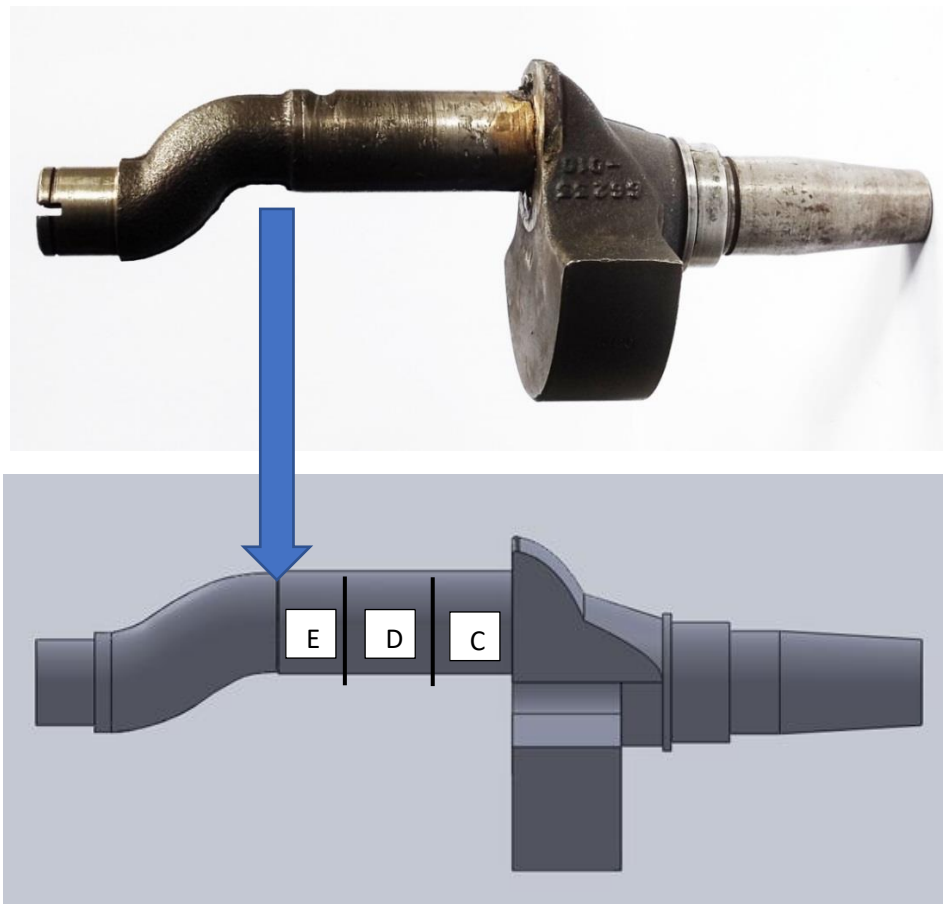
$F = \text{Gaya yang bekerja dengan piston (N)}$

$L = \frac{1}{2}$  dari panjang langkah piston (m)  $40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$

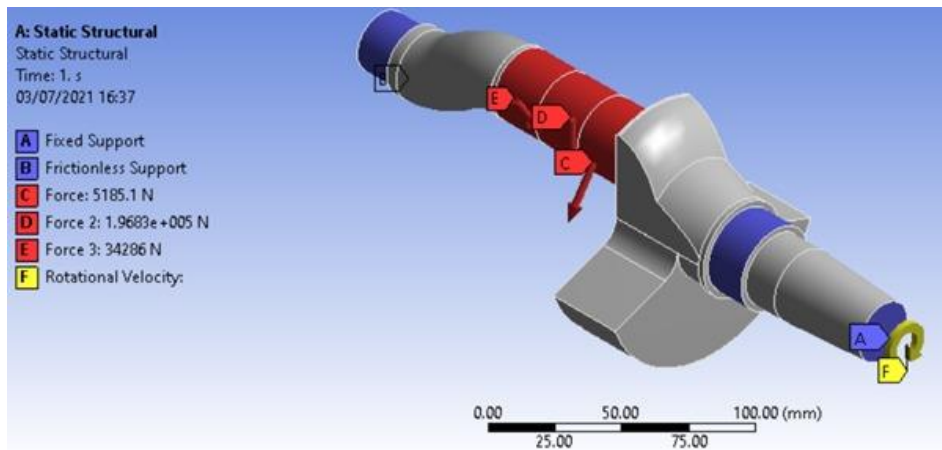
Gaya yang bekerja pada piston dengan persamaan momen torsi

$$F = \frac{M}{L} = \frac{21,950}{0,02} = 1097,5 \text{ N}$$

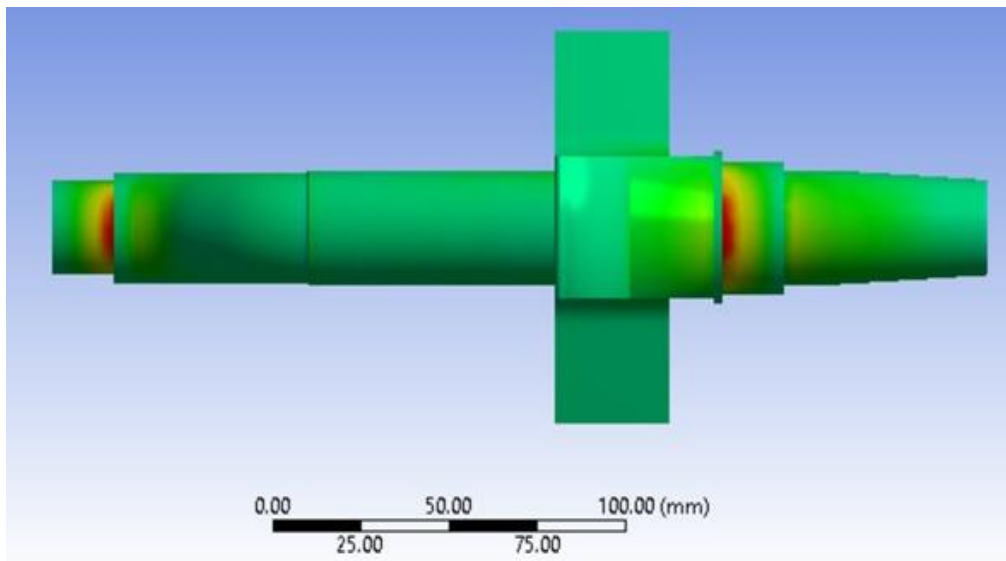
Analisa kondisi *crankshaft* kompresor menggunakan metode *Ansys*. Dengan menggunakan *software ansys* kita bisa mengetahui atau membuktikan dimana area yang mengalami *stress* yang tinggi.



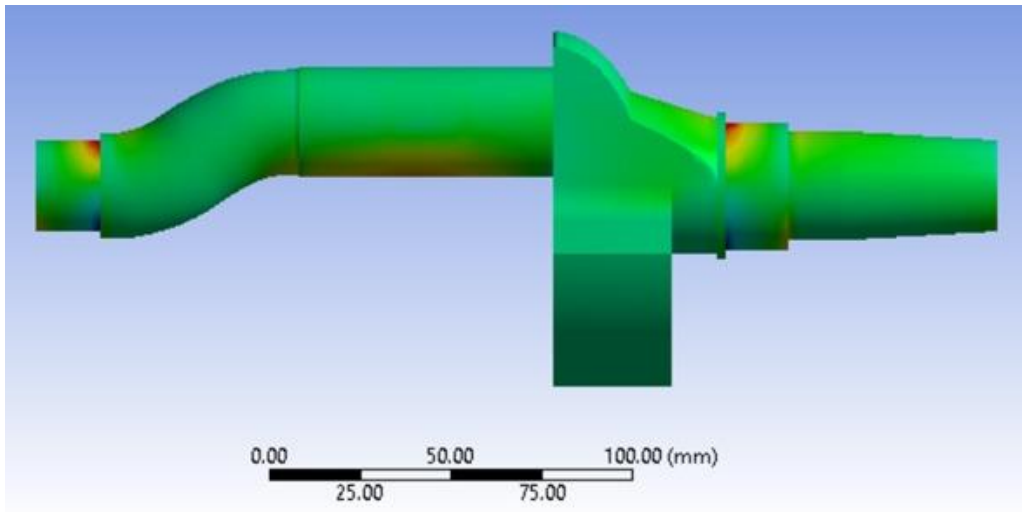
**Gambar 4. 13 Crankshaft kompresor 3 dimensi aktual dan drawing**



**Gambar 4. 14 Analisa tegangan crankshaft software ansys**



**Gambar 4. 15 Daerah yang kritikal ketika crankshaft menerima tekanan.**



**Gambar 4. 16 Daerah yang kritis ketika crankshaft menerima tekanan terlihat dari depan**

Dari hasil analisa tekanan yang terima oleh *crankshaft* kompresor terlihat bahwa ketika *crankshaft* berputar dengan kecepatan 1270 rpm dengan tekanan yang di hasilkan 330 bar maka gaya yang diterima sumbu E (0,52873 ton) yang berada pada *stage 2*, serta pada sumbu D (20 ton) yang berada pada *stage 1* intake air dan beban yang diterima pada sumbu C (3,4962 ton) yang berada pada *stage 3*.

Dari hasil analisa gaya yang terjadi pada *crankshaft* kompresor disimpulkan bahwa *stress* yang dialami *crankshaft* paling kritis pada area bantalan (*bearing*) terlihat pada (Gambar 4.13) secara desain dan pembebanan, tetapi kegagalan yang terjadi di ujung *shaft* yang mendekati *flywheel* sehingga kegagalan *crankshaft* kompresor bukan karena desain tetapi ada factor lain yang menyebabkan kegagalan.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan analisa dilapangan, wawancara dengan *maker machine* serta sudah dilakukan pengujian di laboratorium maka dapat disimpulkan hasilnya sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengamatan dilapangan kompresor telah terjadi kegagalan pertama 19 Mei 2019 dengan jam operasi 3298 jam jika digunakan perharinya  $\pm 7$  jam. Dikarenakan dengan adanya kebutuhan produksi *urgent* maka dari itu dilakukan *repair* dengan dua metode yaitu *brazing* dengan alat yang digunakan *Oxyfuel gas welding* (OFW ) material CuNi dan las SMAW dengan elektroda RB-26, dikarenakan logam pengisi tidak homogen dengan material *crankshaft* kompresor serta penyambungan metode *brazing* yang kekuatannya rendah masih dibawah kekuatan pengelasan ketika dipasang kembali dan di coba untuk beroperasi kurang dari 1 menit *crankshaft* kompresor patah kembali.
2. Hasil pengujian komposisi kimia untuk material *crankshaft* kompresor yaitu besi cor nodular SAE J434 (*ductile iron*) mikrostruktur feritic dengan kandungan karbon (C) lebih dari 1,80 %, silikon (Si) 1,56 %, Mangan (Mn) 0,196 % pada besi cor SAE J434 diantara tipe besi cor lainnya besi cor SAE J434 paling baik kemampuan las ataupun *brazing* karena kandungan komposisi dan strukturmikronya mendukung untuk dilakukan pengelasan ataupun *brazing* dan sebelum dilakukan *brazing repair* atau sesudah dilakukan *repair brazing* ada proses yang harus dilakukan yaitu untuk menghindari pembentukan sementit yang membuat daerah yang dilas menjadi rapuh dan juga untuk mempertahankan bentuk grafit nodular ([ASM Metal Handbook, 2005](#)).
3. Pengamatan visual dan makro terhadap permukaan lokasi awal patah pada kompresor *crankshaft* berasal dari bawah (*intial fracture*) sudut tegak lurus



terhadap poros ØD 30 mm dengan beban penyeimbang (Gambar 2 b). Permukaan patahan *crankshaft* pasca *brazing repair* mempunyai bentuk patah getas karena terlihat pada (gambar 2c) terdapat cacat pada proses *brazing repair* yang bergelombang, berongga penyebabnya saat proses *brazing* tidak dibersihkan atau diratakan terlebih dahulu, kurangnya pengalaman operator sehingga hasilnya buruk serta berpengaruh logam pengisi CuNi karena tidak homogen dengan material *crankshaft* sehingga hal itu yang menyebabkan patah getas.

4. Pada pengelasan SMAW elektroda RB-26 *crankshaft* mengalami *solidification cracking* salah satu termasuk cacat (*hot cracking*) yang disebabkan cepatnya pendinginan, tidak melakukan PWHT dan *preheat*.
5. Pengujian mikrohardeness menunjukkan daerah pengelasan memiliki angka kekerasan Vickers (682,8 HV dan 671,1 HV) karena struktur yang dihasilkan adalah sementit pada daerah las SMAW logam pengisi elektroda RB-26. Nilai terendah daerah *brazing* CuNi 115,7 HV, penyebabnya spesifikasi kekerasan material CuNi lebih rendah di banding besi cor nodular hanya 59,47 VH ([Yosep Reza Budi Setiawan, 2018](#)).
6. Pengambilan sampel pemeriksaan strukturmikro patahan *crankshaft* pasca *welding repair* diambil pada potongan memanjang *shaft* dan dibagian normal sebagai perbandingan, menggunakan etsa Nital 2%. Pada (tabel 4.1) pengujian komposisi kimia terlihat adanya perbedaan antara standar dengan aktual hal ini bisa dilihat dengan hasil strukturmikro material *crankshaft* berupa besi cor nodular dan struktur mikro berupa ferit (putih) dan perlit (hitam) dengan grafit bulat (*Nodular graphyte*) strukturmikro besi cor nodular sudah sesuai dengan standar. Akan tetapi adanya cacat pada proses pengelasan las SMAW dengan elektroda RB-26 terlihat adanya retak pada pengelasan SMAW terdapat *crack intergranular* yang menyebabkan kekuatan tidak maksimal, penyebab adanya *crack intergranular* pada saat proses pengelasan terdapat *solidification cracking* karena cepatnya pendinginan pada saat pengelasan dan tidak adanya PWHT sehingga menyebabkan daerah lasan mengalami *solidification*

*cracking* terjadi di beberapa titik sehingga kekuatan lasan lemah karena banyak cacat.

7. Pada pemeriksaan strukturmikro proses *brazing repair* dengan pembesaran 35 kali, 350 kali, 700 kali dan 1050 kali dengan etsa  $K_2CrO_7$  (kalium dikromat) terlihat pada pembesaran 35 kali terlihat sambungan *brazing repair* tidak menyatu dengan *base metal* besi cor nodular sehingga terpengaruh terhadap kekuatan sambungan *crankshaft*, pada pembesaran 1050 kali pada *weld metal brazing repair* terlihat adanya porositas penyebabnya ada gas yang terperangkap saat proses *repair brazing*, adanya kotoran di *base metal* dan juga kontaminasi terhadap lingkungan sekitar.
8. Dari hasil analisa beban memakai *software ansys* yang diterima *crankshaft* beban yang terendah *stage 3* dan beban tertinggi di *stage 1*. Secara desain dan pembebanan yang mengalami *high stress* dibagian bantalan (bearing) yang seharusnya terjadi kegagalan di daerah bantalan (Gambar 4.13) terlihat yang berwarna merah *high stress*, sehingga kegagalan terjadi sebelum pengelasan bukan disebabkan kesalahan desain dan pembebanan.

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan pada kegagalan *crankshaft* pasca *brazing repair* yaitu :

1. Menurut ASM *Metal Handbook Vol.1 Properties and Selection* Besi cor nodular SAE J434 kemampuan pengelasannya cukup baik dibandingkan besi cor lainnya. Akan tetapi pengelasan besi cor nodular memerlukan tindakan khusus untuk mendapatkan sifat optimal pada sambungan las, dengan tujuannya untuk menghindari pembentukan sementit dan mempertahankan bentuk grafit nodular yang menyebabkan daerah lasan rapuh. Disarankan agar tidak melakukan *brazing welding* pada *crankshaft* karena kekuatannya rendah dianjurkan untuk melakukan *repair welding* yang kekuatannya lebih tinggi dari sambungan *brazing repair*.

- Melakukan membuat *welding procedure specification (WPS) repair welding* sesuai *welding standart ANSI / AWS D11.2-89 (R2006)* agar mendapatkan hasil yang optimal.
- Sambungan *crankshaft* kompresor termasuk *butt joint*.
- Untuk penggunaan *filler* atau logam pengisi besi cor nodular menurut AWS A5.15-90 (R2006) dan termasuk dalam spesifikasi untuk kandungan komposisi sebagai berikut :

**Tabel 5. 1 Filler besi cor nodular**

Electrode	Tensile Strength		Yield Strength 0/2% offset		Elongation % in 2 in.	Hardness BHN
	ksi	MPa	ksi	MPa		
RCI	20-25	138-172	—	—	—	150-210
RCI-A	35-40	241-276	—	—	—	225-290
RCI-B (As-welded)	80-90	552-621	70-75	483-517	3-5	220-310
RCI-B (Annealed)	50-60	345-414	40-45	276-310	5-15	150-200
ESt	—	—	—	—	—	250-400
ENi-CI	40-65	276-448	38-60	262-414	3-6	135-218
ENi-CI-A	40-65	276-448	38-60	262-414	3-6	135-218
ENiFe-CI	58-84	400-579	43-63	296-434	6-18	165-218
ENiFe-CI-A	58-84	400-579	43-63	296-434	4-12	165-218
ENiFeMn-CI	75-95	517-655	60-70	414-483	10-18	165-210
ENiFeT3-CI	65-80	448-552	40-55	276-379	12-20	150-165
ERNiFeMn-CI	75-100	517-689	65-80	448-552	15-35	165-210

Sumber : ANSI/AWS A15-90 (R2006) Hal. 31

**Tabel 5. 2 Komposisi kimia filler**

AWS Classification <sup>d</sup>	UNS Number <sup>e</sup>	Weight Percent <sup>a,b,c</sup>										Other Elements, Total
		C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni <sup>f</sup>	Mo	Cu <sup>g</sup>	Al	
<b>Shielded Metal Arc Welding Electrodes</b>												
ENi-CI	W82001	2.0	2.5	4.0	—	0.03	8.0	85 min.	—	2.5	1.0	1.0
ENi-CI-A	W82003	2.0	2.5	4.0	—	0.03	8.0	* 85 min.	—	2.5	1.0-3.0	1.0
ENiFe-CI	W82002	2.0	2.5	4.0	—	0.03	Rem.	45-60	—	2.5	1.0	1.0
ENiFe-CI-A	W82004	2.0	2.5	4.0	—	0.03	Rem.	45-60	—	2.5	1.0-3.0	1.0
ENiFeMn-CI	W82006	2.0	10-14	1.0	—	0.03	Rem.	35-45	—	2.5	1.0	1.0
ENiCu-A	W84001	0.35-0.55	2.3	0.75	—	0.025	3.0-6.0	50-60	—	35-45	—	1.0
ENiCu-B	W84002	0.35-0.55	2.3	0.75	—	0.025	3.0-6.0	60-70	—	25-35	—	1.0
<b>Flux Cored Arc Welding Electrodes</b>												
ENiFeT3-CI <sup>h</sup>	W82032	2.0	3.0-5.0	1.0	—	0.03	Rem.	45-60	—	2.5	1.0	1.0

\*See notes on following page.

Tabel 5. 3 Ukuran standar filler

**Table 4  
Standard Sizes and Lengths for Shielded  
Metal Arc Welding Electrodes**

AWS Classification	Diameter in.	Size Tolerance in.	Length in.	Length Tolerance in.
ENi-CI ENi-CI-A	3/32	± 0.003	9, 12, and 14	± 1/4
ENiFe-CI ENiFe-CI-A ENiFeMn-CI ESt				
	1/8, 5/32, 3/16, 1/4	± 0.003	12 and 14	± 1/4
ENiCu-A ENiCu-B	3/32, 1/8, 5/32, 3/16	± 0.003	12 and 14	± 1/4

Tabel 5. 4 Ukuran Panjang Filler elektroda SMAW

**Shielded Metal Arc Welding**

Electrode Diameter	Minimum Height (H)	Minimum Length (L)
1/8 in. (3.2 mm) and less	1/2 in. (13 mm)	1-1/2 in. (38 mm)
Greater than 1/8 in. (3.2 mm)	7/8 in. (22 mm)	2 in. (51 mm)

5. Langkah prosedur menurut AWS *welding handbook*

- Tanpa pemanasan awal, suhu interpass tidak boleh melebihi 95 °C (200 °F)
- Dengan pemanasan awal, suhu interpass tidak boleh melebihi suhu pemanasan awal lebih dari 40 °C
- Saat besi cor nodular dipanaskan minimal 315 °C untuk mengurangi pembentukan martensit di zona HAZ
- Untuk meminimalkan tekanan pengelasan, urutan langkah mundur harus digunakan. Panjang manik striger harus maksimum 75 mm dan

setiap manik las harus mendingin hingga sekitar 40°C sebelum langkah berikutnya dilakukan

- Mencair lebih dari yang diperlukan harus dihindari.
  - Bila kemungkinan, setidaknya dua lintasan las harus disimpan untuk meningkatkan kemampuan mesin dari HAZ.
  - Busur harus dipukul dialur las.
  - Panjang busur harus dibuat sesingkat mungkin.
  - Arus pengelasan harus dikurangi sekitar 25% untuk posisi vertikal dan untuk diatas posisi arus pengelasan dikurangi 15%.
  - PWHT ( *Postweld Heat Treatment*) perlakuan panas pasca las pengelasan pada besi cor nodular yang telah selesai harus didinginkan dengan hati-hati. Pendinginan yang sangat cepat dapat menghasilkan fase getas yang keras serta rentan retak. Untuk menghindari cacat pasca pengelasan dilakukan pemanasan dengan temperatur 480°C dan pendinginan lambat diudara diam.
  - Setelah selesai pengelasan dan proses PWHT maka dilakukan metode inspeksi *nondestructive test* (NDT) yang mengacu pada ANSI/AWS B1.10
6. Menurut ANSI/AWS B1.10 proses *nondestructive test* (NDT) ada beberapa metode disarankan pada penelitian terkait *crankshaft* kompresor menggunakan metode *visual*, *magnetic particle* dan ultrasonik.
- *Nondestructive test* (NDT) dengan metode *visual* dilakukan pertama kali sebelum pengelasan, selama pengelasan dan sesudah pengelasan. Metode ini tidak membutuhkan alat yang banyak hanya membutuhkan pengelihatn yang baik serta seorang inspektur yang pengalaman, untuk dari nilai ekonomis metode *visual* sangat murah akan tetapi untuk hasilnya kurang maksimal.
  - *Nondestructive test* (NDT) dengan metode *magnetic particle* (MT) proses pengujian ini menggunakan daya magnet yang dihasilkan dari

proses magnetisasi. Metode ini relatif mudah dan murah akan tetapi metode ini hanya bisa digunakan material ferromagnetik.

- *Nondestructive test* (NDT) dengan metode *ultrasonic* menggunakan energy suara frekuensi tinggi (getaran ultrasonik) metode ini bisa digunakan sambungan las. Proses ini dapat dilakukan dari satu sisi, alat yang digunakan *portable* akan tetapi tidak disarankan digunakan pada benda yang kasar dan tidak beraturam, mahalnya alat dan pengujian yang dilakukan dan membutuhkan cairan *couplant*.
- Dari banyak metode *nondestructive test* (NDT) yang wajib dilakukan proses metode *visual* sebelum, saat pengelasan dan sesudah pengelasan setelah metode *visual* sudah dilakukan ada dua opsi melakukan pengujian *magnetic particle* (MT) atau metode *ultrasonic*. Untuk hasil yang maksimal metode ultrasonik tetapi biaya yang cukup mahal oleh karena itu pada NDT kedua ini tergantung pada biaya yang tersedia.

**Tabel 5. 5 Welding Procedure Specification (WPS)**

Perusahaan	NID
Jenis Pengelasan	SMAW
Mendukung PQR	AWS D11.2-89 (R2006)
Filler metal	ENiFeMn-CI
Ukuran filler metal	3/16 (4,8mm), 1/4 (6,35mm)
Jenis las	Butt Joint
Kondisi pengelasan	DCEP 200 - 300 A, 23 - 45 V
Preheat temperatur	315 °C
Interpass temperatur	370 °Setelah Pengelasan
Logam Dasar	
Spesifikasi Bahan	Lihat tabel 3 terlampir AWS D11.2-89 (R2006)
	D1 atau Besi cor nodular
Type : (Manual, Automatic, Semi auto)	Manual

Sumber : AWS D11.2-89 (R2006)

7. Dari prosedur yang telah dilakukan dari pemilihan standar pengelasan, pemelihan elektroda, jenis sambungan yang digunakan, langkah prosedur pengelasan dan *nondestructive test* (NDT). Untuk hasil akhir dilihat di

proses NDT jika terdapat cacat yang kritikal yang mempengaruhi kekuatan sambungan las maka pengelasan tersebut terjadi kegagalan, jika pada proses NDT tidak ada terdeteksi cacat maka *crankshaft* kompresor sudah layak digunakan akan tetapi hanya bersifat sementara sampai *part* atau komponen *crankshaft* yang baru sudah datang karena menurut *ASME IX boiler and pressure vessel code* jika komponen atau part yang mengalami *stress* tinggi dan tingkat kelelahan tinggi maka tidak dianjurkan untuk dilakukan pengelasan.

## DAFTAR PUSTAKA

- ADNYANA, D. N. (n.d.). [Data Thesis 2020-2021](#).
- ASM *Metal Handbook Vol. 06 Welding, Brazing and Soldering*, 1993
- Asyari, D. (n.d.). [Analisis Kerusakan Pada Poros Penghubung Kompresor Torak](#).  
*Jurnal Sains & Teknologi Fakultas Teknik*, 1(2), 39–45.
- Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (1999). [Machinery Failure Analysis and Troubleshooting](#), Vol. 2. Gulf Publishing Co.
- Febriyanti, E., & Suhadi, A. (2016). [ANALISIS KEGAGALAN FIRE RING PENYEBAB KERUSAKAN PISTON MESIN UNIT KENDARAAN BERMOTOR](#). *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 10(2), 99–106.
- GmbH, B. K. (2010). [Operating Manual High pressure Compressor for Breathing Air](#).
- Ibad, I. K., & Rochiem, R. (2014). [Analisa kegagalan baut piston VVCP gas kompresor gemini DS-504 EMP Malacca Strait SA](#). *Jurnal Teknik ITS*, 3(2), F180–F184.
- Jones, D. R. H. (2013). [Failure analysis case studies II](#). Elsevier.
- Layer, J., Adler, T., & Ahmed, R. (2018). [ASM Handbook Volume 11 Failure Analysis and Prevention](#). ASM International.
- Murti, F. N., & Nurhasanah, N. (2019). [Analisa Risiko Kegagalan Kompresor K-3-02 B di Plant 3C PT. Pertamina \(Persero\) RU V Balikpapan menggunakan Failure Mode and Effect Analysis \(FMEA\) dan Fault Tree Analysis \(FTA\)](#).
- Qosim, N. (2017). [THE ANALYSIS OF RECIPROCATING COMPRESSOR PK 60-150 FAILURE USING FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS METHOD](#). *Jurnal Penelitian Saintek*, 22(2), 80–89.
- Steels, H.-S. L.-A. (2005). [ASM handbook, volume 1, properties and selection: irons, steels, and high performance alloys section: carbon and low-alloy steels](#).
- Bauer Germany. (2017 ) [Handbook manual compressor Hal. 20](#).



- R. Bagus Suryayasa Majanasastra, (2016) [ANALISIS SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO HASIL PROSES HYDROFORMING PADA MATERIAL TEMBAGA \(Cu\) DAN ALUMINIUM Al 6063.](#)
- Kemal Arthur Uktolseja, Margono Sugeng (2017) [ANALISA KERUSAKAN SAMBUNGAN LASAN PADA SISTEM VENTING PRE AIR COOLER DILINGKUNGAN EKSPLORASI DAN PRODUKSI GAS ALAM.](#)
- ASM *Metal Handbook* Vol. 8 (2000), [Mechanical Testing and Evaluation.](#)
- Yosep Reza Budi Setiawan, I ketut Gede Sugita, (2018), [Pengaruh Penambahan Unsur Cu pada Al-7%Si terhadap karakteristik kekerasan dan keausan pada proses Sand Casting](#)
- Sularso , Haruo Tahara,(2000) [Pompa & Kompresor Jakarta](#) Hal. 167 .
- Sunyoto, Karnowo, S. M. Bondan Respati, (2008) [Teknik Mesin Industri Jilid 2.](#)
- Suarsana, (2017) [Fracture Mechanic \( Analisa Kegagalan \)](#), Teknik mesin fakultas Teknik Universitas Udayana Denpasar.
- Heinz P. Bloch, (2006) [Compressor and modern proses applications.](#)
- Tony Giampaolo, (2010) [Compressor handbook principle and practice.](#)
- Ronald H. Aungier, (2000) [Centrifugal compressor.](#)
- D.R.H. Jones, (1997) [Failure analysis case studies II. ASM Metals Handbook Volume 11](#)
- Jose Antonio Pero-Sans Elors, (2018) [Physical Metallurgy Of Cast Iron.](#)
- American Welding Society, (2011) [Welding Handbook Volume 4, Materials And Application Part 1.](#)
- Cooper Development Association (2013), [Cooper – Nickel Welding and Fabrication](#)
- American Welding Society, (2011), [Welding Handbook Volume 4, Materials and Application , Part 1](#)
- Farid Majedi, Indah Puspitasari, (2017), [Optimasi Daya dan Torsi pada Motor 4 Tak dengan Modifikasi Crankshaft dan Porting pada Cylinder Head.](#)
- [AWS A5.5/A5.5M : 2014](#)
- American National Stanadart [AWS D1.1 / D1.1M : 2010](#)