



TUGAS AKHIR (SE43310)

**ANALISIS KEGAGALAN PERALATAN PADA PROSES
ANAEROB IPAL INDUSTRI BIOETANOL MENGGUNAKAN
METODE FMEA DAN ETA**

**Irina Kartika Utami
NRP. 0521040042**

**DOSEN PEMBIMBING:
DR. INDRI SANTIASIH, S.KM., M.T
NORA AMELIA NOVITRIE, S.T., M.T**

**PROGRAM STUDI TEKNIK KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2025**

****Halaman ini sengaja dikosongkan****



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (SE43310)

**ANALISIS KEGAGALAN PERALATAN PADA PROSES
ANAEROB IPAL INDUSTRI BIOETANOL MENGGUNAKAN
METODE FMEA DAN ETA**

Irina Kartika Utami
NRP. 0521040042

DOSEN PEMBIMBING:
DR. INDRI SANTIASIH, S.KM., M.T
NORA AMELIA NOVITRIE, S.T., M.T

PROGRAM STUDI TEKNIK KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2025

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS KEGAGALAN PERALATAN PADA PROSES ANAEROB IPAL
INDUSTRI BIOETANOL MENGGUNAKAN METODE FMEA DAN ETA**

Disusun Oleh:
Irina Kartika Utami
0521040042

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja
Jurusan Teknik Permesinan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA**

**Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 21 Juli 2025
Periode Wisuda : Oktober 2025**

Menyetujui,

Dosen Penguji

NIDN

Tanda Tangan

- | | | |
|--|--------------|---------|
| 1. Mades Darul Khairansyah, S.ST., M.T. | (0012129002) | (.....) |
| 2. Nora Amelia Novitrie, S.T., M.T. | (0014058804) | (.....) |
| 3. Mey Rohma Dhani, S.ST., M.T. | (0002058901) | (.....) |
| 4. Dika Rahayu Widiana, S.ST., M.T. Ph.D | (0018058503) | (.....) |

Dosen Pembimbing

NIDN

Tanda Tangan

- | | | |
|-------------------------------------|--------------|---------|
| 1. Dr. Indri Santiasih, S.KM., M.T. | (0025017901) | (.....) |
| 2. Nora Amelia Novitrie, S.T., M.T. | (0014058804) | (.....) |

**Menyetujui
Ketua Jurusan**

Dr. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T.
NIP. 197708192005011001

**Mengetahui
Koordinator Program Studi,**

Mochamad Yusuf Santoso, S.T., M.T.
NIP. 199011272015041002

****Halaman ini sengaja dikosongkan****



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I. 021
Date : 3 Nopember 2015
Rev. : 01
Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Irina Kartika Utami
NRP : 0521040042
Jurusan/Prodi : Teknik Permesinan Kapal / Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

Analisis Kegagalan Peralatan Pada Proses Anaerob IPAL Industri Bioetanol Menggunakan Metode FMEA dan ETA.

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 05 Juli 2025

Yang membuat pernyataan,



(Irina Kartika Utami)
NRP. 0521040042

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analisis Kegagalan Peralatan pada Proses Anaerob IPAL Industri Bioetanol Menggunakan Metode FMEA dan ETA” sebagai syarat untuk menyelesaikan studi Diploma Empat (D4) Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, penulis menyadari terdapat banyak kekurangan dan kesulitan, namun atas bimbingan, dukungan dan arahan dari berbagai pihak penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa melimpahkan nikmat, rahmat dan hidayah-Nya serta junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan syafaatnya dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Keluarga tercinta saya, Ayah saya Boedi Oetomo, Ibu saya Siti Prihatin, serta adik saya Juliant Irianti Rayhanum Utomo yang selalu memberikan doa, dukungan, semangat, dan bantuan untuk kelancaran dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Dr. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Mochamad Yusuf Santoso, ST., M.T. selaku Koordinator Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
6. Bapak Mochammad Choirul Rizal, S.T., M.T., selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

7. Ibu Dr. Indri Santiasih, S.KM., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing, membagi ilmu dan membantu saya dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
8. Ibu Nora Amelia Novitrie, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan pikiran untuk membimbing, membagi ilmu dan memberi arahan kepada saya dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
9. Seluruh dosen dan staf pengajar Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah banyak membantu dan memberikan ilmu pengetahuan selama masa perkuliahan.
10. Bapak Nurul, Ibu Esti, Bapak Rodhy, Bapak Burhan, Bapak Randy, dan seluruh karyawan perusahaan yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk membantu penulis dalam pengambilan data serta memberi masukan dan mendampingi penulis selama OJT dan melakukan penelitian Tugas Akhir.
11. Jia, Dio, Hanif, dan Wildan, sebagai teman rantau OJT saya pertama kali, yang selalu siap sedia untuk berbagi cerita dan sharing mengenai tugas akhir penulis.
12. Seluruh teman teman kelas 2021 B yang telah menjadi rekan selama 4 tahun perkuliahan dan menjadi tempat berbagi cerita dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
13. Alvin Ardi, Nabila, Miko, Mona, Bima, Nurul, Vanny, Mazida, dan Nina yang telah menjadi teman yang baik, dan teman diskusi penulis selama masa perkuliahan dan saat melakukan pengerjaan Tugas Akhir ini.
14. Rahma, Agustin, dan Putra selaku sahabat penulis sejak masa SMP, terima kasih telah selalu memberikan dukungan yang tiada hentinya kepada penulis.
15. Serta, semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu oleh penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini.

Surabaya, 06 Juli 2025

Penulis

Analisis Kegagalan Peralatan pada Proses Anaerob IPAL Industri Bioetanol Menggunakan Metode FMEA dan ETA

Irina Kartika Utami

ABSTRAK

Kerusakan peralatan utama seperti *lamella presettling*, *digester*, blower, dan *lagoon* pada proses anaerobik IPAL industri bioetanol dapat menurunkan efisiensi pengolahan dan meningkatkan risiko pencemaran lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis kegagalan peralatan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Event Tree Analysis* (ETA). Metode yang digunakan meliputi observasi lapangan, wawancara dengan *expert judgment*, serta pengumpulan data historis kegagalan peralatan tahun 2020-2025. FMEA digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan, menghitung *Risk Priority Number* (RPN), dan menentukan komponen prioritas. ETA diaplikasikan untuk memodelkan skenario lanjutan dari kejadian awal serta menilai efektivitas pengendalian risiko. Hasil menunjukkan 14 mode kegagalan prioritas tinggi. Nilai RPN tertinggi terdapat pada impeller pompa sentrifugal. Analisis ETA menunjukkan bahwa kombinasi pengendalian teknik, administratif, dan APD mampu menurunkan probabilitas risiko lanjutan. Rekomendasi mencakup implementasi sensor deteksi dini dan perawatan preventif untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem IPAL.

Kata kunci: Bioetanol, ETA, FMEA, IPAL, dan RPN

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

Equipment Failure Analysis in the Anaerobic Process of a Bioethanol Industry Wastewater Treatment Plant Using FMEA and ETA Methods

Irina Kartika Utami

ABSTRACT

Damage to main equipment such as the lamella presettling, digester, blower, and lagoon in the anaerobic treatment process of the bioethanol industry wastewater treatment plant can reduce processing efficiency and increase the risk of environmental pollution. This study aims to analyze equipment failures using the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Event Tree Analysis (ETA) methods. The methods used include field observations, interviews with expert judgment, and the collection of historical equipment failure data from 2020 to 2025. FMEA is used to identify failure modes, calculate the Risk Priority Number (RPN), and determine priority components. ETA is applied to model the subsequent scenarios of the initial event and assess the effectiveness of risk control. The results show 14 high-priority failure modes. The highest RPN value is found in the centrifugal pump impeller. ETA analysis shows that a combination of engineering, administrative, and PPE controls can reduce the probability of residual risk. Recommendations include the implementation of early detection sensors and preventive maintenance to enhance the reliability and safety of the wastewater treatment system.

Keywords: *Bioethanol, ETA, FMEA, RPN, and WWTP*

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan.....	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Batasan Masalah.....	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Proses Produksi Bioetanol.....	9
2.1.1 Bahan Baku Produksi	10
2.1.2 Kelebihan dan Kekurangan Bioetanol	10
2.2 Proses Produksi Biogas	11
2.3 <i>Lamella Presettling</i>	13
2.4 <i>Presettling Tank</i>	16
2.5 <i>Cooling Tower</i>	17
2.6 <i>Anaerobic Digester (Continuous Stirred-Tank Reactor)</i>	19
2.7 <i>Degassing Pond</i>	21
2.8 <i>Lamella Digester</i>	22
2.9 <i>Pit Biomethane</i>	22
2.10 <i>Flare Stack</i>	23
2.11 <i>Root Blower</i>	25
2.12 <i>Lagoon</i>	26

2.13	Pompa Sentrifugal.....	26
2.14	Boiler	28
2.15	<i>Functional Block Diagram (FBD)</i>	30
2.16	<i>Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)</i>	31
2.16.1	<i>Risk Priority Number (RPN)</i>	33
2.16.2	Penentuan Komponen Kritis.....	34
2.16.3	Penggunaan Metode FMEA	34
2.16.4	Kelebihan dan Kekurangan Metode FMEA	35
2.17	<i>Event Tree Analysis</i>	36
2.18	Hubungan Antara Metode FMEA dan ETA	41
2.19	<i>Expert Judgment</i>	42
2.20	Pengendalian Risiko	42
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		45
3.1	Tahapan Pendahuluan	46
3.1.1	Identifikasi Masalah	46
3.1.2	Perumusan Masalah.....	47
3.2	Tahapan Pengumpulan Data	47
3.3	Tahapan Pengolahan Data.....	48
3.3.1	Pemilihan <i>Expert Judgment</i>	48
3.3.2	Deskripsi Proses <i>Biogas Plant</i>	49
3.3.3	Penyusunan <i>Functional Block Diagram (FBD)</i>	49
3.3.4	Penyusunan FMEA pada peralatan.....	49
3.3.5	Penentuan Komponen Kritis.....	50
3.3.6	Penyusunan <i>Event Tree Analysis (ETA)</i>	50
3.3.7	Rekomendasi Pengurangan Dampak	50
3.4	Tahapan Kesimpulan dan Saran	50
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		51
4.1	Deskripsi Proses Produksi	51
4.2	Pemilihan <i>Expert Judgment</i>	54
4.3	<i>Functional Block Diagram</i> Peralatan.....	55
4.4	<i>Failure Mode Effect Analysis (FMEA)</i>	67
4.4.1	<i>Failure Mode and Effect Analysis Lamella Presettling</i>	69

4.4.2	<i>Failure Mode and Effect Analysis Kolam Presettling</i>	72
4.4.3	<i>Failure Mode and Effect Analysis Cooling Tower</i>	74
4.4.4	<i>Failure Mode and Effect Analysis Anaerobic Bio Digester</i>	76
4.4.5	<i>Failure Mode and Effect Analysis Degassing Pond</i>	79
4.4.6	<i>Failure Mode and Effect Analysis Lamella Digester</i>	81
4.4.7	<i>Failure Mode and Effect Analysis Pit Biomethane</i>	84
4.4.8	<i>Failure Mode and Effect Analysis Lagoon</i>	86
4.4.9	<i>Failure Mode and Effect Analysis Flare Stack</i>	88
4.4.10	<i>Failure Mode and Effect Analysis Boiler</i>	90
4.5	<i>Event Tree Analysis (ETA)</i>	92
4.5.1	<i>Event Tree Analysis Flocculation Tank</i>	93
4.5.2	<i>Event Tree Analysis Impeller Pompa</i>	95
4.5.3	<i>Event Tree Analysis Beton Kolam Presettling</i>	98
4.5.4	<i>Event Tree Analysis Motor Cooling Tower</i>	100
4.5.5	<i>Event Tree Analysis Mechanical Seal Pompa</i>	103
4.5.6	<i>Event Tree Analysis Shaft Agitator Digester</i>	105
4.5.7	<i>Event Tree Analysis Safety Valve Blower</i>	108
4.5.8	<i>Event Tree Analysis Main Vessel Degassing Pond</i>	110
4.5.9	<i>Event Tree Analysis Valve Wastewater Inlet</i>	113
4.5.10	<i>Event Tree Analysis Beton Kolam Pit Biomethane</i>	115
4.5.11	<i>Event Tree Analysis Cover Lagoon</i>	118
4.5.12	<i>Event Tree Analysis Flare Stack Body</i>	121
4.5.13	<i>Event Tree Analysis Outer Gasket Boiler</i>	123
4.6	<i>Rekomendasi</i>	126
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		133
5.1	<i>Kesimpulan</i>	133
5.2	<i>Saran</i>	133
DAFTAR PUSTAKA		135
LAMPIRAN 1 DATA KEGAGALAN PERALATAN		143
LAMPIRAN 2 DATA KOMPONEN		151
LAMPIRAN 3 FORM EXPERT JUDGMENT		161
LAMPIRAN 4 WORKSHEET FMEA		167

LAMPIRAN 5 GAMBAR KOMPONEN FMEA TERTINGGI	217
LAMPIRAN 6 DIAGRAM ETA	223
LAMPIRAN 7 DOKUMENTASI <i>EXPERT JUDGMENT</i>	233
BIOGRAFI PENULIS	237

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Worksheet</i> FMEA.....	31
Tabel 2. 2 Kriteria Tingkat Keparahan (S).....	32
Tabel 2. 3 Tingkat Kemungkinan Terjadi (O)	32
Tabel 2. 4 Tingkat Deteksi Kejadian (D).....	33
Tabel 4. 1 Kandungan <i>Spentless</i>	52
Tabel 4. 2 Kandungan <i>Spentwash</i>	52
Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan	57
Tabel 4. 4 FMEA Komponen Tertinggi <i>Lamella Presettling</i>	69
Tabel 4. 5 FMEA Komponen Tertinggi Kolam <i>Presettling</i>	72
Tabel 4. 6 FMEA Komponen Tertinggi <i>Cooling Tower</i>	74
Tabel 4. 7 FMEA Komponen Tertinggi <i>Anaerobic Bio Digester</i>	76
Tabel 4. 8 FMEA Komponen Tertinggi <i>Degassing Pond</i>	79
Tabel 4. 9 FMEA Komponen Tertinggi <i>Lamella Digester</i>	81
Tabel 4. 10 FMEA Komponen Tertinggi <i>Pit Biomethane</i>	84
Tabel 4. 11 FMEA Komponen Tertinggi <i>Lagoon</i>	86
Tabel 4. 12 FMEA Komponen Tertinggi <i>Flare Stack</i>	88
Tabel 4. 13 FMEA Komponen Tertinggi Boiler.....	90
Tabel 4. 14 Hasil Rekomendasi	128

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Data Kegagalan Alat Area Anaerobik 2024.....	2
Gambar 2. 1 Komponen <i>Lamella Presettling</i>	14
Gambar 2. 2 <i>Presettling Tank</i>	16
Gambar 2. 3 Komponen <i>Cooling Tower</i>	18
Gambar 2. 4 Komponen <i>Anaerobik Digester</i>	20
Gambar 2. 5 Komponen <i>Degassing Pond</i>	21
Gambar 2. 6 <i>Pit Biomethan</i>	23
Gambar 2. 7 Komponen <i>Flare Stack</i>	24
Gambar 2. 8 Komponen <i>Roots Blower</i>	25
Gambar 2. 9 Komponen Pompa	27
Gambar 2. 10 Komponen Boiler	29
Gambar 2. 11 Konsep ETA	38
Gambar 2. 12 Probabilitas ETA	39
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian	45
Gambar 4. 1 PFD <i>Anaerobic Plant</i>	53
Gambar 4. 2 FBD Anaerobik IPAL	55
Gambar 4. 3 Bagian Proses ETA <i>Flocculation Tank</i>	93
Gambar 4. 4 Bagian Proses ETA <i>Impeller Pompa</i>	95
Gambar 4. 5 Bagian Proses ETA Beton Kolam <i>Presettling</i>	98
Gambar 4. 6 Bagian Proses ETA Motor <i>Cooling Tower</i>	100
Gambar 4. 7 Bagian Proses ETA <i>Mechanical Seal Pompa</i>	103
Gambar 4. 8 Bagian Proses ETA <i>Shaft Agitator Digester</i>	105
Gambar 4. 9 Bagian Proses ETA <i>Safety Valve Blower</i>	108
Gambar 4. 10 Bagian Proses ETA <i>Main Vessel</i>	110
Gambar 4. 11 Bagian Proses ETA <i>Valve Wastewater Inlet</i>	113
Gambar 4. 12 Bagian Proses ETA Beton Kolam <i>Pit Biomethane</i>	115
Gambar 4. 13 Bagian Proses ETA <i>Cover Lagoon</i>	118
Gambar 4. 14 Bagian Proses ETA <i>Flare Stack Body</i>	121
Gambar 4. 15 Bagian Proses ETA <i>Outer Gasket Boiler</i>	123

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

BAB 1

PENDAHULUAN

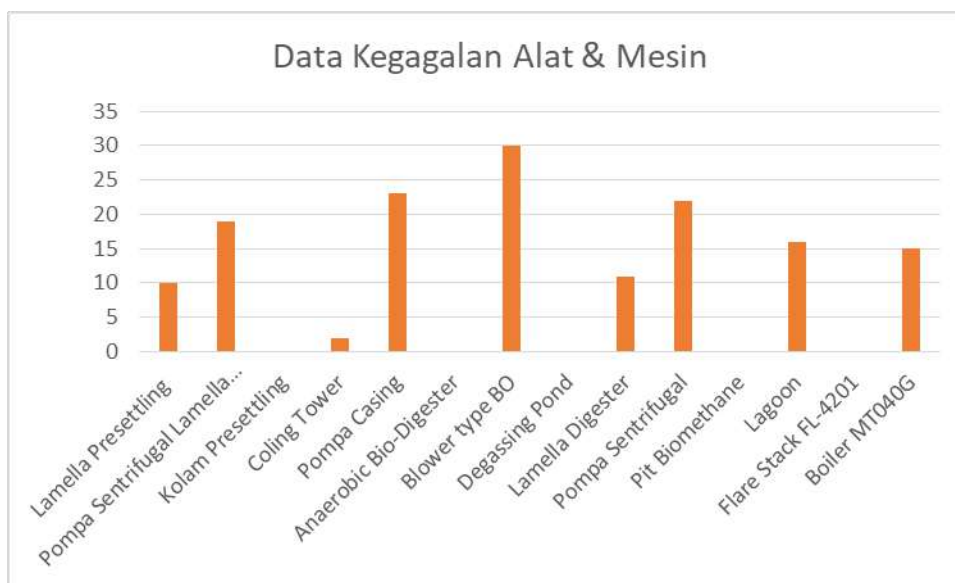
1.1 Latar Belakang

Meningkatnya kesadaran akan dampak negatif bahan bakar fosil mendorong pengembangan industri bioetanol sebagai alternatif energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan menurut PGN LNG Indonesia (2023). Meskipun demikian, produksi bioetanol masih menghadapi berbagai tantangan, salah satunya adalah pengelolaan limbah *spentwash* yang bersifat korosif dan berpotensi mencemari lingkungan. Untuk mengatasi masalah ini, industri bioetanol mengadopsi sistem pengolahan limbah anaerobik yang nantinya dari limbah *spentwash* tersebut akan menghasilkan biogas sebagai sumber energi terbarukan, dengan melibatkan peralatan utama seperti *lamella presettling*, kolam *presettling*, *cooling tower*, *anaerobic digester*, *degassing pond*, *lagoon* dan lainnya.

Masing-masing alat memiliki fungsi yang sangat penting dalam pengolahan limbah secara bertahap. Misalnya, *lamella presettling* digunakan untuk memisah partikel padat dari *spentwash* sebelum masuk ke tahapan anaerobik. *Cooling tower* digunakan sebagai alat untuk menyesuaikan suhu limbah, sementara *anaerobic digester* digunakan sebagai tempat proses untuk menghasilkan biogas dengan bantuan mikroorganisme. Sayangnya, berdasarkan data internal perusahaan peralatan yang digunakan sering mengalami kerusakan yang tidak hanya mengganggu efisiensi proses pengolahan limbah, tetapi juga berpotensi menimbulkan risiko terhadap lingkungan serta keselamatan kerja (Industri Bioetanol, 2024)

Spentwash, limbah cair yang dihasilkan dari proses produksi bioetanol, memiliki sifat korosif yang sangat tinggi akibat kandungan asamnya yang tinggi. Sifat korosif ini dapat merusak peralatan produksi, pipa, dan infrastruktur lainnya secara signifikan, sehingga meningkatkan biaya perawatan dan mengurangi umur pakai peralatan. Selain itu, jika tidak dikelola dengan baik, *spentwash* yang bocor dapat mencemari lingkungan

sekitar. Limbah ini dapat meresap ke dalam tanah, mencemari sumber air tanah, dan bahkan mengalir ke sungai. Akibatnya, kualitas air sungai akan menurun drastis, mengancam ekosistem perairan, dan membahayakan kesehatan masyarakat yang mengonsumsi air atau memanfaatkan sungai untuk berbagai keperluan. Kandungan polutan dalam *spentwash*, seperti senyawa organik beracun dan logam berat, dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan pada manusia, mulai dari gangguan pencernaan hingga penyakit kronis (Industri Bioetanol, 2024)



Gambar 1. 1 Data Kegagalan Alat Area Anaerobik 2024

Meskipun sistem ini telah membantu mengatasi permasalahan limbah, kerusakan pada peralatan tetap sering terjadi, terutama pada blower, pompa casing, pompa sentrifugal, *lagoon*, dan boiler. Berdasarkan gambar 1.2 didapati bahwa alat blower memiliki total kegagalan yang paling tinggi dibandingkan alat maupun komponen lain. Kebocoran, kerusakan struktural, dan gangguan operasional lainnya pada peralatan sering kali menghambat proses pengolahan limbah dan dapat menurunkan kualitas biogas yang dihasilkan menurut Industri Bioetanol (2024). Jika pola dari grafik data kegagalan alat ini masih berlanjut hingga beberapa tahun kedepan, hal ini dapat menyebabkan menurunnya persentase kandungan hasil biogas yang diproduksi pada proses anaerobik. Kondisi ini diperparah oleh pendekatan pemeliharaan yang dilakukan oleh perusahaan saat ini hanya menerapkan *corrective maintenance*, di mana perbaikan dilakukan

setelah terjadi kerusakan, hal ini menjadi kelemahan signifikan karena kegagalan yang tidak terduga dapat menyebabkan gangguan operasional dan menimbulkan biaya besar.

Berdasarkan hasil data kegagalan alat, juga perusahaan saat ini masih menggunakan Identifikasi Bahaya Penilaian Risiko (IBPR) sebagai identifikasi bahaya, sedangkan IBPR belum dapat digunakan untuk menganalisis kerusakan pada peralatan secara detail, dan diperkuat dengan data insiden yang telah terjadi, metode *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) dan *Event Tree Analysis* (ETA) cocok digunakan karena metode ini memungkinkan identifikasi secara sistematis terhadap berbagai mode kegagalan yang terjadi pada komponen peralatan untuk proses anaerobik, seperti kebocoran pada dinding, kerusakan pada motor penggerak, *overheating* atau aus dan sebagainya. Implementasi FMEA sangat penting untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dan merencanakan *preventive maintenance* yang efektif.

Kiran (2017) menjelaskan bahwa FMEA adalah metode manajemen risiko untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dalam sistem beserta penyebab dan dampaknya, memungkinkan pencegahan sebelum kegagalan terjadi. *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) membantu mengidentifikasi mode kegagalan dengan menghitung tingkat risiko melalui *Risk Priority Number* (RPN). Menurut Ivančan (2023) RPN ini menjadi dasar untuk menentukan prioritas perbaikan, di mana mode kegagalan dengan RPN tertinggi menjadi fokus utama untuk mitigasi. Setelah nilai RPN dihitung, langkah selanjutnya adalah mengurutkan mode kegagalan berdasarkan RPN dari yang terbesar hingga terkecil, untuk menentukan prioritas perbaikan. Setelah mode kegagalan telah teridentifikasi, *Event Tree Analysis* (ETA) digunakan untuk mengevaluasi berbagai skenario kejadian yang dapat terjadi setelah suatu kejadian awal atau insiden terjadi. Söderholm (2024) menjelaskan dalam ETA, kejadian awal dianggap sebagai "titik awal," dan setiap cabang pada pohon kejadian mewakili kemungkinan respons atau kondisi berikutnya yang bisa muncul dari titik awal ini. Selain menentukan apakah suatu kejadian risiko dapat dikelola atau

tidak, ETA juga berguna untuk memodelkan risiko sisi atas (*up-side risk*), yaitu risiko yang muncul ketika peluang tidak dimanfaatkan dengan baik, yang meliputi peluang atau hasil positif yang mungkin diraih. Dalam analisis risiko sisi atas, ETA dapat membantu mengevaluasi apakah peluang tersebut dapat dicapai melalui penerapan strategi atau tindakan yang telah direncanakan sebelumnya. Menurut Alijoyo (2022) pendekatan ini memungkinkan penggunaan strategi protektif maupun preventif dalam menghadapi berbagai skenario risiko yang potensial. Kombinasi kedua metode ini sangat relevan untuk menganalisis kegagalan peralatan pada sistem anaerobik. FMEA memberikan identifikasi awal dan penentuan prioritas kegagalan, sedangkan ETA membantu mengevaluasi dampak lanjutan dari kegagalan tersebut secara menyeluruh. Pendekatan ini memungkinkan perusahaan dapat melakukan langkah preventif dan protektif secara efektif, mencegah kerusakan yang berulang, serta menjaga efisiensi dan keandalan sistem pengolahan limbah pada industri bioetanol.

Penelitian sebelumnya telah banyak menggunakan metode FMEA dan ETA dalam konteks industri yang berbeda. Kemal (2024) menganalisis risiko kegagalan pada *tower crane* dan menemukan 22 komponen kritis dengan nilai RPN tertinggi pada *slewing mechanism*. Penelitian ini menghasilkan rekomendasi mitigasi berbasis hierarki pengendalian. Sementara itu, Triwulandari (2019) mengkaji risiko pelepasan gas hidrogen pada *Hydrogen storage* di fasilitas pengolahan gas, menunjukkan bahwa risiko tertinggi terjadi pada kegagalan vessel gas hidrogen. Sulaksono (2018) menganalisis potensi kebocoran biogas pada *biogas plant*, mengidentifikasi delapan komponen berisiko tinggi, dengan skenario yang mencakup *jet fire*, *flash fire*, dan VCE.

Caminschi & Dorogaia (2023) menjelaskan bahwa manajemen risiko adalah proses untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengelola risiko melalui penerapan berbagai metode dan teknik untuk meminimalkan dampak kejadian yang merugikan. Urgensi penelitian ini terletak pada pentingnya memahami secara mendalam akar penyebab kegagalan pada seluruh peralatan dalam proses anaerobik industri bioetanol. Melalui

analisis yang sistematis dengan metode FMEA dan pengukuran menggunakan RPN, selanjutnya *Event Tree Analysis* (ETA) digunakan untuk mengevaluasi skenario lanjutan dari kegagalan yang teridentifikasi, memberikan pandangan menyeluruh terhadap dampak risiko dan rekomendasi teknis. Penelitian ini diharapkan dapat mengurangi risiko kegagalan berulang serta meningkatkan efisiensi proses pengolahan limbah, yang pada akhirnya mendukung keberlanjutan operasional dan keselamatan kerja di industri bioetanol. Metode pengendalian risiko meliputi eliminasi dengan menghilangkan sumber bahaya, substitusi dengan mengganti proses atau bahan berisiko tinggi dengan alternatif yang lebih aman, serta rekayasa teknik melalui modifikasi alat, mesin, atau lingkungan. Selain itu, upaya pengendalian risiko juga dilakukan secara administratif, seperti penerapan prosedur, aturan keselamatan, dan pelatihan, serta penggunaan alat pelindung diri (APD) seperti *helm*, masker, dan sepatu *safety* yang sesuai dengan jenis pekerjaan. Penerapan metode pengendalian risiko ini diharapkan tidak hanya mendukung kelancaran operasional tetapi juga memperkuat aspek keselamatan di lingkungan kerja menurut (Hastin Nuraini (2022), dari permasalahan yang telah dijelaskan pada latar belakang. Oleh karena itu, penulis memilih topik tugas akhir ini untuk mengidentifikasi dan menganalisis penyebab kegagalan pada seluruh peralatan menggunakan metode FMEA, ETA, dan pada tahapan terakhir penelitian ini akan memberikan rekomendasi yang sesuai berdasarkan hierarki pengendalian yang telah ditentukan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana hasil nilai RPN pada kegagalan peralatan proses anaerob industri bioetanol dengan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)?
2. Bagaimana hasil dari penentuan skenario dari penyebab kegagalan peralatan pada proses anaerob industri bioetanol dengan menggunakan metode *Event Tree Analysis* (ETA)?

3. Bagaimana rekomendasi pengendalian yang tepat untuk penyebab dari kegagalan peralatan pada proses anaerob industri bioetanol?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan yang akan dibahas dalam penelitian ini, yaitu:

1. Menentukan potensi bahaya tertinggi berdasarkan hasil nilai RPN pada kegagalan peralatan pada proses anaerob industri bioetanol dengan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA).
2. Menentukan skenario dari penyebab kegagalan peralatan pada proses anaerob industri bioetanol dengan menggunakan metode *Event Tree Analysis* (ETA).
3. Menentukan upaya pengendalian yang dengan berdasarkan hierarki pengendalian.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian di atas, maka manfaat yang diperoleh dari penelitian ini, sebagai berikut:

1. Bagi Penulis

Manfaat yang didapat bagi penulis yaitu dapat mengaplikasikan ilmu yang telah diterima selama perkuliahan dan ilmu yang diterima setelah melakukan *on the job training* (OJT) selama 4 bulan, serta dapat mengimplementasikan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Event Tree Analysis* (ETA) pada kegagalan peralatan pada proses anaerob.

2. Bagi Perusahaan

Manfaat yang didapat bagi perusahaan dari hasil penelitian ini, yaitu dapat mengetahui penyebab kegagalan pada peralatan proses anaerobik dan mengetahui upaya pengendalian yang dengan berdasarkan hierarki pengendalian.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah ini digunakan agar peneliti dapat lebih fokus dalam penelitiannya, berikut batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir.

1. Penelitian ini hanya menggunakan komponen dengan nilai RPN tertinggi dari setiap peralatan sebagai dasar analisis skenario menggunakan metode ETA
2. Penelitian ini tidak menghitung dan menyebutkan anggaran biaya *maintenance* pada peralatan.
3. Penelitian ini hanya akan membahas proses pengolahan dari *spenwash*

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Produksi Bioetanol

Produksi bioetanol melibatkan beberapa tahapan utama yang umumnya serupa, meskipun dapat bervariasi tergantung pada jenis bahan baku yang digunakan serta kondisi proses seperti suhu, tekanan, dan jenis mikroorganisme yang terlibat. Tahapan dasar dalam produksi bioetanol meliputi *pretreatment*, hidrolisis, fermentasi dan distilasi (Bajpai, 2013)

Pretreatment adalah tahap penting dalam proses produksi bioetanol, khususnya dari bahan lignoselulosa, karena bertujuan untuk mempermudah pemecahan struktur tanaman menjadi gula sederhana. Metode ini bisa dilakukan secara fisik, kimia, maupun biologis, dan sering kali saling bergantung satu sama lain. Hidrolisis adalah proses pemecahan selulosa dan hemiselulosa menjadi gula sederhana untuk difermentasi menjadi bioetanol. Metode yang umum digunakan adalah hidrolisis asam dan enzimatik. Hidrolisis asam, baik encer maupun pekat, efektif namun bisa menghasilkan senyawa penghambat fermentasi jika tidak dikontrol dengan baik. Hidrolisis enzimatik lebih ramah lingkungan dan selektif, meski membutuhkan waktu lebih lama dan kondisi khusus. Keberhasilan tahap ini sangat bergantung pada jenis bahan baku dan *pretreatment* sebelumnya (Bajpai, 2013).

Proses fermentasi dalam produksi bioetanol mengubah gula hasil hidrolisis biomassa menjadi etanol menggunakan mikroorganisme seperti ragi. Ada beberapa metode fermentasi, antara lain: Hidrolisis dan Fermentasi Terpisah (SHF), di mana hidrolisis dan fermentasi dilakukan dalam dua tahap terpisah; Sakarifikasi dan Fermentasi Simultan (SSF), yang menggabungkan keduanya dalam satu tahap untuk efisiensi lebih tinggi; dan Sakarifikasi dan Ko-fermentasi Simultan (SSCF), yang memungkinkan fermentasi beberapa jenis gula sekaligus. SSF dan SSCF lebih efisien karena mengurangi waktu dan energi yang dibutuhkan, dengan mikroorganisme rekombinan mampu memfermentasi gula C5 dan C6 secara bersamaan. Proses ini bertujuan mengubah gula menjadi etanol dengan kontrol yang

ketat terhadap suhu dan pH untuk mengoptimalkan hasil menurut Bajpai (2013). Tahap distilasi bertujuan untuk memisahkan etanol dari campuran gas yang keluar dari reaktor sehingga diperoleh produk dengan kemurnian tertentu.

2.1.1 Bahan Baku Produksi

Salah satu keunggulan bioetanol adalah keragaman bahan baku yang sangat banyak, dan bukan hanya tanaman, yang dapat digunakan untuk memproduksinya. Metode produksinya bervariasi, tergantung pada apakah bahan baku tersebut kaya serat atau tidak. Bahan dasar untuk memproduksi biofuel harus memiliki ciri-ciri tertentu, termasuk konsentrasi karbon dan hidrogen yang tinggi serta konsentrasi oksigen, nitrogen, dan komponen organik lainnya yang rendah. Berikut ini adalah beberapa bahan baku terpenting yang cocok untuk digunakan dalam produksi bioetanol, bahan baku yang kaya akan kandungan gula, pati, dan bahan selulosa (Bajpai, 2013)

2.1.2 Kelebihan dan Kekurangan Bioetanol

Bioetanol adalah bahan bakar alternatif yang menawarkan sejumlah kelebihan, terutama dari sisi lingkungan dan efisiensi mesin. Bahan ini mudah terurai di alam, menghasilkan emisi yang lebih bersih, serta memiliki tingkat racun yang rendah. Etanol juga fleksibel karena dapat dicampur dengan bensin dalam berbagai kadar, baik sebagai campuran tambahan maupun bahan bakar utama. Dengan nilai oktan yang tinggi, etanol membantu meningkatkan performa mesin dan mengurangi risiko kerusakan akibat pembakaran tidak sempurna. Selain itu, pembakarannya yang lebih dingin membuat mesin tidak membutuhkan pendinginan berlebih. Secara keseluruhan, bioetanol lebih ramah lingkungan dan berpotensi mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Bajpai, 2013).

Campuran bioetanol dan bensin memiliki beberapa kelemahan, terutama dalam penyimpanan, transportasi, dan penggunaan. Etanol mudah menyerap air, sehingga berisiko

menyebabkan pemisahan fase dalam tangki bahan bakar, yang bisa merusak mesin. Masa simpannya juga lebih pendek dan membutuhkan stabilizer. Selain itu, etanol bersifat korosif terhadap logam tertentu dan dapat merusak komponen kendaraan seperti selang, segel, atau tangki berbahan plastik atau *fiberglass*. Karena tidak bisa dikirim lewat pipa seperti bensin, distribusinya harus menggunakan truk atau kereta, yang lebih mahal. Etanol juga dapat melarutkan endapan dalam sistem bahan bakar lama, menyumbat filter, serta memengaruhi kinerja mesin jika tidak disesuaikan. Campuran etanol-bensin juga bisa memperluas area kontaminasi jika tumpah karena kelarutannya yang tinggi dalam air, dan meskipun emisi CO₂ lebih rendah, emisi NO_x dan VOC bisa meningkat, yang berpotensi memperburuk kualitas udara (Jia *et al.*, 2005).

2.2 Proses Produksi Biogas

Biogas adalah salah satu bentuk bioenergi yang berkembang pesat karena mampu mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Biogas dihasilkan melalui proses pencernaan anaerobik (AD) dari berbagai limbah organik seperti residu pertanian, limbah industri makanan, limbah kota, dan kotoran hewan. Ghassan Alsultan (2023) menjelaskan bahwa proses ini menghasilkan gas yang dapat digunakan untuk listrik, panas, atau sebagai bahan bakar alternatif, serta menghasilkan digestate yang bisa dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Biogas dihasilkan melalui penguraian biomassa oleh bakteri dalam kondisi tanpa oksigen (anaerob), biasanya di instalasi biogas. Bahan bakunya dapat berasal dari limbah pertanian (seperti kotoran ternak dan sisa panen), limbah rumah tangga dan kota (seperti sampah organik dan makanan kedaluwarsa), serta limbah industri (seperti gliserin dan sisa pengolahan makanan). Proses ini menghasilkan biogas yang mengandung metana (50–75%) dan karbon dioksida (25–50%), dengan sedikit air, oksigen, dan hidrogen sulfida.

Menurut Wellinger (2013) setelah diproses, biogas dapat diubah menjadi *biomethane* berkadar metana tinggi (sekitar 98%) yang memiliki

sifat setara gas alam. Biogas bisa digunakan untuk menghasilkan listrik dan panas, atau sebagai bahan bakar kendaraan. Karena fleksibel dan dapat disimpan, biogas menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang potensial. Selain itu, biogas juga bisa digunakan untuk menggantikan senyawa karbon dalam produk plastik. Meski masih ada perdebatan soal peran biogas dalam pasokan energi berkelanjutan, potensinya sangat besar baik dari limbah organik yang belum dimanfaatkan maupun dari tanaman energi yang bisa dibudidayakan.

Proses produksi biogas menggunakan cara anaerobik (tanpa bantuan udara), dimana bakteri yang digunakan bekerja dengan cara menguraikan bahan organik yang berada dalam lingkungan tanpa bantuan oksigen. Dalam proses ini, bakteri bekerja secara alami dan optimal guna untuk memecah bahan organik dan juga akan menghasilkan biogas yang terdiri dari pencampuran antara gas metana dan karbon dioksida. Bahan seperti vinasse, kotoran ternak, feses, jerami, dan sekam dapat diolah menjadi biogas. Efektivitas proses dipengaruhi oleh kandungan padatan, pH, dan suhu (Karellas *et al.*, 2010)

Metana diproduksi sebagai bahan bakar fosil yang tidak terbarukan selama ribuan bahkan jutaan tahun, seiring berjalannya waktu metana (CH_4) yang merupakan suatu unsur gas digunakan sebagai penentu sebuah kualitas biogas yang merupakan energi terbarukan, jika biogas mempunyai kadar persentase metan yang tinggi maka biogas tersebut memiliki nilai kalor yang tinggi. Biogas yang diproses dari fermentasi suatu limbah organik tidak memiliki kandungan gas yang 100% dapat terbakar. Burke (2001) menerangkan bahwa produk biogas terdiri dari metana (CH_4) 55-75%, karbondioksida (CO_2) 25-45%, nitrogen (N_2) 0-0,3%, hidrogen (H_2) 1—5%, hidrogen sulfida (H_2S) 0-3%, oksigen (O_2) 0,1-0,5%, dan uap air. Dari semua unsur tersebut gas metana (CH_4) dan karbondioksida (CO_2) merupakan penentu kualitas suatu biogas (Wellinger *et al.*, 2013).

Bonatto (2024) menjelaskan mengenai Hidrogen sulfida yang merupakan salah satu polutan utama yang dimiliki oleh biogas, biasanya konsentrasi H_2S berkisar antara 0,1 hingga 3%. Rashed Al Mamun & Torii (2015) Hidrogen Sulfida merupakan jenis gas yang tidak berwarna, sangat beracun, dan juga mudah terbakar. Gas ini mempunyai bau khas yang mirip dengan telur busuk dan dapat terdeteksi pada konsentrasi rendah mulai dari 0,5 ppb. H_2S merupakan gas asam yang beracun, yang dapat menyebabkan kerusakan pada pipa dan mesin yang berada di industri biogas, selain itu jika manusia terpapar langsung oleh gas hidrogen sulfida dan alam jangka waktu yang bertahap, paparan gas ini dapat menyebabkan efek samping yang cukup parah bagi manusia. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengurangi persentase kadar H_2S dari industri biogas agar dapat digunakan sebagai sumber energi lebih lanjut yang aman.

2.3 *Lamella Presettling*

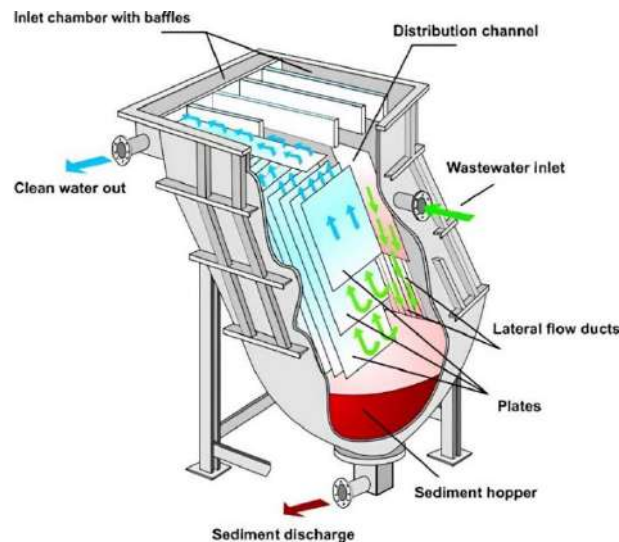
Lamella presettling adalah sistem pengolahan air limbah yang efektif, banyak digunakan di berbagai industri, termasuk pertambangan, metal finishing, dan bioetanol. Sistem ini memanfaatkan pelat miring atau *lamella plate* yang berfungsi sebagai *clarifier* untuk meningkatkan efisiensi pemisahan partikel padat dari air limbah. Pelat-pelat ini, biasanya terbuat dari logam atau PVC, disusun dengan kemiringan 30 derajat, memungkinkan partikel mengendap secara optimal ke dasar tangki karena gravitasi, sementara air jernih mengalir ke atas untuk proses pengolahan berikutnya. Fungsi utama *lamella presettling* dalam industri bioetanol adalah memisahkan partikel tersuspensi dan meningkatkan kejernihan air limbah pada tahap pengolahan primer, menggantikan tangki sedimentasi konvensional, menyediakan area pengendapan yang lebih luas, serta mengurangi kebutuhan ruang dan energi (Industri Bioetanol, 2024).

Sistem ini juga memiliki keunggulan dalam efisiensi energi, karena tidak memiliki bagian bergerak yang membutuhkan daya listrik, dan proses tertutupnya mengurangi pertumbuhan lumut. Kinerjanya dapat ditingkatkan

dengan menambahkan koagulan atau flokulan untuk mempercepat pengendapan partikel kecil, sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan.

2.3.1 Komponen *Lamella Presettling*

Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai setiap komponen dari *Lamella Presettling* berdasarkan gambar 2.2



Gambar 2. 1 Komponen *Lamella Presettling*

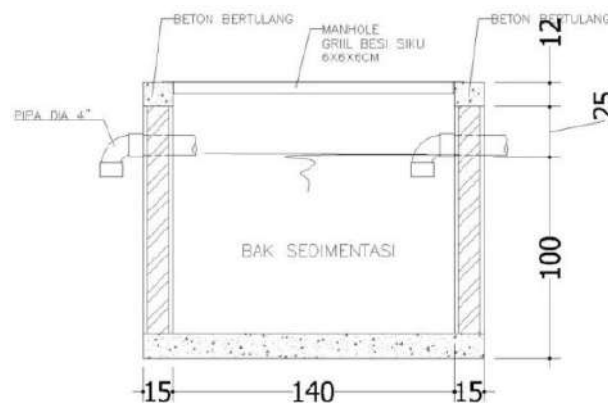
Sumber: Technologies (2024)

- 1) *Wastewater Inlet* (Saluran Masuk Air Limbah): Berfungsi sebagai tempat masuknya limbah spentwash ke dalam sistem *Lamella Presettling*. Melalui saluran ini, limbah *spentwash* dari proses produksi bioetanol dialirkan ke alat, biasanya melalui pipa atau saluran dengan tekanan tertentu. Saluran masuk ini menghubungkan limbah *spentwash* dengan alat, memastikan suplai limbah yang konsisten ke dalam ruang inlet.
- 2) *Inlet Chamber with Baffles* (Ruang Masuk dengan *Baffle*): Berfungsi sebagai tempat pertama limbah *spentwash* memasuki alat *Lamella Presettling*. *Baffle* di dalamnya berfungsi untuk mengarahkan dan menenangkan aliran limbah *spentwash* yang masuk. Dengan mengurangi turbulensi, *baffle* membantu menciptakan aliran yang lebih stabil, sehingga partikel padat di dalam air limbah dapat mengendap lebih efektif saat melewati pelat *lamella*. Ini juga mencegah partikel-partikel halus terbawa arus langsung ke saluran keluar air bersih.

- 3) *Distribution Channel* (Saluran Distribusi): Setelah melewati ruang masuk, air limbah bergerak ke saluran distribusi. Saluran ini berperan dalam mendistribusikan aliran air limbah secara merata ke seluruh pelat *lamella* di dalam unit. Penyebaran yang merata ini memastikan setiap pelat *lamella* dapat berfungsi secara optimal, sehingga partikel-partikel tersuspensi memiliki kesempatan yang sama untuk mengendap di seluruh area *lamella*.
- 4) *Lateral Flow Ducts* (Saluran Aliran Lateral): Berfungsi mengatur aliran limbah *spentwash* secara lateral (samping) di sepanjang pelat *lamella*. Dengan mengarahkan aliran secara lateral, *lamella presettling* memanfaatkan seluruh permukaan pelat *lamella* untuk menangkap dan menahan partikel yang lebih berat sehingga dapat mengendap. Aliran lateral juga membantu mencegah partikel tersuspensi melewati pelat secara langsung tanpa mengendap.
- 5) *Plates* (Pelat *Lamella*): Pelat *lamella* adalah inti dari *lamella presettling*, dirancang dalam posisi miring dengan sudut sekitar 30 derajat. Biasanya terbuat dari logam atau PVC, pelat ini disusun dalam serangkaian lapisan berjarak yang memungkinkan limbah *spentwash* mengalir di antaranya. Karena pelat-pelat ini dipasang miring, partikel-partikel padat yang lebih berat dapat menempel dan mengendap pada permukaan pelat, kemudian bergerak turun ke bagian bawah karena gravitasi. Kemiringan pelat memperbesar area pengendapan tanpa memerlukan ruang yang luas, menjadikannya lebih efisien dibandingkan tangki sedimentasi konvensional.
- 6) *Sediment Hopper* (Penampung Sedimen): Terletak di dasar *lamella presettling* dan berfungsi sebagai wadah untuk mengumpulkan partikel padat yang telah mengendap dari pelat *lamella*. Ketika partikel-partikel ini menumpuk, mereka akan terkumpul di bagian dasar penampung sedimen sebagai lumpur yang nantinya akan disalurkan menuju *lagoon*.

- 7) *Sediment Discharge* (Saluran Pembuangan Sedimen): Saluran ini adalah jalur keluarnya lumpur yang telah mengendap dan terkumpul di *sediment hopper* yang nantinya akan menuju *lagoon*. Sedimen atau lumpur dikeluarkan secara berkala melalui saluran ini dengan membuka katup penguras. Pengurasan ini penting untuk menjaga kapasitas penampung sedimen, mencegah penumpukan berlebih yang dapat mengganggu proses pengendapan.
- 8) *Clean Water Out* (Saluran Keluar Air Bersih): Setelah melalui proses pengendapan, limbah *spentwash* yang telah bersih (telah terpisah dari partikel-partikel padat) akan mengalir ke atas, melewati lapisan pelat *lamella*, dan keluar melalui saluran ini. Saluran keluar ini biasanya menggunakan metode *weir* (batas tinggi air), yang menjaga aliran limbah *spentwash* tetap stabil dan mencegah limbah *spentwash* terkontaminasi sedimen kembali masuk. Limbah *spentwash* yang keluar dari saluran ini selanjutnya diarahkan menuju kolam *presettling*.

2.4 Presettling Tank



Gambar 2. 2 *Presettling Tank*
Sumber: Ratnawati (2014)

Kolam *presettling*, atau bak pengendap, adalah salah satu komponen penting dalam pengolahan air limbah. Kolam ini berfungsi untuk memisahkan partikel tersuspensi (*Total Suspended Solids* atau TSS) dari air limbah melalui mekanisme pengendapan gravitasi. Dalam proses ini, air limbah yang mengandung partikel padat masuk ke dalam kolam

presettling, di mana partikel dengan berat jenis lebih besar dari air akan mengendap di dasar kolam, sementara partikel yang lebih ringan akan mengapung di permukaan (Shengbao *et al.*, 2015)

Kolam *presettling* dirancang untuk meminimalkan turbulensi agar partikel dapat mengendap dengan baik. Dua elemen penting dalam desainnya adalah konfigurasi pada bagian masuk dan keluar, karena turbulensi di area tersebut dapat mengganggu proses pengendapan. Partikel yang mengendap di dasar kolam akan membentuk lumpur (*sludge*), yang tidak mudah terurai secara biologis. Akibatnya, lumpur akan terus menumpuk di dasar hingga perlu dikeluarkan, biasanya melalui katup lumpur (*mud valve*) untuk dibuang ke saluran pembuangan atau ke kolam pengeringan (Jeffrey Pierce *et al.*, 1998)

Selain fungsi utamanya sebagai tempat pengendapan, kolam *presettling* juga digunakan untuk menambahkan nutrisi ke dalam limbah menggunakan bahan seperti *diammonium sulfat* dan urea. Nutrisi ini membantu proses pengolahan lanjutan, terutama dalam tahapan biologis. Kolam ini umumnya terbuat dari beton untuk memastikan ketahanan terhadap korosi dan daya tahan dalam jangka panjang. Kondisi operasional kolam dijaga pada suhu antara 32 hingga 35 °C dan pH sekitar 4, dengan kapasitas *volume* rata-rata sekitar (Industri Bioetanol, 2024).

2.5 Cooling Tower

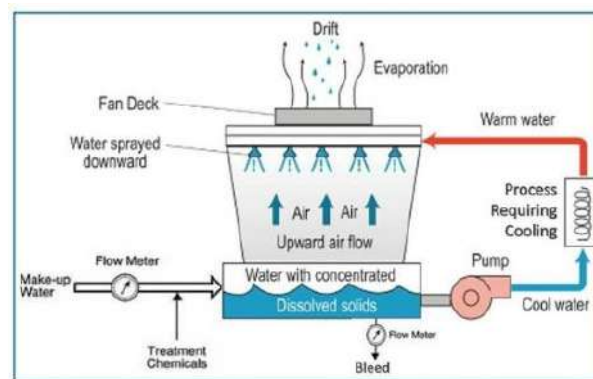
Cooling tower adalah alat yang dirancang untuk mendinginkan air dengan cara menghilangkan panas melalui kontak langsung dengan udara. Ketika air menguap, panas yang tersimpan di dalamnya dilepaskan, sehingga suhu air yang tersisa menjadi lebih rendah (Industri Bioetanol, 2024).

Cooling tower umumnya dibangun dari bahan seperti kayu, logam, atau beton, dengan komponen pengemas dari kayu atau plastik untuk mendistribusikan aliran air secara merata. Proses pendinginan dilakukan dengan bantuan kipas atau blower, yang dapat menghisap atau memaksa udara masuk dan keluar dari menara. Sebagian air yang melewati *cooling tower* akan menguap, meninggalkan zat padat yang terkandung dalam air

tersebut. Hal ini menyebabkan peningkatan konsentrasi zat padat dalam air yang tersisa, sehingga pengelolaan kualitas air menjadi penting untuk menjaga efisiensi sistem menurut Parkash (2003). *Cooling tower* biasanya dilengkapi dengan pompa sentrifugal untuk memastikan air dapat bergerak melintasi menara dengan lancar.

2.5.1 Komponen *Cooling Tower*

Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai setiap komponen dari *cooling tower* berdasarkan gambar 2.4



Gambar 2. 3 Komponen *Cooling Tower*
Sumber: Industri Bioetanol (2024)

- 1) *Fan Deck*, berfungsi untuk memutar kipas guna menarik udara dari bawah ke atas (*upward air flow*), meningkatkan laju pendinginan melalui tahapan evaporasi.
- 2) *Water Sprayed Downward*, berfungsi untuk menyemprotkan air panas ke bawah, meningkatkan area kontak antara air dan udara sehingga efisiensi pendinginan lebih tinggi.
- 3) *Upward Air Flow*, udara bergerak ke atas untuk membawa panas dan uap air keluar dari *cooling tower*.
- 4) *Drift Eliminator*, berfungsi agar mencegah hilangnya tetesan air (*drift*) bersama aliran udara keluar dari *cooling tower*, agar efisiensi air tetap terjaga.
- 5) *Evaporation Area*, area utama tempat air menguap dan melepaskan panas ke udara, menyebabkan pendinginan air.
- 6) *Make-up Water Line*, sebagai pemasok air baru ke *cooling tower* untuk menggantikan air yang hilang karena proses evaporasi dan *blowdown*.

- 7) *Flow Meter*, berfungsi untuk mengukur laju aliran dari *make-up water* dan air yang akan dikeluarkan melalui bleed line.
- 8) *Treatment Chemicals*, sebagai tempat untuk menambahkan bahan kimia ke air yang bertujuan untuk mencegah korosi, pembentukan kerak, dan pertumbuhan mikroorganisme.
- 9) *Pump*, berfungsi untuk mengalirkan air dingin dari *cooling tower* kembali ke proses atau sistem yang memerlukan pendinginan.
- 10) *Bleed Line*, berfungsi sebagai tempat untuk proses mengeluarkan air yang mengandung konsentrasi tinggi padatan terlarut untuk menjaga kualitas air di dalam sistem.
- 11) *Water with Concentrated Dissolved Solid*, berfungsi sebagai tempat untuk menampung air yang jenuh dengan padatan terlarut sebelum dikeluarkan melalui bleed line untuk mencegah penumpukan kontaminan.

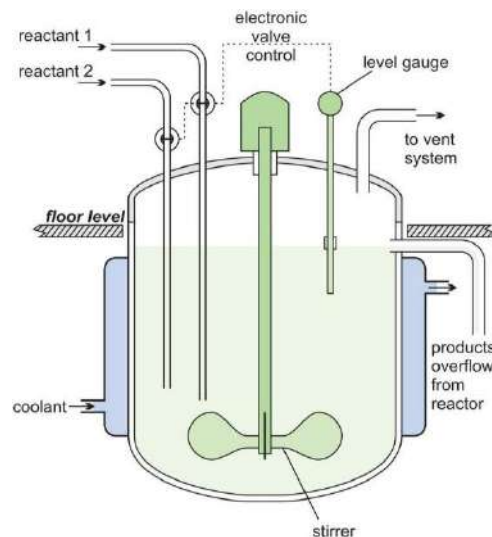
2.6 Anaerobic Digester (Continuous Stirred-Tank Reactor)

Menurut Cremonez (2021) *Continuous Stirred-Tank Reactor* adalah jenis reaktor yang dirancang dengan sistem pencampuran yang memastikan bahan substrat tercampur secara merata di dalam media reaksi. Pencampuran ini memungkinkan kontak maksimal antara substrat dan mikroorganisme, sehingga proses biokimia dapat berjalan lebih efisien. CSTR sering digunakan pada pabrik biogas skala besar karena mampu mendukung berbagai jenis substrat, termasuk limbah dengan kandungan padatan yang tinggi. Selain itu, reaktor ini memiliki keunggulan dalam pengendalian parameter seperti pH, suhu, dan waktu retensi, yang penting untuk menjaga stabilitas proses. Horan (2018) menjelaskan, dalam operasinya, substrat dengan total padatan (TS) sekitar 3 hingga 8% ditambahkan setiap hari, sementara efluen dengan jumlah yang sama dikeluarkan. Reaktor ini juga dapat dijalankan dalam kondisi mesofilik (suhu sedang) atau termofilik (suhu tinggi) untuk mendukung aktivitas mikroorganisme. Keunggulan lain dari CSTR adalah kemampuannya untuk digunakan dalam sistem dua-tahap, yang lebih stabil dan efisien dalam

menghasilkan biogas, terutama saat menghadapi limbah dengan muatan organik yang tinggi.

2.6.1 Komponen CSTR

Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai setiap komponen dari CSTR berdasarkan gambar 2.5



Gambar 2. 4 Komponen Anaerobik Digester
Sumber: Monir (2020)

- 1) *Reactant 1 & 2*, sebagai jalur masuk *spentwash* ke dalam reaktor .
- 2) *Electronic Valve Control*, berfungsi untuk mengatur aliran reaktan ke dalam reaktor agar sesuai dengan kebutuhan proses reaksi.
- 3) *Level Gauge*, berfungsi untuk memantau dan memastikan *volume* cairan yang berada dalam reaktor selalu berada pada *level* yang diinginkan untuk menjaga efisiensi reaksi.
- 4) *Stirrer* (pengaduk), digunakan untuk mengaduk campuran reaktan di dalam reaktor untuk memastikan homogenitas dan meningkatkan kecepatan serta efisiensi reaksi.
- 5) *Coolant Jacket* (Mantel Pendingin), berfungsi untuk mengatur suhu di dalam reaktor dengan mengalirkan pendingin (*coolant*) disekitar dinding reaktor, mencegah reaksi yang terlalu panas atau eksotermik.
- 6) *To Vent System*, berfungsi untuk mengalirkan gas atau uap yang dihasilkan selama reaksi ke sistem ventilasi, sehingga tekanan di dalam reaktor tetap aman.

- 7) *Products Overflow*, berfungsi sebagai jalur keluar untuk produk hasil reaksi, yang terus dikeluarkan secara kontinu dari reaktor.
- 8) *Floor Level*, berfungsi untuk memberikan acuan ketinggian pemasangan komponen, terutama untuk kestabilan reaktor.

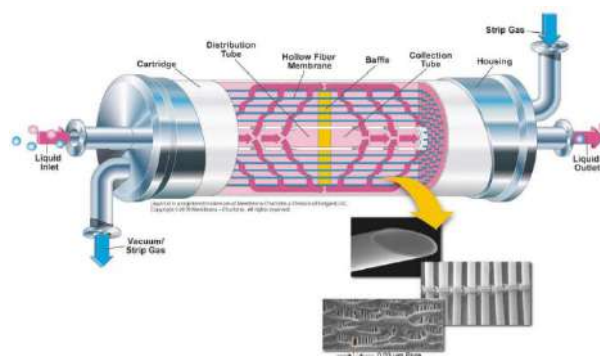
2.7 *Degassing Pond*

Degassing adalah proses penting dalam pengolahan *vinasse* yang bertujuan untuk menghilangkan pori-pori atau gas yang terperangkap selama pencampuran atau reaksi kimia. Pori-pori ini dapat berasal dari udara yang terjebak selama pencampuran atau dari reaksi kimia yang terjadi. Proses *degassing* harus dilakukan dengan durasi yang tepat. Jika terlalu singkat, pori-pori atau gas tidak akan terhilangkan sepenuhnya, sedangkan jika terlalu lama, hal ini dapat menyebabkan penguapan cairan yang tidak diinginkan dan mengubah sifat reologi *vinasse* (Yang *et al.*, 2015).

Alat *degasser* memiliki fungsi utama untuk memberikan perlakuan awal pada padatan sebelum dianalisis, yaitu dengan menghilangkan zat-zat pengotor seperti air, mineral, dan zat volatil yang menempel pada permukaan atau pori-pori padatan. Selain itu, *degasser* juga berfungsi untuk mengurangi kadar gas yang terperangkap, sehingga memastikan bahan yang diolah lebih homogen dan siap untuk tahap pengolahan atau analisis selanjutnya (Industri Bioetanol, 2024).

2.7.1 *Komponen Degassing Pond*

Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai setiap komponen dari *degassing pond* berdasarkan gambar



Gambar 2. 5 Komponen *Degassing Pond*
Sumber: Chadni (2023)

- 1) *Liquid Inlet*, sebagai pintu masuk untuk *vinasse* yang masih mengandung gas terlarut masuk ke dalam *housing* melalui jalur masuk.
- 2) *Distribution Tube*, cairan *vinasse* yang masuk di distribusikan secara merata ke dalam membran *hollow fiber* melalui tabung distribusi.
- 3) *Hollow Fiber Membrane*, cairan *vinasse* mengalir melalui membran berbentuk serat berongga. Gas-gas terlarut di dalam cairan berpindah melalui pori-pori membran, sementara cairan tetap mengalir di dalam serat.
- 4) *Vacuum/Strip Gas*, gas terlarut yang keluar melalui membran akan dibuang menggunakan strip gas atau vakum.
- 5) *Baffle*, sebagai pengarah aliran cairan *vinasse* untuk memastikan distribusi yang merata ke seluruh membran dan mengoptimalkan efisiensi proses.
- 6) *Collection Tube*, setelah proses pemisahan selesai, cairan dikumpulkan di tabung koleksi.
- 7) *Liquid Outlet*, cairan yang telah mengalami penghilangan gas terlarut akan dikeluarkan dari sistem melalui jalur keluar menuju proses selanjutnya.

2.8 *Lamella Digester*

Lamella Digester adalah sistem pengolahan limbah cair yang memiliki fungsi serupa dengan *lamella presettling*, yaitu mengendapkan lumpur dan partikel padat dari cairan untuk menghasilkan efluen berkualitas tinggi. Perbedaan utama antara keduanya terletak pada hasil akhirnya. Pada *lamella digester*, sebagian lumpur aktif (*activated sludge*) yang dihasilkan dikembalikan ke biodigester atau CSTR untuk mendukung proses pengolahan lebih lanjut (Industri Bioetanol, 2024).

2.9 *Pit Biomethane*

Pit Biomethane berfungsi sebagai wadah penampungan *spentwash* yang telah melalui proses pengolahan. *Spentwash* ini kemudian dialirkan

untuk proses lanjutan ke *lagoon* sebagai tempat penyimpanan atau pengolahan lebih lanjut (Industri Bioetanol, 2024).



Gambar 2. 6 Pit Biomethan
Sumber: Industri Bioetanol (2024)

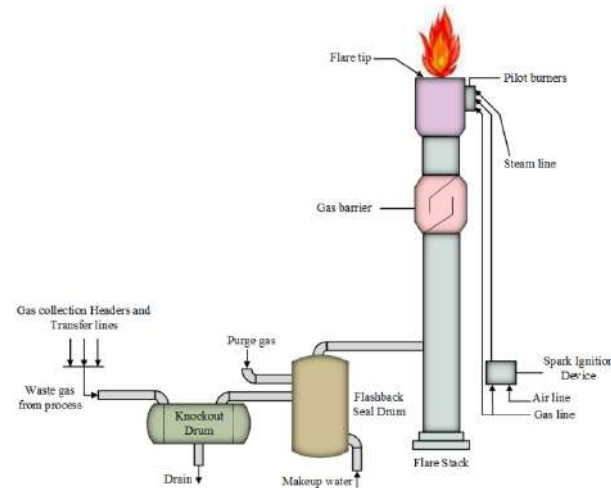
2.10 *Flare Stack*

Gas Flare, atau dikenal sebagai *Flare Stack*, adalah perangkat pembakaran gas yang digunakan di berbagai fasilitas industri. Menurut Industri Bioetanol (2024) sistem ini berfungsi untuk membuang limbah gas secara aman melalui pembakaran. *Gas flare* digunakan dalam berbagai situasi, seperti pembuangan gas dalam jumlah besar selama proses *start-up* atau *shutdown*, pembuangan gas berlebih dari proses pengolahan, dan penanganan pelepasan darurat dari katup pengaman, sistem *blow-down*, serta *depressurizing*.

Desainnya disesuaikan dengan jenis peralatan yang terhubung dan kompleksitas sistem, yang biasanya terdiri dari tiang pembakaran tinggi, mekanisme untuk menjaga pembakaran di puncak tiang, serta sistem pencegah penyalaan balik, saat peralatan industri mengalami tekanan berlebih, katup pelepas tekanan secara otomatis melepaskan gas atau cairan sesuai dengan standar keselamatan industri. Bahadori (2014) menjelaskan bahwa gas yang dilepaskan kemudian dialirkan melalui pipa besar menuju *flare stack*, di mana gas tersebut dibakar di ujung *flare stack*. Ukuran dan

intensitas nyala api bergantung pada laju aliran material mudah terbakar, yang diukur dalam satuan energi seperti *joule* per jam atau BTU per jam.

2.10.1 Komponen *Flare Stack*



Gambar 2. 7 Komponen *Flare Stack*
Sumber: Akeredolu & Sonibare (2004)

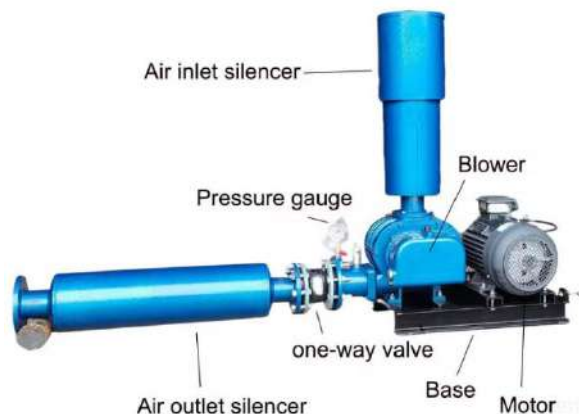
- 1) *Gas Collection Headers and Transfer Lines*, berfungsi untuk mengumpulkan gas buangan dari digester dan mengalirkannya menuju sistem *flare*.
- 2) *Knockout Drum*, berfungsi untuk memisahkan cairan atau partikel berat dari gas buangan untuk mencegah kerusakan atau masalah pada *flare stack*.
- 3) *Purge Gas*, berfungsi untuk mencegah masuknya udara ke dalam sistem *flare*, yang dapat menyebabkan pembentukan campuran eksplosif.
- 4) *Flashback Seal Drum*, berfungsi untuk mencegah aliran balik api (*back fire*) ke sistem gas dengan memberikan penghalang berupa air.
- 5) *Flare Stack*, memiliki struktur vertikal sebagai tempat pembakaran gas buangan.
- 6) *Flare Tip*, dirancang untuk mendukung pembakaran yang stabil dan efisien, sebagai tempat gas keluar dan terbakar.
- 7) *Pilot Burners*, membakar gas secara kontinu, untuk memastikan *flare* tetap menyala.
- 8) *Spark Ignition Device*, berfungsi untuk menyalakan *pilot burners*.

- 9) *Steam Line*, berfungsi untuk mengalirkan uap guna mencegah pembentukan karbon hitam, dan mengurangi emisi gas yang tidak terbakar.
- 10) *Gas Barrier*, digunakan untuk mencegah aliran udara ke bawah *flare stack*, guna menghindari potensi masuknya oksigen yang dapat menyebabkan masalah pembakaran.

2.11 *Root Blower*

Root blower adalah kompresor sederhana yang bekerja dengan prinsip *displacement compression* untuk memindahkan udara dari satu ruang ke ruang lain. Alat ini efisien, mudah dioperasikan, minim perawatan, dan menghasilkan aliran udara yang stabil dengan tingkat kebisingan rendah. *Root blower* tidak memerlukan oli, sehingga lebih praktis dibandingkan kompresor lain. Dalam aplikasi biogas, alat ini digunakan untuk menyalurkan biogas dari digester ke boiler sebagai bahan bakar (Industri Bioetanol, 2024).

2.11.1 *Komponen Root Blower*



Gambar 2. 8 *Komponen Roots Blower*
Sumber: Felix (2011)

- 1) *Air Inlet Silencer*, berfungsi untuk mengurangi kebisingan saat udara masuk ke sistem blower dan menyaring partikel kecil dari udara.
- 2) *Blower*, sebagai komponen utama yang menghisap udara dari *inlet*, lalu meningkatkan tekanan udara melalui proses kompresi.

- 3) *Pressure Gauge*, berfungsi untuk mengukur dan menampilkan tekanan udara yang dihasilkan oleh blower untuk memastikan sistem bekerja pada tekanan yang sesuai.
- 4) *One-Way Valve*, berfungsi untuk mencegah udara bertekanan yang telah dihasilkan kembali masuk ke blower jika terjadi perubahan tekanan di dalam sistem.
- 5) *Air Outlet Silencer*, digunakan untuk meredam kebisingan yang dihasilkan saat udara bertekanan keluar dari sistem, dan memastikan operasi lebih tenang.
- 6) *Base*, digunakan untuk dukungan yang menopang semua komponen sistem, agar memastikan kestabilan selama operasi.
- 7) *Motor*, memberikan tenaga mekanik untuk menggerakkan blower.

2.12 Lagoon

Beegle dan Borole (2018) menjelaskan bahwa laguna anaerobik adalah kolam dangkal tertutup yang dibangun di area permukaan yang luas untuk menghilangkan bahan organik dan patogen. Mekanisme sistem ini adalah bahwa cairan mengalir melalui kolam dan karena tidak adanya pencampuran, bahan masukan yang dapat diendapkan terakumulasi di dasar kemudian fraksi yang dapat terurai secara hayati dicerna. Selanjutnya, biogas dikumpulkan dari kolam. Karena mereka menyebabkan masalah bau yang parah, mereka dirasakan pada jarak yang jauh dari kolam. Waktu retensi kurang dari sekitar 6 hari diperlukan untuk memastikan kondisi anaerobik di kolam. Tetapi metode ini memiliki kelemahan yaitu keluarnya gas metana ke atmosfer dan menyebabkan pemanasan global. Laguna anaerobik menguntungkan karena biaya operasional dan konstruksinya minimal (Periyasamy *et al.*, 2022)

2.13 Pompa Sentrifugal

Menurut Hariady (2014) pompa sentrifugal merupakan salah satu jenis pompa dinamis (*non-positive displacement*) yang paling umum digunakan di berbagai industri, termasuk industri pengolahan air, kimia, dan energi, karena kemampuannya dalam memindahkan fluida cair dengan

aliran yang kontinu, kapasitas besar, serta konstruksi yang relatif sederhana dan mudah dirawat. Prinsip kerja pompa ini didasarkan pada gaya sentrifugal yang ditimbulkan oleh putaran *impeller*. Fluida masuk melalui sisi isap (*eye of impeller*), kemudian terdorong oleh sudu-sudu *impeller* yang berputar, sehingga mengalami peningkatan kecepatan dan energi kinetik. Energi ini selanjutnya diubah menjadi tekanan saat fluida meninggalkan *impeller* melalui *casing* atau *volute*, dan dialirkan menuju sistem perpipaan. Komponen utama pompa ini terdiri dari *impeller*, poros (*shaft*), *stuffing box*, *shaft sleeve*, *bearing*, *casing*, serta *discharge nozzle*. Masing-masing memiliki fungsi penting dalam menunjang efisiensi dan stabilitas operasional.

2.13.1 Komponen Pompa Sentrifugal



Gambar 2. 9 Komponen Pompa
Sumber: Alkhowaiter & Consultant (2019)

- 1) *Suction (Inlet)*, merupakan saluran masuk fluida ke dalam pompa. Fluida mengalir melalui suction menuju ke *eye of impeller*, tempat awal pemutaran oleh sudu-sudu *impeller*.
- 2) *Discharge (Outlet)*, Merupakan saluran keluar fluida dari pompa setelah mengalami peningkatan tekanan oleh *impeller*. Di sinilah fluida dialirkan ke sistem perpipaan atau proses berikutnya.
- 3) *Casing*, atau rumah pompa berfungsi sebagai pelindung komponen internal dan sebagai saluran untuk mengumpulkan dan mengarahkan aliran fluida keluar dari *impeller* ke *discharge*.

Biasanya berbentuk *spiral (volute)* untuk mengubah energi kecepatan menjadi energi tekanan.

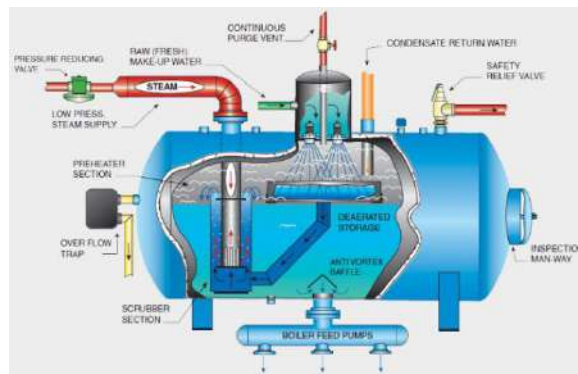
- 4) *Seal*, berfungsi untuk mencegah kebocoran fluida di area di mana poros (*shaft*) menembus *casing*. *Seal* bisa berupa *packing* atau *mechanical seal*, tergantung tipe pompa.
- 5) *Shaft*, poros yang menghubungkan motor penggerak dengan *impeller*. *Shaft* memutar *impeller* sehingga fluida bisa dipindahkan. Harus kuat dan presisi agar tidak terjadi vibrasi berlebihan.
- 6) *Bearing Housing*, Tempat dudukan *bearing*, yang berfungsi untuk menopang poros (*shaft*) agar tetap stabil selama berputar. *Bearing housing* membantu mengurangi gesekan dan memastikan putaran *shaft* lancar dan sejajar.

2.14 Boiler

Menurut Sugiharto (2020) boiler adalah sebuah bejana tertutup yang berfungsi untuk menghasilkan uap bertekanan melalui proses pemanasan air, di mana uap tersebut digunakan untuk keperluan di luar boiler itu sendiri, seperti dalam proses pembangkitan listrik, pemanas, dan aplikasi industri lainnya termasuk migas, kimia, dan manufaktur. Proses pembakaran dalam boiler dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar, seperti gas, cair, maupun padat, yang menghasilkan energi panas untuk mengubah air menjadi uap. Salah satu jenis boiler yang umum digunakan di industri adalah boiler pipa api (*fire tube boiler*), di mana gas panas hasil pembakaran mengalir di dalam pipa dan memanaskan air yang mengelilingi pipa-pipa tersebut. Efisiensi sebuah boiler sangat bergantung pada seberapa baik energi dari bahan bakar dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan uap, dan sering kali dihitung melalui metode langsung (*input-output*), yaitu dengan membandingkan energi panas yang diserap oleh air dengan energi yang tersedia dari bahan bakar. Faktor-faktor seperti desain ruang bakar, jenis bahan bakar, jumlah udara sisa pembakaran (*excess air*), serta kehilangan panas melalui cerobong asap (*stack*) sangat mempengaruhi efisiensi boiler. Semakin optimal proses pembakarannya, semakin tinggi

efisiensinya, yang berarti konsumsi bahan bakar lebih hemat dan emisi gas buang lebih rendah, menjadikan boiler sebagai salah satu komponen penting dalam mendukung operasi industri yang efisien dan berkelanjutan.

2.14.1 Komponen Boiler



Gambar 2. 10 Komponen Boiler

Sumber: Chaudry (2024)

- 1) *Low Pressure Steam Supply*, mensuplai uap bertekanan rendah ke dalam deaerator untuk memanaskan air umpan dan menghilangkan gas-gas terlarut seperti oksigen (O_2) dan karbon dioksida (CO_2) melalui proses pemanasan dan penguapan.
- 2) *Raw (Fresh) Make-up Water*, air baru (air baku) yang ditambahkan untuk menggantikan kehilangan air dalam sistem, baik karena *blowdown* maupun kebocoran lainnya.
- 3) *Condensate Return Water*, air hasil kondensasi dari sistem uap dikembalikan ke *deaerator* untuk digunakan kembali, menghemat energi dan air.
- 4) *Continuous Purge Vent*, lubang ventilasi terus-menerus yang membuang gas-gas non-kondensabel seperti O_2 dan CO_2 yang terlepas dari air agar tidak masuk ke dalam sistem boiler dan menyebabkan korosi.
- 5) *Safety Relief Valve*, katup pengaman yang mencegah *overpressure* di dalam *deaerator* dengan melepaskan tekanan berlebih secara otomatis.
- 6) *Preheater Section*, bagian awal pemanasan air dengan uap untuk menaikkan suhu air umpan secara bertahap sebelum masuk ke zona penghilangan gas.

- 7) *Scrubber Section*, bagian tempat campuran uap dan air saling bersentuhan intensif, sehingga gas-gas terlarut bisa terlepas dari air melalui proses stripping.
- 8) *Over Flow Trap*, mengalirkan kelebihan air dari tangki bila *volume* melebihi kapasitas, mencegah *flooding* di dalam *deaerator*.
- 9) *Deaerated Storage*, tangki penyimpanan air umpan yang telah melalui proses deaerasi, siap dipompa menuju boiler dengan kandungan gas terlarut yang sangat minim.
- 10) *Anti Vortex Baffle*, menghindari terbentuknya pusaran (*vortex*) saat air disedot oleh pompa, menjaga kestabilan aliran dan mencegah masuknya udara ke pompa.
- 11) *Boiler Feed Pumps*, pompa yang mengalirkan air deaerasi ke boiler dengan tekanan tertentu untuk mendukung pembentukan uap.
- 12) *Pressure Reducing Valve*, mengatur tekanan uap yang masuk ke *deaerator* agar sesuai dengan spesifikasi sistem, mencegah tekanan berlebih pada *preheater* dan *scrubber section*.
- 13) *Inspection Man-Way*, lubang inspeksi yang memungkinkan petugas masuk ke dalam tangki *deaerator* untuk keperluan pemeriksaan, perawatan, atau pembersihan berkala.

2.15 Functional Block Diagram (FBD)

Functional Block Diagram (FBD) adalah diagram yang menggambarkan berbagai komponen dalam suatu sistem beserta fungsinya, disajikan dalam bentuk blok-blok yang saling terhubung. Syahrudin (2018) menerangkan bahwa hubungan ini membentuk satu kesatuan fungsi dalam sistem kerja. FBD sering digunakan dalam kegiatan seperti verifikasi sistem, analisis kesalahan, dan pemrograman yang berkaitan dengan keselamatan. Diagram ini membantu menjelaskan komponen-komponen dalam sebuah sistem serta cara kerjanya sesuai fungsi masing-masing. Dengan menggunakan representasi visual berupa blok dan panah sebagai aliran utama, FBD memberikan gambaran rinci tentang proses kerja suatu sistem atau perangkat serta hubungan antar fungsinya.

2.16 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) merupakan metode sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mencegah suatu masalah sistem, produk, dan sebuah proses sebelum terjadi. Bennett (2017) menjelaskan FMEA sendiri difokuskan untuk pencegahan masalah, peningkatan keselamatan, dan peningkatan kepuasan pelanggan. FMEA banyak dipakai dalam industri manufaktur, metode ini telah meluas ke berbagai sektor seperti industri makanan, unit pembangkit listrik, layanan kesehatan, dan lain lain. Penggunaan dari metode ini yang dilakukan diberbagai industri cukup membantu dalam mengidentifikasikan dan mencegah potensi suatu kegagalan, yang dapat meningkatkan kualitas dan keamanan suatu proses hingga menjadi produk menurut Carlson (2012). FMEA sendiri merupakan metode penting karena kegunaannya dapat mencegah suatu kegagalan sedini mungkin dibandingkan jika harus memperbaikinya setelah suatu kerusakan telah terjadi (Semnasti *et al.*, 2023).

Tabel 2. 1 Worksheet FMEA

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System :</i>					<i>Date :</i>				
<i>Sub-System :</i>					<i>Years :</i>				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity	Potential Cause of Failure	Occurance	Current Control	Detection (D)	RPN

Sumber: Degu & Moorthy (2014)

Tabel yang ditampilkan ini merupakan template untuk melakukan analisis *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA), berikut merupakan penjelasan dari isi tabel 2.3:

1. Komponen (*Component*), pada kolom ini digunakan sebagai tempat untuk mencatat jenis komponen yang spesifik dalam suatu proses yang sedang dalam tahap dianalisis.

2. Modus Kegagalan (*Potential Failure Mode*), pada area ini digunakan sebagai tempat mengidentifikasi bagaimana suatu aktivitas dalam proses dapat terjadi kegagalan.
3. Dampak Kegagalan (*Effect of Failure*), pada kolom ini digunakan sebagai tempat untuk menguraikan suatu dampak dari kegagalan yang telah diidentifikasi yang berasal dari proses.
4. Peringkat Keparahan (*Severity*), pada area ini digunakan sebagai tempat untuk menilai seberapa parah dampak dari suatu kegagalan. Nilai skala yang digunakan biasanya dari angka 1 hingga 5, yang artinya jika bernilai 1 maka dampak kegagalan hanya berefek ringan, dan jika bernilai 5 maka dampak kegagalan tersebut berefek serius terhadap proses.

Tabel 2. 2 Kriteria Tingkat Keparahan (S)

Dampak	Tingkat Keparahan	Peringkat
Sangat tinggi	Produk tidak dapat dioperasikan Menghentikan pengoperasian sistem produksi	5
Tinggi	Mengganggu kelancaran sistem produksi	4
Sedang	Kinerja produk menurun karena beberapa fungsi tertentu mungkin tidak beroperasi	3
Rendah	Kinerja produk atau hasil menurun tetapi tidak memerlukan perbaikan	2
Tidak ada dampak	Tidak memiliki pengaruh	1

Sumber: Industri Bioetanol (2024)

5. Peringkat Kemungkinan Terjadi (*Occurance*), pada kolom ini digunakan sebagai tempat untuk memberikan peringkat mengenai kemungkinan suatu kegagalan dapat terjadi, jika nilainya semakin tinggi maka kemungkinan kegagalan dapat terjadi juga semakin besar.

Tabel 2. 3 Tingkat Kemungkinan Terjadi (O)

Peluang Terjadi Kegagalan	Tingkat Kemungkinan Kegagalan	Peringkat
Sangat Tinggi	Sering terjadi, setiap hari	5
Tinggi	Terjadi berulang, terjadi 1x dalam satu minggu	4
Sedang	Jarang terjadi, kemungkinan terjadi rata-rata atau terjadi 1x dalam satu bulan	3
Rendah	Sangat kecil terjadi, atau terjadi 1x dalam satu tahun	2
Sangat Rendah	Sangat jarang, hampir tidak pernah terjadi atau terjadi 1x kejadian selama ini	1

Sumber: Industri Bioetanol (2024)

6. Peringkat kemungkinan Kegagalan Deteksi (*Detection*), pada area ini dilakukan penilaian mengenai seberapa besar kegagalan tersebut dapat terdeteksi sebelum mengalami dampak yang lebih jauh. Jika nilainya rendah maka kegagalan mudah terdeteksi, begitupun jika peringkat tinggi maka kegagalan dari proses sulit dideteksi.

Tabel 2. 4 Tingkat Deteksi Kejadian (D)

Kemungkinan Kegagalan Terdeteksi	Kriteria Berdasarkan Rancangan Pengendalian Saat ini	Peringkat
Hampir mustahil	Tidak ada kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	5
Tinggi	Terdapat sedikit kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	4
Sedang	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang/cukup untuk mendeteksi potensi kegagalan	3
Kecil	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	2
Hampir pasti	Kendali hampir pasti dapat mendeteksi potensi kegagalan	1

Sumber: Alijoyo (2020)

7. Angka Prioritas Risiko (RPN), pada area ini dilakukan penghitungan nilai yang telah diperoleh dari peringkat keparahan (S), peringkat kemungkinan terjadi (O), dan peringkat kemungkinan kegagalan deteksi (D). RPN juga digunakan untuk menentukan porioritas kegagalan mana yang harus segera ditangani.

$$RPN = Severity \times Occurance \times Detection$$

Sumber: Bennett (2017)

2.16.1 Risk Priority Number (RPN)

Carlson (2012) menjelaskan bahwa angka Prioritas Risiko (RPN) adalah skor numerik yang dihitung sebagai hasil perkalian tiga parameter: tingkat keparahan, kejadian, dan deteksi, yang digunakan untuk menilai risiko yang terkait dengan mode kegagalan. Angka ini menyediakan cara standar untuk memprioritaskan mode kegagalan potensial berdasarkan dampaknya, kemungkinan terjadinya, dan efektivitas kontrol yang ada untuk mendeteksinya.

RPN berfungsi sebagai metrik panduan untuk mengidentifikasi dan memberi peringkat area yang paling penting dalam suatu sistem.

Menurut Kiran (2017) meskipun RPN sendiri mungkin bukan satu-satunya faktor dalam memutuskan tindakan perbaikan yang tepat, RPN berperan penting dalam menetapkan ambang batas untuk penentuan prioritas, dengan menganalisis nilai RPN, mode kegagalan dengan skor RPN tertinggi ditandai untuk segera mendapat perhatian, karena mode tersebut menimbulkan risiko terbesar terhadap fungsionalitas, keamanan, atau keandalan sistem. Masalah berprioritas tinggi ini menuntut pendekatan yang terfokus, yang melibatkan analisis terperinci dan penerapan tindakan perbaikan untuk mengurangi risiko secara efektif.

Selain itu, RPN juga dapat membantu organisasi mengoptimalkan alokasi sumber daya dengan memusatkan upaya pada area yang memiliki potensi dampak tertinggi pada keseluruhan sistem. Penentuan prioritas secara sistematis ini memastikan bahwa waktu dan sumber daya diarahkan untuk mengurangi risiko yang dapat menimbulkan konsekuensi serius, sehingga meningkatkan kinerja, keselamatan, dan keandalan sistem.

2.16.2 Penentuan Komponen Kritis

Penilaian FMEA dilakukan dengan menghitung frekuensi kegagalan berdasarkan data historis yang dimiliki perusahaan. Dalam proses ini, nilai RPN dihitung untuk mengidentifikasi komponen kritis pada suatu alat. Selanjutnya, dilakukan pengelompokan dampak kegagalan pada setiap komponen. Hasil perhitungan RPN digunakan untuk menentukan tingkat kritis dari masing-masing komponen pada alat tersebut (Rinoza & Ahmad Kurniawan, 2021).

2.16.3 Penggunaan Metode FMEA

Berikut merupakan kondisi yang sesuai untuk menggunakan metode FMEA (Kiran, 2017):

1. Saat memulai pengembangan produk atau proses baru, di mana analisis risiko diperlukan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan sejak tahap awal.
2. Ketika terjadi perubahan pada desain produk, proses, atau kondisi operasional, karena perubahan tersebut dapat memengaruhi kinerja dan potensi kegagalan sistem.
3. Pada saat penerapan regulasi baru yang memerlukan evaluasi untuk memastikan kepatuhan terhadap persyaratan yang berlaku.
4. Ketika umpan balik pelanggan menunjukkan adanya masalah pada produk atau proses, sehingga diperlukan analisis mendalam untuk mengidentifikasi akar penyebab dan menentukan langkah perbaikan.

2.16.4 Kelebihan dan Kekurangan Metode FMEA

Kelebihan metode FMEA sebagai berikut (Schneider, 1996):

1. FMEA memungkinkan identifikasi dan penilaian risiko secara sistematis dalam suatu proses atau desain.
2. Dengan menggunakan FMEA, organisasi dapat memperbaiki desain atau proses yang rentan terhadap kegagalan, yang akhirnya meningkatkan keandalan dan keselamatan.
3. FMEA bersifat preventif, membantu mencegah masalah sebelum mereka berkembang menjadi kegagalan yang lebih besar.

Kekurangan metode FMEA sebagai berikut (Schneider, 1996):

1. FMEA lebih mengandalkan penilaian kualitatif, yang bisa menimbulkan bias atau perbedaan interpretasi antar anggota tim.
2. Penentuan nilai RPN (yang menggabungkan kemungkinan kegagalan, dampak, dan deteksi) bisa sangat subjektif, dan sering kali menimbulkan perbedaan pandangan
3. Meskipun FMEA dapat mengidentifikasi potensi kegagalan, tanpa tindakan lanjut atau penerapan sistem kontrol yang tepat,

rekomendasi yang dihasilkan dari FMEA mungkin tidak dapat mengurangi risiko secara efektif.

2.17 *Event Tree Analysis*

Event Tree Analysis (ETA) merupakan metode berbasis risiko yang digunakan dalam mengevaluasi segala potensi bahaya yang berada dalam sistem teknis, dilakukan dengan alur menelusuri tiap urutan peristiwa yang mungkin terjadi yang diakibatkan dari suatu insiden atau kegagalan. Juanizar (2022) menjelaskan bahwa metode ETA fokus dalam mengidentifikasi dan melokalisasi kesalahan yang terjadi dalam suatu sistem serta potensi dari dampaknya. Rausand (2011) menjelaskan *Event Tree Analysis* diawali dengan adanya *initiating event* (IE) seperti terdapatnya kegagalan komponen yang menjadikan sebuah kecelakaan dapat terjadi. Setiap cabang dalam diagram ETA menggambarkan keberhasilan atau kegagalan sistem yang dirancang untuk merespons insiden tersebut. Konsekuensi dari event tersebut berupa rentetan dari kemungkinan kejadian, yang berisikan kemungkinan-kemungkinan kejadian dan bermacam-macam kemungkinan *outcomes* yang dapat dilakukan perhitungan (Ericson, 2005).

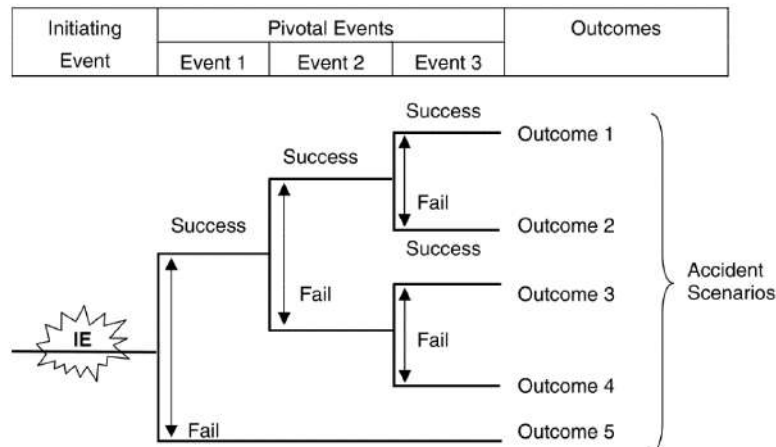
Event Tree Analysis (ETA) tidak hanya fokus pada identifikasi dan analisis dampak, tetapi juga bertujuan untuk melokalisasi kesalahan dalam sistem, mengevaluasi respon sistem, dan memetakan potensi risiko secara menyeluruh. Dibandingkan dengan teknik lain seperti *Fault Tree Analysis* (FTA), teknik FTA berfokus pada peristiwa-peristiwa atau kejadian-kejadian yang dapat memicu kejadian puncak/peristiwa risiko utama, atau dengan kata lain FTA lebih berorientasi pada penyebab risiko menurut Rausand (2011). Sedangkan ETA memiliki pendekatan satu langkah di depan, yaitu memprediksi konsekuensi setelah suatu peristiwa terjadi. *Worksheet* untuk ETA berupa *event tree diagram* (ETD), yang dikembangkan dari informasi sebagai berikut:

1. *Initiating event* (IE), merupakan kejadian awal atau titik awal dari sebuah rangkaian kejadian yang akan menyebabkan sebuah kejadian selanjutnya, setiap kejadian pasti memiliki dua hasil kemungkinan:

sukses atau gagal, kemungkinan ini menjadi penentu sebuah kejadian yang akan datang. Kejadian awal (IE) biasanya dikategorikan ke salah satu dari empat kategori berikut (Ericson, 2005):

- a. Kegagalan suatu sistem
 - b. Kegagalan suatu peralatan
 - c. Kesalahan manusia
 - d. Peristiwa eksternal, seperti bencana alam dan lain-lain
2. *Pivotal Event*, setelah kejadian awal telah ditentukan, langkah selanjutnya adalah membuat skenario bagaimana risiko tersebut akan ditangani atau dimitigasi. Penanganan yang telah dirancang dicantumkan secara terstruktur dan berurutan untuk mempermudah analisis, dalam proses ini, akan muncul sebuah rangkaian kejadian yang dapat dikatakan sukses atau gagal. Jika suatu kejadian dinyatakan sukses, maka kejadian tersebut harus mengikuti alur yang berada di atas, sedangkan jika suatu kejadian dinyatakan gagal, maka kejadian tersebut harus mengikuti jalur yang berada di bawah. Untuk setiap penanganan yang diberikan, perlu dicantumkan tingkat kemungkinan berhasil maupun tingkat kemungkinan gagal (Rausand, 2011)
3. *Outcome*, dalam urutan terakhir kejadian, terdapat beberapa hasil dari suatu potensial. Masing masing dari hasil tersebut akan menunjukkan kombinasi dari keberhasilan atau kegagalan dari kejadian sebelumnya.

Berikut merupakan konsep dari diagram ETA



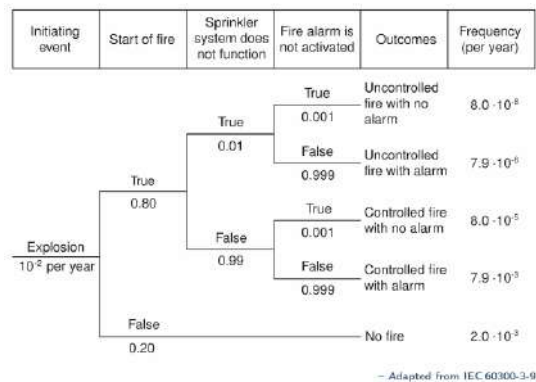
Gambar 2. 11 Konsep ETA
Sumber: Ericson (2005)

4. Ericson (2005) menjelaskan bahwa probabilitas digunakan untuk menggambarkan peluang terjadinya setiap jalur skenario setelah suatu kejadian awal (*initiating event*) terjadi. Probabilitas di dalam ETA diperoleh dari keberhasilan atau kegagalan sistem pengendalian bahaya yang disebut *pivotal events*. Perhitungan nilai probabilitas tiap jalur skenario dihitung berdasarkan kombinasi dari probabilitas keberhasilan atau kegagalan dari setiap *pivotal event*. Perhitungan probabilitas kegagalan pada diagram *event tree* dilakukan dengan menentukan tingkat kemungkinan berdasarkan data historis atau analisis perbandingan dengan kasus serupa. Perhitungan probabilitas dalam ETA dijelaskan oleh Ericson (2005) sebagai berikut:

- a) Menentukan *Failure Rate* (λ), laju kegagalan komponen diperoleh dari data historis jumlah kegagalan selama periode waktu tertentu.
- b) Menghitung Keandalan / *Reliability* (R), keandalan atau probabilitas keberhasilan suatu komponen dihitung dengan $R = e^{-\lambda T}$ dimana R merupakan *reliability* atau probabilitas komponen, λ merupakan laju kegagalan komponen dan T merupakan waktu paparan komponen.
- c) Menghitung *Probability of Failure* (Q) atau ketidakandalan suatu komponen dihitung sebagai $Q = 1 - R = e^{-\lambda T}$,

dikarenakan $R + Q = 1$ probabilitas kegagalan merupakan kebalikan dari *reliability*, semakin lama waktu paparan (T) atau durasi operasi komponen, maka semakin besar nilai probabilitas dari kegagalan. Begitupun sebaliknya, semakin kecil laju kegagalan (λ), maka nilai probabilitas kegagalan menjadi lebih rendah.

- d) Perhitungan Probabilitas *Outcome* (P), pada ETA, setiap *outcome* dihitung dengan mengalikan seluruh probabilitas dari jalur skenario.



Gambar 2. 12 Probabilitas ETA
Sumber: Ericson (2005)

2.17.1 Kelebihan dan Kekurangan Metode ETA

Kelebihan metode ETA sebagai berikut (Rausand, 2011):

1. ETA merupakan pendekatan yang terstruktur, metodis, dan mudah dipahami karena menyajikan urutan kejadian dalam bentuk visual (pohon kejadian), sehingga memudahkan pemahaman hubungan sebab-akibat serta spektrum konsekuensi dari suatu kejadian awal (*initiating event*).
2. ETA tergolong metode yang relatif mudah dipelajari dan diimplementasikan, serta telah terdokumentasi dengan baik dan diterima luas dalam praktik industri.
3. Analisis dapat dilakukan bahkan ketika informasi sistem belum sepenuhnya lengkap, baik pada tahap awal desain maupun saat sistem sudah beroperasi.

4. ETA membantu mengidentifikasi kelemahan sistem, titik-titik kegagalan tunggal (*single-point failure*), serta menjadi dasar untuk mengevaluasi kebutuhan perbaikan atau penambahan pengendalian (*barrier*).
5. Metode ini memungkinkan penilaian probabilitas dari jalur kejadian yang terjadi dan dapat menggabungkan berbagai aspek sistem seperti perangkat keras, perangkat lunak, lingkungan, dan faktor manusia.
6. Tersedia perangkat lunak komersial yang dapat membantu memodelkan ETA secara lebih efisien, termasuk untuk sistem yang kompleks.

Kekurangan metode ETA sebagai berikut (Rausand, 2011):

1. Setiap pohon ETA hanya dapat menganalisis satu kejadian awal. Oleh karena itu, jika terdapat banyak potensi kejadian awal, maka harus dibuat beberapa pohon ETA yang terpisah.
2. ETA mengharuskan analis mampu meramalkan atau menetapkan urutan kejadian penting (*pivotal events*), yang kadang sulit dilakukan jika informasi terbatas.
3. ETA tidak secara eksplisit memperhitungkan keberhasilan atau kegagalan parsial, sehingga bisa menyederhanakan representasi realitas sistem.
4. ETA tidak cocok untuk menangani ketergantungan antar kejadian (*event dependencies*) secara kuantitatif, dan juga tidak menampilkan tindakan kelalaian (*acts of omission*).
5. Walaupun mudah dipelajari, ETA tetap membutuhkan analis dengan pelatihan dan pengalaman praktis agar hasil analisis valid dan akurat.
6. Tidak terdapat standar universal untuk tata letak grafis pohon kejadian, yang dapat menyebabkan perbedaan tampilan dan interpretasi antar pengguna.

7. Dalam praktiknya, banyak ETA yang dihentikan sebelum mencapai konsekuensi akhir. Ini bukan kelemahan metode, melainkan kekurangan dalam pelaksanaan analisis.

2.18 Hubungan Antara Metode FMEA dan ETA

Penelitian yang dilakukan oleh Triwulandari (2019) mengenai analisis risiko pelepasan gas hidrogen, penelitian ini menggunakan metode FMEA untuk mengetahui penyebab terjadi suatu kegagalan komponen pada area *hydrogen storage* yang dapat mengakibatkan pelepasan gas hidrogen. Metode Event Tree Analysis (ETA) digunakan untuk mengetahui dampak dari bentuk kegagalan pada sistem tangki penyimpanan gas hidrogen. *Initiating event* didapatkan dari dampak kegagalan hasil analisis identifikasi bahaya dan penilaian risiko dengan metode FMEA yang risiko kegagalannya termasuk dalam level risiko *high risk*.

Hubungan antara metode FMEA dan ETA dalam analisis kegagalan seluruh peralatan pada proses anaerob industri bioetanol terletak pada pendekatan yang saling melengkapi untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi risiko. FMEA digunakan sebagai langkah awal untuk mengidentifikasi fungsi, potensi kegagalan, serta mode kegagalan pada setiap komponen peralatan. Nilai *Risk Priority Number* (RPN), yang dihitung berdasarkan *severity*, *occurrence*, dan *detection*, membantu menentukan komponen yang paling kritis.

Hasil dari FMEA menjadi dasar dalam metode ETA untuk menganalisis efektivitas pengendalian risiko. Proses ETA dimulai dengan mengidentifikasi *initiating event* dari komponen dengan nilai RPN tertinggi, diikuti oleh evaluasi alur peristiwa berdasarkan tingkat keberhasilan atau kegagalan pengendalian yang telah dirancang. ETA tidak hanya memetakan skenario risiko tetapi juga menilai dampak dari risiko tersebut dan memberikan rekomendasi perbaikan. Dengan demikian, FMEA membantu mengidentifikasi prioritas risiko, sementara ETA memastikan pengelolaan risiko dilakukan secara efektif melalui analisis mendalam pada komponen yang paling kritis.

2.19 *Expert Judgment*

Expert Judgment atau yang biasa disebut sebagai penilaian ahli merupakan kegiatan dalam meminta pendapat ahli pada bidang tertentu untuk memberikan pendapat maupun evaluasi terkait bidang tertentu menurut Sugiani dan Santoso (2022). Menurut Skjong dan Wentworth (2001) penilaian ahli juga cenderung lebih terstruktur dan objektif, dengan persyaratan yang lebih ketat untuk mengevaluasi keputusan atau pendapat secara rasional. Penilaian ahli sangat penting dalam konteks analisis risiko atau kegagalan, terutama ketika data kuantitatif tidak mencukupi. Para ahli yang dilibatkan seperti *foreman*, *supervisor* maupun *manager area*, harus memenuhi kriteria tertentu, seperti memiliki informasi yang relevan, pengalaman dibidangnya, dan keahlian teknis di bidang terkait, selain itu para *expert judgment* juga harus mampu menganalisis situasi secara sistematis, dapat memberikan penilaian yang berbasis bukti, dan dapat menjelaskan rekomendasi menurut mereka dengan jelas (Meyer & Booker, 2001).

2.20 **Pengendalian Risiko**

Hasil identifikasi dan penilaian risiko dari analisis sebelumnya menghasilkan sejumlah rekomendasi pengendalian yang ditujukan untuk menurunkan tingkat risiko kegagalan hingga berada pada tingkat yang dapat diterima, meskipun tidak sepenuhnya dapat dihilangkan. Pengendalian risiko ini bertujuan untuk menentukan langkah-langkah preventif maupun korektif dalam meminimalkan dampak risiko yang telah teridentifikasi. Penyusunan rekomendasi mengacu pada prinsip hierarki pengendalian risiko, yang menurut Ramadhan (2017) dan diatur dalam ISO 45001 (2018) pasal 8.1.2, memprioritaskan lima tahapan pengendalian secara berurutan, yaitu eliminasi, substitusi, *engineering control*, pengendalian administratif, serta penggunaan alat pelindung diri (APD).

Selain itu, penyusunan rekomendasi pengendalian juga merujuk pada beberapa regulasi nasional terkait K3. Di antaranya adalah Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja yang mengatur perlindungan keselamatan dan kesehatan tenaga kerja serta orang lain di

tempat kerja, serta Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang penerapan Sistem Manajemen K3 (SMK3) yang dalam pasal 7 ayat 2 mewajibkan pengusaha melakukan identifikasi potensi bahaya, penilaian, dan pengendalian risiko. Regulasi teknis lainnya yang menjadi acuan adalah Permenaker Nomor 38 Tahun 2016 terkait K3 Pesawat Angkat dan Angkut, serta Permenaker Nomor 37 Tahun 2016 tentang K3 Bejana Tekanan dan Tangki Timbun, yang secara spesifik mengatur prosedur keselamatan mulai dari perencanaan, pemasangan, pengoperasian, hingga pemeliharaan dan inspeksi peralatan teknis di industri, lalu Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi NOMOR PER.08/MEN/VII/2010 dalam pasal 4 tentang penggunaan APD di tempat kerja. Berikut merupakan penjelasan tingkatan-tingkatan dari hierarki risiko:

a. Eliminasi (*Elimination*)

Eliminasi adalah langkah untuk menghilangkan sumber bahaya secara menyeluruh. Sebagai bentuk pengendalian risiko yang paling ideal, eliminasi menjadi prioritas utama dalam mengelola bahaya di tempat kerja. Upaya ini dilakukan dengan menghentikan penggunaan peralatan atau menghilangkan sumber yang berpotensi menimbulkan risiko.

b. Substitusi (*Substitution*)

Substitusi adalah upaya mengganti bahan berbahaya dengan bahan yang lebih aman. Prinsip pengendalian ini bertujuan untuk mengurangi risiko dengan menggantikan sumber bahaya menggunakan sarana atau peralatan lain yang memiliki tingkat risiko lebih rendah.

c. Rekayasa *Engineering*

Rekayasa *Engineering* adalah usaha untuk mengurangi tingkat risiko dengan merancang ulang desain tempat kerja, mesin, peralatan, atau proses kerja agar lebih aman. Pada tahap ini, dilakukan pemikiran yang lebih mendalam mengenai cara menciptakan lingkungan kerja yang aman melalui modifikasi peralatan, kombinasi kegiatan,

perubahan prosedur, serta pengurangan frekuensi kegiatan yang berisiko.

d. Administrasi

Dalam upaya pengendalian secara administratif, fokus diberikan pada penerapan prosedur, seperti SOP (*Standard Operating Procedure*), sebagai langkah untuk mengurangi tingkat risiko.

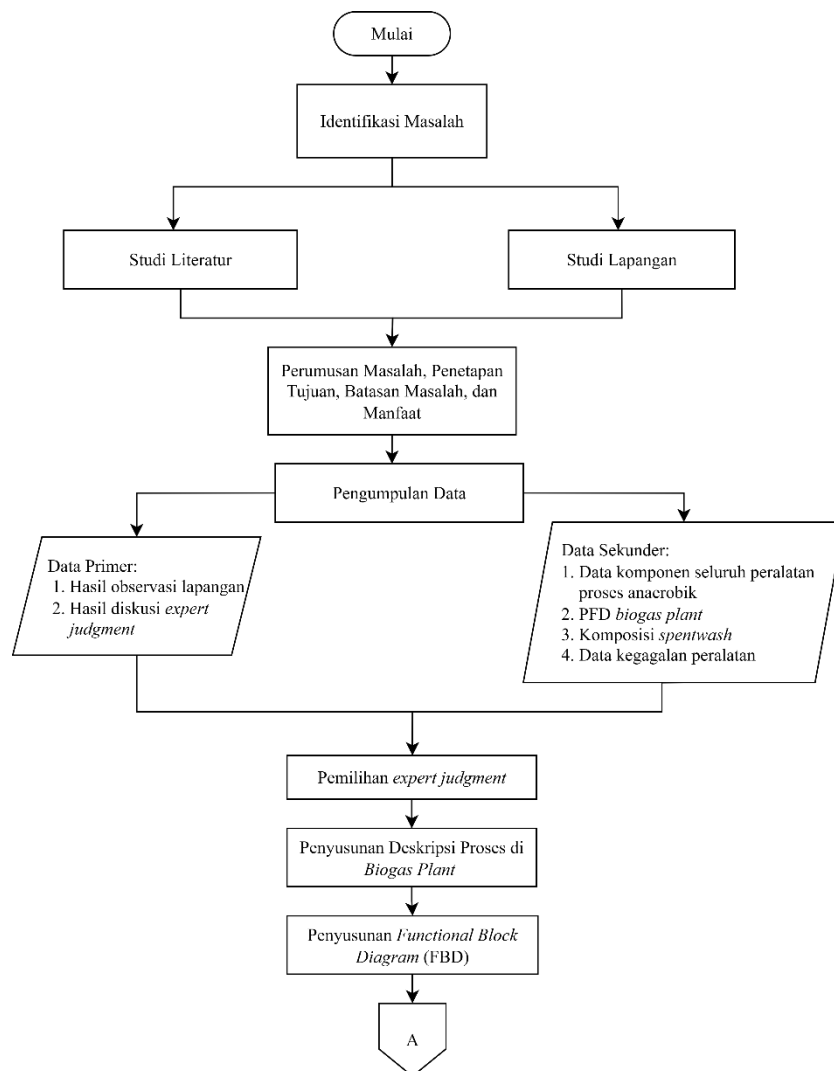
e. Alat Pelindung Diri (APD)

Alat Pelindung Diri (APD) merupakan langkah terakhir yang diambil untuk mengurangi tingkat keparahan yang disebabkan oleh bahaya yang ada.

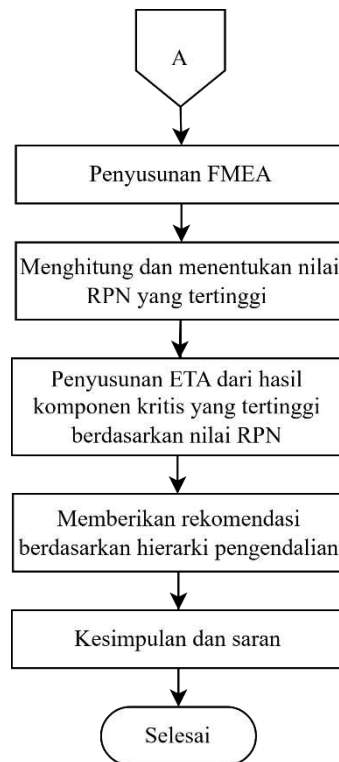
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dikerjakan dalam proses yang terstruktur dan sistematis dalam metode penelitian. Dalam bab ini akan diuraikan tahapan metode penelitian yang dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian sebagai berikut. Berikut merupakan tahapan yang dilakukan dalam proses pengerjaan penelitian yang digambarkan pada diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian



Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian Lanjutan

3.1 Tahapan Pendahuluan

Tahapan pendahuluan merupakan awal dalam melakukan pelaksanaan penelitian. Berikut merupakan isi dari tahapan pendahuluan yang akan dilakukan.

3.1.1 Identifikasi Masalah

Pada tahapan identifikasi masalah dilakukan menjadi dua tahapan, yaitu studi lapangan dan tahapan studi literatur. Kedua tahapan ini akan diuraikan sebagai berikut

a. Studi Lapangan

Studi lapangan merupakan pengamatan secara langsung kepada objek penelitian, yaitu pada *Biogas Plant* mengenai tahapan proses kerja serta potensi bahaya yang dapat timbul pada area tersebut. Studi lapangan ini dilakukan dengan cara observasi secara langsung dan juga diskusi kepada pihak pekerja di area anaerobik untuk mendapatkan informasi lebih detail terkait dengan area *Biogas Plant*.

b. Studi Literatur

Studi literatur terkait penelitian yang dibutuhkan dalam proses penelitian mulai dari tahap identifikasi, analisis, hingga rekomendasi. Adapun literatur yang berasal dari perusahaan untuk digunakan dalam penelitian ini adalah data kegagalan, spesifikasi alat, fungsi dari komponen, dan cara kerja dari peralatan untuk proses anaerobik. Literatur ini akan digunakan sebagai dasar pondasi dalam pengerjaan tugas akhir. Literatur yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode FMEA, metode ini digunakan untuk melakukan analisis kegagalan peralatan. Kemudian menggunakan metode ETA yang berfungsi untuk mengevaluasi apakah peristiwa atau pengendalian yang telah diterapkan oleh perusahaan dapat dikelola secara efektif oleh sistem dan prosedur keselamatan yang telah dirancang. Analisis ini digunakan untuk menilai sejauh mana langkah-langkah pengendalian mampu mencegah berkembangnya suatu peristiwa menjadi kecelakaan serius, sekaligus memberikan rekomendasi kepada perusahaan untuk penyelesaian permasalahan yang ditemukan.

3.1.2 Perumusan Masalah

Pada tahap ini, tahapan dari identifikasi masalah dikembangkan untuk menentukan rumusan masalah, setelah itu menetapkan tujuan dari penelitian yang ingin dicapai, sekaligus manfaat dari dilakukannya penelitian ini. Tahapan ini merupakan fokus dari penelitian berdasarkan dari tujuan yang telah ditetapkan untuk melakukan studi literatur dan pengumpulan data.

3.2 Tahapan Pengumpulan Data

Dalam tahap ini dilakukan pengumpulan data yang dibutuhkan untuk mencapai tujuan penelitian. Data yang dibutuhkan berupa data primer dan data sekunder yang diuraikan sebagai berikut.

1. Data primer yang dibutuhkan dalam penelitian diperoleh melalui diskusi kepada pihak *expert judgment* terkait yaitu, *maintenance supervisor, foreman, supervisor safety* yang mengetahui lebih dalam

mengenai alur proses serta bahaya yang terdapat pada area *Biogas Plant*. Tujuan dilakukannya diskusi ini yaitu untuk mendapatkan informasi secara detail mengenai bentuk kegagalan yang terjadi, penyebab kegagalan dan efek yang ditimbulkan dalam proses anaerobik di area *Biogas Plant*. Tahapan ini diperoleh melalui observasi area kerja, proses kerja, dan hasil diskusi bersama para *expert judgment*.

2. Data sekunder yang dibutuhkan dalam proses penelitian ini berupa data komponen dalam peralatan yang di gunakan untuk proses anaerobik, data kegagalan peralatan, dan data komposisi *spewwash* di industri bioetanol.

3.3 Tahapan Pengolahan Data

Pada tahapan ini dilakukan pengolahan dan analisis data yang telah diperoleh berdasarkan tujuan awal yang ingin dicapai. Berikut merupakan tahapan dalam pengolahan data.

3.3.1 Pemilihan *Expert Judgment*

Penilaian dilakukan oleh individu yang memiliki pengalaman dan keahlian di bidang terkait, seperti *supervisor area*, *foreman area*, dan *supervisor HSE*. Pemilihan *expert judgment* bertujuan untuk memperoleh informasi yang akurat mengenai potensi bahaya serta penyebab kegagalan pada peralatan yang digunakan dalam proses anaerob, yang akan dianalisis menggunakan metode FMEA dan ETA dalam penelitian ini. Proses diskusi bersama para ahli dilakukan melalui pendekatan *brainstorming*, yang membutuhkan koordinasi teknis seperti penjadwalan bersama agar kegiatan dapat berjalan efektif dan menghasilkan data yang maksimal. Hasil dari diskusi dengan pihak terkait memberikan gambaran mengenai jenis-jenis kegagalan komponen serta potensi bahaya yang dapat terjadi selama pengoperasian alat. Selain itu, *expert judgment* juga berperan dalam memvalidasi hasil analisis FMEA dan ETA, serta memberikan masukan dalam menyusun strategi pengendalian risiko berdasarkan hierarki pengendalian yang tepat.

3.3.2 Deskripsi Proses *Biogas Plant*

Mendesripsikan secara jelas mengenai proses yang ada dalam *Biogas Plant*. Dalam tahapan ini peran *expert judgment* sangat diperhatikan, penilaian yang diberikan oleh seorang *expert judgment* mengenai hasil dari data kegagalan dan potensi bahaya dari kegagalan peralatan sangat penting untuk dilakukan analisis dengan metode FMEA. Peran *expert judgment* juga penting dalam proses pengerjaan hingga validasi metode FMEA, ETA dan juga hasil dari rekomendasi menggunakan hierarki pengendalian.

3.3.3 Penyusunan *Functional Block Diagram* (FBD)

Functional Block Diagram digunakan untuk menggambarkan hubungan antar peralatan dan alur proses kerja pada peralatan yang di gunakan dalam proses anaerobik. Diagram ini bertujuan untuk menganalisis fungsi masing-masing peralatan serta potensi kegagalan fungsinya. Representasi visualnya dibuat menggunakan blok-blok yang terhubung oleh garis panah untuk menunjukkan aliran utama proses.

3.3.4 Penyusunan FMEA pada peralatan

Pada tahap ini dilakukan penyusunan FMEA pada peralatan yang digunakan untuk proses yang berada di area *biogas plant*, untuk mengetahui mode kegagalan dan efek dari kegagalan tersebut. Hasil dari FMEA akan digunakan sebagai penentuan titik paling berpotensi untuk terjadinya kegagalan alat. Berikut merupakan langkah-langkah dalam penyusunan FMEA:

1. Mengidentifikasi fungsi dan potensi kegagalan pada setiap komponen peralatan
2. Mengidentifikasi mode kegagalan dengan bantuan *expert judgment* mengenai alat peralatan
3. Menghitung nilai RPN dari setiap kegagalan dengan cara mengalikan *severity* (*S*), *occurrence* (*O*), dan *detection* (*D*)
4. Menentukan nilai RPN tertinggi untuk prioritas utama
5. Menganalisis hasil perhitungan RPN yang telah didapat

3.3.5 Penentuan Komponen Kritis

Penilaian FMEA dilakukan dengan menghitung frekuensi kegagalan berdasarkan data historis perusahaan untuk menentukan nilai RPN, yang berguna dalam mengidentifikasi komponen kritis suatu alat serta dampak kegagalannya. Nilai RPN ini menjadi dasar untuk menentukan tingkat kritis komponen.

3.3.6 Penyusunan *Event Tree Analysis* (ETA)

Proses dalam metode *Event Tree Analysis* (ETA) difokuskan pada komponen yang memiliki kategori kritis tertinggi sesuai dengan nilai RPN. Tahapan pengolahan metode ini dimulai dengan menentukan *initial event*, kemudian mengklasifikasikannya, dan menilai tingkat dampak risiko dengan memperkirakan besarnya dampak yang mungkin terjadi jika peristiwa tersebut berlangsung. Dalam pembuatan diagram ETA, prosesnya meliputi penyusunan *initiating event*, *pivotal event*, *outcomes* dan perhitungan probabilitasnya. Setelah itu, dilakukan evaluasi dan diberikan rekomendasi teknis dengan bantuan oleh *expert judgment*.

3.3.7 Rekomendasi Pengurangan Dampak

Rekomendasi dari dampak akan diberikan berdasarkan hierarki pengendalian. Rekomendasi tersebut dapat berupa penambahan, perbaikan, ataupun penggantian kemudian akan diberikan kesimpulan dan saran.

3.4 Tahapan Kesimpulan dan Saran

Dilakukan proses penyimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan, yang akan menjadi jawaban dari tujuan penelitian ini dilakukan, dan dilakukan pemberian saran untuk perusahaan serta penelitian berikutnya.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Proses Produksi

Produksi bioetanol secara umum terdiri dari dua tahapan, yaitu tahapan fermentasi dan tahapan pemurnian (*refinery*). Pada tahap fermentasi, tetes tebu dikonversikan menjadi etanol dengan konsentrasi sekitar 11-12% (v/v) menggunakan *mikroorganisme*. Proses fermentasi ini melibatkan beberapa langkah, mulai dari propagasi *mikroorganisme* yang berada di laboratorium, selanjutnya propagasi di dalam tanki, dan yang terakhir penyimpanan etanol yang berada didalam tangki khusus. Setelah tahapan fermentasi selesai, cairan etanol kemudian akan dimurnikan melalui tahapan *refinery* yang bertujuan untuk meningkatkan konsentrasi etanol sehingga menjadi bioetanol yang memiliki kualitas tinggi. Tahapan pemurnian (*refinery*) terdiri dari evaporasi yang bertujuan untuk memisahkan *liquid* dengan etanol. Produk dari evaporator yang berupa kondensat campuran dari etanol dengan air memiliki kadar etanol sekitar 16-20%. Tahapan selanjutnya yaitu dilakukannya pemisahan lebih lanjut pada kolom distilasi, tahapan ini dilakukan agar mendapatkan etanol dengan kadar 92%. Prinsip kerja dalam tahapan pemurnian (*refinery*) ialah proses pemisahan etanol dengan air yang berdasarkan dari perbedaan titik didihnya pada tiap tray. Etanol akan menguap terlebih dahulu dikarenakan air memiliki titik didih yang lebih tinggi dibanding etanol, produk yang dihasilkan dari distilasi merupakan uap etanol yang memiliki konsentrasi sebesar 94% dan *spentless* (air dan sedikit etanol). Selanjutnya dilakukan tahapan dehidrasi yang memiliki tujuan untuk menghilangkan kandungan air yang masih dimiliki etanol dari tahapan distilasi guna mendapatkan konsentrasi akhir untuk etanol sebesar 99,5% (Industri Bioetanol, 2024).

Pada produksi bioetanol biasanya menghasilkan 2 jenis limbah, yaitu *spentless* dan *spentwash*. *Spentless* merupakan limbah yang berasal dari tahapan distilasi, limbah ini nantinya akan diolah kembali untuk menjadi *steril pure water* yang berfungsi dalam tahapan fermentasi

Tabel 4. 1 Kandungan *Spentless*

pH	3 – 4,5
COD	± 8000 ppm
Temperature	45°C

Sumber: Industri Bioetanol (2024)

Sedangkan *spentwash* merupakan limbah yang berasal dari *coloumn analyzer* yang berisikan air, *molases* dan *yeast* sisa hasil tahapan dari *refinery* yang selanjutnya diolah menjadi biogas, *spentwash* diolah melalui beberapa tahapan pada fermentasi *anaerob* seperti pengendapan, penyesuaian pH dan pemberian nutrisi.

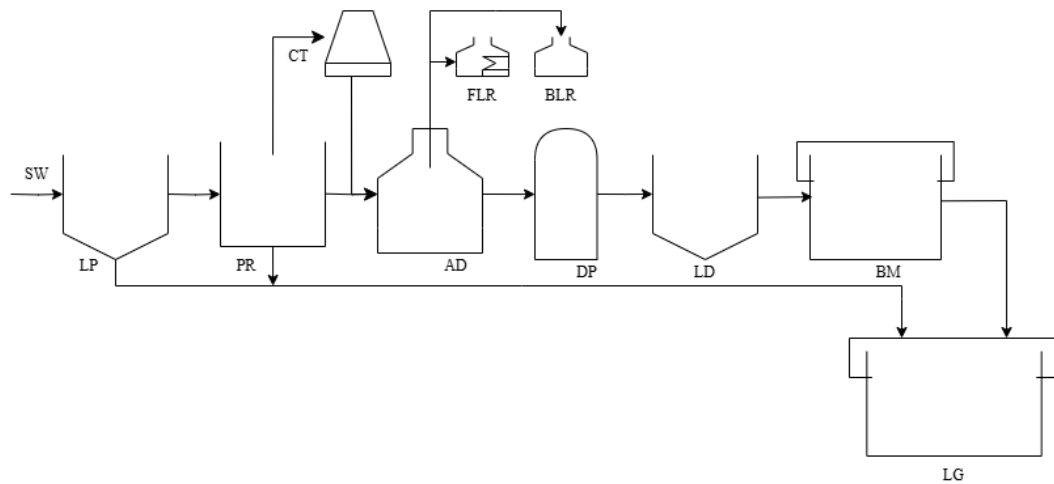
Tabel 4. 2 Kandungan *Spentwash*

pH	3,8 – 4,3
Total Solid	14 – 17 % w/w
Total Suspended Solid	1,3 – 1,5 % w/w
Total Dissolved Solid	13 – 16 % w/w
BOD	60.000 – 80.000 ppm
COD	150.000 – 190.000 ppm
Temperature	40°C

Sumber: Industri Bioetanol (2024)

Spentwash mengandung padatan yang dapat menghambat proses terjadinya fermentasi, oleh karena itu dilakukannya proses pengendapan guna memisahkan *sludge* (lumpur) yang masih tercampur dengan *spentwash* menggunakan *lamella presettling*, *sludge* nantinya akan mengalir menuju *lagoon*, sedangkan *liquid* akan menuju *presettling*. Saat berada didalam *presettling tank* limbah akan ditambahkan urea dan *diammonium phosphate* (DAP), dan juga pada tahapan ini dibantu dengan *cooling tower* guna menaikkan atau menurunkan temperatur suhu yang dimiliki oleh limbah, setelah limbah diproses dalam *presettling tank*, limbah akan dialirkan menuju digester untuk memproses limbah menjadi biogas. Didalam digester terdapat beberapa tahapan yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis. Suhu saat operasi terjadi ialah sekitar 20°C hingga 40°C, suhu yang aman ialah 35°C dengan pH 6,8 hingga 7,2 menurut Ahmad (2011). Biogas yang dihasilkan mengandung 65% hingga 75% gas metana (CH_4), 25% hingga 35% karbondioksida (CO_2), 0,5% hidrogen sulfida (H_2S), dan gas-gas lain sekitar 0,1%. Namun biogas tidak hanya terbentuk pada saat proses di digester, pada saat di *lagoon* juga ikut terbentuk biogas

karena bantuan dari *mikroorganisme*, dengan adanya mikroba didalam *lagoon* hal ini menyebabkan proses fermentasi kembali terjadi dan akan menciptakan biogas. Cairan fermentasi sisa dari digester (*vinasse*) yang meluap secara langsung akan mengalir menuju *degassing pond*. *Vinasse* akan melewati *plate* berlubang sehingga dapat memecah buih dan merilis gas yang terdapat dalam *vinasse*. Setelah *vinasse* melewati *degassing pond* selanjutnya akan masuk menuju *lamella digester*, dalam tahapan ini endapan (*sludge*) yang dimiliki *vinasse* akan diendapkan oleh *lamella digester*. *Sludge* hasil endapan ini masih memiliki banyak kandungan bakteri metanogenesis sehingga sebagian endapan akan di *recycle* kembali menuju digester untuk digunakan sebagai *starter*. *Vinasse* yang berasal dari digester akan ditampung terlebih dahulu di pit biometan sebelum nantinya akan menuju *lagoon* yang merupakan penyimpanan akhir cairan fermentasi sisa yang berasal dari digester. Biogas yang diproduksi oleh digester akan digunakan sebagai bahan bakar boiler untuk proses fermentasi, jika biogas melebihi set point penampungan, gasnya akan dibakar dengan *flare*.



Gambar 4. 1 PFD Anaerobic Plant
Sumber: Industri Bioetanol (2024)

Keterangan:

SW : Spentwash	BM : Pit Biomethan
LP : Lamella Presettling	FLR : Flare
PR : Presettling	BLR : Boiler
CT : Cooling Tower	LG : Lagoon
AD : Anaerobic Digester	
DP : Degassing Pond	
LD : Lamella Digester	

4.2 Pemilihan *Expert Judgment*

Expert judgment atau penilaian ahli merupakan proses sistematis dalam meminta pendapat dari individu yang memiliki kompetensi dan keahlian khusus di bidang terkait, guna memberikan evaluasi berdasarkan pengalaman dan pengetahuan yang dimiliki, penilaian ahli memiliki karakteristik yang terstruktur dan objektif, dengan syarat yang ketat agar setiap keputusan atau pandangan dapat dipertanggungjawabkan secara rasional.

Dalam penelitian ini, peran *expert judgment* sangat diperlukan untuk mendukung proses analisis kegagalan peralatan pada sistem proses anaerob di IPAL industri bioetanol. Para ahli yang terlibat dalam penelitian ini terdiri dari *supervisor*, dan manajer area yang memahami karakteristik sistem dan komponen secara teknis maupun operasional. Peran mereka dalam penelitian ini mencakup identifikasi kegagalan, pemberian nilai pada metode FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*), serta validasi skenario dan konsekuensi pada metode ETA.

A. Expert Judgment 1

Nama : Rodhy Amrillah
Masa Jabatan : 11 Tahun
Jabatan : *Biogas & Fertilizer Plant Manager*

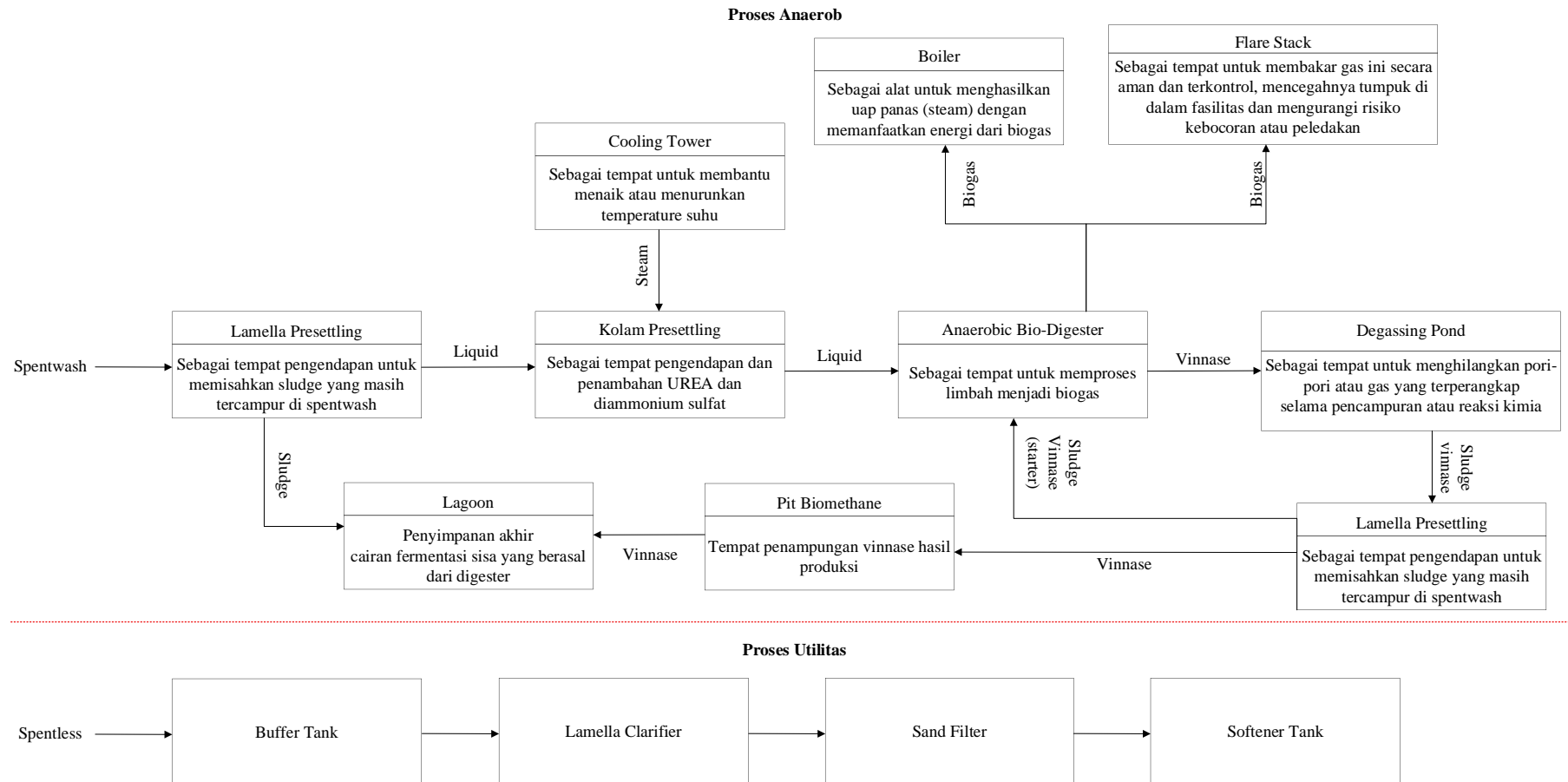
B. Expert Judgment 2

Nama : Randy Istahyudi
Masa Jabatan : 9 Tahun
Jabatan : *Maintenance Supervisor*

C. Expert Judgment 3

Nama : Nurul Bahri
Masa Jabatan : 13 Tahun
Jabatan : *HSE Supervisor*

4.3 Functional Block Diagram Peralatan



Gambar 4. 2 FBD Anaerobik IPAL
Sumber: Industri Bioetanol (2024)

Functional Block Diagram (FBD) merupakan representasi alur kerja sistem yang menggambarkan hubungan antar peralatan serta fungsi dari masing-masing komponen di dalam proses. Diagram ini dibuat untuk memberikan pemahaman visual terkait bagaimana suatu sistem beroperasi, dan sangat membantu dalam proses analisis kegagalan dengan metode FMEA maupun ETA. Dalam penelitian ini, FBD disusun berdasarkan hasil diskusi dengan *expert judgment* yang memiliki pengalaman langsung terhadap sistem IPAL industri bioetanol, serta disesuaikan dengan dokumentasi teknis dan pemahaman lapangan terkait proses anaerob.

Gambar FBD pada sistem IPAL menunjukkan urutan proses mulai dari unit pendukung (seperti *cooling tower* dan boiler), unit pengendapan awal (*lamella presettling* dan kolam *presettling*), hingga proses inti di *anaerobic bio-digester*, serta unit pendukung akhir seperti *degassing pond*, *lagoon*, *pit biomethane*, *flare stack*, dan boiler. Masing-masing peralatan memiliki fungsi spesifik yang saling terintegrasi satu sama lain. Misalnya, kolam *presettling* digunakan untuk pengendapan awal dan penambahan nutrisi, sedangkan *bio-digester* menjadi unit utama dalam pembentukan gas biometana melalui proses anaerobik. Di akhir proses, *lagoon* berfungsi sebagai penampungan sisa cairan hasil fermentasi.

Secara lebih rinci, masing-masing peralatan pada sistem ini memiliki komponen-komponen dengan fungsi spesifik untuk mendukung jalannya proses. Sebagai contoh, *Lamella Presettling* memiliki komponen utama berupa plat lamella yang berfungsi untuk mempercepat proses pemisahan *sludge* dari *spewwash*. Sementara itu, *Anaerobic Bio-Digester* terdiri atas komponen pengaduk internal dan sensor suhu yang berperan dalam menjaga kestabilan kondisi anaerobik dan mempercepat reaksi biologis. Di sisi lain, *Degassing Pond* difungsikan untuk melepaskan gas-gas sisa yang terperangkap dalam cairan, dan biasanya dilengkapi dengan jalur ventilasi atau sistem pelepas tekanan. Adapun komponen seperti boiler, flare stack, dan cooling tower merupakan unit pendukung energi dan keselamatan sistem, yang masing-masing dilengkapi dengan sistem pembakaran gas, kontrol tekanan, dan pendingin suhu.

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
1	<i>Lamella Presettling</i>	<i>Wastewater Inlet</i>	Sebagai jalur masuk awal bagi limbah cair (<i>spewwash</i>) ke dalam unit lamella untuk diproses lebih lanjut.
		<i>Inlet Chamber with Baffles</i>	Mengalirkan air limbah secara merata, memperlambat aliran, mengarahkan aliran ke plat lamella, dan mencegah <i>bypass</i> aliran sehingga efisiensi sedimentasi meningkat
		<i>Distribution Channel</i>	Menyebarkan air limbah secara merata ke seluruh permukaan lamella plates. Ini memastikan aliran seimbang dan menghindari <i>overloading</i> pada satu titik.
		<i>Lateral Flow Ducts</i>	Mengarahkan aliran air limbah ke sela-sela antara pelat <i>lamella</i> . Ini memastikan setiap pelat berfungsi optimal dalam proses sedimentasi.
		<i>Plates</i>	Merupakan pelat-pelat miring yang mempercepat proses pengendapan padatan dengan memperbesar luas permukaan kontak. Memungkinkan partikel padat mengendap lebih cepat ke dasar.
		<i>Sediment Hopper</i>	Wadah berbentuk corong di bagian bawah yang menampung lumpur atau endapan yang jatuh dari <i>lamella plates</i> .
		<i>Sediment Discharge</i>	Jalur keluaran endapan dari <i>hopper</i> ke sistem pengolahan lumpur seperti <i>sludge pump</i> atau pipa <i>drainase</i> .
		<i>Clean Water Out</i>	Jalur keluaran air bersih yang telah terpisah dari padatan menuju ke unit berikutnya yaitu kolam <i>presettling</i> .
2	Pompa Sentrifugal Model FSA	<i>Casing</i>	Rumah pompa yang menahan tekanan dan mengarahkan aliran fluida keluar.
		<i>Casing Cover</i>	Penutup <i>casing</i> pompa yang dapat dibuka untuk inspeksi/servis.
		<i>Impeller</i>	Memutar fluida untuk memberikan energi kinetik agar dapat dipompa.
		<i>Shaft</i>	Poros penggerak yang menghubungkan <i>impeller</i> ke motor.
		<i>Impeller Key</i>	Mengunci <i>impeller</i> pada <i>shaft</i> agar tidak selip.
		<i>Coupling Key</i>	Mengunci kopling ke poros motor/pompa untuk transmisi tenaga.
		<i>Impeller Nut</i>	Mengencangkan <i>impeller</i> pada poros.

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
	Pompa Sentrifugal Model FSA	<i>Impeller Nut Washer</i>	Penahan (<i>washer</i>) agar mur tidak kendur dan <i>impeller</i> tetap stabil.
		<i>Bearing Housing</i>	Rumah pelindung bearing yang mendukung poros dan menjaga posisi.
		<i>Bearing Cover</i>	Menutup <i>bearing</i> dan melindunginya dari kotoran.
		<i>Ball Bearing</i>	Mengurangi gesekan putaran <i>shaft</i> dan menopang beban radial/aksial.
		<i>Deflector</i>	Menahan cipratan fluida agar tidak mencapai bearing.
		<i>Bearing Support</i>	Penopang struktur <i>bearing</i> agar tetap pada posisi kerja.
		<i>Casing Ring</i>	Mengurangi kebocoran internal antara <i>casing</i> dan <i>impeller</i> .
		<i>Mechanical Seal</i>	Mencegah kebocoran fluida di antara <i>shaft</i> yang berputar dan <i>casing</i> tetap.
		<i>Plug</i>	Tutup penguras atau pengisi (biasanya untuk fluida pelumas atau cairan sistem).
		<i>O-Ring</i>	Segel elastomer untuk mencegah kebocoran antara bagian sambungan.
		<i>Spring Holder</i>	Menahan posisi pegas di <i>mechanical seal</i> .
		<i>Coil Spring</i>	Memberikan tekanan konstan pada elemen sealing untuk mempertahankan kontak.
		<i>Bellows</i>	Komponen fleksibel di <i>mechanical seal</i> yang memungkinkan gerakan <i>axial</i> .
		<i>Seal Ring</i>	Komponen utama di <i>mechanical seal</i> yang membentuk bidang kontak dengan <i>matting ring</i> .
		<i>Matting Ring</i>	Bidang kontak pasangan dari <i>seal ring</i> untuk membentuk <i>seal</i> dinamis.
		<i>Cup Gasket</i>	<i>Gasket</i> berbentuk cawan untuk mencegah kebocoran di sambungan tertentu.
		<i>Lantern Ring Bushing</i>	Mengatur sirkulasi cairan pembilas (<i>flush</i>) ke <i>gland packing</i> dan memperpanjang usia seal.
		<i>Gland</i>	Penekan <i>gland packing</i> agar tetap rapat.
		<i>Gland Bolt</i>	Baut pengencang untuk menekan <i>gland</i> ke <i>gland packing</i> .
		<i>Gland Packing</i>	Seal berbentuk tali/kawat untuk mencegah kebocoran di sekitar <i>shaft</i> yang berputar.
3	Kolam Presettling	-	Menampung <i>spentwash</i> untuk proses pendinginan dan penambahan nutrisi sebelum masuk <i>biodigester</i> .

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
4	Cooling Tower CDW	<i>Motor</i>	Menggerakkan fan untuk menciptakan aliran udara yang membantu proses pendinginan air.
		<i>Fan</i>	Menghisap atau mendorong udara melalui <i>tower</i> untuk mempercepat evaporasi air panas.
		<i>Fan Guard</i>	Pelindung kipas agar tidak terjadi kontak langsung dengan baling-baling <i>fan</i> , meningkatkan keselamatan kerja.
		<i>Belt Cover</i>	Menutup dan melindungi sistem transmisi sabuk (<i>belt</i>) dari debu dan gangguan luar.
		<i>Fan Casing</i>	Penutup atau rumah kipas untuk mengarahkan aliran udara secara efisien.
		<i>Upper Water Basin</i>	Wadah penampung sementara air panas yang akan didistribusikan ke area pendinginan (<i>fill</i>).
		<i>Framework</i>	Struktur utama yang menopang seluruh bagian <i>cooling tower</i> .
		<i>Fill</i>	Media tempat air tersebar dan bersentuhan dengan udara, meningkatkan luas permukaan untuk efisiensi perpindahan panas dan evaporasi.
		<i>Lower Frame</i>	Struktur penyangga bagian bawah <i>cooling tower</i> yang menopang <i>basin</i> dan <i>casing</i> .
		<i>Lower Water Basin</i>	Kolam di bagian bawah yang menampung air dingin hasil pendinginan sebelum dipompa kembali.
		<i>Casing Panel</i>	Dinding pelindung luar <i>cooling tower</i> untuk menutupi dan melindungi bagian dalam dari pengaruh luar.
		<i>Ladder</i>	Tangga untuk akses teknisi dalam melakukan inspeksi atau perawatan bagian atas.
		<i>Louver</i>	Sirip ventilasi yang mengatur arah masuknya udara dan mencegah percikan air ke luar.
		<i>Overflow Pipe</i>	Saluran untuk mengalirkan air berlebih jika kapasitas basin terlampaui, mencegah tumpahan.
		<i>Inspection Door</i>	Pintu akses untuk memeriksa atau melakukan pemeliharaan bagian dalam <i>cooling tower</i> .
5	Pompa Casing Volute ICBI	<i>Volute Casing</i>	Rumah pompa berbentuk spiral yang mengumpulkan fluida dari <i>impeller</i> dan mengarahkan ke <i>outlet</i> ; mengubah energi kecepatan menjadi tekanan.

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
	Pompa Casing Volute ICBI	<i>Casing Power</i>	Bagian penutup rumah pompa yang menopang seluruh bagian internal dan menjadi titik koneksi ke sistem.
		<i>Support Foot</i>	Penopang bagian bawah pompa untuk kestabilan dan perletakan pada pondasi.
		<i>Pump Aligment</i>	Komponen yang membantu penjajaran poros antara motor dan pompa.
		<i>Stub Shaft</i>	Poros pendek yang menghubungkan <i>impeller</i> ke motor atau sistem transmisi daya.
		<i>Impeller</i>	Komponen berputar yang memberikan energi kinetik ke fluida untuk memindahkannya.
		<i>Motor Lantern</i>	Dudukan motor yang menjaga keselarasan dan memfasilitasi koneksi antara motor dan pompa.
		<i>Gasket</i>	<i>Seal</i> tipis untuk mencegah kebocoran antara dua permukaan sambungan.
		<i>O-Ring</i>	Seal berbentuk cincin yang mencegah kebocoran fluida pada sambungan bertekanan.
		<i>Mechanical Seal</i>	Seal dinamis yang mencegah kebocoran pada poros putar.
		<i>Wear Ring</i>	Cincin pelindung yang mencegah aus langsung pada casing akibat gesekan <i>impeller</i> .
		<i>Fixing Ring</i>	Menahan atau mengunci komponen pada tempatnya.
		<i>Washer</i>	Penyebar tekanan mur/baut agar tidak merusak permukaan.
		<i>Bevelwasher</i>	<i>Washer</i> dengan sudut untuk menyesuaikan permukaan miring atau berbentuk kerucut.
		<i>Bevelcup</i>	Penahan berbentuk cekung untuk menampung atau mengarahkan komponen lain.
		<i>Washer</i>	Penyebar tekanan mur/baut agar tidak merusak permukaan.
		<i>Guard Plate</i>	Pelindung dari bagian yang berputar atau bertekanan untuk keselamatan kerja.
		<i>Flange Motor</i>	<i>Flange</i> untuk menghubungkan dan menyelaraskan motor ke pompa.
		<i>Hexagonal Screw</i>	Baut segi enam untuk sambungan permanen antara bagian-bagian pompa.
		<i>Stud</i>	Batang ulir sebagai pengunci atau penyangga sambungan.

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
	Pompa Casing Volute ICBI	<i>Grub Screw</i>	Baut kecil tanpa kepala yang biasa digunakan untuk mengunci komponen berputar seperti gear atau <i>pulley</i> .
		<i>Drain Plug</i>	Saluran buangan cairan yang memungkinkan pengosongan pompa saat <i>shutdown</i> atau perawatan.
		<i>Hexagonal Nut</i>	Mur segi enam untuk mengencangkan baut dan komponen lainnya.
		<i>Impeller Nut</i>	Mengencangkan impeller pada poros.
		<i>Key</i>	Komponen kecil yang mengunci pergerakan putaran antara poros dan <i>impeller</i> atau <i>gear</i> agar tidak slip.
		<i>Shell & Roof Structure</i>	Struktur utama reaktor untuk menahan tekanan dan memisahkan lingkungan luar dengan proses fermentasi anaerob di dalam tangki
		<i>Spare Liquid Inlet</i>	Jalur cadangan untuk mengisi cairan limbah ke dalam <i>digester</i> jika <i>inlet</i> utama tidak dapat digunakan.
6	Anaerobic Bio-Digester (CSTR)	<i>Liquid Inlet</i>	Jalur utama untuk memasukkan limbah cair ke dalam <i>digester</i> sebagai bahan baku fermentasi.
		<i>Central Agitator Port</i>	Titik pemasangan pengaduk pusat yang berfungsi mencampur isi tangki agar homogen.
		<i>Gas Vent with Valve</i>	Untuk melepaskan gas secara terkontrol dari tangki, menjaga tekanan tidak berlebih.
		<i>Pressure Gauge with Plug</i>	Mengukur tekanan internal di dalam tangki untuk <i>monitoring</i> dan kontrol keselamatan.
		<i>Pressure /Vacuum Relief Valve</i>	Melindungi tangki dari kondisi tekanan atau vakum ekstrem dengan membuka otomatis.
		<i>Biogas Outlet</i>	Saluran keluaran gas metana hasil fermentasi menuju sistem penampungan/energi.
		<i>Spare with Blind Flange</i>	Titik cadangan untuk penambahan komponen di masa depan, ditutup dengan <i>blind flange</i> .
		<i>Digested Spent Wash Out</i>	Jalur pengeluaran limbah cair yang telah difermentasi untuk proses selanjutnya.
		<i>Pressure Transmitter Connection</i>	Titik untuk alat ukur tekanan otomatis yang mengirim data ke kontrol sistem.

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
	Anaerobic Bio-Digester (CSTR)	<i>Sample Point</i>	Titik pengambilan sampel cairan dari berbagai ketinggian untuk pengujian kualitas.
		<i>Lateral Agitator Connection</i>	Titik pemasangan pengaduk samping untuk sirkulasi dan pencampuran isi tangki.
		<i>Drain System</i>	Sistem pengurasan atau pembuangan cairan dari tangki saat pembersihan atau <i>shutdown</i> .
		<i>Safety System</i>	Berfungsi mengeluarkan <i>spentwash</i> secara terkendali ketika level cairan dalam <i>digester</i> melebihi batas operasi normal. Fitur ini mencegah risiko <i>overflow</i> dan menjaga stabilitas proses anaerobik.
		<i>Spentwash Out Pipe</i>	Pipa pengeluaran limbah cair ke kolam <i>presettling</i> sebelum proses lanjutan.
		<i>Tangga & Platform</i>	Akses operator untuk inspeksi, perawatan, dan pengambilan data di atas tangki.
		<i>Agitator (Mixer Shaft)</i>	Batang pengaduk yang berfungsi mengaduk isi <i>digester</i> agar tetap homogen dan mencegah pengendapan.
		<i>Bottom Sloped Plate</i>	Bagian dasar tangki yang miring untuk memudahkan pengaliran lumpur atau residu ke sistem <i>drainase</i> .
		<i>Safety Guard</i>	Pelindung mekanis untuk mencegah kecelakaan saat pengoperasian peralatan.
		<i>Casing</i>	Pelindung utama blower dan tempat semua komponen internal terpasang. Berfungsi menjaga tekanan dan arah aliran udara.
7	Blower Type BO	<i>Housing</i>	Rangka struktural pendukung rotor dan <i>shaft</i> blower. Tempat penempatan bearing dan elemen transmisi lainnya.
		<i>Gear Cover</i>	Penutup untuk ruang gear yang melindungi gigi transmisi dari debu dan kontaminan.
		<i>Rotor Shaft</i>	Poros utama tempat rotor blower berputar, mentransmisikan tenaga dari motor ke rotor.
		<i>Discharge Flange</i>	Titik keluaran udara terkompresi dari blower ke sistem.
		<i>Timing Gear</i>	Sinkronisasi putaran rotor dalam blower agar tidak saling berbenturan.
		<i>Blower Pulley</i>	Menghubungkan motor ke blower melalui sabuk (<i>belt</i>) untuk mentransmisikan daya putar.
		<i>Bearing L</i>	Mendukung poros (<i>shaft</i>) dan memungkinkan putaran yang stabil serta mengurangi gesekan.

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
	Blower Type BO	<i>Gear Stop Nut</i>	Mengunci posisi <i>gear</i> agar tidak bergeser saat blower beroperasi.
		<i>Conical Spring Washer</i>	Memberikan tekanan seragam pada sambungan berulir agar tidak mudah kendur.
		<i>V-Seal</i>	<i>Seal</i> fleksibel yang mencegah masuknya kontaminan seperti debu dan cairan ke area bearing atau poros.
		<i>Snap Ring</i>	Pengunci komponen berputar agar tetap berada di tempatnya, terutama di area bearing.
		<i>Grease Nipple</i>	Titik injeksi pelumas (<i>grease</i>) ke dalam bearing atau area bergerak lainnya.
		<i>Oil Gauge</i>	Menunjukkan <i>level</i> oli di dalam gearbox blower. Memastikan pelumasan memadai.
		<i>Oil Cap</i>	Penutup tempat pengisian oli pada sistem pelumasan blower.
		<i>Pulley Check Key</i>	Menahan <i>pulley</i> agar tidak berputar bebas pada poros (<i>shaft</i>), menjaga posisi tetap.
		<i>Pulley Check Plate</i>	Pelat penahan <i>pulley</i> agar tidak bergeser dari posisi kerja.
		<i>Gasket for Gear Cover</i>	Mencegah kebocoran oli atau udara di sambungan <i>gear cover</i> dan <i>housing</i> .
		<i>Gasket for Housing</i>	<i>Seal</i> antara dua bagian <i>housing</i> agar tidak bocor.
		<i>Gasket for Disc. Flange</i>	Mencegah kebocoran udara/oli di sambungan antara <i>flange</i> dan pipa.
		<i>Pulley Check Bolt</i>	Baut yang menahan <i>pulley check plate</i> pada tempatnya.
		<i>Oil Drain Plug</i>	Titik pembuangan oli lama saat penggantian pelumas.
		<i>Slinger</i>	Menyebarkan oli secara merata ke bagian dalam blower saat berputar.
		<i>O Ring for Bearing</i>	<i>Seal</i> berbentuk cincin yang mencegah kebocoran pelumas di area <i>bearing</i> .
		<i>Sprinkle Plate</i>	Menyebarkan oli ke permukaan <i>gear</i> atau <i>bearing</i> saat sistem bekerja.
		<i>Check Valve</i>	Mencegah aliran balik udara atau fluida ke blower dari sistem <i>downstream</i> .
		<i>Safety Valve</i>	Melepaskan tekanan berlebih secara otomatis untuk mencegah kerusakan blower atau sistem.
8	Boiler MT040G	<i>Thermostat (L4006A211 4)</i>	Mengatur dan menjaga suhu air dalam boiler agar tetap pada kisaran yang diinginkan dengan mengontrol elemen pemanas.

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
	Boiler MT040G	<i>3/4 Short Well</i>	Rumah sensor termostat yang melindungi sensor dari kontak langsung dengan air panas sambil memungkinkan pengukuran suhu.
		<i>Clean Out Cover</i>	Penutup yang dapat dilepas untuk akses ke bagian dalam boiler saat proses pembersihan endapan atau inspeksi.
		<i>Outer Gasket</i>	Menyegel bagian luar <i>clean out cover</i> untuk mencegah kebocoran uap atau air.
		<i>Inner Gasket</i>	Menyegel bagian dalam untuk perlindungan ganda terhadap kebocoran dan menjaga tekanan internal.
		<i>M10 x 30mm Carriage Bolt</i>	Baut pengikat komponen, biasanya digunakan untuk mengencangkan <i>clean out cover</i> atau panel lainnya.
		<i>M10 Flat Washer</i>	Menyebarkan tekanan baut agar tidak merusak permukaan dan memastikan pemasangan rapat.
		<i>M10 Hex Nut</i>	Mur pengunci baut M10 agar tidak longgar selama operasi.
		<i>Cap</i>	Tutup pelindung, biasanya menutup akses ke bagian sensitif seperti elemen pemanas atau sensor.
		<i>Cap Insulation</i>	Material isolasi yang menutupi bagian dalam cap untuk menjaga efisiensi termal dan keselamatan.
		<i>M4 Flat Washer</i>	<i>Washer</i> kecil untuk menyebarkan tekanan baut kecil (M4).
		<i>M4 x 10mm Machine Screw</i>	Sekrup mesin untuk mengencangkan bagian ringan seperti isolasi atau pelat pelindung.
		<i>Anode Rod</i>	Batang logam yang digunakan untuk mencegah korosi tangki melalui proses <i>sacrificial anode</i> .
		<i>Rubber Anode Gasket</i>	Karet pelindung untuk menyegel sambungan anode rod agar tidak terjadi kebocoran.
		<i>Insulating Gasket</i>	Gasket isolasi untuk mencegah arus listrik bocor yang bisa mempercepat korosi.
		<i>M8 Flat Washer</i>	<i>Washer</i> untuk baut/mur ukuran M8 agar distribusi tekanan lebih merata.
		<i>M8 Lock Washer</i>	<i>Washer</i> pengunci yang mencegah mur M8 mengendur akibat getaran.

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
9	Flare Stack FL-4201 Schedule 40 Carbon Steel	Pilot Burner	Burner kecil yang berfungsi sebagai sumber nyala awal (<i>ignition</i>) untuk menyalakan gas utama (biogas) saat keluar dari <i>flare</i> .
		Wind Shield	Pelindung angin yang mencegah nyala api dari <i>pilot burner</i> atau <i>flare</i> padam akibat tiupan angin.
		Flare Tip	Ujung <i>flare</i> tempat pembakaran akhir biogas terjadi, didesain untuk membakar gas secara efisien dan aman.
		Flare Stack Body	Badan utama cerobong <i>flare</i> , berfungsi sebagai saluran vertikal tempat aliran gas menuju <i>flare tip</i> .
		PCD 1220	Pitch Circle Diameter (PCD) untuk flensa penghubung
		16 NB Flange	Flensa standar untuk menghubungkan pipa biogas ke <i>flare stack</i> . 16 NB berarti nominal bore ½ inci. ASA 150# menunjukkan tekanan kerja maksimum (150 psi).
		Flare Mounting Plate "A"	Pelat dasar untuk pemasangan struktur <i>flare</i> di atas pondasi atau <i>support</i> .
		Anchor Bolts	Posisi pada <i>mounting plate</i> , jumlah 4 buah untuk penguncian unit ke struktur
		Inlet Nozzle	Titik masuknya biogas ke sistem <i>flare</i> dari instalasi WWTP
10	Degassing Pond Silinder Vertical Packed Tower Stainless Steel SA 336	Main Vessel	Merupakan badan utama menara (<i>tower</i>) tempat proses <i>degassing</i> berlangsung, Berbentuk silinder vertikal untuk efisiensi distribusi aliran dan kontak permukaan.
		Valve	Mengontrol aliran fluida masuk dan keluar sistem
		Nipple	Pipa pendek berulir untuk menyambungkan komponen pipa lain, seperti <i>valve</i> , <i>elbow</i> , atau <i>gauge</i> .
		Hex Bolts	Baut berkepala segi enam untuk menyatukan bagian-bagian struktur seperti <i>flange</i> , <i>body</i> , atau <i>base plate</i> .
		Spring Washer	Washer berbentuk spiral/berpegas yang digunakan bersama baut untuk mencegah kendur karena getaran.
		Hex Nut	Mur berkepala segi enam yang dipasangkan dengan <i>hex bolt</i> untuk mengunci sambungan mekanis.
		Bolts	Menghubungkan bagian-bagian utama <i>vessel</i>

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
	<i>Degassing Pond Silinder Vertical Packed Tower Stainless Steel SA 336</i>	<i>8" Elbow Components</i>	Sambungan pipa berbentuk siku dengan diameter 8 inci, digunakan untuk mengubah arah aliran fluida.
		<i>Seal</i>	Komponen elastomer atau logam lunak yang diletakkan di antara dua permukaan sambungan (seperti <i>flange</i>) untuk mencegah kebocoran.
		<i>Foundation Bolts</i>	Baut tanam untuk mengikat struktur utama (<i>vessel</i>) ke fondasi beton, memastikan kestabilan dan keamanan unit.
		<i>Pressure Gauge</i>	Alat ukur tekanan yang menunjukkan tekanan internal dalam <i>vessel</i> ; penting untuk kontrol dan keamanan sistem.
11	<i>Lamella Digester</i>	<i>Wastewater Inlet</i>	Jalur masuk awal <i>sludge vinasse</i> ke dalam unit <i>lamella digester</i> untuk diproses lebih lanjut.
		<i>Inlet Chamber with Baffles</i>	Berfungsi untuk menenangkan aliran masuk agar tidak turbulen serta menyebarkan aliran secara merata sebelum memasuki saluran distribusi. <i>Baffle</i> di dalamnya membantu memperbaiki distribusi aliran limbah.
		<i>Distribution Channel</i>	Menyebarkan air limbah secara merata ke seluruh permukaan pelat <i>lamella</i> . Distribusi yang seimbang ini penting untuk efisiensi proses pengendapan di antara pelat.
		<i>Lateral Flow Ducts</i>	Saluran yang mengarahkan aliran air limbah ke sela-sela antara pelat <i>lamella</i> . Tujuannya adalah memastikan setiap pelat bekerja secara optimal dalam mempercepat sedimentasi padatan.
		<i>Plates</i>	Fungsinya adalah mempercepat pengendapan lumpur atau partikel padat dari cairan yang mengalir melewatinya.
		<i>Sediment Hopper</i>	Wadah berbentuk corong di bagian bawah unit yang menampung lumpur aktif dan endapan lainnya yang jatuh dari pelat <i>lamella</i> .
		<i>Sediment Discharge</i>	Jalur pembuangan lumpur dari hopper. Pada <i>lamella digester</i> , <i>vinasse</i> sisanya diarahkan ke pit biomethane.
		<i>Clean Water Out</i>	Jalur keluaran air bersih (efluen) yang telah terpisah dari lumpur dan partikel padat, sebagian lumpur aktif ini dikembalikan ke unit biodigester atau CSTR untuk mendukung proses biologis lanjutan

Tabel 4. 3 Data Komponen Peralatan Lanjutan

No	Nama Alat	Komponen	Fungsi
12	<i>Pit Biomethane</i>	-	Menampung <i>spentwash after treated</i> sebelum dialirkan menuju lagoon
13	<i>Lagoon</i>	-	Kolam penampungan terakhir dari limbah yang di hasilkan pada proses produksi bioethanol
		<i>Cover lagoon</i>	Mencegah resapan, dan sebagai kontrol gas dan bau

4.4 Failure Mode Effect Analysis (FMEA)

FMEA diterapkan dalam penelitian ini terhadap komponen-komponen yang telah diidentifikasi dalam Tabel 4.1. hingga 4.12. Komponen-komponen tersebut merupakan bagian dari sistem proses pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) industri bioetanol, yang menjadi fokus utama dalam analisis ini. Tujuan penerapan metode FMEA adalah untuk dapat mengetahui berbagai potensi kegagalan yang mungkin dapat terjadi di lapangan sekaligus memahami sejauh mana kegagalan tersebut dapat memengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Komponen-komponen tersebut dianalisis menggunakan lembar kerja FMEA untuk mengetahui mode kegagalan, dampak, penyebab, serta pengendalian yang sudah diterapkan maupun yang masih perlu dikembangkan. Analisis dilakukan secara sistematis dengan mempertimbangkan seluruh aspek yang relevan dari proses operasional.

Pelaksanaan analisis FMEA dilakukan melalui kombinasi dari pengamatan langsung di lapangan serta diskusi bersama *expert judgement* dari teknisi maupun *supervisor* terkait yang memahami kondisi terkait keadaan dan alur proses di unit IPAL. Hal ini bertujuan agar analisis yang dilakukan bersifat realistis, sesuai dengan kondisi aktual sistem, dan mempertimbangkan pengalaman praktis dari personel yang terlibat langsung dalam operasional sistem. Dengan demikian validitas hasil analisis dapat lebih terjamin dan rekomendasi perbaikan yang dihasilkan menjadi lebih relevan karena sesuai dengan kebutuhan di lapangan. Secara umum, aspek-aspek utama yang dianalisis dalam metode FMEA ini mencakup:

- a) *Component*: Menentukan dan mengidentifikasi komponen dari sistem/peralatan yang dianalisis. Komponen yang dianalisis merupakan bagian dari sistem IPAL yang memiliki potensi mengalami gangguan operasional.
- b) *Potential Failure Mode*: Menentukan jenis atau mode kegagalan potensial yang mungkin terjadi dari fungsi setiap komponen.
- c) *Effect of Failure*: Menjelaskan dampak atau konsekuensi apabila kegagalan tersebut terjadi terhadap sistem secara keseluruhan.
- d) *Potential Cause of Failure*: Menjelaskan penyebab yang memungkinkan terjadinya mode kegagalan.
- e) *Current Control*: Menjelaskan upaya pengendalian atau sistem pemantauan yang sudah dilakukan untuk mencegah atau mendeteksi kegagalan.

Setiap potensi kegagalan kemudian diberikan penilaian terhadap tiga parameter utama, yaitu:

- a) *Severity (S)*: Seberapa parah dampak dari kegagalan tersebut terhadap sistem atau keselamatan. Penilaian dilakukan berdasarkan seberapa besar kegagalan tersebut mempengaruhi proses produksi, kualitas produk, lingkungan, atau keselamatan tenaga kerja.
- b) *Occurrence (O)*: Seberapa sering kemungkinan kegagalan itu terjadi berdasarkan data historis.
- c) *Detection (D)*: Seberapa besar kemungkinan kegagalan tersebut dapat dideteksi sebelum menimbulkan kerusakan.

Nilai dari ketiga parameter dapat dilihat di tabel 2.2 hingga 2.4, setelah itu akan dikalikan untuk mendapatkan skor yang disebut dengan *Risk Priority Number (RPN)*. Nilai RPN digunakan untuk menentukan prioritas penanganan, di mana semakin tinggi nilai RPN maka semakin besar risiko yang harus segera ditangani.

4.4.1 Failure Mode and Effect Analysis Lamella Presettling

Tabel 4. 4 FMEA Komponen Tertinggi *Lamella Presettling*

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
<i>System</i> : <i>Lamella Presettling</i>					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Year</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurrence (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : <i>Lamella Presettling</i>									
1	<i>Flocculation Tank</i>	Kebocoran	Kebocoran cairan kougulan	3	Korosi bahan kimia	2	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang bocor, dan dilakukan pemantauan mengenai aliran	4	24
Nama Peralatan : Pompa Sentrifugal Model FSA									
2	Impeller	Longgar dari poros	Vibrasi tinggi, kegagalan total pompa	5	Penguncian tidak sempurna	2	Pengencangan ulang, dan dilakukan pemantauan visual getaran pada pompa	4	40

Hasil *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) terhadap sistem *Lamella Presettling* dalam instalasi pengolahan limbah cair industri bioetanol, ditemukan dua komponen dengan tingkat risiko signifikan, yaitu *Flocculation Tank* dan *Impeller* pada Pompa Sentrifugal Model FSA. Kedua komponen ini menjadi fokus utama analisis karena memiliki fungsi penting dalam tahapan awal pengolahan limbah cair, dan kegagalannya dapat memengaruhi kelancaran proses produksi maupun efisiensi pengolahan limbah secara keseluruhan.

Komponen pertama yang dianalisis adalah *Flocculation Tank*, berperan dalam pencampuran awal cairan koagulan sebelum limbah masuk ke tahap pengendapan di dalam sistem lamella. Efektivitas proses ini sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik tangki dan kestabilan aliran internal. Kegagalan yang diidentifikasi pada tangki ini adalah kebocoran akibat korosi, terutama pada sambungan tangki yang rawan aus karena kontak terus-menerus dengan bahan kimia yang bersifat korosif. Kebocoran ini dapat menyebabkan keluarnya cairan koagulan dari sistem, menurunkan efisiensi pencampuran, hingga mencemari lingkungan kerja. Berdasarkan karakteristik dampaknya, nilai *Severity* (S) ditetapkan sebesar 3 sesuai dengan acuan kriteria tabel 2.2, karena meskipun tidak menyebabkan penghentian proses secara langsung, pengaruhnya terhadap performa sistem cukup signifikan. Selanjutnya untuk data historis lima tahun terakhir, yang menunjukkan bahwa rata-rata terdapat dua kejadian kebocoran pada *Flocculation Tank* tiap tahunnya, hal ini menunjukkan bahwa meskipun tidak terlalu sering terjadi, tetapi kegagalan ini tetap harus diperhitungkan dalam penilaian risiko operasional sistem, sehingga nilai *Occurance* (O) yang sesuai dengan tabel 2.3 ditetapkan 2. Deteksi terhadap kebocoran saat ini masih bersifat reaktif, karena kebocoran baru dapat diketahui setelah cairan mulai terlihat bocor dari dinding atau sambungan tangki. Karena belum ada sistem pemantauan otomatis, dan juga inspeksi yang dilakukan hanya berupa pengamatan visual oleh operator selama pergantian *shift* maka *Detection* (D) diberi nilai 4 hal ini berdasarkan kriteria tabel 2.4.

Dengan demikian, nilai total RPN untuk *Flocculation Tank* adalah 24. Risiko ini masih tergolong sedang, tetapi tetap perlu dipantau secara berkelanjutan untuk mencegah perburukan kondisi.

Komponen kedua, *Impeller* pada Pompa Sentrifugal Model FSA, merupakan bagian penting dalam menjamin aliran cairan tetap stabil selama proses *presettling*. *Impeller* bekerja dengan memutar cairan dalam pompa sehingga menghasilkan tekanan yang cukup untuk mengalirkan campuran ke tahap berikutnya. Potensi kegagalan yang ditemukan adalah *impeller* longgar dari porosnya, yang menyebabkan vibrasi tinggi dan berisiko menyebabkan kegagalan total pompa. Kegagalan ini bisa disebabkan oleh penguncian *impeller* yang tidak sempurna atau akibat keausan pada sistem pengikat.

Dampak dari kegagalan *impeller* ini berpotensi menghentikan aliran sistem dan menyebabkan *downtime*, nilai *Severity* (S) berdasarkan kriteria tabel 2.2 ditetapkan sebesar 5 bahwa kegagalan yang berpotensi menghentikan proses produksi atau sistem secara total masuk kategori *severity* tertinggi. Berdasarkan catatan kejadian lima tahun terakhir, insiden longgarnya *impeller* terjadi sekitar 1 hingga 2 kali per tahun, meskipun jumlahnya tidak tergolong sering, dampak dari kegagalan ini cukup besar sehingga tetap menjadi perhatian utama dalam evaluasi risiko, sehingga *Occurance* (O) diberi nilai 2 selaras dengan kriteria penilaian tabel 2.3. Deteksi terhadap kondisi ini masih kurang memadai karena vibrasi baru teridentifikasi saat sudah cukup parah. Oleh karena itu, *Detection* (D) diberi nilai 4 sesuai dengan tabel 2.4, karena deteksi terhadap masalah *impeller* masih dilakukan secara manual dan belum mampu mendeteksi kondisi awal secara akurat. Dari ketiga parameter tersebut dilakukan perhitungan untuk mencari nilai RPN dan didapati nilai untuk komponen ini mencapai 40. Nilai ini merupakan yang tertinggi di antara seluruh komponen dalam sistem *Lamella Presettling*, menunjukkan bahwa risiko kegagalan pada komponen ini memiliki prioritas tertinggi untuk diawasi dan ditangani. Keberadaan *impeller* sebagai komponen inti dalam menjaga kelangsungan aliran cairan membuat potensinya dianggap sebagai titik kritis dalam sistem.

4.4.2 Failure Mode and Effect Analysis Kolam Presettling

Tabel 4. 5 FMEA Komponen Tertinggi Kolam Presettling

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System</i> : Kolam Presettling				<i>Date</i> :					
<i>Subsystem</i> :				<i>Years</i> :					
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Kolam Presettling									
1	Beton bertulang, volume 30m ³	Retak Struktural	Robohnya unit	5	Kualitas pencampuran beton yang buruk	1	Inspeksi manual secara visual	4	20

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) terhadap sistem Kolam *Presettling*, ditemukan bahwa struktur beton bertulang dengan volume 30 m³ memiliki tingkat risiko signifikan. Komponen ini merupakan bagian utama dari konstruksi kolam yang berfungsi sebagai wadah permanen dalam proses awal pengendapan limbah cair sebelum memasuki tahapan pengolahan lanjutan.

Kegagalan utama yang teridentifikasi adalah retak struktural, yang apabila tidak ditangani dengan cepat dan tepat, berpotensi menyebabkan keruntuhan unit secara keseluruhan. Kerusakan ini bersifat serius karena dapat menghentikan operasi sistem sepenuhnya serta menimbulkan risiko keselamatan kerja dan kerugian material. Penyebab dominan dari kegagalan ini adalah kualitas pencampuran beton yang kurang baik, yang dapat menghasilkan struktur yang rapuh dan tidak tahan terhadap tekanan maupun pengaruh lingkungan jangka panjang.

Tingkat keparahan (*Severity*) berdasarkan tabel 2.2 dari potensi kegagalan ini diberi nilai 5, karena akibat yang ditimbulkan sangat kritis terhadap keberlangsungan proses dan keselamatan fasilitas. Namun demikian, berdasarkan data pengamatan dan catatan pemeliharaan selama beberapa tahun terakhir, frekuensi kejadian (*Occurance*) retak struktural tergolong sangat jarang, dan lebih bersifat potensial daripada historis. Oleh karena itu, nilai *Occurance* yang sesuai tabel 2.3 ditetapkan pada nilai 1.

Berdasarkan kondisi lapangan, deteksi kebocoran hanya dapat dilakukan ketika cairan sudah mulai menetes atau mengalir keluar dari sistem, sehingga deteksi dini menjadi terbatas. Oleh karena itu, tingkat deteksi (*Detection*) berdasarkan tabel 2.4 diberikan nilai 4, karena deteksi yang dilakukan saat ini memiliki keterbatasan dalam mendeteksi retakan pada tahap awal. Dari keseluruhan analisis FMEA, komponen beton bertulang pada Kolam *Presettling* memperoleh nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebesar 20, yang meskipun tidak tergolong sangat tinggi, tetap perlu diperhatikan secara khusus mengingat potensi dampaknya terhadap integritas struktur dan kelangsungan proses operasional.

4.4.3 Failure Mode and Effect Analysis Cooling Tower

Tabel 4. 6 FMEA Komponen Tertinggi *Cooling Tower*

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
<i>System</i> : Cooling Tower				<i>Date</i> :					
<i>Subsystem</i> :				<i>Years</i> :					
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurrence (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Cooling Tower									
1	Motor	Overheat	Downtime sistem	5	Overload	1	Pembersihan pendingin motor dari kotoran	4	20
Nama Peralatan : Pompa Casing Volute ICB									
2	Mechanical Seal	Aus	Berasap, kebocoran cairan dari housing pompa	4	Gesekan berlebih, pelumasan tidak cukup	2	Penggantian seal baru dan setting ulang	4	32

Penerapan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) pada sistem *Cooling Tower* mengidentifikasi dua komponen dengan tingkat risiko signifikan, yaitu motor *cooling tower* dan *mechanical seal* pada pompa *casing volute* ICB. Kedua komponen ini memiliki peran penting dalam mendukung kinerja sistem pendingin yang digunakan dalam proses industri bioetanol.

Motor berfungsi sebagai penggerak kipas pendingin yang memastikan sirkulasi udara berjalan optimal. Potensi kegagalan yang teridentifikasi adalah *overheat* akibat beban berlebih (*overload*). Jika tidak segera ditangani, kondisi ini dapat menyebabkan kerusakan permanen pada motor dan mengganggu kelangsungan proses produksi. Berdasarkan tingkat dampaknya, parameter *Severity* (S) diberi skor 5. Namun, karena kejadian *overheat* tergolong sangat jarang berdasarkan data historis, skor *Occurrence* (O) adalah 1. Di sisi lain, karena sistem belum dilengkapi deteksi otomatis dan masih mengandalkan inspeksi manual, skor *Detection* (D) adalah 4. Hasil perhitungan menunjukkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebesar 20. Meskipun tergolong rendah, tetap diperlukan program pemeliharaan preventif untuk mencegah risiko lebih lanjut.

Komponen kedua, *mechanical seal*, berfungsi menjaga kedapannya pompa dan mencegah kebocoran cairan. Potensi kegagalan utamanya adalah keausan akibat gesekan dan pelumasan yang tidak memadai. Gejala awal meliputi munculnya asap dan kebocoran, yang dapat menurunkan efisiensi pendinginan. Berdasarkan catatan lima tahun terakhir, kegagalan pada komponen ini terjadi sekitar 2 hingga 6 kali per tahun. Dengan demikian, nilai *Severity* (S) adalah 4, *Occurrence* (O) sebesar 2, dan *Detection* (D) sebesar 4, menghasilkan RPN sebesar 32. Nilai ini menunjukkan perlunya pemantauan rutin dan strategi *condition-based maintenance* untuk mencegah kerusakan yang lebih besar.

Melalui analisis FMEA ini, perusahaan dapat menyusun prioritas pemeliharaan berdasarkan risiko, sehingga keandalan sistem *Cooling Tower* dapat ditingkatkan, dan potensi gangguan pada proses industri dapat diminimalkan secara sistematis.

4.4.4 Failure Mode and Effect Analysis Anaerobic Bio Digester

Tabel 4. 7 FMEA Komponen Tertinggi Anaerobic Bio Digester

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
<i>System</i> : Anaerobic Bio-Digester (CSTR)					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Years</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurrence (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Anaerobic Bio-Digester (CSTR)									
1	Agitator (Mixer Shaft)	Shaft patah	Agitasi tidak efektif	5	Tekanan dan getaran berlebih	1	Penggantian agitator dilakukan saat shutdown pabrik	4	20
Nama Peralatan : Blower type BO									
2	Safety Valve	Tidak membuka saat overpressure	Risiko kerusakan sistem	4	Tekanan berlebih	2	Kalibrasi untuk safety valve, pembersihan valve dari sumbatan	4	32

Sistem *Anaerobic Bio-Digester tipe Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)*, terdapat beberapa komponen utama yang berperan penting dalam menjaga stabilitas dan keberlangsungan proses pengolahan limbah berbasis mikroorganisme anaerob. Sistem ini sangat sensitif terhadap gangguan mekanis maupun fluktuasi lingkungan, karena seluruh proses bergantung pada keseimbangan biologis dan keberfungsian peralatan pendukung. Komponen yang paling vital sekaligus memiliki potensi risiko tinggi terhadap gangguan proses adalah *agitator (mixer shaft)* dan *blower safety valve*. Meskipun memiliki fungsi yang berbeda, keduanya saling menunjang dalam menjaga efisiensi, keamanan, dan kontinuitas sistem secara menyeluruh.

Komponen pertama yang dianalisis adalah agitator, yang berfungsi untuk mencampur substrat dan mikroorganisme di dalam reaktor secara merata. Proses pencampuran ini sangat penting untuk memastikan distribusi nutrisi dan gas berlangsung homogen, serta untuk mencegah terbentuknya zona stagnan atau akumulasi bahan beracun yang dapat mengganggu populasi mikroba. Pendekatan *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*, kegagalan paling kritis yang teridentifikasi pada agitator adalah patahnya poros (*shaft*). Kegagalan ini menyebabkan fungsi pencampuran terhenti total, yang dalam jangka pendek akan mengganggu proses dekomposisi bahan organik dan dalam jangka panjang dapat merusak ekosistem mikroba dalam digester. Oleh karena itu, nilai *Severity (S)* ditetapkan sebesar 5, sesuai dengan Tabel 2.2. Penyebab utama kegagalan agitator berasal dari tekanan dan getaran berlebih yang disebabkan oleh ketidakseimbangan pada *blade*, keausan material, korosi, atau penurunan kualitas fabrikasi. Dari diskusi bersama tim teknis dan hasil pengamatan lapangan, diketahui bahwa kegagalan jenis ini tergolong jarang terjadi. Dalam lima tahun terakhir, kasus kegagalan agitator hampir tidak pernah tercatat, sehingga nilai *Occurrence (O)* ditetapkan sebesar 1 berdasarkan Tabel 2.3. Namun, dari sisi deteksi, sistem saat ini masih sangat bergantung pada inspeksi manual dan pemantauan getaran berkala tanpa dukungan sensor otomatis. Oleh karena itu, *Detection (D)* diberikan nilai 4 sesuai Tabel 2.4. Kombinasi

ketiga nilai tersebut menghasilkan Risk Priority Number (RPN) sebesar 20, yang termasuk kategori risiko sedang. Meski nilai ini tidak tinggi, tetap diperlukan upaya peningkatan sistem *Monitoring* prediktif agar kegagalan bisa dicegah lebih awal.

Komponen kedua yang dianalisis adalah blower *safety valve*, yaitu katup pengaman yang berfungsi untuk menjaga tekanan dalam sistem tetap berada di bawah ambang batas aman. Jika tekanan gas dalam blower melebihi batas toleransi, *safety valve* akan terbuka secara otomatis untuk melepaskan kelebihan tekanan dan mencegah kerusakan pada struktur sistem maupun risiko keselamatan. Salah satu kegagalan paling serius yang diidentifikasi melalui FMEA adalah *safety valve* tidak membuka saat terjadi *overpressure*. Kegagalan ini sangat berbahaya karena dapat menyebabkan kerusakan mekanis, kebocoran gas, bahkan potensi ledakan mikro pada area tertutup, sehingga nilai *Severity* (S) ditetapkan sebesar 4. Penyebab utama dari kegagalan ini adalah adanya sumbatan akibat kerak atau kotoran, serta kalibrasi yang tidak akurat sehingga katup tidak merespons pada tekanan yang semestinya. Berdasarkan data historis dan laporan kejadian, tercatat sekitar 10 kali kegagalan dalam lima tahun terakhir, atau rata-rata 1 hingga 2 kejadian per tahun. Maka, nilai *Occurrence* (O) sesuai Tabel 2.3 adalah 2. Sementara itu, sistem deteksi saat ini belum dilengkapi alat *Monitoring* tekanan otomatis, dan pengawasan hanya dilakukan saat shutdown atau saat gangguan jelas terdeteksi secara visual atau suara. Oleh karena itu, nilai *Detection* (D) ditetapkan sebesar 4, berdasarkan Tabel 2.4. Kombinasi ketiga parameter menghasilkan nilai RPN sebesar 32, yang membutuhkan prioritas dalam program peningkatan keselamatan dan keandalan sistem.

Dengan adanya analisis FMEA terhadap dua komponen kritis ini, perusahaan dapat memperoleh dasar objektif dalam menyusun strategi pemeliharaan berbasis risiko. Selain itu, hasil ini juga menjadi acuan untuk melakukan peningkatan terhadap sistem deteksi dini, pengendalian kualitas material, serta kalibrasi dan inspeksi berkala. Pendekatan ini menekankan pencegahan kegagalan sejak dini agar operasional sistem anaerobik tetap stabil dan aman dalam jangka panjang.

4.4.5 Failure Mode and Effect Analysis Degassing Pond

Tabel 4. 8 FMEA Komponen Tertinggi *Degassing Pond*

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
<i>System : Degassing Pond Silinder Vertical</i>					<i>Date :</i>				
<i>Subsystem :</i>					<i>Years :</i>				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : <i>Degassing Pond Silinder Vertical Packed Tower Stainless Steel SA 336</i>									
1	Main Vessel	Retak	Kebocoran	5	Karena tekanan berlebih	1	Inspeksi visual pada permukaan <i>vessel</i> untuk mendeteksi retakan	4	20

Pada unit *Degassing Pond Silinder Vertical Packed Tower*, *main vessel* berperan sebagai komponen vital yang menopang proses pemisahan gas dari limbah cair. Kinerjanya bergantung pada kondisi tekanan dan suhu tertentu untuk memastikan efisiensi *degassing*. Oleh karena itu, integritas struktural *vessel* sangat krusial bagi keandalan sistem secara keseluruhan. Berdasarkan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), keretakan pada *main vessel* merupakan potensi kegagalan serius yang dapat menyebabkan kebocoran cairan atau gas. Hal ini tidak hanya mengurangi efisiensi proses, tapi juga berisiko terhadap keselamatan kerja dan lingkungan, terutama jika terjadi secara mendadak.

Penyebab utama keretakan yang diidentifikasi adalah tekanan berlebih dalam sistem, baik karena lonjakan aliran dari unit sebelumnya maupun karena ketidakseimbangan suhu dan tekanan selama proses berlangsung. Namun demikian, berdasarkan catatan kegagalan lima tahun terakhir, insiden terkait retakan pada *main vessel* tergolong tidak pernah terjadi, sehingga nilai *Occurance* (O) berdasarkan tabel 2.3 diberikan sebesar 1 sesuai kriteria kegagalan sangat jarang atau kurang dari sekali per tahun. Sementara itu, karena dampaknya yang dapat menyebabkan bocornya material dari sistem dan membahayakan personel serta peralatan di sekitarnya, nilai *Severity* (S) diberikan sebesar 5 sesuai dengan kriteria tabel 2.2.

Metode deteksi yang digunakan masih bersifat manual dan bergantung pada pengamatan langsung, sehingga potensi keterlambatan deteksi awal terhadap retakan mikro atau tekanan abnormal cukup tinggi. Oleh karena itu, tingkat *Detection* (D) yang sesuai tabel 2.4 diberikan nilai 4, mencerminkan bahwa sistem deteksi terhadap potensi kegagalan masih memiliki ruang untuk ditingkatkan.

Dengan kombinasi nilai *Severity* (5), *Occurance* (1), dan *Detection* (4), maka diperoleh nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebesar 20. Meskipun RPN ini belum masuk kategori risiko tinggi, namun tetap memerlukan perhatian, terutama pada aspek deteksi dini dan pemantauan tekanan.

4.4.6 Failure Mode and Effect Analysis Lamella Digester

Tabel 4. 9 FMEA Komponen Tertinggi *Lamella Digester*

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
<i>System</i> : <i>Lamella Digester</i>					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Years</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : <i>Lamella Digester</i>									
1	<i>Wastewater Inlet</i>	<i>Valve macet</i>	Kebocoran limbah, potensi pencemaran, aliran air limbah terhenti, menyebabkan sistem overflow	4	Penumpukan padatan dan sifat korosif limbah	2	Melakukan pengecekan, dan penggantian <i>handle pin valve</i> , sekaligus pemantauan mengenai flow aliran	4	32
Nama Peralatan : Pompa Sentrifugal Model FSA									
2	Impeller	Longgar dari poros	Vibrasi tinggi, kegagalan total pompa	5	Penguncian tidak sempurna	2	Pengencangan ulang, dan dilakukan pemantauan visual getaran pada pompa	4	40

Sistem *lamella digester*, keberhasilan proses pengolahan limbah secara anaerob sangat bergantung pada performa komponen-komponen mekanis yang mendukung aliran dan kestabilan proses. Berdasarkan pendekatan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), dua komponen yang menunjukkan tingkat risiko signifikan terhadap keberlangsungan proses adalah *Wastewater Inlet* dan *Impeller* pada Pompa Sentrifugal Model FSA. Keduanya memiliki peran penting dalam mendukung efisiensi dan kontinuitas proses pengolahan limbah.

Komponen pertama yang dianalisis adalah *Wastewater Inlet*, yaitu saluran utama masuknya air limbah menuju sistem *lamella digester*. Fungsinya sebagai jalur distribusi awal membuatnya krusial dalam menjaga laju dan tekanan aliran limbah ke dalam proses penyaringan. Potensi kegagalan yang diidentifikasi adalah *valve* yang macet, yang dapat menghambat aliran dan menyebabkan penumpukan limbah di hulu. Kondisi ini berisiko menyebabkan *overflow*, peningkatan tekanan tak terkendali. Kegagalan ini umumnya disebabkan oleh penumpukan padatan, material korosif, serta karakteristik limbah yang abrasif, yang dalam jangka waktu tertentu dapat mengganggu fungsi mekanis *valve*. Berdasarkan catatan teknis selama lima tahun terakhir, kegagalan *valve* pada *wastewater inlet* terjadi 1 hingga 2 kali per tahun, sehingga nilai *Occurrence* (O) sesuai dengan Tabel 2.3 ditetapkan sebesar 2. Namun, karena dampak kegagalan ini dapat mengganggu proses secara keseluruhan, nilai *Severity* (S) ditetapkan 4, mengacu pada Tabel 2.2. Sistem deteksi terhadap kegagalan masih mengandalkan pengamatan visual terhadap laju aliran cairan, tanpa dukungan sistem pemantauan otomatis. Oleh karena itu, *Detection* (D) diberi skor 4, sebagaimana tertuang dalam Tabel 2.4. Kombinasi ketiga parameter tersebut menghasilkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebesar 32, yang termasuk dalam kategori risiko sedang.

Komponen kedua yang dianalisis adalah *Impeller* pada Pompa Sentrifugal Model FSA. *Impeller* ini berfungsi untuk menghasilkan aliran limbah yang stabil melalui sistem dengan memberikan tekanan sentrifugal pada fluida. Potensi kegagalan paling signifikan pada komponen ini adalah

longgarnya poros *impeller*, yang dapat menyebabkan ketidakseimbangan putaran, getaran berlebih, dan berkurangnya efisiensi pompa. Jika tidak segera diketahui, kondisi ini dapat memicu kerusakan total pada pompa dan menghentikan proses sirkulasi limbah secara keseluruhan.

Kondisi longgar pada poros *impeller* umumnya disebabkan oleh kesalahan saat pemasangan, penguncian yang tidak sempurna, atau keausan akibat pemakaian jangka panjang. Berdasarkan data operasional, kegagalan ini tercatat terjadi sekitar dua kali per tahun dalam lima tahun terakhir, sehingga skor *Occurrence* (O) ditetapkan sebesar 2, berdasarkan Tabel 2.3. Dampaknya cukup signifikan terhadap proses pengolahan, karena hilangnya tekanan dari pompa menyebabkan ketidakaturan aliran dalam sistem. Oleh karena itu, nilai *Severity* (S) ditetapkan sebesar 5, sesuai Tabel 2.2. Sistem deteksi terhadap kondisi ini juga masih bersifat manual, yaitu melalui pengamatan terhadap getaran dan suara pompa, tanpa adanya sistem pemantauan otomatis. Maka nilai *Detection* (D) diberikan 4, mengacu pada Tabel 2.4.

Dari ketiga parameter tersebut, nilai RPN yang diperoleh untuk *impeller* adalah 40, yang merupakan nilai tertinggi di antara seluruh komponen pada sistem *lamella digester*. Nilai ini menunjukkan bahwa kegagalan *impeller* memiliki dampak dan kemungkinan yang lebih tinggi dibanding komponen lainnya, dan menjadi perhatian utama dalam konteks analisis risiko teknis. Jika dibandingkan, RPN untuk *impeller* (40) lebih tinggi dari RPN *wastewater inlet* (16), yang menandakan bahwa meskipun *inlet* penting, *impeller* berkontribusi lebih besar terhadap potensi gangguan operasional.

Secara keseluruhan, analisis FMEA terhadap kedua komponen tersebut memberikan gambaran kuantitatif terhadap tingkat risiko yang dapat digunakan untuk mendukung proses evaluasi teknis dan penentuan prioritas tindakan dalam sistem pengolahan limbah *lamella digester*.

4.4.7 Failure Mode and Effect Analysis Pit Biomethane

Tabel 4. 10 FMEA Komponen Tertinggi Pit Biomethane

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System : Pit Biomethane</i>				<i>Date :</i>					
<i>Subsystem :</i>				<i>Years :</i>					
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Pit Biomethane									
1	Beton bertulang, volume 20m ³	Retak	Kebocoran air limbah, kerusakan struktural	5	Kualitas pencampuran beton yang buruk	1	Inspeksi manual secara visual	4	20

Pada *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) terhadap sistem *Pit Biomethane*, ditemukan bahwa struktur beton bertulang dengan volume 30 m³ memiliki tingkat risiko signifikan. Komponen ini berfungsi sebagai wadah penampung *spentwash* yang telah melalui proses pengolahan (*after treated*) sebelum dialirkan ke *lagoon*.

Kegagalan utama yang teridentifikasi adalah retak struktural, yang apabila tidak ditangani dengan cepat dan tepat, berpotensi menyebabkan keruntuhan unit secara keseluruhan. Kerusakan ini bersifat serius karena dapat menghentikan operasi sistem sepenuhnya serta menimbulkan risiko keselamatan kerja dan kerugian material. Penyebab dominan dari kegagalan ini adalah kualitas pencampuran beton yang kurang baik, yang dapat menghasilkan struktur yang rapuh dan tidak tahan terhadap tekanan maupun pengaruh lingkungan jangka panjang.

Tingkat keparahan (*Severity*) berdasarkan tabel 2.2 dari potensi kegagalan ini diberi nilai 5, karena akibat yang ditimbulkan sangat kritis terhadap keberlangsungan proses dan keselamatan fasilitas. Namun, berdasarkan data pengamatan dan catatan pemeliharaan selama beberapa tahun terakhir, frekuensi kejadian (*Occurance*) retak struktural tergolong sangat jarang, dan lebih bersifat potensial daripada historis. Oleh karena itu, nilai *Occurance* yang sesuai tabel 2.3 ditetapkan pada nilai 1.

Berdasarkan kondisi lapangan, deteksi kebocoran hanya dapat dilakukan ketika cairan sudah mulai menetes atau mengalir keluar dari sistem, sehingga deteksi dini menjadi terbatas. Oleh karena itu, tingkat deteksi (*Detection*) berdasarkan tabel 2.4 diberikan nilai 4, karena deteksi yang dilakukan saat ini memiliki keterbatasan dalam mendeteksi retakan pada tahap awal. Dari keseluruhan analisis FMEA, komponen beton bertulang pada *Pit Biomethane* memperoleh nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebesar 20, yang meskipun tidak tergolong sangat tinggi, tetap perlu diperhatikan secara khusus mengingat potensi dampaknya terhadap integritas struktur dan kelangsungan proses operasional.

4.4.8 Failure Mode and Effect Analysis Lagoon

Tabel 4. 11 FMEA Komponen Tertinggi Lagoon

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
System : Lagoon					Date :				
Subsystem :					Years :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Lagoon									
1	Cover Lagoon (Geomembrane 2.5 mm)	Mengalami ekspansi termal berlebih tanpa kompensasi gerakan	Pelapisan melipat atau sobek, menimbulkan area bocor	4	Tekanan berlebih, dan faktor lingkungan	2	Penambalan HDPE	4	32

Lagoon berfungsi sebagai tahap akhir proses di mana *cover lagoon* memegang peran krusial. Menggunakan *geomembrane* HDPE 2.5 mm, komponen ini dirancang untuk menahan gas hasil proses anaerobik sekaligus mencegah dampak lingkungan yang tidak diinginkan, seperti pelepasan emisi ke udara terbuka. Namun, material ini rentan mengalami ekspansi termal berlebihan akibat kombinasi tekanan gas internal dan pengaruh lingkungan seperti paparan sinar matahari langsung, terutama saat musim kemarau atau cuaca ekstrem. Gangguan ini dapat memicu deformasi material, retakan mikro, hingga kebocoran, yang akhirnya mengurangi kinerja sistem secara keseluruhan dan mempercepat degradasi struktur. Jika tidak segera ditangani, kerusakan ini dapat berakibat pada kebocoran gas metana atau kontaminan lain ke lingkungan sekitar, menciptakan risiko keamanan dan gangguan terhadap proses pengolahan limbah. Berdasarkan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dari kriteria Tabel 2.2, tingkat *Severity* (S) dari kegagalan ini dinilai 4, mengingat konsekuensinya cukup kritis terhadap keselamatan dan performa sistem, serta potensi dampaknya terhadap lingkungan dan pekerja di sekitar lagoon.

Frekuensi kejadian atau *Occurrence* (O) dalam lima tahun terakhir dikategorikan pada tingkat sedang, karena telah terjadi sekitar 16 kali insiden *cover lagoon* sobek, sebagian besar saat musim kemarau atau ketika terjadi lonjakan suhu ekstrem. Oleh karena itu, nilai O ditetapkan sebesar 2, sesuai dengan Tabel 2.3. Sistem deteksi terhadap tanda awal kegagalan masih bersifat visual dan reaktif, terutama ketika kerusakan sudah terlihat secara kasat mata dari permukaan geomembran. Belum terdapat sensor tekanan atau pengukuran deformasi otomatis yang dapat memperingatkan operator lebih awal. Oleh karena itu, nilai *Detection* (D) diberikan 4, berdasarkan Tabel 2.4. Dari kombinasi ketiga faktor tersebut, nilai *Risk Priority Number* (RPN) untuk komponen *Cover Lagoon* ini adalah 32, yang menandakan bahwa komponen ini memiliki tingkat risiko yang tinggi dan perlu mendapatkan perhatian khusus dalam agenda pemeliharaan preventif, upaya ini penting untuk menjamin keandalan sistem dan mencegah dampak lingkungan yang lebih luas.

4.4.9 Failure Mode and Effect Analysis Flare Stack

Tabel 4. 12 FMEA Komponen Tertinggi Flare Stack

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System : Flare Stack</i>					<i>Date :</i>				
<i>Subsystem :</i>					<i>Years :</i>				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : <i>Flare Stack FL-4201 Schedule 40 Carbon Steel</i>									
1	<i>Flare Stack Body</i>	Retak	Kebocoran gas, berakibat risiko keselamatan dan pencemaran udara	5	Terkena suhu panas dan temperatur tinggi secara terus menerus	1	Inspeksi visual secara manual pada peralatan untuk pengecekan keretakan sekaligus pengecekan menggunakan <i>gas detektor</i> , desain <i>flare stack body</i> sesuai dengan kondisi area kerja, pemilihan bahan <i>flare stack body</i> tahan terhadap suhu dan korosi	4	20

Flare Stack berperan sebagai sistem krusial dalam pengolahan limbah gas industri, khususnya untuk membakar gas buangan berbahaya secara terkendali. Pada unit FL-4201 yang menggunakan material *Schedule 40 Carbon Steel*, *Flare Stack Body* menjadi komponen vital yang harus menahan tekanan dan suhu ekstrem dari gas sebelum proses pembakaran akhir berlangsung. Komponen ini juga dirancang untuk bekerja secara kontinu dalam kondisi termal tinggi dengan eksposur lingkungan terbuka, yang menambah tantangan teknis terhadap daya tahan materialnya. Namun, berdasarkan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), komponen ini rentan mengalami retak akibat paparan suhu tinggi secara terus-menerus. Kondisi ini berpotensi menyebabkan kebocoran gas yang tidak hanya membahayakan keselamatan operasional akibat risiko ledakan, tetapi juga dapat menimbulkan dampak lingkungan berupa pencemaran udara. Oleh karena itu, kegagalan ini dinilai memiliki tingkat *Severity* (S) sebesar 5, sesuai dengan Tabel 2.2, karena dampaknya sangat besar terhadap keselamatan dan lingkungan.

Data historis dan pengamatan teknis di lapangan, potensi kejadian atau *Occurrence* dari kegagalan ini tergolong jarang, dengan tidak adanya laporan retakan besar dalam kurun waktu lima tahun terakhir. Namun, potensi tetap ada mengingat sifat kerja dari *flare stack* yang selalu terpapar termal ekstrem dan siklus tekanan yang fluktuatif. Maka, berdasarkan kriteria Tabel 2.3, nilai O diberikan 1. Terkait sistem pengendalian dan deteksi atau *Detection* (D), perusahaan masih menggunakan metode inspeksi visual berkala, yang tentu memiliki keterbatasan dalam mendeteksi kerusakan awal mikro seperti retakan halus atau perubahan warna akibat oksidasi. Oleh karena itu, berdasarkan kriteria Tabel 2.4, nilai D ditetapkan 4, untuk mencerminkan tingkat keterlambatan dalam deteksi dini kegagalan struktural.

Dari perhitungan berdasarkan metode FMEA, *Risk Priority Number* (RPN) untuk *Flare Stack Body* adalah 20. Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun frekuensi kejadian tergolong rendah, tingkat dampaknya sangat serius, sehingga komponen ini tetap harus dipantau secara ketat.

4.4.10 Failure Mode and Effect Analysis Boiler

Tabel 4. 13 FMEA Komponen Tertinggi Boiler

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System</i> : Boiler MT040G					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Years</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Boiler MT040G									
1	Outer Gasket	Aus	Kebocoran	3	Aus karena suhu tinggi	2	Penggantian dengan gasket baru, material gasket tahan terhadap suhu dan bahan kimia	4	24

Boiler MT040G merupakan salah satu peralatan kritis dalam sistem utilitas pabrik yang berfungsi menghasilkan uap untuk keperluan proses produksi. Salah satu komponen penting yang mendukung keandalan sistem ini adalah outer gasket, yang berperan sebagai penyekat pada sambungan antar bagian boiler. Gasket ini berfungsi menjaga sistem tetap tertutup rapat terhadap tekanan dan suhu tinggi yang terjadi selama operasi.

Melalui pendekatan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), telah diidentifikasi bahwa potensi kegagalan utama dari outer gasket adalah aus, yang umumnya disebabkan oleh paparan suhu tinggi secara terus-menerus. Keausan ini dapat menyebabkan kebocoran uap atau fluida, yang berdampak pada penurunan efisiensi dan dapat mempercepat korosi pada komponen di sekitarnya. Meskipun kegagalan ini tidak secara langsung menyebabkan penghentian operasi, namun tetap berisiko menurunkan performa sistem dalam jangka panjang.

Tingkat keparahan atau *severity* dari kegagalan ini dinilai sebesar 3 berdasarkan tabel 2.2, karena meskipun tidak langsung menyebabkan shutdown atau bahaya keselamatan tinggi, dampaknya terhadap kerusakan bertahap dan penurunan performa cukup signifikan. Berdasarkan catatan kejadian gasket mengalami kerusakan sebanyak 8 kali selama lima tahun terakhir, kegagalan ini terjadi secara tidak teratur dengan frekuensi sedang, sehingga berdasarkan tabel 2.3 nilai *Occurance* ditetapkan sebesar 2.

Untuk deteksi atau *detection*, metode inspeksi yang digunakan cenderung bersifat reaktif dan tidak dilengkapi sensor atau deteksi dini secara otomatis, maka sesuai dengan kriteria tabel 2.4 nilai D ditentukan sebesar 4. Sistem deteksi ini baru efektif setelah adanya gejala fisik seperti kebocoran atau penurunan tekanan terdeteksi.

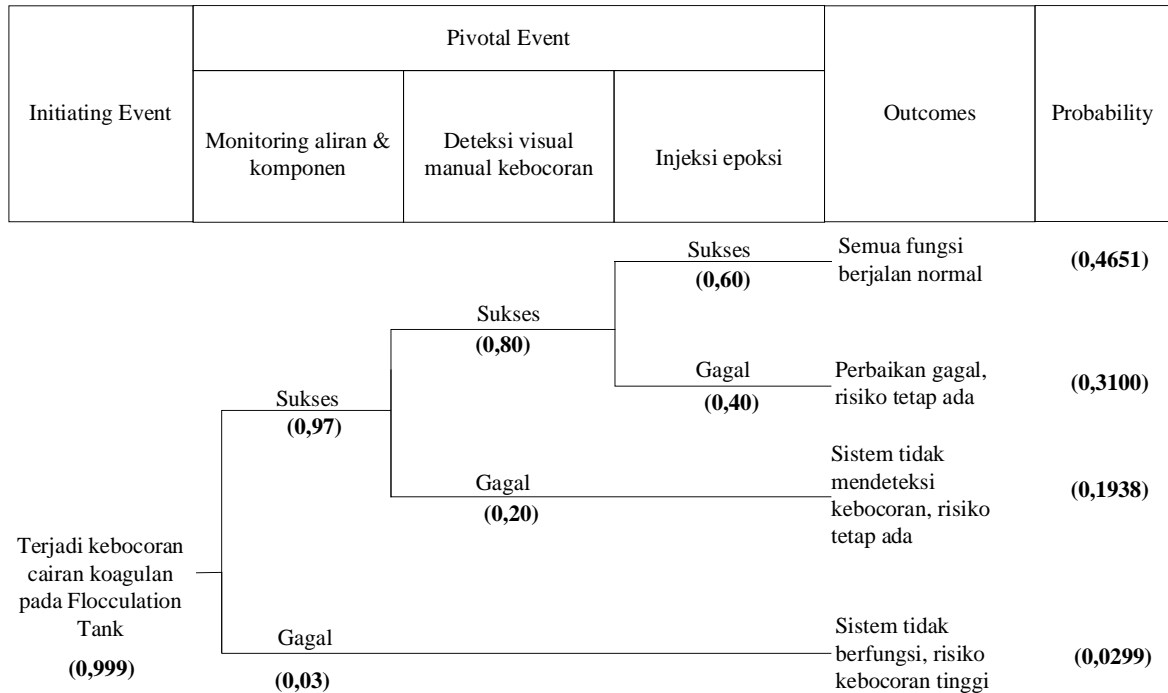
Dari keseluruhan penilaian FMEA, nilai *Risk Priority Number* (RPN) untuk outer gasket pada Boiler MT040G adalah 24. Meskipun nilai ini tidak masuk kategori risiko tertinggi, peningkatan kualitas inspeksi dan jadwal penggantian material secara berkala tetap menjadi rekomendasi penting untuk mencegah kegagalan total pada sistem boiler.

4.5 *Event Tree Analysis (ETA)*

Bab ini menyajikan hasil *Event Tree Analysis (ETA)* yang digunakan untuk mengevaluasi potensi risiko dari kegagalan peralatan dalam sistem proses anaerobik IPAL industri bioetanol. ETA merupakan metode analisis berbasis risiko yang menelusuri urutan peristiwa (*event sequence*) yang mungkin terjadi akibat suatu kejadian awal atau *initiating event* (IE), serta menganalisis respons sistem terhadap kegagalan tersebut. Metode ini membantu memetakan jalur kemungkinan sukses maupun gagal dari setiap upaya mitigasi yang telah dirancang. Melalui pendekatan ini, jalur-jalur kegagalan yang sebelumnya tidak terlihat secara sistematis dapat dipetakan secara lebih jelas dan terukur. Setiap skenario memberikan gambaran visual mengenai bagaimana kegagalan suatu komponen dapat berkembang menjadi konsekuensi yang lebih besar apabila sistem pengendalian gagal berfungsi optimal.

Penerapan ETA dalam penelitian ini bertujuan tidak hanya untuk mengidentifikasi dampak dari kegagalan komponen, tetapi juga untuk memahami efektivitas sistem pengendalian bahaya yang ada, serta memperkirakan probabilitas berbagai *outcome* yang dapat terjadi. Setiap jalur skenario dalam diagram ETA dihitung nilai probabilitasnya, dengan mempertimbangkan keberhasilan maupun kegagalan dari *pivotal event* (PE) yang berperan sebagai pengendalian. Perhitungan probabilitas dilakukan menggunakan pendekatan matematis berdasarkan *failure rate* komponen, durasi operasi, dan tingkat keandalan sistem. Hasil analisis yang ditampilkan pada bab ini berupa diagram ETA untuk setiap *initiating event* utama, berikut nilai probabilitas *outcome* yang dihasilkan. Diagram tersebut dikembangkan berdasarkan data kegagalan aktual di industri, data historis, serta kajian diskusi bersama pihak terkait melalui *expert judgment*. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan teknis untuk peningkatan keselamatan proses di sistem anaerobik IPAL bioetanol dan penyusunan rekomendasi pengendalian risiko pada bab selanjutnya.

4.5.1 Event Tree Analysis Flocculation Tank



Gambar 4. 3 Bagian Proses ETA *Flocculation Tank*

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\begin{aligned}
 \text{Failure rate} &= \frac{n}{45} \\
 &= \frac{10}{45} = 0,222
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\
 &= e^{-0,222 \times 45} = 0,000045
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Probability} &= 1 - R \\
 &= 1 - 0,000045 = 0,999
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas kegagalan kebocoran koagulan di *Flocculation Tank* selama 45 bulan adalah 0,999.

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. *Monitoring* aliran & komponen sebesar 0,97 mengacu pada efektivitas sistem pemantauan yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 97% (Paisal et al., 2024).
2. Deteksi visual manual kebocoran sebesar 0,80 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas dari deteksi visual berada pada angka 80% (Aloqaily, 2018).
3. Injeksi epoksi sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,60, berdasarkan keberhasilan 60% dalam menutup kebocoran sedang (Mat Saliah et al., 2019).

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.3, *initiating event* berupa terjadinya kebocoran cairan koagulan pada *Flocculation Tank*, dapat berpotensi menyebabkan gangguan pada efisiensi proses flokulasi, risiko pencemaran lingkungan, serta kerusakan peralatan di sekitarnya. Analisis *Event Tree* mengevaluasi jalur kejadian (*event path*) berdasarkan tiga *pivotal event*, yaitu:

1. *Monitoring* aliran dan komponen,
2. Deteksi visual manual kebocoran, dan
3. Injeksi epoksi.

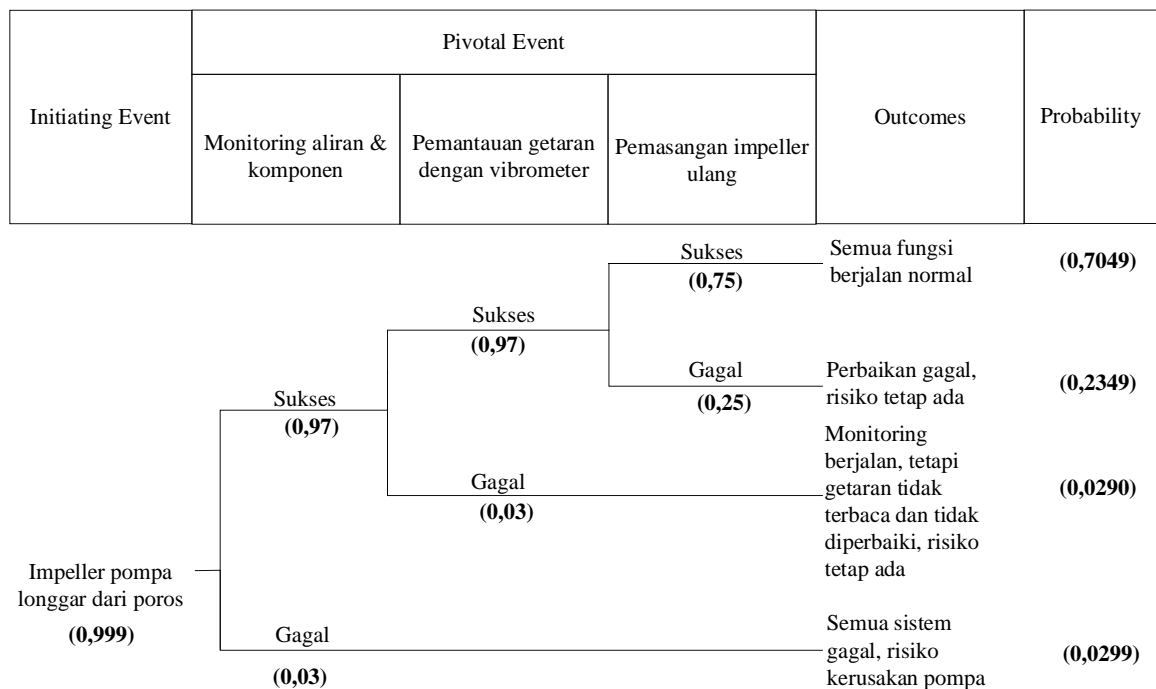
Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Ketiga *pivotal event* sukses, *outcome* yang diperoleh adalah sistem kembali normal, karena kebocoran terdeteksi dengan cepat, perbaikan dilakukan dengan tepat.

2. Sistem berhasil memantau dan mendeteksi kebocoran, tetapi perbaikan gagal, menyebabkan risiko tetap ada karena kebocoran masih berlanjut.
3. *Monitoring* berjalan, tetapi deteksi tidak berfungsi dan tidak diperbaiki, menyebabkan risiko kebocoran tetap ada.
4. Semua fungsi gagal bekerja, risiko kebocoran tinggi dan tidak terpantau.

Dari seluruh jalur kejadian yang dianalisis, terlihat bahwa *Monitoring*, deteksi visual hingga injeksi epoksi merupakan tiga aspek krusial dalam mitigasi kebocoran pada sistem *Flocculation Tank*. Kegagalan dalam satu saja dari ketiga elemen ini dapat secara signifikan meningkatkan risiko operasional dan lingkungan.

4.5.2 Event Tree Analysis Impeller Pompa



Gambar 4. 4 Bagian Proses ETA Impeller Pompa

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA.

Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\begin{aligned} \text{Failure rate} &= \frac{n}{45} \\ &= \frac{18}{45} = 0,400 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\ &= e^{-0,400 \times 45} = 0,00000001523 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Probability} &= 1 - R \\ &= 1 - 0,00000001523 = 0,999 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas kegagalan impeller pompa yang longgar dari poros selama 45 bulan adalah 0,999.

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. *Monitoring* aliran & komponen sebesar 0,97 mengacu pada efektivitas sistem pemantauan otomatis yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 97% (Paisal et al., 2024).
2. Pemantauan getaran dengan vibrometer sebesar 0,97 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas pemantauan menggunakan vibrometer berada pada angka 97% (Mohammed et al., 2024).
3. Pemasangan impeller ulang sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,75, berdasarkan keberhasilan 75% (Galatanu et al., 2018).

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.4, *initiating event* yang dianalisis adalah impeller pompa yang longgar dari poros, kondisi ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan mekanis, getaran berlebih, keausan dini, hingga kerusakan total pada pompa. Untuk menganalisis jalur kejadian yang

mungkin terjadi setelah kegagalan ini, digunakan metode *Event Tree Analysis* dengan tiga *pivotal event*, yaitu:

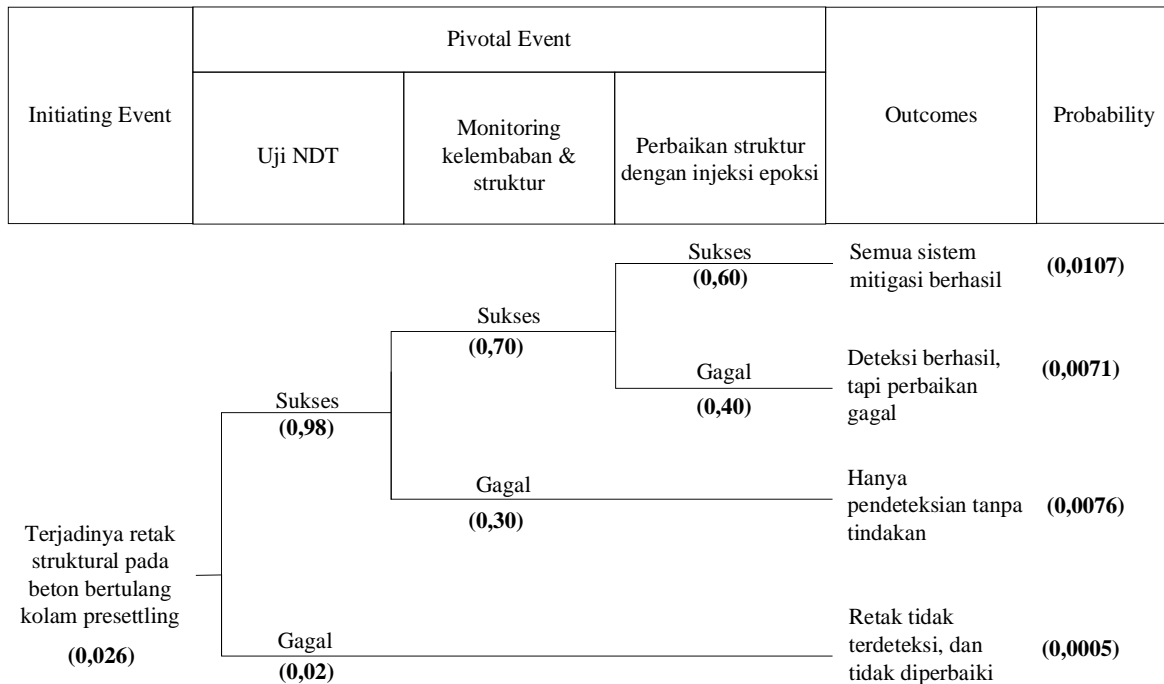
1. *Monitoring* aliran dan komponen,
2. Pemantauan getaran dengan vibrometer, dan
3. Pemasangan impeller ulang.

Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Ketiga *pivotal event* sukses, maka *outcome* yang dihasilkan adalah sistem kembali normal, seluruh sistem mitigasi berfungsi. Gangguan terdeteksi melalui aliran dan getaran, serta tindakan korektif berhasil dilakukan. Risiko berkurang signifikan.
2. Gangguan berhasil terdeteksi, namun tindakan koreksi tidak berhasil. Risiko teknis seperti vibrasi tinggi tetap berlangsung.
3. Pemantauan aliran berfungsi, namun getaran tidak terpantau dan tidak ada perbaikan. Risiko meningkat akibat keterlambatan respons teknis.
4. Semua *barrier* gagal menjalankan fungsinya saat dibutuhkan. Kelonggaran impeller tidak dikenali dan tidak diperbaiki, risiko kerusakan total pada pompa.

Hasil analisis menunjukkan bahwa keberhasilan penanganan kondisi impeller yang longgar sangat bergantung pada deteksi dini melalui *Monitoring* aliran & komponen, lalu pemantauan getaran dengan vibrometer, dan pemasangan ulang impeller. Kegagalan dalam satu tahapan saja dapat meningkatkan risiko teknis dan menurunkan keandalan sistem pompa.

4.5.3 Event Tree Analysis Beton Kolam Presettling



Gambar 4. 5 Bagian Proses ETA Beton Kolam *Presettling*

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$Failure\ rate = \frac{0}{45}$$

= 0, maka diasumsikan nilainya 0.0006025 berdasarkan

brainstorming dengan *expert judgment*

$$Reliability = e^{-\lambda T}$$

$$= e^{-0.0006025 \times 45} = 0,9732$$

$$Probability = 1 - R$$

$$= 1 - 0,9732 = 0,026$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas kegagalan terjadinya retak struktural pada beton bertulang di kolam *presettling* selama 45 bulan adalah 0,026.

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Uji NDT sebesar 0,98 mengacu pada efektivitas dari sistem pengujian yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 98% (Provençal et al., 2024).
2. *Monitoring* kelembaban serta kondisi struktural sebesar 0,70 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas *Monitoring* berada pada angka 70% (Jung et al., 2020).
3. Injeksi epoksi sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,60, berdasarkan keberhasilan 60% dalam menutup kebocoran sedang (Mat Saliah et al., 2019).

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.5, *initiating event* yang dianalisis adalah terjadinya retak struktural pada beton bertulang di kolam *presettling*. Retak ini dapat mengganggu integritas struktural bangunan, menyebabkan kebocoran, serta menurunkan keselamatan dan keandalan operasi. Untuk menilai dampak dari kejadian tersebut, dilakukan analisis *Event Tree* berdasarkan tiga *pivotal event*, yaitu:

1. Uji *Non-Destructive Test (NDT)*,
2. *Monitoring* kelembaban serta kondisi struktural, dan
3. Perbaikan struktur dengan injeksi epoksi

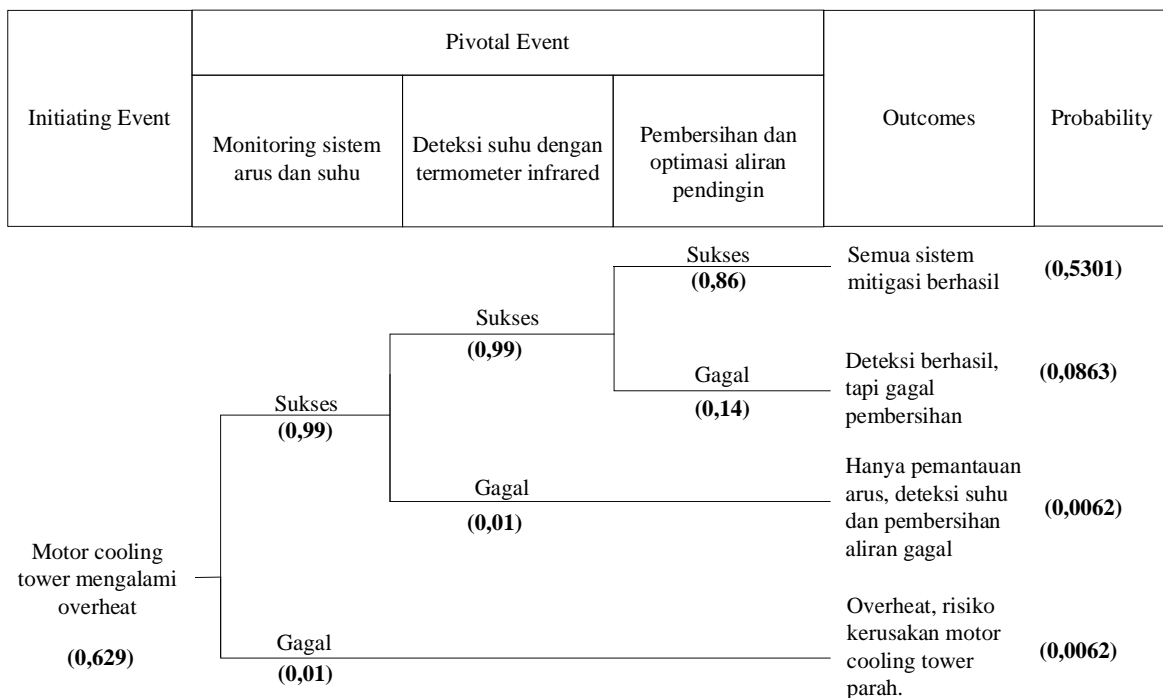
Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Semua *pivotal event* berhasil, maka *outcome* yang diperoleh adalah sistem aman, karena retak terdeteksi dini, diperbaiki tepat waktu.

2. Deteksi dini dengan uji NDT dan pemantauan kondisi struktural dilakukan dengan baik dan berhasil, tetapi perbaikan tidak berhasil, menyebabkan risiko masih ada.
3. Deteksi awal menggunakan uji NDT berhasil, tetapi *Monitoring* dan perbaikan gagal dilakukan, menyebabkan risiko masih ada.
4. Semua *barrier* gagal menjalankan fungsinya saat dibutuhkan, risiko tinggi keretakan struktural.

Hasil ini menunjukkan bahwa keberhasilan dalam mendeteksi dini melalui uji NDT, melanjutkan dengan *Monitoring*, dan melakukan perbaikan struktur dengan injeksi epoksi adalah langkah kunci dalam menjamin keselamatan konstruksi beton bertulang. Kegagalan dalam salah satu tahapan dapat menghambat mitigasi kerusakan dan mempercepat degradasi struktur.

4.5.4 Event Tree Analysis Motor Cooling Tower



Gambar 4. 6 Bagian Proses ETA Motor Cooling Tower

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\begin{aligned}
 \text{Failure rate} &= \frac{n}{45} \\
 &= \frac{1}{45} = 0,022 \\
 \text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\
 &= e^{-0,022 \times 45} = 0,371 \\
 \text{Probability} &= 1 - R \\
 &= 1 - 0,371 = 0,629
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas motor *cooling tower* mengalami *overheat* selama 45 bulan adalah 0,629.

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. *Monitoring* sistem arus dan suhu sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari sistem *Monitoring* yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Paisal et al., 2024) .
2. Deteksi suhu dengan termometer infrared sebesar 0,99 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas dari termometer infrared berada pada angka 99% (Guo et al., 2016)
3. Pembersihan serta optimalisasi aliran pendingin sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,86, berdasarkan keberhasilan 86% (Sezer et al., 2023)

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.6, *initiating event* yang dianalisis adalah motor *cooling tower* mengalami *overheat*. Kondisi ini berisiko menyebabkan gangguan pendinginan, kerusakan motor, dan potensi

shutdown proses produksi. Untuk mengevaluasi skenario penanganan *overheat*, digunakan metode *Event Tree Analysis (ETA)* dengan tiga *pivotal event*, yaitu:

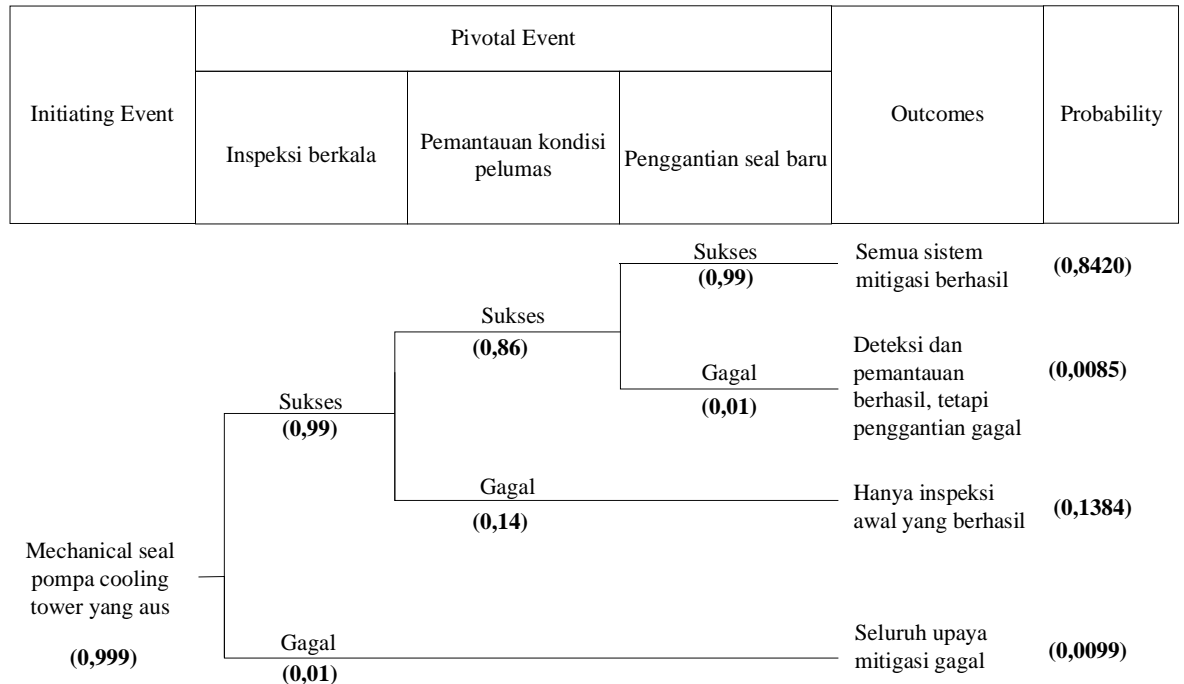
1. *Monitoring* sistem arus dan suhu,
2. Deteksi suhu dengan termometer infrared, dan
3. Pembersihan serta optimalisasi aliran pendingin.

Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Ketiga *pivotal event* berhasil, maka *outcome*-nya adalah sistem bekerja optimal, karena suhu, pendingin, dan arus terkontrol secara menyeluruh.
2. Pemantauan arus lalu pengecekan menggunakan termometer infrared berhasil dilakukan, namun pembersihan dan optimalisasi aliran gagal berfungsi sebagaimana mestinya, menyebabkan masih adanya risiko.
3. *Monitoring* sistem arus berhasil, tetapi deteksi suhu gagal berfungsi sebagaimana mestinya, menyebabkan menghasilkan *outcome* tidak adanya penanganan, yang berpotensi menyebabkan *shutdown* mendadak.
4. Semua *pivotal event* gagal, menghasilkan *outcome* terburuk berupa *overheat* berat, risiko kerusakan motor *cooling tower* parah,

Dari hasil analisis ETA ini dapat disimpulkan bahwa penanganan *overheat* yang efektif memerlukan keterpaduan antara pemantauan arus, deteksi suhu menggunakan termometer infrared dan pembersihan aliran pendingin. Kegagalan dalam satu aspek saja dapat mengganggu keseluruhan sistem.

4.5.5 Event Tree Analysis Mechanical Seal Pompa



Gambar 4. 7 Bagian Proses ETA *Mechanical Seal Pompa*

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\begin{aligned}
 \text{Failure rate} &= \frac{n}{45} \\
 &= \frac{18}{45} = 0,400
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\
 &= e^{-0,400 \times 45} = 0,00000001523
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Probability} &= 1 - R \\
 &= 1 - 0,00000001523 = 0,999
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas keausan pada *mechanical seal* pompa *cooling tower* selama 45 bulan adalah 0,999.

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Inspeksi berkala sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari inspeksi peralatan yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Xu & Floeder, 2000) .
2. Pemantauan kondisi pelumasan sebesar 0,86 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas dari pemantauan berada pada angka 86% (Yao et al., 2024)
3. Penggantian *seal* baru sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,99, berdasarkan keberhasilan 99% (Cluever et al., 2017)

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.7, *initiating event* yang dianalisis adalah terjadinya keausan pada *mechanical seal* pompa *cooling tower*. Kondisi ini dapat menyebabkan getaran tinggi, *misalignment*, kerusakan motor penggerak, serta menurunnya efisiensi pendinginan. Untuk mengantisipasi jalur kegagalan yang mungkin terjadi, dilakukan analisis *Event Tree (ETA)* dengan tiga *pivotal event*, yaitu:

1. Inspeksi berkala,
2. Pemantauan kondisi pelumas, dan
3. Penggantian *seal* baru

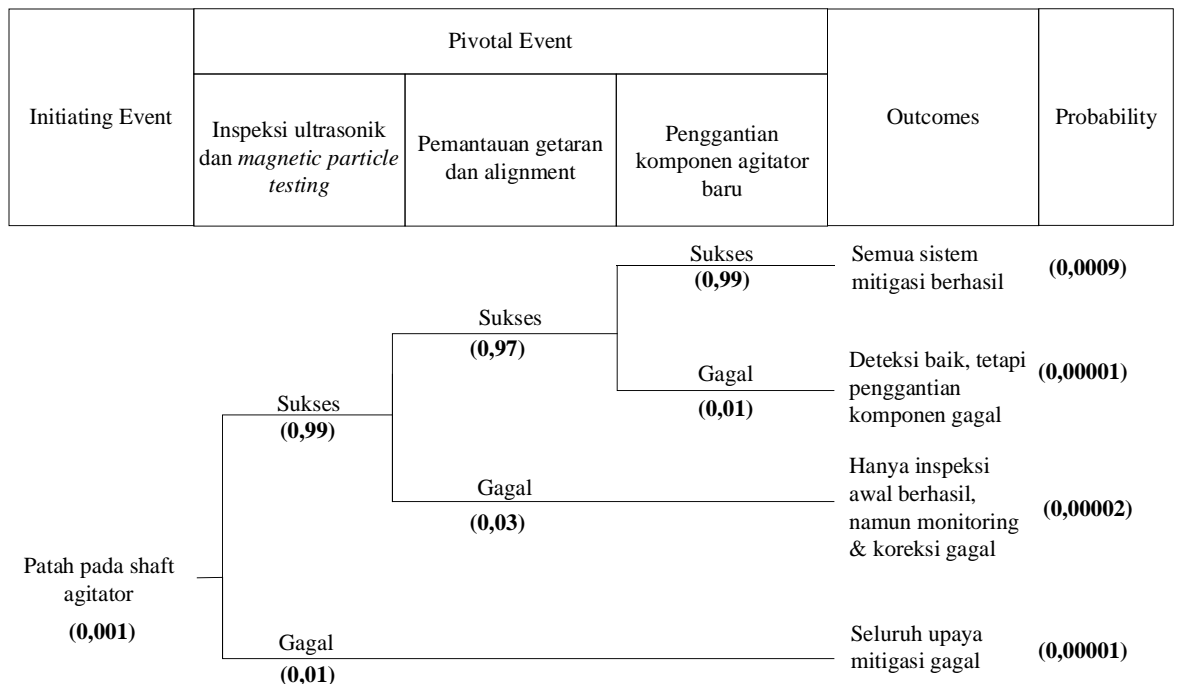
Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Semua *pivotal event* sukses, maka *outcome*-nya adalah sistem bekerja optimal, karena pelumas dalam kondisi baik, dan komponen aus telah diganti tepat waktu.

2. Pelumas dan kondisi fisik pompa terpantau, tetapi penggantian gagal, menghasilkan *outcome* berupa deteksi dini ada, tapi penggantian tidak dilakukan, yang dapat menyebabkan keausan tetap berkembang.
3. Hanya kondisi fisik yang dipantau, tanpa melakukan penggantian komponen maupun pengecekan kondisi pelumas maka *outcome*-nya adalah risiko keausan berulang tetap ada karena akar masalah tidak ditangani.
4. Semua *pivotal event* gagal, menyebabkan *outcome* terburuk berupa aus berlebihan, risiko fatal yang sangat mungkin menyebabkan kerusakan sistem secara menyeluruh dan *downtime* proses.

Dari hasil analisis ini dapat disimpulkan bahwa pendekatan yang komprehensif melalui deteksi kondisi pelumas, penggantian komponen *seal*, dan inspeksi berkala komponen sangat penting untuk menjaga keandalan pompa *cooling tower*. Mengabaikan salah satu tahapan dapat menyebabkan risiko kegagalan sistem meningkat secara signifikan.

4.5.6 Event Tree Analysis Shaft Agitator Digester



Gambar 4. 8 Bagian Proses ETA *Shaft Agitator Digester*

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\text{Failure rate} = \frac{0}{45}$$

= 0, maka diasumsikan nilainya 0.0000083 berdasarkan *brainstorming* dengan *expert judgment*

$$\begin{aligned}\text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\ &= e^{-0.0000083 \times 45} = 0,999\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Probability} &= 1 - R \\ &= 1 - 0,999 = 0,001\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas kegagalan terjadinya patah pada *shaft agitator* selama 45 bulan adalah 0,001

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Inspeksi ultrasonik dan *magnetic particle testing* sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari inspeksi yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Alvarado et al., 2024)
2. Pemantauan getaran sebesar 0,97 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas dari pemantauan getaran berada pada angka 97% (Mohammed et al., 2024)
3. Penggantian *agitator* baru sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,99, berdasarkan keberhasilan 99% (Cluever et al., 2017)

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.8, *initiating event* yang dianalisis adalah terjadinya patah pada *shaft agitator*, yang dapat mengakibatkan gangguan proses pencampuran, kerusakan mekanis lanjutan, hingga penghentian

operasi. Untuk mengidentifikasi jalur risiko dan penanganannya, dilakukan analisis *Event Tree (ETA)* berdasarkan tiga *pivotal event*, yaitu:

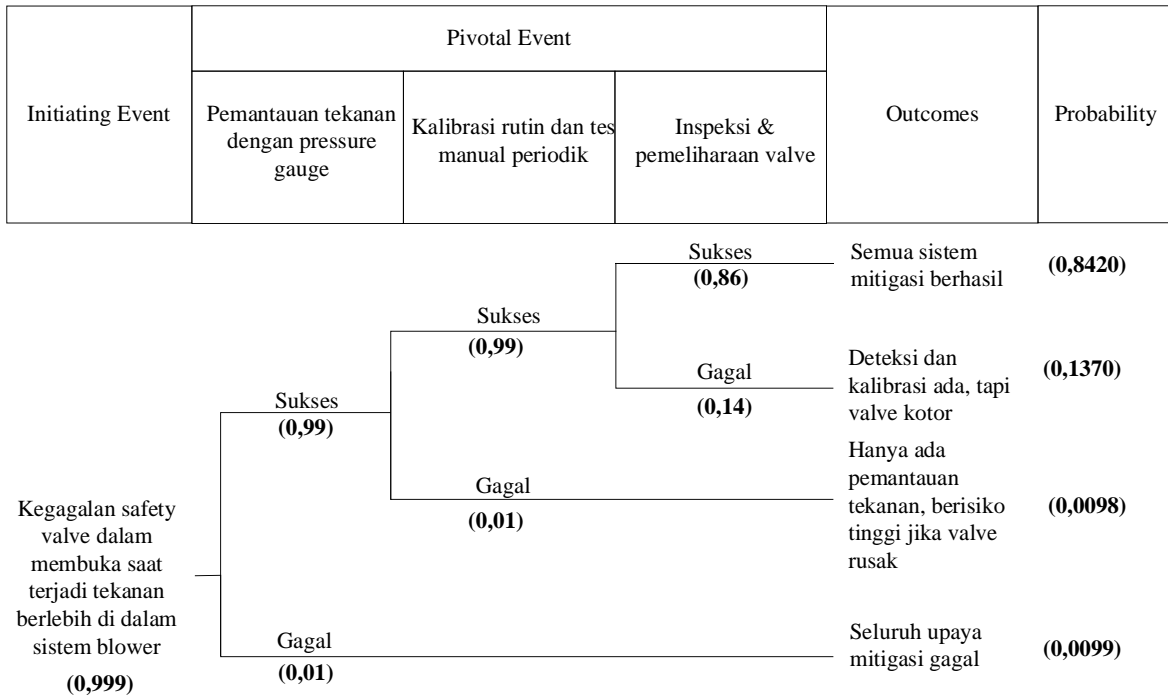
1. Inspeksi ultrasonik dan *magnetic particle testing*,
2. Pemantauan getaran dan alignment, dan
3. Penggantian komponen agitator baru.

Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Ketiga *pivotal event* berhasil, *outcomenya* semua sistem proteksi berfungsi optimal. Risiko kegagalan diminimalkan dengan biaya *maintenance* yang efisien.
2. Deteksi melalui inspeksi dan pemantauan getaran dilakukan dengan baik, tetapi material shaft gagal dilakukan penggantian, menyebabkan risiko tetap ada.
3. Inspeksi ultrasonik dan magnetic particle testing berhasil dilakukan tetapi sistem pemantauan getaran dan penggantian komponen gagal berfungsi, risiko kerusakan tetap ada karena akar masalah tidak ditangani.
4. Semua *pivotal event* gagal, maka *outcome* terburuknya adalah patah shaft berisiko tinggi dan bisa menyebabkan *shutdown* total.

Analisis ini menegaskan bahwa inspeksi ultrasonik dan *magnetic particle testing*, lalu pemantauan getaran dan *alignment*, dilanjutkan dengan penggantian komponen yang baru adalah tiga komponen yang saling melengkapi dalam mencegah kerusakan pada *shaft agitator*. Kegagalan salah satu atau lebih elemen ini dapat mempercepat terjadinya patah komponen.

4.5.7 Event Tree Analysis Safety Valve Blower



Gambar 4. 9 Bagian Proses ETA *Safety Valve Blower*

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\begin{aligned}
 \text{Failure rate} &= \frac{n}{45} \\
 &= \frac{11}{45} = 0,244
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\
 &= e^{-0,244 \times 45} = 0.0000170391
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Probability} &= 1 - R \\
 &= 1 - 0.0000170391 = 0,999
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas kegagalan *safety valve* dalam membuka saat terjadi tekanan berlebih selama 45 bulan adalah 0,999.

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Pemantauan tekanan dengan *pressure gauge* sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari *pressure gauge* yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Ebrahimi et al., 2023)
2. Kalibrasi rutin dan pengujian manual periodik sebesar 0,99 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas dari rutinnnya melakukan kalibrasi berada pada angka 99% (Fan et al., 2023)
3. Inspeksi dan pembersihan *valve* sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,86, berdasarkan keberhasilan 86% (Xu & Floeder, 2000)

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.9, *initiating event* yang menjadi fokus analisis adalah kegagalan *safety valve* dalam membuka saat terjadi tekanan berlebih, yang berpotensi menyebabkan tekanan berlebih tertahan dalam sistem blower. Hal ini dapat memicu kerusakan komponen, kebocoran pipa, bahkan risiko ledakan lokal. Untuk mengevaluasi kemungkinan jalur kejadian (*event path*), dilakukan analisis *Event Tree (ETA)* dengan mempertimbangkan tiga *pivotal event*, yaitu:

1. Pemantauan tekanan dengan *pressure gauge*,
2. Kalibrasi rutin dan pengujian manual periodik, dan
3. Inspeksi dan pembersihan *valve*.

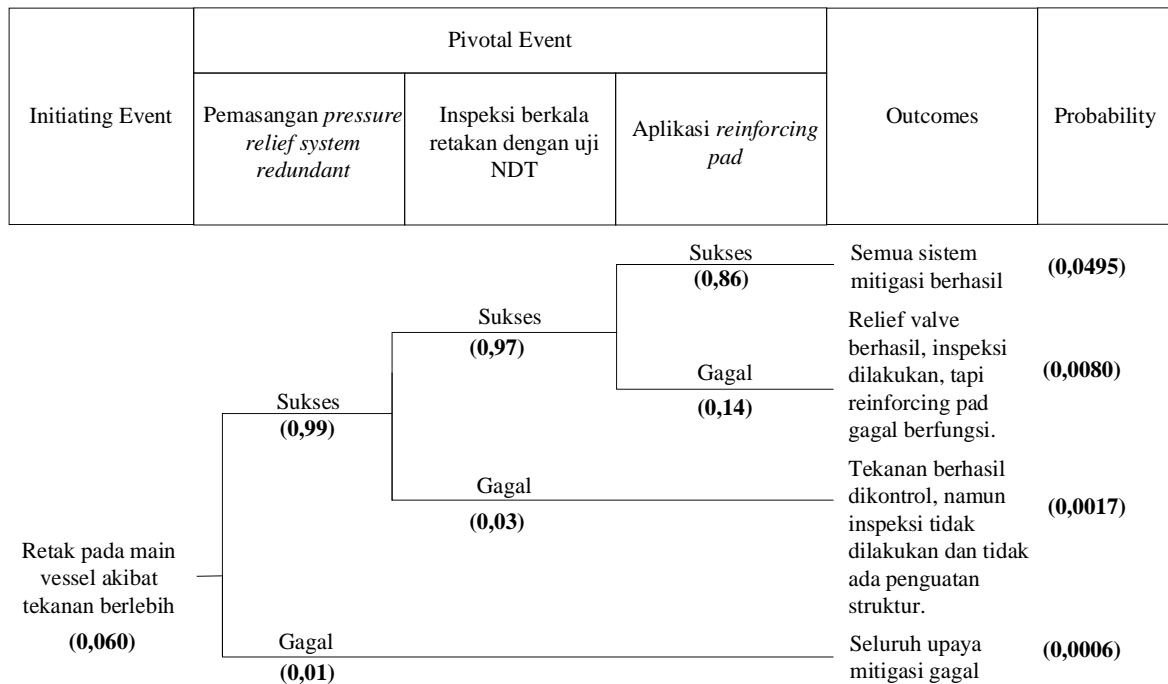
Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Ketiga *pivotal event* sukses, *outcome*-nya adalah semua sistem deteksi dan pemeliharaan aktif, sehingga tekanan dapat terkontrol, *safety valve* bekerja, dan sistem tetap aman.

2. Pemantauan dan kalibrasi sukses, tetapi inspeksi gagal, menghasilkan *outcome* berupa deteksi dan kalibrasi ada, namun *valve* kotor, yang dapat menyebabkan gangguan mekanis pada fungsi buka-tutup *valve*.
3. Hanya pemantauan tekanan yang berhasil, sedangkan kalibrasi dan inspeksi gagal, sehingga *outcome*-nya berupa hanya pemantauan tekanan, namun jika *valve* rusak atau tidak dikalibrasi, risiko tetap tinggi.
4. Semua *pivotal event* gagal, menghasilkan *outcome* terburuk berupa risiko tertinggi terhadap kebocoran atau kerusakan sistem, karena tekanan tinggi tidak terdeteksi, tidak ditanggulangi, dan tidak ada fungsi protektif dari *safety valve*.

Dari analisis tersebut, terlihat bahwa kombinasi antara sistem deteksi tekanan, kalibrasi, dan inspeksi komponen sangat menentukan efektivitas fungsi *safety valve*. Kegagalan dalam salah satu tahap dapat menyebabkan terjadinya akumulasi tekanan yang berbahaya.

4.5.8 Event Tree Analysis Main Vessel Degassing Pond



Gambar 4. 10 Bagian Proses ETA Main Vessel

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:
Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\begin{aligned}
 \text{Failure rate} &= \frac{n}{T} \\
 &= 1,90 \text{ per } 10^6 \text{ jam} \\
 &= 1 \text{ bulan} = 30 \text{ hari} \times 24 \text{ jam} = 720 \text{ jam} \\
 &= \frac{1.000.000}{720} = 1389 \text{ bulan} \\
 &= \frac{1,90}{1389} = 0,00137 \text{ perbulan} \\
 \text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\
 &= e^{-0,00137 \times 45} = 0,940 \\
 \text{Probability} &= 1 - R \\
 &= 1 - 0,940 = 0,06
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas kegagalan terjadinya adalah retak pada *main vessel* akibat tekanan berlebih. selama 45 bulan adalah 0,06.

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Pemasangan *pressure relief system redundant* sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari *pressure relief redundant* yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Weber, 2006)
2. Inspeksi berkala retakan dengan uji NDT sebesar 0,97 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas dari uji NDT berada pada angka 97% (Provençal et al., 2024)
3. Perbaikan dengan aplikasi *reinforcing pad* sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,86, berdasarkan keberhasilan 86% (Denduluri et al., 2023)

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.10, *initiating event* yang dianalisis adalah retak pada *main vessel* akibat tekanan berlebih. Retak ini dapat disebabkan oleh ketebalan dinding *vessel* yang menipis, kegagalan sistem proteksi tekanan, dan tidak adanya perlindungan terhadap kerusakan mikro. Untuk menganalisis jalur kejadian, digunakan pendekatan *Event Tree Analysis (ETA)* dengan mempertimbangkan tiga *pivotal event* penting, yaitu:

1. Pemasangan sistem proteksi tekanan tambahan (*pressure relief system redundant*),
2. Inspeksi berkala retakan dengan uji NDT, dan
3. Perbaikan dengan aplikasi *reinforcing pad*.

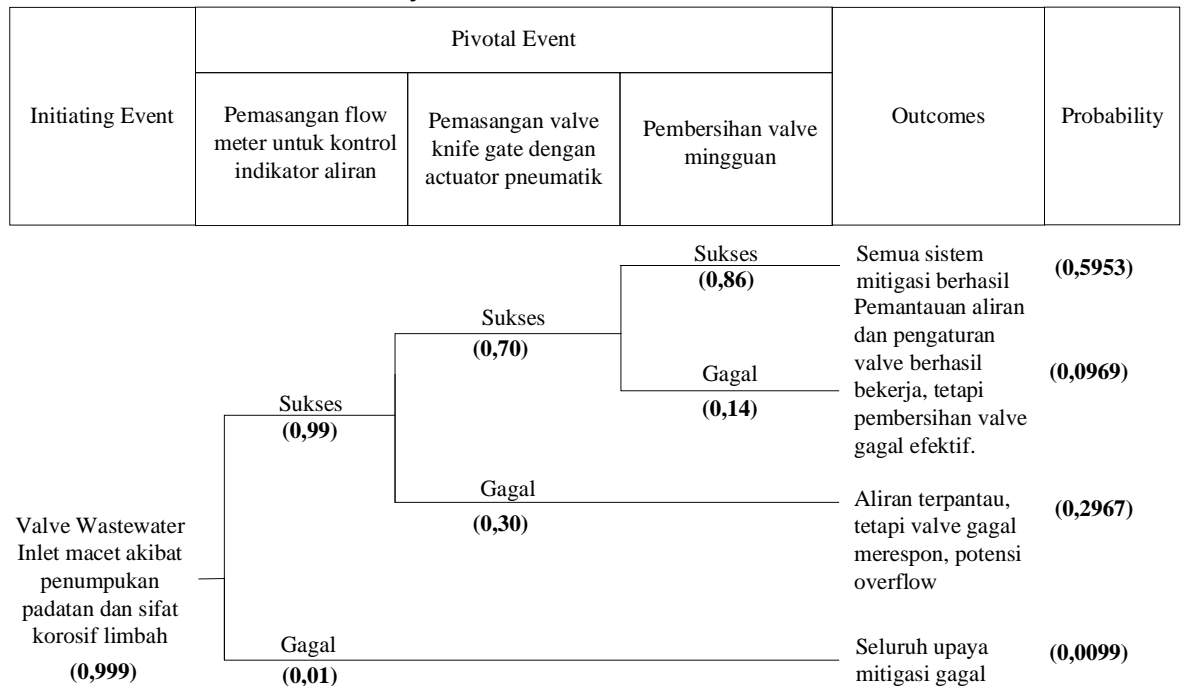
Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Ketiga *pivotal event* berhasil, sistem mampu memantau dan mengatur tekanan, perbaikan dilakukan dan inspeksi NDT yang rutin. Risiko retakan dapat dicegah secara efektif.
2. Sistem kontrol dan inspeksi NDT memadai, tetapi perbaikan tidak komprehensif.
3. Sistem kontrol bekerja, tetapi perbaikan dan inspeksi NDT gagal berfungsi, risiko kegagalan masih ada dan perlu evaluasi lanjut.
4. Semua gagal, tidak ada sistem kontrol tekanan, tidak ada perbaikan, dan tidak ada inspeksi NDT. Risiko tertinggi berupa retakan besar, kebocoran, ledakan, bahkan shutdown total proses.

Dari hasil analisis ini dapat disimpulkan bahwa ketiga sistem pengendali memiliki fungsi yang saling melengkapi dan tidak bisa berdiri

sendiri. Kegagalan salah satu sistem saja dapat memperbesar peluang terjadinya kerusakan struktural.

4.5.9 Event Tree Analysis Valve Wastewater Inlet



Gambar 4. 11 Bagian Proses ETA Valve Wastewater Inlet

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\begin{aligned} \text{Failure rate} &= \frac{10}{45} \\ &= 0,222 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\ &= e^{-0,222 \times 45} = 0.0000458562 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Probability} &= 1 - R \\ &= 1 - 0.0000458562 = 0,999 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas kegagalan *valve wastewater inlet* macet akibat penumpukan padatan dan sifat korosif limbah selama 45 bulan adalah 0,999

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Pemasangan *flowmeter* sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari *flowmeter* yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Zhou et al., 2010)
2. Pemasangan *valve knife gate* sebesar 0,70 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas dari fungsi *valve knife gate* berada pada angka 70% (Stacey & Eng, 2016)
3. Pembersihan *valve* sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,86, berdasarkan keberhasilan 86% (Xu & Floeder, 2000)

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.11, *initiating event* yang menjadi fokus adalah *valve wastewater inlet* macet akibat penumpukan padatan dan sifat korosif limbah. Macetnya *valve* ini berisiko mengganggu aliran limbah masuk, menyebabkan potensi *overflow*, serta kerusakan mekanis akibat tekanan balik. Untuk menganalisis jalur penyebab dan dampaknya, digunakan pendekatan *Event Tree Analysis* (ETA) dengan tiga *pivotal event*, yaitu:

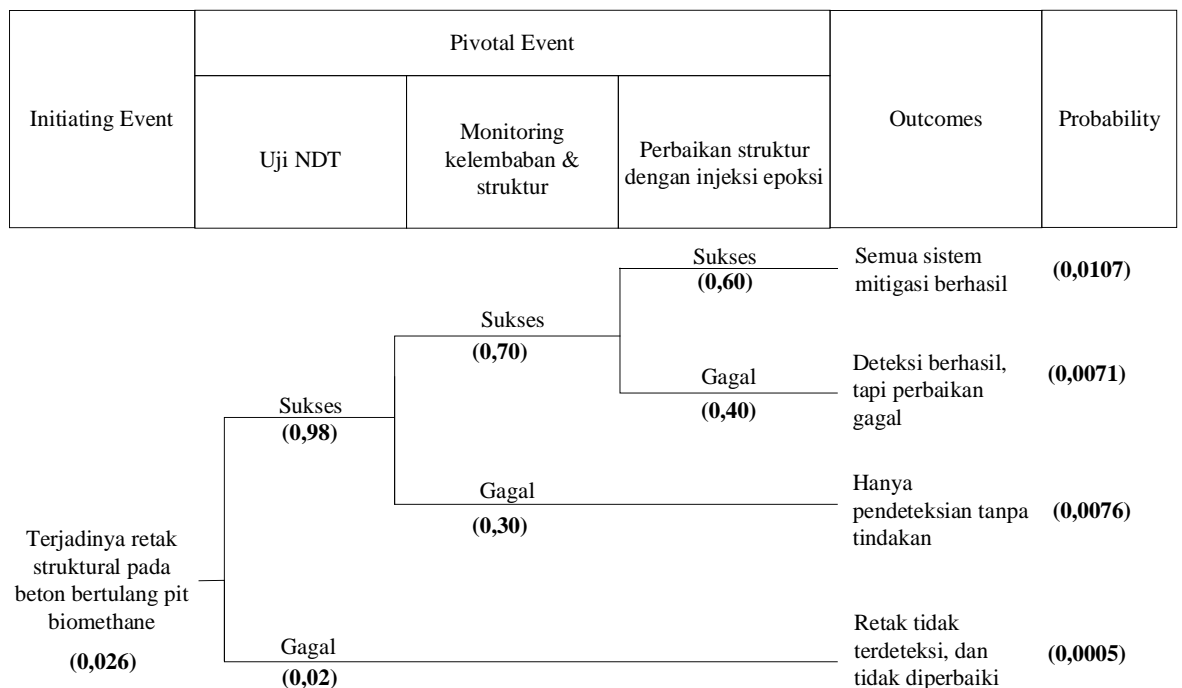
1. Pemasangan flow meter untuk kontrol indikator aliran,
2. Pemasangan valve tipe knife gate dengan actuator pneumatik, dan
3. Pembersihan valve mingguan

Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Semua tindakan berhasil, menghasilkan *outcome* optimal berupa sistem bersih, kontrol otomatis dan *Monitoring* aktif, sehingga risiko macet dapat dicegah.
2. Pemantauan aliran dan pengaturan *valve* berhasil dilakukan. Namun, pembersihan rutin tidak efektif dilakukan, sehingga walaupun *valve* terbuka, residu atau kerak mulai menumpuk.
3. Aliran terpantau baik dan gangguan terdeteksi, tetapi *actuator* knife gate gagal merespons, potensi *overflow* atau pencemaran meningkat.
4. Semua gagal, menyebabkan *valve* sangat rentan *stuck* total dan berpotensi menyebabkan *overflow* limbah ke lingkungan, menjadi *outcome* terburuk dari seluruh jalur kejadian.

Melalui analisis ini, dapat disimpulkan bahwa kombinasi antara perawatan rutin, penggunaan *valve* otomatis, dan sistem *Monitoring* aliran sangat penting untuk mencegah kegagalan pada sistem *valve* limbah. Kegagalan salah satu dari ketiga elemen ini dapat menyebabkan peningkatan risiko kegagalan sistem dan pencemaran lingkungan.

4.5.10 Event Tree Analysis Beton Kolam Pit Biomethane



Gambar 4. 12 Bagian Proses ETA Beton Kolam Pit Biomethane

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\text{Failure rate} = \frac{0}{45}$$

= 0, maka diasumsikan nilainya 0.0006025 berdasarkan *brainstorming* dengan *expert judgment*

$$\begin{aligned}\text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\ &= e^{-0.0006025 \times 45} = 0,9732\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Probability} &= 1 - R \\ &= 1 - 0,9732 = 0,026\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas kegagalan terjadinya retak struktural pada beton bertulang di kolam *pit biomethane* selama 45 bulan adalah 0,026

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Uji NDT sebesar 0,98 mengacu pada efektivitas dari sistem pengujian yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 98% (Provençal et al., 2024).
2. *Monitoring* kelembaban serta kondisi struktural sebesar 0,70 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas *Monitoring* berada pada angka 70% (Jung et al., 2020).
3. Injeksi epoksi sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,60, berdasarkan keberhasilan 60% dalam menutup kebocoran sedang (Mat Saliah et al., 2019).

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.12, *initiating event* yang dianalisis adalah terjadinya retak struktural pada beton bertulang di kolam *pit biomethane*. Retak ini dapat mengganggu integritas struktural bangunan, menyebabkan kebocoran, serta menurunkan keselamatan dan keandalan operasi. Untuk menilai dampak dari kejadian tersebut, dilakukan analisis *Event Tree* berdasarkan tiga *pivotal event*, yaitu:

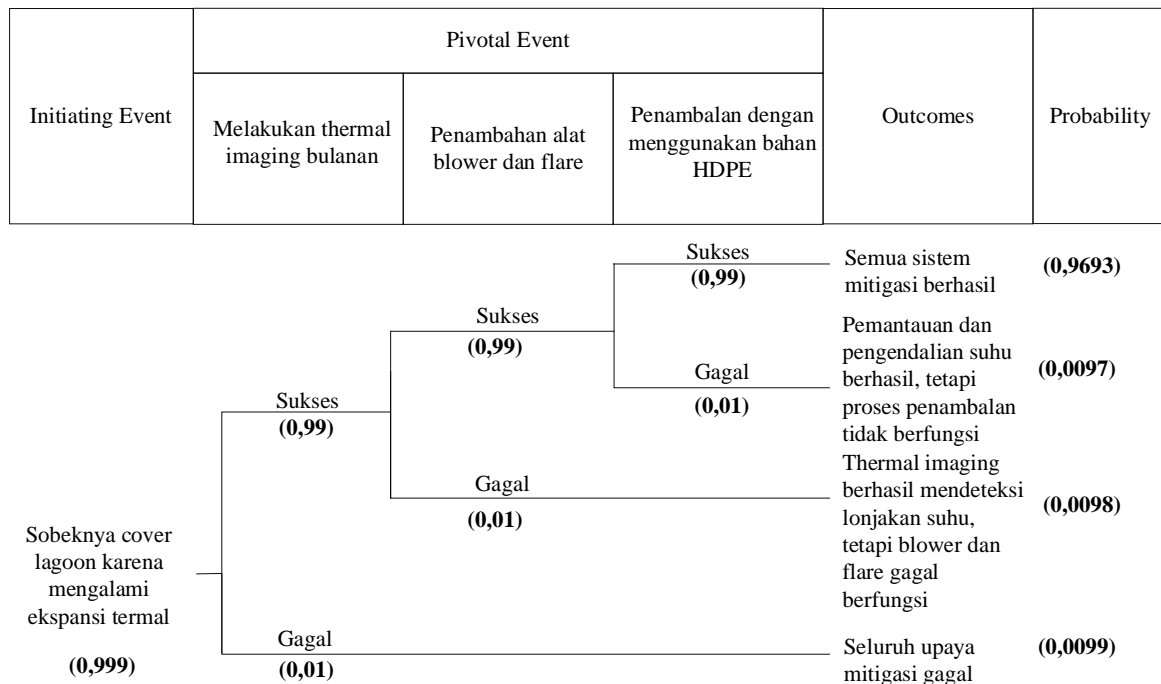
4. Uji *Non-Destructive Test (NDT)*,
5. *Monitoring* kelembaban serta kondisi struktural, dan
6. Perbaikan struktur dengan injeksi epoksi

Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

5. Semua *pivotal event* berhasil, maka *outcome* yang diperoleh adalah sistem aman, karena retak terdeteksi dini, diperbaiki tepat waktu.
6. Deteksi dini dengan uji NDT dan pemantauan kondisi struktural dilakukan dengan baik dan berhasil, tetapi perbaikan tidak berhasil, menyebabkan risiko masih ada.
7. Deteksi awal menggunakan uji NDT berhasil, tetapi *Monitoring* dan perbaikan gagal dilakukan, menyebabkan risiko masih ada.
8. Semua *barrier* gagal menjalankan fungsinya saat dibutuhkan, risiko tinggi keretakan struktural.

Hasil ini menunjukkan bahwa keberhasilan dalam mendeteksi dini melalui uji NDT, melanjutkan dengan *Monitoring*, dan melakukan perbaikan struktur dengan injeksi epoksi adalah langkah kunci dalam menjamin keselamatan konstruksi beton bertulang. Kegagalan dalam salah satu tahapan dapat menghambat mitigasi kerusakan dan mempercepat degradasi struktur.

4.5.11 *Event Tree Analysis Cover Lagoon*



Gambar 4. 13 Bagian Proses ETA *Cover Lagoon*

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\begin{aligned} \text{Failure rate} &= \frac{n}{45} \\ &= \frac{16}{45} = 0,356 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\ &= e^{-0,356 \times 45} = 0.000000110307 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textit{Probability} &= 1 - R \\ &= 1 - 0.000000110307 = 0,999 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas sobeknya *cover lagoon* akibat ekspansi termal selama 45 bulan adalah 0.999.

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Melakukan *thermal imaging* sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari pengukuran menggunakan *thermal imaging* yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Guo et al., 2016).
2. Penambahan alat yaitu blower dan flare sebesar 0,99 diambil dari studi yang menunjukkan efektivitas dari kedua alat tersebut berada pada angka 99% (Weber, 2006).
3. Penambalan dengan bahan HDPE sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,99, berdasarkan keberhasilan 99% dalam menutup kebocoran sedang (Dutson, 2011).

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.13, *initiating event* yang menjadi fokus adalah sobeknya *cover lagoon* akibat ekspansi termal. Kegagalan ini berpotensi menimbulkan pelepasan gas dari dalam lagoon ke udara bebas, yang dapat menyebabkan risiko keselamatan dan lingkungan seperti ledakan, kebakaran, atau pencemaran udara oleh gas berbahaya seperti CH₄ dan H₂S. Untuk mengidentifikasi berbagai kemungkinan jalur kejadian dan dampaknya, dilakukan pendekatan *Event Tree Analysis (ETA)* dengan tiga *pivotal event*, yaitu:

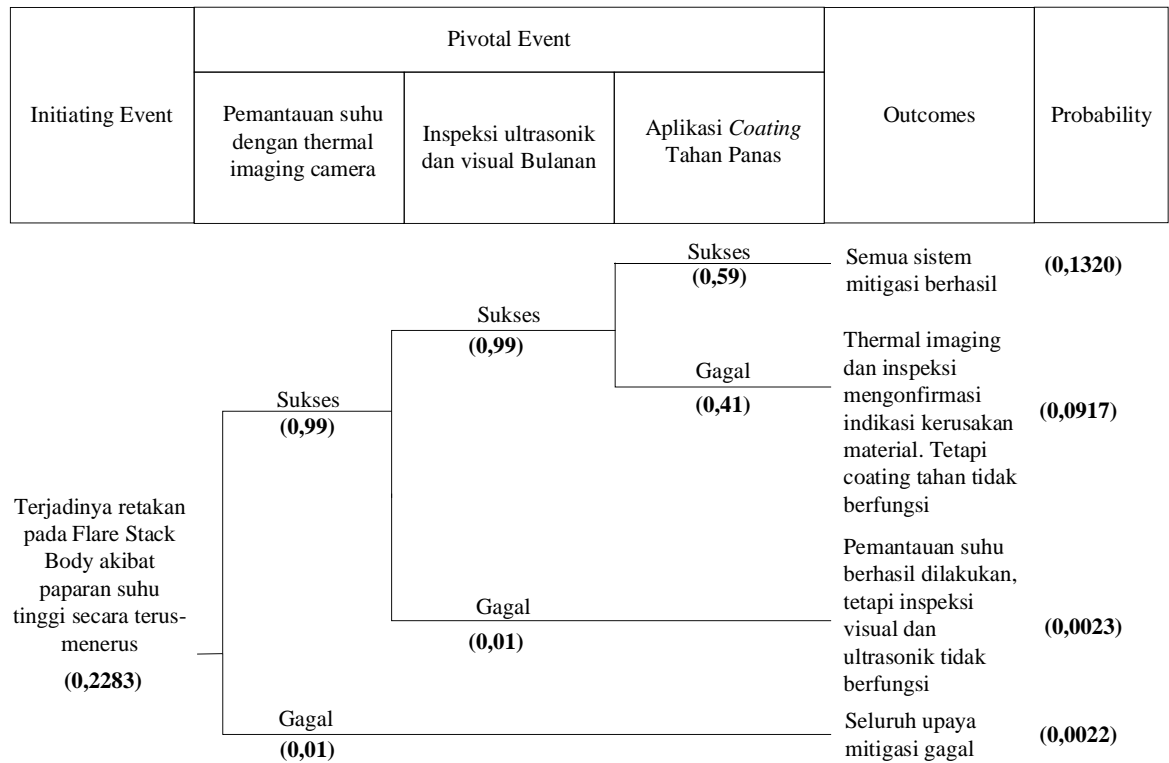
1. Melakukan *thermal imaging* bulanan,
2. Penambahan alat blower dan flare, dan
3. Penambalan menggunakan bahan HDPE.

Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Semua tindakan aktif, kombinasi optimal dari deteksi, penanganan kerusakan, dan pembuangan gas. Risiko sobekan besar dan pelepasan gas dapat dicegah secara maksimal.
2. Pemantauan dan pengendalian suhu berhasil, tetapi proses penambalan HDPE tidak efektif berfungsi, kebocoran gas tetap terjadi.
3. *Thermal imaging* berhasil mendeteksi lonjakan suhu, namun tidak ada pengendalian suhu aktif karena blower/flare gagal berfungsi, dan penambalan juga tidak berhasil. Terjadi tekanan tinggi akibat panas yang tak dikendalikan
4. Semua gagal, *outcome* terburuk berupa sobekan besar pada *cover*, potensi pelepasan penutup, dan emisi gas langsung ke udara, yang berbahaya bagi keselamatan dan lingkungan.

Melalui analisis ini, dapat disimpulkan bahwa kombinasi sistem deteksi dini, perbaikan struktural, dan pelepasan tekanan internal sangat penting untuk mencegah kegagalan pada *lagoon*. Kegagalan salah satu saja dari tiga kontrol tersebut dapat secara signifikan meningkatkan risiko kerusakan dan dampak lingkungan.

4.5.12 Event Tree Analysis Flare Stack Body



Gambar 4. 14 Bagian Proses ETA *Flare Stack Body*

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$Failure\ rate = \frac{0}{45}$$

= 0, maka diasumsikan nilainya 0,005761 berdasarkan

brainstorming dengan *expert judgment*

$$Reliability = e^{-\lambda T}$$

$$= e^{-0,005761 \times 45} = 0,771601$$

$$Probability = 1 - R$$

$$= 1 - 0,771601 = 0,2283$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas kegagalan terjadinya retakan pada *Flare Stack Body* akibat paparan suhu tinggi secara terus-menerus selama 45 bulan adalah 0,2283

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Melakukan *thermal imaging* sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari pengukuran menggunakan *thermal imaging* yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Guo et al., 2016).
2. Inspeksi ultrasonik dan visual bulanan sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari inspeksi yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Alvarado et al., 2024)
3. Pengaplikasian *coating* sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,59, berdasarkan keberhasilan 59% (Zhang et al., 2022)

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.14, *initiating event* yang dianalisis adalah terjadinya retakan pada *Flare Stack Body* akibat paparan suhu tinggi secara terus-menerus. Kegagalan ini merupakan ancaman serius karena dapat menimbulkan kerusakan struktural pada *flare stack*, yang berisiko mengarah pada kebocoran gas, keruntuhan struktur, bahkan ledakan. Untuk memahami jalur penyebab dan potensi dampaknya, dilakukan analisis *Event Tree Analysis (ETA)* dengan tiga *pivotal event*, yaitu:

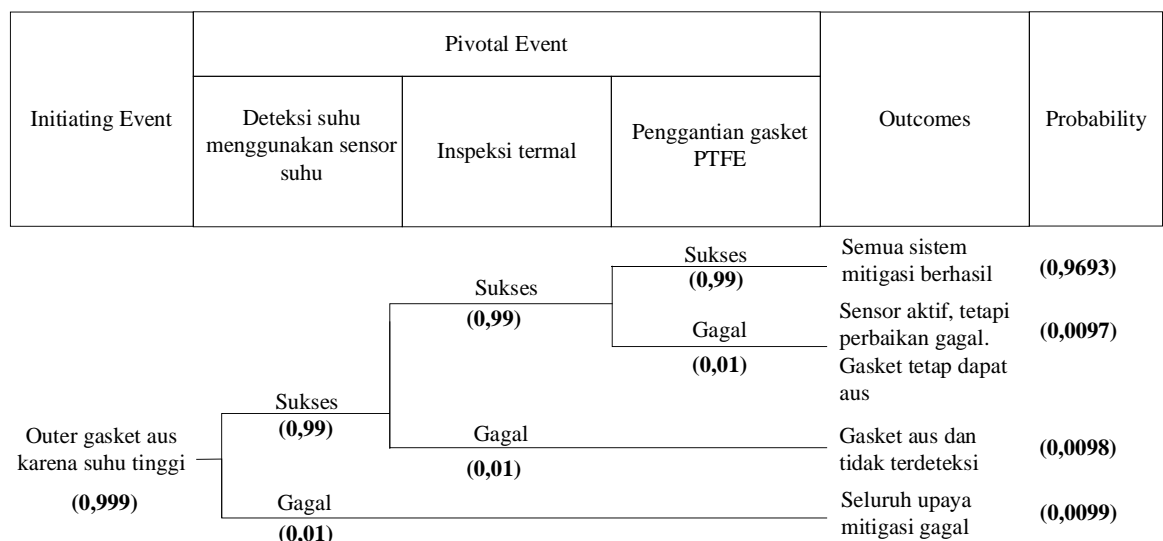
1. Pemantauan Suhu dengan *Thermal Imaging Camera*,
2. Inspeksi Ultrasonik dan Visual Bulanan, dan
3. Aplikasi *Coating* Tahan Panas

Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Semua sistem aktif, *outcome* terbaik di mana semua sistem proteksi berfungsi sempurna. *Thermal imaging camera* mendeteksi secara *real-time*, perbaikan menggunakan pengaplikasian coating tahan panas, inspeksi ultrasonik bulanan yang dilakukan secara konsisten memverifikasi integritas struktur. Risiko kegagalan diminimalkan.
2. *Thermal imaging* mendeteksi suhu abnormal dan inspeksi lanjutan mengonfirmasi adanya indikasi kerusakan material. Tetapi, coating tahan panas tidak berfungsi dengan benar, menyebabkan *flare stack* tetap mengalami retakan struktural dalam waktu dekat.
3. Pemantauan suhu berhasil dilakukan, tetapi inspeksi visual dan ultrasonik sebagai langkah deteksi langsung tidak berfungsi, informasi suhu tinggi tidak ditindaklanjuti, dan retakan tetap terjadi
4. Semua sistem proteksi gagal berfungsi. Tidak ada pemantauan suhu aktif, perbaikan coating tidak dilakukan, dan inspeksi ultrasonik diabaikan. Ini adalah skenario terburuk.

Dari analisis ini dapat disimpulkan bahwa kombinasi antara desain tahan suhu, deteksi termal berkala, dan pengelolaan suhu melalui sistem pendinginan sangat penting untuk mencegah keretakan pada *flare stack*. Ketiganya bersifat saling melengkapi.

4.5.13 Event Tree Analysis Outer Gasket Boiler



Gambar 4. 15 Bagian Proses ETA *Outer Gasket Boiler*

Pada tahap ini dilakukan perhitungan *failure rate*, *reliability*, dan *probability* dari *initiating event* yang telah diidentifikasi melalui FMEA. Perhitungannya berdasarkan data kegagalan selama 5 tahun dengan 3 bulan *shutdown* tiap tahun, serta hasil diskusi dengan *expert*:

Waktu operasi efektif = 45 bulan (5 tahun, per tahun *shutdown* selama 3 bulan)

$$\begin{aligned} \text{Failure rate} &= \frac{n}{45} \\ &= \frac{8}{45} = 0,178 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Reliability} &= e^{-\lambda T} \\ &= e^{-0,178 \times 45} = 0,000332125 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Probability} &= 1 - R \\ &= 1 - 0,000332125 = 0,999 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, diperoleh nilai probabilitas sobeknya *cover lagoon* akibat ekspansi termal selama 45 bulan adalah 0,999.

Nilai probabilitas keberhasilan tiap *pivotal event* ditentukan berdasarkan literatur:

1. Deteksi suhu menggunakan sensor suhu sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari deteksi suhu yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Paisal et al., 2024)
2. Inspeksi termal sebesar 0,99 mengacu pada efektivitas dari inspeksi yang dilaporkan memiliki tingkat keberhasilan 99% (Guo et al., 2016)
3. Penggantian gasket PTFE sebagai metode perbaikan diberi nilai 0,99, berdasarkan keberhasilan 99% (Cluever et al., 2017)

Nilai-nilai ini digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk mencerminkan efektivitas mitigasi dalam sistem saat data spesifik belum tersedia.

Berdasarkan Gambar 4.15, *initiating event* yang dianalisis adalah ausnya *outer gasket* akibat suhu tinggi dari boiler. Gasket yang aus dan tidak

diganti tepat waktu dapat menyebabkan kebocoran sistem, gangguan tekanan, bahkan kegagalan peralatan akibat kehilangan isolasi panas/listrik maupun tekanan kerja. Untuk menganalisis jalur penyebab dan dampaknya, digunakan pendekatan *Event Tree Analysis (ETA)* dengan tiga *pivotal event*, yaitu:

1. Deteksi suhu menggunakan sensor suhu,
2. Inspeksi termal, dan
3. Penggantian gasket PTFE

Tiga *pivotal event* (PE), yang merupakan representasi dari mitigasi yang telah tersedia. Setiap PE memiliki dua kemungkinan yaitu, berhasil (sukses) apabila PE tersebut berfungsi saat dibutuhkan, dan gagal apabila PE tersebut tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Kombinasi antara keberhasilan dan kegagalan dari ketiga *pivotal event* tersebut menghasilkan skenario *outcome* yang berbeda, yaitu:

1. Semua sistem berjalan, merupakan kondisi optimal di mana sensor suhu berfungsi secara optimal, penggantian gasket dilakukan dengan baik dan juga inspeksi termal yang terjadwal, sehingga risiko kegagalan dapat ditekan seminimal mungkin.
2. Sensor suhu berhasil mendeteksi kenaikan suhu dan dilanjutkan dengan inspeksi termal yang mengonfirmasi adanya keausan pada gasket. Tetapi, penggantian gasket tidak berfungsi dengan baik, meskipun permasalahan telah teridentifikasi, kegagalan dalam tindakan korektif menyebabkan potensi kebocoran tetap terjadi.
3. Sensor suhu berhasil memberikan peringatan dini atas suhu tinggi, tetapi inspeksi termal untuk memverifikasi kondisi lapangan tidak berfungsi dengan baik. Akibatnya, meskipun telah terdeteksi, tidak ada tindakan pemeriksaan atau penggantian yang dilakukan.
4. Semua gagal, risiko besar, *outcome* terburuk di mana semua sistem perlindungan gagal berfungsi. Sensor tidak mendeteksi kenaikan suhu, gasket tidak diganti sesuai kebutuhan, dan tidak ada inspeksi termal yang dilakukan. Kombinasi ini sangat berisiko menyebabkan kebocoran sistem, kerusakan peralatan, bahkan kecelakaan kerja.

Melalui analisis ini, dapat disimpulkan bahwa kombinasi deteksi menggunakan sensor suhu, lalu penggantian gasket dengan bahan PTFE dan juga inspeksi termal merupakan strategi pengendalian risiko yang saling melengkapi dalam menjaga keandalan gasket. Gagalnya satu elemen pengendali sudah cukup untuk meningkatkan risiko kegagalan sistem, terlebih jika lebih dari satu fungsi protektif tidak berjalan.

4.6 Rekomendasi

Hasil identifikasi dan penilaian risiko dari analisis sebelumnya, diperoleh sejumlah rekomendasi pengendalian yang ditujukan untuk menurunkan tingkat risiko kegagalan. Pengendalian ini mencakup tindakan pencegahan maupun penanggulangan, yang disusun dengan mengacu pada ISO 45001:2018 dalam pasal 8.1.2 Eliminasi bahaya dan mengurangi risiko K3, hirarki pengendalian risiko meliputi eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, pengendalian administratif, serta penggunaan alat pelindung diri (APD). Rekomendasi pengendalian yang disampaikan juga disesuaikan dengan ketentuan dalam Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja yang mengatur tentang perlindungan keselamatan dan kesehatan tenaga kerja serta orang lain yang berada di tempat kerja, Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan SMK3 pasal 7 ayat 2 pengusaha paling sedikit harus melakukan tinjauan awal kondisi K3 yang meliputi identifikasi potensi bahaya, penilaian dan pengendalian risiko, Peraturan Menteri Ketenagakerjaan (Permenaker) Nomor 38 Tahun 2016 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pesawat Angkat dan Angkut pasal 4 ayat 1 yang menyatakan bahwa pelaksanaan syarat-syarat K3 Pesawat Tenaga dan Produksi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 meliputi kegiatan perencanaan, pembuatan, atau perakitan, pemakaian atau pemasangan pengoperasian, pemeliharaan, perbaikan, perubahan atau modifikasi, serta pemeriksaan dan pengujian, dan Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 37 tahun 2016 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Bejana Tekanan dan Tangki Timbun pasal 3 yang menyatakan pelaksanaan syarat-syarat K3 Bejana Tekanan atau Tangki

Timbun sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 bertujuan untuk melindungi K3 Tenaga Kerja dan orang lain yang berada di Tempat Kerja dari potensi bahaya Bejana Tekanan atau Tangki Timbun, menjamin dan memastikan Bejana Tekanan atau Tangki Timbun yang aman untuk mencegah terjadinya peledakan, kebocoran, dan kebakaran menciptakan Tempat Kerja yang aman dan sehat untuk meningkatkan produktivitas.. Seluruh rekomendasi ini dirancang berdasarkan 14 hasil analisis menggunakan metode *Event Tree Analysis* (ETA).

Tabel 4. 14 Hasil Rekomendasi

Rekomendasi						
No	Komponen	Eliminasi	Substitusi	Engineering Control	Administrasi	Alat Pelindung Diri
1.	<i>Flocculation Tank Lamella Presettling Bocor</i>	<i>Koagulan</i> bersifat korosif berpotensi bocor dan mencemari, namun penting dalam proses pemisahan partikel, sehingga tidak dapat dieliminasi.	Penggantian jenis bahan kimia <i>kougulan</i> menjadi <i>biokougulan</i> .	Pemasangan sensor deteksi kebocoran otomatis	Inspeksi visual mingguan dan pembuatan form <i>checklist</i> kondisi <i>flocculation tank</i> pasca perbaikan. Pelatihan untuk operator dalam melakukan prosedur <i>emergency shutdown</i> per 6 bulan	APD Umum: helm, sepatu <i>safety</i> , dan <i>wearpack</i> APD spesifik: sarung tangan kimia, dan pelindung wajah saat perbaikan
2.	<i>Impeller Pompa Lamella Presettling Longgar</i>	<i>Impeller</i> memiliki potensi bahaya getaran berlebih, hingga risiko pecah, namun karena merupakan komponen vital penggerak aliran fluida, maka tidak dapat dieliminasi dari sistem.	Material dan desain <i>impeller</i> sudah standar industri, tidak dapat disubstitusi.	Penguncian ulang dengan torsi sesuai standar pabrik	Pemantauan, pendokumentasian getaran harian dengan <i>vibrometer</i> dan aliran tiap bulan, pembuatan <i>logboook</i> perawatan alat	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . Tidak diperlukan APD tambahan karena tidak ada paparan langsung.
3.	Beton Kolam <i>Presettling Retak</i>	Struktur beton dapat retak dan roboh, namun merupakan elemen utama sistem, sehingga tidak dapat dieliminasi.	Beton bertulang adalah pilihan optimal untuk kekuatan struktural, tidak dapat disubstitusi.	Injeksi epoksi, dan pengujian <i>Non-Destructive Test</i> (NDT)	<i>Monitoring</i> kelembaban dan deformasi dengan pengukuran retak setiap 3 bulan.	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . Tidak diperlukan APD tambahan karena inspeksi tidak berisiko langsung.

Tabel 4. 14 Hasil Rekomendasi Lanjutan

Rekomendasi						
No	Komponen	Eliminasi	Substitusi	Engineering Control	Administrasi	Alat Pelindung Diri
4.	Motor Cooling Tower Overheat	Motor berpotensi <i>overheat</i> dan <i>downtime</i> , namun merupakan hal vital dalam sistem pendinginan, sehingga tidak dapat dieliminasi.	Jenis motor telah disesuaikan dengan beban dan lingkungan kerja, tidak dapat disubstitusi.	Instalasi sistem kontrol suhu otomatis pada motor	Jadwal pembersihan motor tiap 2 minggu dan pemantauan arus listrik bulanan.	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . Tidak diperlukan APD tambahan karena pemantauan otomatis.
5.	Mechanical Seal pompa Cooling Tower Aus	<i>Seal</i> aus menyebabkan kebocoran dan kerusakan pompa, namun <i>seal</i> merupakan komponen penting untuk menjaga tekanan dan aliran, sehingga tidak dapat dieliminasi.	Penggantian dengan <i>mechanical seal</i> yang berbahan karbon keramik tahan aus dan suhu tinggi.	Penggantian <i>seal</i> secara preventif	Pemantauan pelumas mingguan dan pengukuran getaran <i>bearing</i> tiap bulan, pembuatan <i>logbook</i> untuk perawatan alat	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . Tidak diperlukan APD tambahan karena aktivitas dilakukan saat sistem mati.
6.	Shaft Agitator Anaerobic Bio Digester Patah	<i>Shaft agitator</i> dapat patah dan mengganggu proses produksi, namun merupakan bagian penting untuk pengadukan, sehingga tidak dapat dieliminasi.	Ganti <i>shaft</i> dengan material kekuatan tinggi seperti baja tahan <i>fatigue</i> atau logam komposit.	Analisis beban dan pemantauan kondisi operasional <i>shaft agitator</i>	Penjadwalan ulang inspeksi <i>shaft</i> berdasarkan data keausan, kalibrasi ulang kondisi <i>shaft</i> tiap tahun	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . Tidak diperlukan APD tambahan karena penggantian dilakukan preventif.

Tabel 4. 14 Hasil Rekomendasi Lanjutan

Rekomendasi						
No	Komponen	Eliminasi	Substitusi	Engineering Control	Administrasi	Alat Pelindung Diri
7.	Safety Valve Blower Gagal Membuka	Safety valve dapat gagal membuka dan memicu <i>overpressure</i> , namun fungsi safety valve dibutuhkan, maka tidak dapat dieliminasi.	Teknologi safety valve sudah disesuaikan untuk tekanan, tidak dapat disubstitusi	Kalibrasi berkala dan pemasangan pressure gauge standar	Inspeksi visual mingguan dan uji fungsi safety valve tiap 3 bulan dengan form khusus.	APD umum: helm, sepatu safety, wearpack. APD spesifik: kacamata safety & pelindung telinga saat uji tekanan.
8.	Main Vessel Degassing Pond Retak	Main vessel dapat retak dan menyebabkan kebocoran gas, namun bagian utama peralatan <i>degassing pond</i> , sehingga tidak dapat dieliminasi.	Material sesuai tekanan operasional, tidak dapat disubstitusi	Pemasangan sistem relief valve redundan, dan aplikasi reinforcing pad	Evaluasi tekanan operasi bulanan dan penjadwalan inspeksi dengan uji NDT tiap per 6 bulan	APD umum: helm, sepatu safety, wearpack. Tidak diperlukan APD tambahan karena Monitoring otomatis.
9.	Valve Wastewater Inlet Lamella Digester Macet	Valve berisiko macet dan sebabkan <i>overflow</i> , namun penting untuk mengontrol aliran, tidak dapat dieliminasi.	Ganti ke valve knife gate dengan aktuator pneumatik	Pemasangan flow meter otomatis pada jalur limbah	Pembersihan valve mingguan dan pencatatan hasil inspeksi pada form standar perusahaan, pelatihan operator untuk manual override procedure	APD umum: helm, sepatu safety, wearpack. Tidak diperlukan APD tambahan karena pembersihan ringan.

Tabel 4. 14 Hasil Rekomendasi Lanjutan

Rekomendasi						
No	Komponen	Eliminasi	Substitusi	<i>Engineering Control</i>	Administrasi	Alat Pelindung Diri
10.	<i>Impeller</i> Pompa <i>Lamella</i> <i>Digester</i> Longgar	<i>Impeller</i> memiliki potensi bahaya getaran berlebih, hingga risiko pecah, namun karena merupakan komponen vital penggerak aliran fluida, maka tidak dapat dieliminasi dari sistem.	Material dan desain <i>impeller</i> sudah standar industri, tidak dapat disubstitusi.	Penguncian ulang dengan torsi sesuai standar pabrik	Pemantauan pendokumentasian getaran harian dengan <i>vibrometer</i> dan aliran tiap bulan, pembuatan <i>logbook</i> perawatan alat	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . Tidak diperlukan APD tambahan karena tidak ada paparan langsung.
11.	Beton Kolam <i>Pit</i> <i>Biomethane</i> Retak	Struktur beton dapat retak dan roboh, namun merupakan elemen utama sistem, sehingga tidak dapat dieliminasi.	Beton bertulang adalah pilihan optimal untuk kekuatan struktural, tidak dapat disubstitusi.	Injeksi epoksi, dan pengujian <i>Non-Destructive Test</i> (NDT)	<i>Monitoring</i> kelembaban dan deformasi dengan pengukuran retak setiap 3 bulan.	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . Tidak diperlukan APD tambahan karena inspeksi tidak berisiko langsung.
12.	<i>Cover Lagoon</i> Sobek	<i>Cover</i> dapat sobek dan melepas gas beracun, namun penting untuk menahan emisi gas, tidak dapat dieliminasi.	Material HDPE adalah pilihan optimal dari sisi teknis dan biaya, tidak dapat disubstitusi.	Penambalan material HDPE, serta pemasangan blower dan <i>flare</i>	Penjadwalan inspeksi visual dan <i>thermal imaging</i> setiap 2 minggu disertai dokumentasi foto.	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . APD spesifik: respirator saat penanganan area gas beracun.

Tabel 4. 14 Hasil Rekomendasi Lanjutan

Rekomendasi						
No	Komponen	Eliminasi	Substitusi	<i>Engineering Control</i>	Administrasi	Alat Pelindung Diri
13.	<i>Flare Stack Body</i> Retak	<i>Flare stack</i> bisa retak karena suhu tinggi, namun bagian ini merupakan bagian vital untuk proses penanganan kontrol emisi, tidak dapat dieliminasi.	Desain dan material <i>flare stack</i> disesuaikan dengan operasional pabrik yang bersuhu tinggi, tidak dapat disubstitusi.	Pengaplikasian <i>coating</i> tahan panas	Penjadwalan <i>Thermographic inspection flare</i> tiap minggu dan evaluasi suhu puncak tiap bulan.	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . Tidak diperlukan APD tambahan karena pemantauan tanpa kontak langsung.
14.	<i>Outer Gasket</i> Aus	<i>Gasket</i> dapat pecah dan bocor, namun penting untuk isolasi sambungan, tidak dapat dieliminasi.	Ganti dengan gasket PTFE yang lebih tahan terhadap tekanan dan korosi.	Instalasi sistem kontrol suhu otomatis pada peralatan boiler	Inspeksi termal harian dan pembuatan <i>log</i> (catatan) kondisi gasket.	APD umum: helm, sepatu <i>safety</i> , <i>wearpack</i> . Tidak diperlukan APD tambahan karena dilakukan saat sistem tidak aktif.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Event Tree Analysis* (ETA), maka dapat ditarik beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

1. Penentuan subkomponen kritis menunjukkan bahwa terdapat 14 mode kegagalan yang dikategorikan sebagai prioritas tinggi berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) maupun dampak lanjutan yang signifikan dari hasil ETA. Nilai RPN tertinggi ditemukan pada 14 mode kegagalan yang berasal dari berbagai peralatan utama. Nilai RPN berkisar antara 20 hingga 40, dengan kegagalan tertinggi disebabkan oleh kelonggaran impeller pompa dengan RPN senilai 40.
2. Analisis ETA terhadap 13 *initiating event* menunjukkan bahwa sebagian besar skenario memiliki probabilitas kegagalan tinggi yaitu berkisar antara 0,999 hingga 0,06. Jika sistem pengendalian tidak berjalan baik, jalur paling kritis terjadi saat seluruh pivotal event gagal, yang dapat menyebabkan *shutdown*, pencemaran, atau kerusakan sistem. Skenario terbaik terjadi saat seluruh sistem pengendalian berjalan efektif.
3. Pengendalian risiko dilakukan terhadap mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi berdasarkan hasil FMEA, kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan ETA. Rekomendasi pengendalian disusun mengikuti prinsip hierarki pengendalian bahaya, yaitu: eliminasi, substitusi, rekayasa teknis (*engineering control*), pengendalian administratif, dan penggunaan alat pelindung diri (APD).

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah diuraikan, maka penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Perusahaan disarankan melakukan evaluasi berkala terhadap efektivitas tindakan pengendalian yang telah diterapkan. Rekomendasi hasil FMEA dan ETA dapat dijadikan dasar dalam mengurangi adanya kegagalan pada peralatan proses anaerobik IPAL.
2. Penelitian lanjutan disarankan untuk melibatkan metode kuantitatif lainnya, seperti *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk perbandingan jalur penyebab, atau *Reliability Centered Maintenance* (RCM) untuk pengembangan strategi pemeliharaan yang lebih efisien dan terfokus.
3. Perlu ditambahkan analisis ekonomi teknik atau *cost-benefit analysis* (CBA) dalam kajian pengendalian, guna mengetahui kelayakan investasi terhadap penerapan sistem kontrol otomatis atau penggantian peralatan kritis.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., Ghufra, R., & Wahid, Z. A. (2011). *Bioenergy from anaerobic degradation of lipids in palm oil mill effluent*. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 10(4), 353–376. <https://doi.org/10.1007/s11157-011-9253-8>
- Akeredolu, F. A., & Sonibare, J. A. (2004). *A review of the usefulness of gas flares in air pollution control*. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, 15(6), 574–583. <https://doi.org/10.1108/14777830410560674>
- Alijoyo, A., Wijaya, B., & Jacob, I. (2022). *Event Tree Analysis Analisis Pohon Kejadian*. CRMS Indonesia. www.lspmks.co.id
- Alijoyo, A., Wijaya, Q. B., & Jacob, I. (2020). Failure Mode Effect Analysis Analisis Modus Kegagalan dan Dampak RISK EVALUATION RISK ANALYSIS: Consequences Probability Level of Risk. In *Crms*. www.lspmks.co.id
- Alkhowaiter, A., & Consultant, M. (2019). *Machinery Reliability Chapter-1 : The Secrets of Extremely Reliable Mechanical Shaft Seals*. 1–18.
- Aloqaily, A. (2018). Foreword and Book Description. *Cross Country Pipeline Risk Assessments and Mitigation Strategies*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816007-7.00001-9>
- Alvarado, J. W. V., García, L. F. C., Neira, M. T., & Flores, J. W. V. (2024). Probability of Defects Detection in Welded Joints Using the Magnetic Particle Method. *Archives of Metallurgy and Materials*, 69(2), 607–612. <https://doi.org/10.24425/amm.2024.149789>
- Bahadori, A. (2014). Blow-Down and Flare Systems. In A. Bahadori (Ed.), *Natural Gas Processing* (hal. 275–312). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099971-5.00006-4>
- Bajpai, P. (2013). Advances in Bioethanol. In *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology* (Nomor 9788132215837). Springer New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London Library. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1584-4_1
- Beegle, J. R., & Borole, A. P. (2018). Energy production from waste: Evaluation of anaerobic digestion and bioelectrochemical systems based on energy efficiency and economic factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96(June 2017), 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.057>
- Bennett, M. A., McDermott, R., & Beauregard, M. (2017). The Basics of FMEA.

In *The Basics of FMEA*. <https://doi.org/10.1201/b16656>

- Bonatto, I. D. C., Becker, H. R., Matias, M. S., Filho, P. B., & de Castilhos Júnior, A. B. (2024). Removal of H₂S from biogas by adsorption with commercial activated carbon and granular iron oxide. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 29, 1–11. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522023135>
- Burke P. E, D. A. (2001). Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook. *Time*, 20(3), 156–161. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WYV-4HJ3VM2-2/2/ddf81cc8e21efc39b285d358a28bcea2>
- Caminschi, O., & Dorogaia, I. (2023). *Operational risk management of an enterprise: assessment and minimization methods*. 478, 48–56. <https://doi.org/10.53486/icspm2023.05>
- Carlson, C. S. (2012). *Effective FMEAs Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. <https://doi.org/10.1002/9781118312575>
- Chadni, M., Moussa, M., Athès, V., Allais, F., & Ioannou, I. (2023). Membrane contactors-assisted liquid-liquid extraction of biomolecules from biorefinery liquid streams: A case study on organic acids. *Separation and Purification Technology*, 317, 123927. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123927>
- Chaudry, M. (2024). *Steam Boiler Types, Construction and Working Principle*. Electrical Engineering 123. <https://electricalengineering123.com/steam-boiler-types-construction-and-working-principle/?amp=1>
- Cluever, J., Esselman, T., & Harvey, S. (2017). *Pvp2017-65408 Bayesian Analysis of Expert Elicitation Responses for Life Cycle*. 1–10.
- Cremonese, P. A., Teleken, J. G., Weiser Meier, T. R., & Alves, H. J. (2021). *Two-Stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review*. **Journal of Environmental Management**, 281(December 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111854>
- Degu, Y. M., & Moorthy, R. S. (2014). *Implementation of Machinery Failure Mode and Effect Analysis in Amhara American Journal of Engineering Research (AJER)* Open Access Implementation of Machinery Failure Mode and Effect Analysis in Amhara Pipe Factory P. L. C., Bahir Dar, Ethiopia. **American Journal of Engineering Research**, 3(March), 57–63.
- Denduluri, A. T., Dunna, S. V., Prasada, H. C., Kuncha, S. C., & Rapeta, S. R. (2023). *Design and Analysis of Reinforcement pad at Nozzle junction on Pressure Vessel*. 356–366. <https://doi.org/10.46254/in02.20220148>

- Dutson, G. Q. (2011). Patch Extrusion Welding of an Evaporation Pond as a Geomembrane Failure Mechanism – A Case History. *Geo-Frontiers 2011* © ASCE 2011, 8, 1453–1462.
- Ebrahimi, M., Shaghaghian, M. R., & Ghadampour, Z. (2023). Pressure gauge network design for leakage detection in water distribution systems using a combination of the pressure residual vector method and the entropy concept. *Water Supply*, 23(8), 3030–3045. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.186>
- Ericson, C. A. (2005). Hazard Analysis Techniques for System Safety. In *Hazard Analysis Techniques for System Safety*. <https://doi.org/10.1002/0471739421>
- Fan, X., Zhang, J., & Zhang, Y. (2023). *Multi Performance Reliability Analysis Method of Safety Valves Based on Mixed Weighted Regression*. **2023 5th International Conference on System Reliability and Safety Engineering (SRSE)**, 57–62. <https://doi.org/10.1109/SRSE59585.2023.10336144>
- Galatanu, S. V., Muntean, S., Marsavina, L., Micota, D., & Draghici, I. (2018). Integrity Analysis of the Rainwater Pump Impeller. *MATEC Web of Conferences*, 188. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818804005>
- Ghassan Alsultan, A., Asikin-Mijan, N., Kareem Obeas, L., Isalam, A., Mansir, N., Fawzi Nassar, M., Zulaika Razali, S., Yunus, R., & Hin Taufiq-Yap, Y. (2023). Biogas Fundamentals, Process, and Operation. In *Biochar - Productive Technologies, Properties and Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104984>
- Guo, J. W., Yang, L., Zhou, Y. C., He, L. M., Zhu, W., Cai, C. Y., & Lu, C. S. (2016). Reliability assessment on interfacial failure of thermal barrier coatings. *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*, 32(5), 915–924. <https://doi.org/10.1007/s10409-016-0595-x>
- Hariady, S. (2014). *Analisa Kerusakan Pompa Sentrifugal 53-101C Wtu Sungai Gerong Pt. Pertamina Ru Iii Plaju*. **Jurnal Desiminasi Teknologi**, 2(1), 29–42.
- Hastin Nuraini. (2022). *Manajemen Risiko Untuk Meminimalisir Masalah Perusahaan*. **OPTIMAL Jurnal Ekonomi dan Manajemen**, 2(3), 339–350. <https://doi.org/10.55606/optimal.v2i3.1366>
- Horan, N., Zahrim Yaser, A., & Wit, N. (2018). Anaerobic Digestion Processes Applications and Effluent Treatment. In N. Horan, A. Zahrim Yaser, & N. Wit (Ed.), *Green Energy and Technology* (Vol. 0, Nomor 9789811081286). Springer Singapore. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3>
- Indonesia, P. R. (2012). Peraturan Presiden Nomor 50 Tahun 2012 Tentang

Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Dan Kesehatan Kerja. In *Pemerintah Republik Indonesia*.
<https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/5263/pp-no-50-tahun-2012>

Industri Bioetanol. (2024). *Proses Produksi Bioetanol dan Biogas*.

Ivančan, J., Lisjak, D., Pavletić, D., & Kolar, D. (2023). Improvement of Failure Mode and Effects Analysis Using Fuzzy and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Machines*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/machines11070739>

Jeffrey Pierce, J., Weiner, R. F., & Aarne Vesilind, P. (1998). Environmental Pollution and Control. In *Butterworth-Heinemann* (4 ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-9899-3.X5000-7>

Jia, L. W., Shen, M. Q., Wang, J., & Lin, M. Q. (2005). *Influence of ethanol-gasoline blended fuel on emission characteristics from a four-stroke motorcycle engine*. **Journal of Hazardous Materials**, 123(1–3), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.046>

Juanizar, A. R., Suripin, S., Sriyana, I., & Suprpto, S. (2022). *Analisis Probabilitas Kegagalan Bendungan Pacal Menggunakan Metode Event Tree Analysis*. **Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil**, 1(2), 117–130. <https://doi.org/10.35334/be.v1i2.2652>

Jung, H., Im, S. B., & An, Y. K. (2020). Probability-based concrete carbonation prediction using on-site data. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(12), 4330. <https://doi.org/10.3390/app10124330>

Karellas, S., Boukis, I., & Kontopoulos, G. (2010). *Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14(4), 1273–1282. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.12.002>

Kemal, M., Riswanda, F., Rizal, M. C., & Luqman, M. (2024). *Analisis Risiko Kegagalan Komponen Tower Crane pada Proyek RSIA Kaliwaron Menggunakan Metode FMEA*. **8th CONFERENCE ON SAFETY ENGINEERING AND ITS APPLICATION**, 2581, 451–457.

Kementerian Ketenagakerjaan RI. (2016). Pp Nomor 37 Tahun 2016 Tentang Keselamatan Dan Kesehatan Kerja Bejana Tekanan Dan Tangki Timbun. In *Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Bejana Tekanan dan Tangki Timbun*.

Kiran, D. R. (2017). Failure Modes and Effects Analysis. In BSP Books Pvt. Ltd. Published (Ed.), *Total Quality Management: Key Concepts and Case Studies* (hal. 373–389). Elsevier Inc. All rights reserved.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-811035-5.00026-X>

- Mat Saliah, S. N., Khairul Nizam, K., Muhammad Ariffaizad, M. M., Abd Rahman, N., & Nor, N. M. (2019). *Evaluation of severe damaged reinforced concrete beam repaired with epoxy injection and retrofitted with CFRP using acoustic emission technique*. **Journal of Physics: Conference Series**, 1349(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012097>
- Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2016). Peraturan Menteri Ketenagakerjaan No.38 tahun 2016 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pesawat Tenaga dan Produksi. In *Peraturan Menteri Ketenagakerjaan No.38 tahun 2016 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pesawat Tenaga dan Produksi*.
- Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi. (2010). Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia. *Peraturan Menteri tenaga Kerja dan Transmigrasi*, VII(8), 1–69. <https://indolabourdatabase.files.wordpress.com/2018/03/permenaker-no-8-tahun-2010-tentang-apd.pdf>
- Meyer, M. A., & Booker, J. M. (2001). *Eliciting and Analyzing Expert Judgment: A Practical Guide* (R. F. Gunst, R. L. Mason, J. A. Calvin, G. C. McDonald, S. Keller-McNulty, M. D. Morris, J. F. Pendergast, & R. N. Rodriguez (ed.)). Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/https://doi.org/10.1137/1.9780898718485.bm>
- Mohammed, A. K., Lawal, M. N., & Ozigis, I. I. (2024). *Gas turbine bearing vibration monitoring using potable vibrometer*. **LAUTECH Journal of Engineering and Technology**, 8(2), 52–64. <https://doi.org/10.36108/laujet/4202.81.0250>
- Monir, M. U., Yousuf, A., & Aziz, A. A. (2020). Chapter 6 - Syngas fermentation to bioethanol. In A. Yousuf, D. Pirozzi, & F. Sannino (Ed.), *Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels* (hal. 195–216). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815936-1.00006-X>
- Organisasi Internasional untuk Standardisasi. (2018). Occupational Health and Safety Management System (OHSMS) ISO 45001-2018. In *Www.Spindo.Com*. <https://drive.google.com/file/d/1ym3gi7ur-HhifF6gouMKeJJufhAqCx2H/view>
- Paisal, Taufik, A., & Faisal, M. (2024). *MONITORING ALIRAN FLUIDA MENGGUNAKAN SENSOR ALIRAN BERBASIS IoT PADA motor listrik dengan sistem umpan balik tertutup dimana posisi dari motor akan diinformasikan kembali ke rangkaian kontrol yang ada di dalam motor servo [4] , Potensiometer 10K Ohm ada*. 91–96.

- Parkash, S. (2003). Refinery Water Systems. In S. Parkash (Ed.), *Refining Processes Handbook* (hal. 242–269). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075067721-9/50009-8>
- Pemerintah Indonesia. (1970). *Undang-undang No 1 Tahun 1970 Tentang Keselematan Kerja*.
- Periyasamy, S., Temesgen, T., Karthik, V., Isabel, J. B., & Kavitha, S. (2022). *Wastewater to biogas recovery*. In A. An, V. Tyagi, M. Kumar, & Z. Cetecioglu (Ed.), **Clean Energy and Resource Recovery: Wastewater Treatment Plants as Biorefineries, Volume 2** (hal. 301–314). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90178-9.00029-9>
- PGN LNG Indonesia. (2023). *Bahan Bakar Fosil: Jenis, Manfaat dan Dampaknya Terhadap Lingkungan*. PGN LNG Indonesia Web Site. <https://pgnlng.co.id/berita/wawasan/bahan-bakar-fosil/>
- Provençal, E., Drolet, R., & Sisto, M. M. (2024). *Demonstrating Probability of Detection of indication in a Heat Exchanger with Assisted Analysis using Artificial Intelligence*. **e-Journal of Nondestructive Testing**, 29(8). <https://doi.org/10.58286/30029>
- Ramadhan, F. (2017). *Analisis Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) menggunakan metode Hazard Identification Risk Assessment and Risk Control (HIRARC)*. **Seminar Nasional Riset Terapan**, November, 164–169.
- Rashed Al Mamun, M., & Torii, S. (2015). Comparative Studies on Methane Upgradation of Biogas by Removing of Contaminant Gases Using Combined Chemical Methods. *AIMS Energy*, 3(3), 255–266. <https://doi.org/10.3934/energy.2015.3.255>
- Ratnawati, R., Al Kholif, M., & Sugito, S. (2014). *Desain Instalasi Pengolahan Air Limbah (Ipal) Biofilter Untuk Mengolah Air Limbah Poliklinik Unipa Surabaya*. **WAKTU: Jurnal Teknik UNIPA**, 12(2), 73–82. <https://doi.org/10.36456/waktu.v12i2.915>
- Rausand, M. (2011). Risk Assessment Risk. Theory, Methods, and Applications. In *John Wiley & Sons, Inc.* (Vol. 24, Nomor 4).
- Rinoza, M., & Ahmad Kurniawan, F. (2021). *Analisa Rpn (Risk Priority Number) Terhadap Keandalan Komponen Mesin Kompresordouble Screw Menggunakan Metode Fmea Di Pabrik Semen Pt. Xyz*. **Cetak Buletin Utama Teknik**, 17(1), 1410–4520.
- Schneider, H. (1996). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA From Theory to Execution*. In **Technometrics** (Vol. 38, Nomor 1). <https://doi.org/10.1080/00401706.1996.10484424>

- Semnasti, A., Ramdhani, A. Y., & Alim Safa'at, M. (2023). *Penerapan FMEA (Failure Mode And Effect Analysis) Untuk Mengidentifikasi Risiko Kegagalan Pada Kemasan Produk XYZ (Studi Kasus: PT. Herba Emas Wahidatama)*. **Waluyo Jatmiko Proceeding**, 16(1), 241–250. <https://doi.org/10.33005/wj.v16i1.17>
- Sezer, S. I., Akyuz, E., & Gardoni, P. (2023). Prediction of human error probability under Evidential Reasoning extended SLIM approach: The case of tank cleaning in chemical tanker. *Reliability Engineering & System Safety*, 238, 109414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109414>
- Shengbao, L., Jianjiang, W., Zhihua, S., Feng, X., Guang, Y., Fen, L., Yu, J., Chunxia, W., Zhen, C., Ruopeng, Y., & Yan, H. (2015). *Patent Model Utilitas* (Patent No. 201520221220.7).
- Skjong, R., & Wentworth, B. H. (2001). Expert judgment and risk perception. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 4(December), 537–544.
- Söderholm, P. (2024). *Event tree analysis for risk-based assessment of digitalised condition-based maintenance in railway*. <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4557508/v1>
- Stacey, E., & Eng, P. (2016). *Pipelines 2016 1721. Epa 2013*, 1721–1731.
- Sugiani, A. T., & Santoso, A. B. (2022). *Perancangan arsitektur aplikasi umat bertanya menggunakan pendekatan C4 model*. **Telnologiterkkini.org**, 2(9), 3.
- Sugiharto, A. (2020). *Perhitungan Efisiensi Boiler Dengan Metode Secara Langsung pada Boiler Pipa Api*. **Majalah Ilmiah Swara Patra**, 10(2), 51–57. <https://doi.org/10.37525/sp/2020-2/260>
- Sulaksono, P. H., Nugroho, A., & Mayangsari, N. E. (2018). *Analisis Potensi Bahaya Kebocoran Biogas pada Biogas Plant Industri Bioetanol*. **2ND PROCEEDING CONFERENCE ON SAFETY ENGINEERING AND IT'S APPLICATION**, 658–661.
- Syahrudin. (2018). *Analisis Sistem Perawatan Mesin Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) Sebagai Dasar Kebijakan Perawatan yang Optimal di PLTD "X."* **Jurnal Tekhologi Terpadu**, 1(7), 42–49.
- Technologies, P. A. (2024). *Clarifier Lamella*. <https://aquariontechnologies.weebly.com/clarifier-lamella.html>

- Triwulandari, M. H., Nugroho, A., & Ramadani, T. A. (2019). *Analisa Risiko Hydrogen Storage dengan Menggunakan FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) dan ETA (Event Tree Analysis)*. **3 rd Proceeding Conference On Safety Engineering**, 2581, 614–618.
- Weber, M. (2006). Some Safety Aspects on the Design of Sparger Systems for the. *Process Safety Progress*, 25(4), 326–330. <https://doi.org/10.1002/prs>
- Wellinger, A., Murphy, J., & Baxter, D. (2013). The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. <https://doi.org/10.1533/9780857097415>
- Wu, F. (2011). *Akar Blower (Tekanan Conveyance)*. Trundean Machinery. <https://www.bestrootsblower.com/id/product/roots-blower-pressure-conveyance-th-type.html>
- Xu, W., & Floeder, S. P. (2000). Detection Probability Evaluation of an Automated Inspection System. *Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII*, 3966, 134–144. <https://doi.org/10.1117/12.380067>
- Yang, Y., Liu, Y., Shimai, S., & Wu, Y. (2015). *Environmentally Friendly Processing of Transparent Optical Ceramics*. In **Green and Sustainable Manufacturing of Advanced Material**. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411497-5.00018-7>
- Yao, Q., Dai, L., Tang, J., Wu, H., & Liu, T. (2024). High-speed rolling bearing lubrication reliability analysis based on probability box model. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 76, 103612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2024.103612>
- Zhang, H., Zhou, C., Zhao, H., & Zhang, Z. (2022). An ensemble model-based method for estimating failure probability function with application in reliability-based optimization. *Applied Mathematical Modelling*, 108, 445–468. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.03.040>
- Zhou, Z., Li, L. B., Qin, Y., Ma, D. Z., & Niu, B. (2010). Failure modes analysis of electromagnetic flowmeter based on grey relational analysis. *Applied Mechanics and Materials*, 33, 322–326. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.33.322>



LAMPIRAN 1
DATA KEGAGALAN PERALATAN

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

Lampiran I

Data Kegagalan Peralatan Anaerobik

No	Tanggal	Komponen	Keterangan
1	14 Januari 2020	Flokulan lamella presettling	Bocor
2	17 Januari 2020	Rotor Shaft Blower	Suara kasar
3	23 Februari 2020	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Bocor
4	5 Maret 2020	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar
5	8 Maret 2020	Safety Valve Blower Digester	Rusak
6	15 April 2020	O-Ring for Bearing Blower Digester	Aus
7	22 April 2020	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
8	25 April 2020	Shaft Pompa Lamella Digester	Aus
9	28 April 2020	Outer Gasket Boiler	Aus
10	3 Mei 2020	M10 Hex Nut Boiler	Lepas
11	8 Mei 2020	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat
12	9 Mei 2020	Impeller Pompa Lamella Presettling	Longgar
13	12 Mei 2020	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar
14	16 Juni 2020	Flokulan lamella presettling	Bocor
15	19 Juni 2020	Cover Lagoon	Sobek
16	24 Juni 2020	Motor Cooling Tower	Berasap
17	28 Juni 2020	Safety Valve Blower Digester	Rusak
18	2 Juli 2020	Coupling Pompa Lamella Digester	Aus
19	6 Juli 2020	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Bocor
20	9 Juli 2020	Cover Lagoon	Sobek
21	7 Juli 2020	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
22	13 Juli 2020	Slinger Blower Digester	Aus
23	17 Juli 2020	Bearing Blower Digester	Aus
24	20 Juli 2020	Cover Lagoon	Sobek
25	23 Juli 2020	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
26	28 Juli 2020	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar

No	Tanggal	Komponen	Keterangan
27	3 Agustus 2020	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat
28	20 Agustus 2020	Cover Lagoon	Sobek
29	26 September 2020	Outer Gasket Boiler	Aus
30	30 September 2020	O-Ring for Bearing Blower Digester	Aus
31	5 Oktober 2020	Safety Valve Blower Digester	Rusak
32	6 Oktober 2020	Impeller Pompa Lamella Presettling	Longgar
33	09 November 2020	Shaft Pompa Lamella Digester	Aus
34	12 November 2020	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar
35	15 November 2020	Flokulan lamella presettling	Bocor
36	20 November 2020	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
37	04 April 2021	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
38	07 April 2021	O-Ring for Bearing Blower Digester	Aus
39	11 April 2021	Shaft Pompa Lamella Digester	Aus
40	18 Mei 2021	Coupling Pompa Lamella Digester	Aus
41	22 Mei 2021	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Bocor
42	30 Mei 2021	Outer Gasket Boiler	Aus
43	26 Juni 2021	M10 Hex Nut Boiler	Lepas
44	26 Juni 2021	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
45	28 Juni 2021	Rotor Shaft Blower	Suara kasar
46	2 Juli 2021	Impeller Pompa Lamella Presettling	Longgar
47	3 Juli 2021	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
48	4 Juli 2021	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar
49	10 Maret 2022	Shaft Pompa Lamella Digester	Aus
50	15 Maret 2022	M10 Hex Nut Boiler	Lepas
51	15 Maret 2022	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
52	18 Maret 2022	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap

No	Tanggal	Komponen	Keterangan
53	18 Maret 2022	Impeller Pompa Lamella Presettling	Longgar
54	21 April 2022	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat
55	25 April 2022	Flokulan lamella presettling	Bocor
56	2 Mei 2022	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar
57	4 Juni 2022	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Bocor
58	4 Juni 2022	Impeller Pompa Lamella Presettling	Longgar
59	7 Juni 2022	O-Ring for Bearing Blower Digester	Aus
60	11 Juni 2022	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat
61	11 Juni 2022	Outer Gasket Boiler	Aus
62	18 Agustus 2022	Safety Valve Blower Digester	Rusak
63	24 September 2022	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Bocor
64	28 September 2022	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar
65	30 September 2022	O-Ring for Bearing Blower Digester	Aus
66	30 September 2022	Impeller Pompa Lamella Presettling	Longgar
67	3 Oktober 2022	Safety Valve Blower Digester	Rusak
68	5 Oktober 2022	Rotor Shaft Blower	Suara kasar
69	10 Oktober 2022	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat
70	12 Oktober 2022	Cover Lagoon	Sobek
71	15 November 2022	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
72	19 November 2022	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
73	22 November 2022	Cover Lagoon	Sobek
74	26 November 2022	Flokulan lamella presettling	Bocor
75	29 November 2022	Outer Gasket Boiler	Aus
76	2 Desember 2022	Shaft Pompa Lamella Digester	Aus
77	10 Februari 2023	Safety Valve Blower Digester	Rusak
78	14 Februari 2023	O-Ring for Bearing Blower Digester	Aus
79	18 Maret 2023	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat

No	Tanggal	Komponen	Keterangan
80	21 April 2023	Coupling Pompa Lamella Digester	Aus
81	25 April 2023	Outer Gasket Boiler	Aus
82	25 April 2023	Impeller Pompa Lamella Presettling	Longgar
83	28 April 2023	Cover Lagoon	Sobek
84	1 Mei 2023	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
85	2 Juni 2023	M10 Hex Nut Boiler	Lepas
86	5 Juni 2023	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
87	14 Juli 2023	Outer Gasket Boiler	Aus
88	17 Juli 2023	Flokulan lamella presettling	Bocor
89	2 Agustus 2023	Rotor Shaft Blower	Suara kasar
90	05 September 2023	O-Ring for Bearing Blower Digester	Aus
91	08 September 2023	Shaft Pompa Lamella Digester	Aus
92	11 September 2023	Safety Valve Blower Digester	Rusak
93	15 Oktober 2023	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar
94	18 Oktober 2023	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat
95	22 Oktober 2023	Cover Lagoon	Sobek
96	26 Oktober 2023	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
97	02 November 2023	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
98	06 November 2023	Cover Lagoon	Sobek
99	10 November 2023	Cover Lagoon	Sobek
100	18 November 2023	Ladder Cooling Tower	Longgar
101	26 November 2023	Slinger Blower Digester	Aus
102	30 November 2023	Flokulan lamella presettling	Bocor
103	3 Desember 2023	Outer Gasket Boiler	Aus
104	7 Desember 2023	Cover Lagoon	Sobek
105	15 Desember 2023	Bearing Blower Digester	Aus
106	19 Desember 2023	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
107	23 Desember 2023	Cover Lagoon	Sobek
108	27 Desember 2023	Impeller Pompa Lamella Presettling	Longgar
109	27 Desember 2023	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat

No	Tanggal	Komponen	Keterangan
110	19 Maret 2024	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
111	21 Maret 2024	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat
112	23 Maret 2024	Shaft Pompa Lamella Digester	Aus
113	05 April 2024	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Bocor
114	05 April 2024	Safety Valve Blower Digester	Rusak
115	17 April 2024	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar
116	15 Mei 2024	O-Ring for Bearing Blower Digester	Aus
117	20 Mei 2024	Flokulan lamella presettling	Bocor
118	22 Mei 2024	Cover Lagoon	Sobek
119	5 Juni 2024	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Bocor
120	10 Juni 2024	Cover Lagoon	Sobek
121	16 Juni 2024	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
122	17 Juni 2024	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat
123	17 Juni 2024	Rotor Shaft Blower	Suara kasar
124	19 Juni 2024	Outer Gasket Boiler	Aus
125	21 Juni 2024	Bearing Blower Digester	Aus
126	3 Juli 2024	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
127	11 Juli 2024	Guard Plate Pompa Cooling Tower	Lepas
128	15 Juli 2024	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
129	3 Agustus 2024	O-Ring for Bearing Blower Digester	Aus
130	4 Agustus 2024	Safety Valve Blower Digester	Rusak
131	4 Agustus 2024	Cover Lagoon	Sobek
132	12 Agustus 2024	Gasket Pompa Cooling Tower	Aus
133	21 Agustus 2024	O Ring Pompa Cooling Tower	Aus
134	24 Agustus 2024	Support Foot Pompa Cooling Tower	Misalignment
135	02 September 2024	Slinger Blower Digester	Aus
136	06 September 2024	Flokulan lamella presettling	Bocor

No	Tanggal	Komponen	Keterangan
137	14 September 2024	Impeller Pompa Lamella Presettling	Aus
138	18 September 2024	Cover Lagoon	Sobek
139	22 September 2024	Wastewater Inlet Lamella Digester	Tersumbat
140	30 September 2024	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Berasap
141	3 Oktober 2024	M10 Hex Nut Boiler	Lepas
142	7 Oktober 2024	Outer Gasket Boiler	Aus
143	19 Oktober 2024	Shaft Pompa Lamella Digester	Aus
144	27 Oktober 2024	Safety Valve Blower Digester	Rusak
145	01 November 2024	Flokulan lamella presettling	Bocor
146	09 November 2024	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar
147	13 November 2024	Mechanical seal Pompa Cooling Tower	Bocor
148	14 November 2024	Impeller Pompa Lamella Digester	Longgar

Mengetahui,

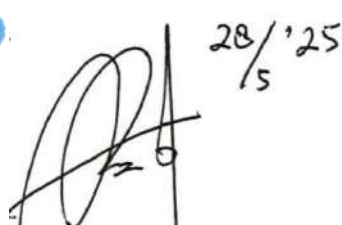
Supervisor HSE
PT Energi Agro Nusantara



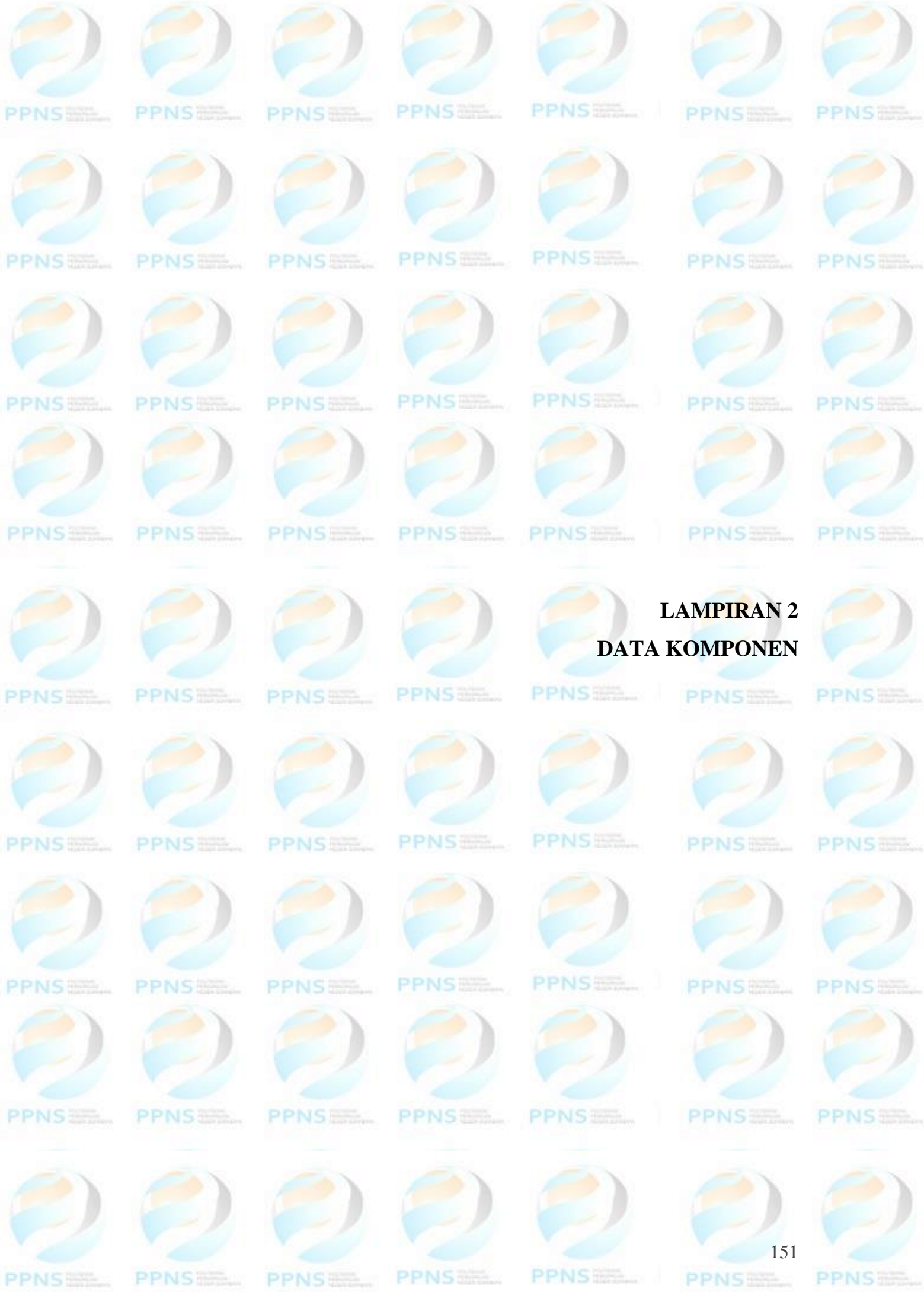
Nurul Bahri



Supervisor Maintenance
PT Energi Agro Nusantara



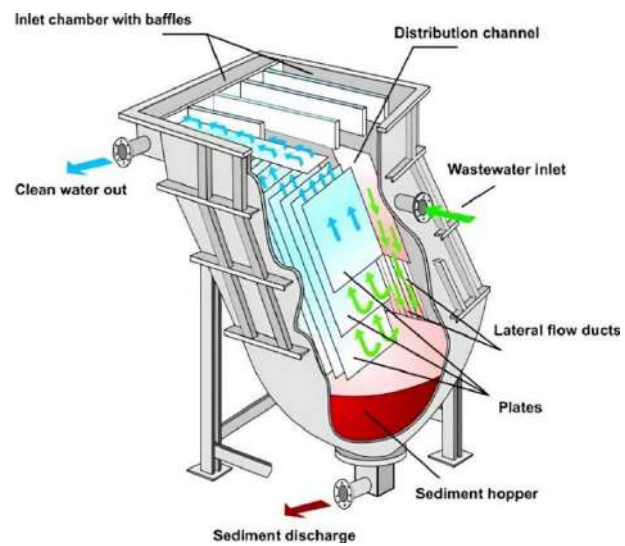
Randhy Istahyudi



LAMPIRAN 2
DATA KOMPONEN

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

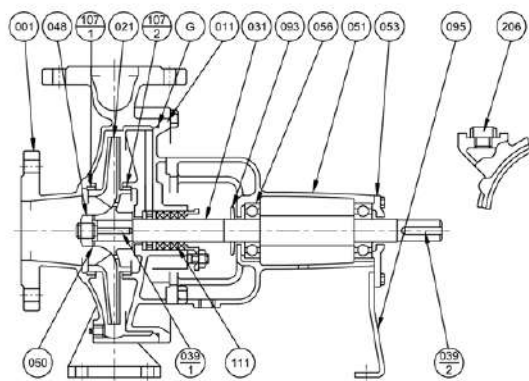
1. *Lamella Presettling dan Lamella Digester*



2. *Kolam Presettling*

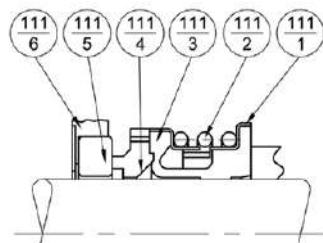


3. Pompa Sentrifugal FSA



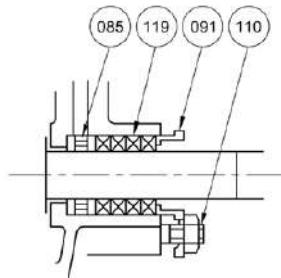
G	O-Ring	Rubber	1
206	Plug	Steel	
111	Mechanical Seal	-	
107-2	Casing Ring	Bronze	
107-1	Casing Ring		
095	Bearing Support	Steel	
093	Deflector	Rubber	
056	Ball Bearing	-	2
053	Bearing Cover	Cast Iron	1
051	Bearing Housing		
050	Impeller Nut Washer	Brass	
048	Impeller Nut		
039-2	Coupling Key	Stainless Steel	
039-1	Impeller Key		
031	Shaft		
021	Impeller	Bronze	
011	Casing Cover	Cast Iron	
001	Casing		
No.	Part Name	Material	Qty

Tipe Mechanical Seal (Standar)



111-6	Cup Gasket	NBR	1
111-5	Matting Ring	Ceramic	
111-4	Seal Ring	Carbon	
111-3	Bellows	NBR	
111-2	Coil Spring	Stainless Steel	
111-1	Spring Holder		
No.	Part Name	Material	Qty

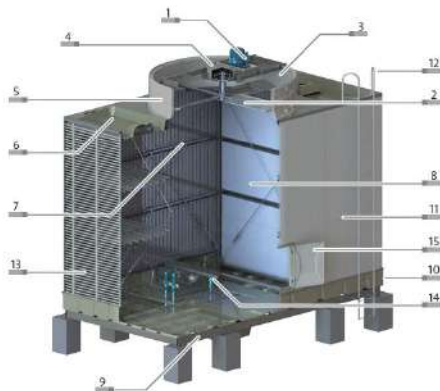
Tipe Gland Packing (Pilihan)



119	Gland Packing	Non-Asbestos	4 or 5
110	Gland Bolt	Brass	2
091	Gland	Bronze	1
085	Lantern Ring Bushing		
No.	Part Name	Material	Qty

Catatan: Beberapa model pompa tanpa Lantern Ring Busging (085)

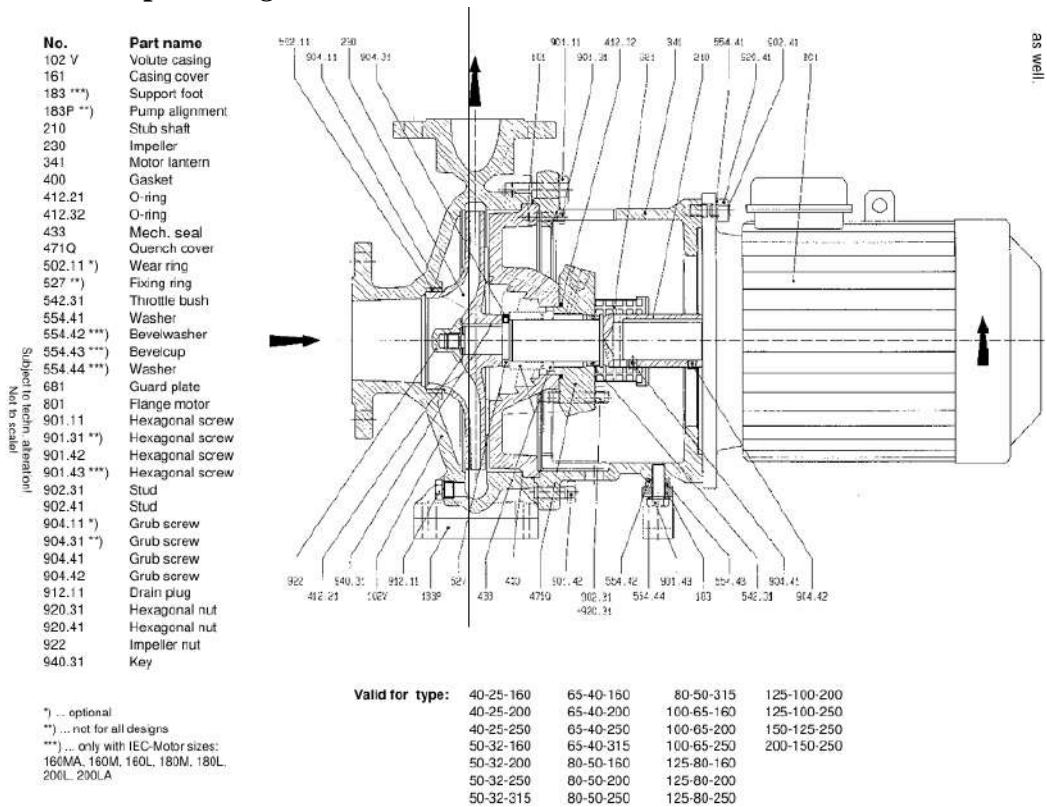
4. Cooling Tower



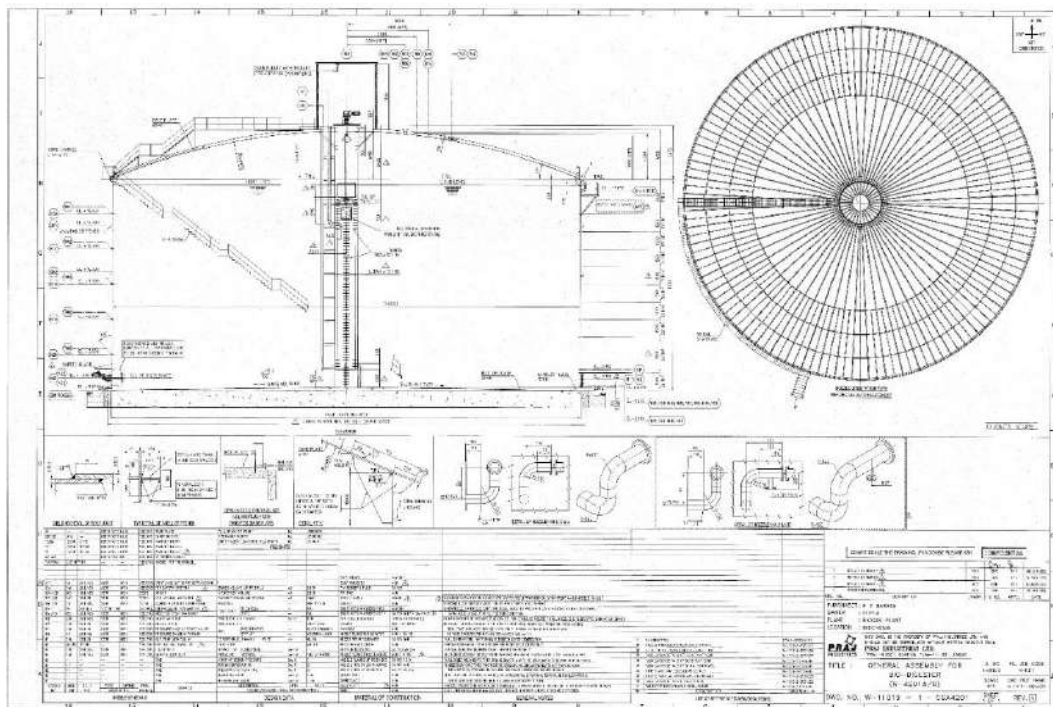
NO.	PARTS NAME	MATERIALS	Q'TY	REMARKS
1	Motor		1 Pc	Total Enclosed Outdoor
2	Fan	Alum. Alloy Cast	1 Set	
3	Fan Guard	H.D.G.Steel	1 Set	Hot Dip Galvanized
4	Belt Cover	F.R.P.	1 Set	
5	Fan Casing	F.R.P.	1 Set	
6	Upper Water Basin	F.R.P.	2 Pcs	
7	Framework	H.D.G.Steel	1 Set	Hot Dip Galvanized
8	Fill	P.V.C.	1 Set	
9	Lower Frame	H.D.G.Steel	1 Set	Hot Dip Galvanized
10	Lower Water Basin	F.R.P.	1 Set	
11	Casing Panel	F.R.P.	2 Sides	
12	Ladder	H.D.G.Steel	1 Pc	Hot Dip Galvanized
13	Louver	P.V.C.	2 Sides	
14	Overflow Pipe	H.D.G.Steel	1 Set	Hot Dip Galvanized
15	Inspection Door	F.R.P.	1 Pc	
STANDARD COLOR : GRAY OR WHITE				

* Above structure drawing is an external piping type.

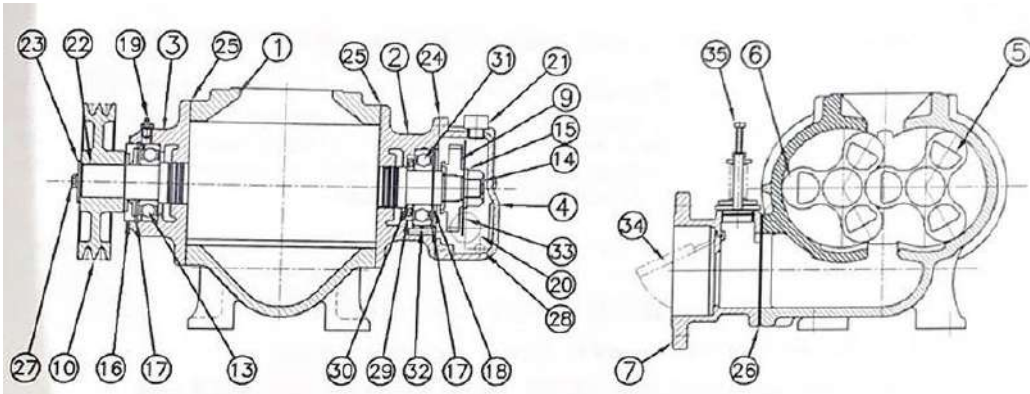
5. Pompa Casing



6. Anaerobik Digester



7. Blower



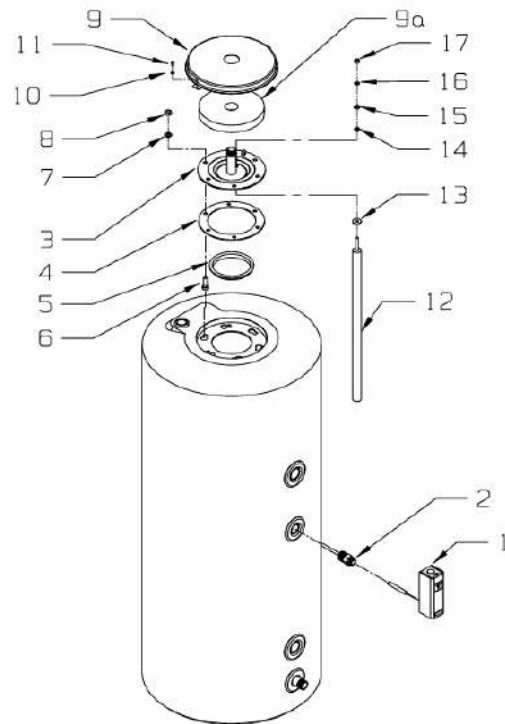
No.	Component Name	Material	Parts	No.	Component Name	Material	Parts
1	Casing	FC200	1	20	Oil Gauge	Resin	1
2	Housing R	FC200	1	21	Oil Cap	Resin	1
3	Housing L	FC200	1	22	Pulley Check Key	S45C	1
4	Gear Cover	FC200	1	23	Pulley Check Plate	SS400	1
5	Rotor Shaft A	FCD500-7	1	24	Gasket for Gear Cover	NA joint sheet	1
6	Rotor Shaft B	FCD500-7	1	25	Gasket for Housing	Pressboard	2
7	Discharge Flange	FC200	1	26	Gasket for Disc.Flange	NA joint sheet	1
9	Timing Gear	SCM415	2	27	Pulley Check Bolt	SS400	1
10	Blower Pulley	FC200	1	28	Oil Drain Plug	SS400	1
13	Bearing L	SUJ2	2	29	Slinger	SS400	2
14	Gear Stop Nut	SS400	2	30	O Ring for Slinger	NBR	2
15	Conical Spring Washer	SPS10	2	31	Bearing R	SUJ2	2
16	V-Seal	SBR	2	32	O Ring for Bearing	NBR	2
17	Snap Ring R	S65C	4	33	Sprinkle Plate	SS400	1
18	Snap Ring S	S65C	2	34	Check Valve	EPDM	1
19	Grease Nipple	C3604	2	35	Safety Valve	CAC406	1

8. Lagoon



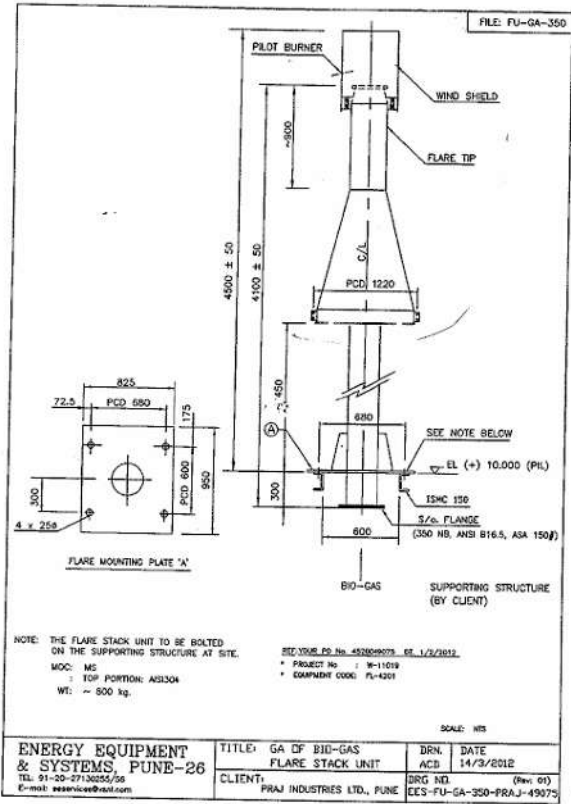
9. Boiler

Parts - MT040G, MT050G

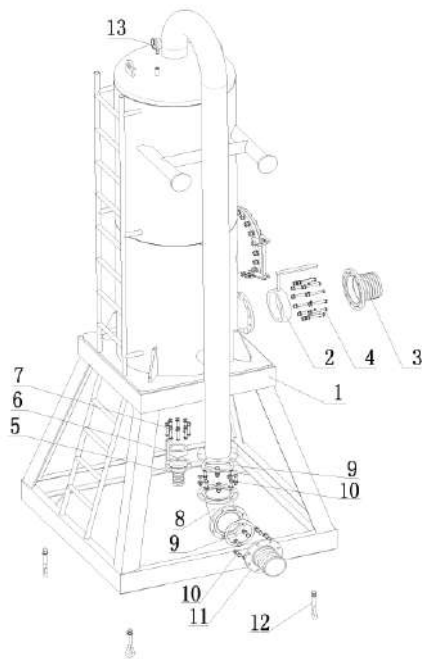


KEY #	PART DESCRIPTION	CROWN P.N.	QTY.
1	THERMOSTAT (L4006A2114)	35-3200	1
2	3/4 SHORT WELL	35-1010	1
3	CLEAN OUT COVER	220000	1
4	OUTER GASKET	220001	1
5	INNER GASKET	220002	1
6	M10 x 30mm CARRIAGE BOLT	900023	6
7	M10 FLAT WASHER	90-024	6
8	M10 HEX NUT	90-025	6
9	CAP	220020	1
9a	CAP INSULATION	220021	1
10	M4 FLAT WASHER	900005	2
11	M4 x 10mm MACHINE SCREW	900006	2
12	ANODE ROD	220010	1
13	RUBBER ANODE GASKET	220015	1
14	INSULATING GASKET	220016	1
15	M8 FLAT WASHER	900007	1
16	M8 LOCK WASHER	900008	1
17	M8 BRASS HEX NUT	900009	1
	ANODE ROD REPLACEMENT KIT (1 ea. OF KEY #12 - 17)	220200	1

10. Flare Stack



11. Degassing Pond

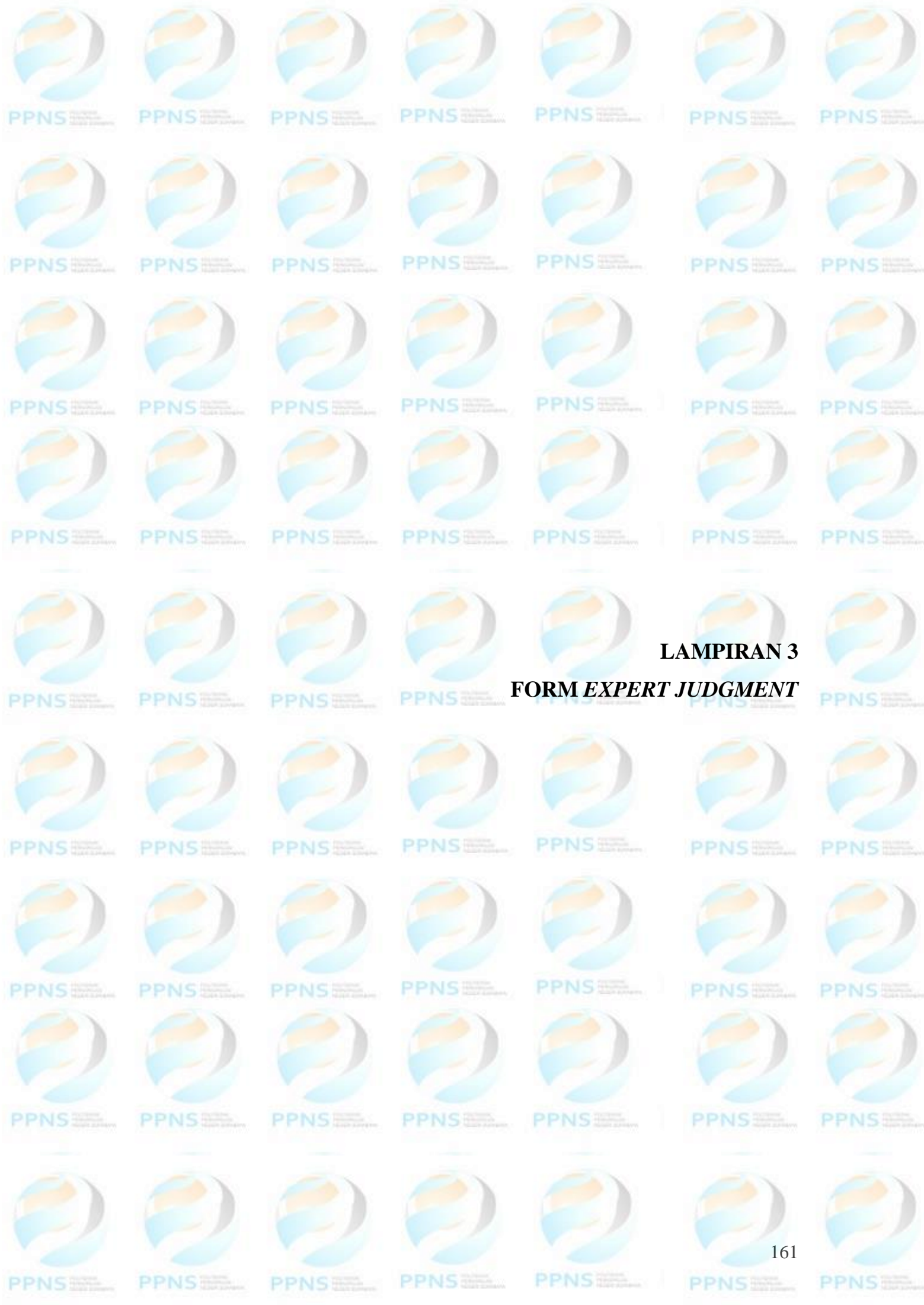


SN	Des.	FN	QTY
1	Main vessel	GNZYQ1000-01	1
2	Valve	JB/T 308 PN10DN250DD3	1
3	Nipple	DN250DC-00	1
4	Hex Bolts	GB/T 5783 M20x160	12
4	Spring washer	GB/T 93 20	28
	Hex nut	GB/T 41 M20	28
5	Nipple	DN100DC-00	1
6	Valve	JB/T 308 PN10DN100DDB	1
7	Bolts	GB/T 5783 M16x130	8
	Spring washer	GB/T 93 16	8
	Hex nut	GB/T 41 M16	8
8	8" Elbow components	GNZYQ1000-02	1
9	Seal	GB/T 9126 RFDN200PN10	1
10	Hex Bolts	GB/T 5783 M20x80	16
11	Nipple	DN200DC-00	1
12	Foundation Bolts	GB/T 799 M24x300	4
13	Pressure gauge	YLB100	1
14	Lifting eye	GNZYQ1000-01-02-08	2
15	Name plate		

12. *Pit Biomethane*



****Halaman ini sengaja dikosongkan****



LAMPIRAN 3
FORM *EXPERT JUDGMENT*

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

KRITERIA EXPERT JUDGMENT

Penelitian ini menggunakan expert judgement untuk membantu menganalisis identifikasi kegagalan peralatan, menilai tingkat risiko, dan menentukan langkah pengendalian pada sistem proses anaerob di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) industri bioetanol. Proses ini melibatkan para ahli yang memiliki pemahaman mendalam terkait penyebab kegagalan, solusi perbaikan, serta alternatif pemecahan masalah untuk meningkatkan keandalan peralatan. Kriteria expert judgement yang digunakan mengacu pada Skjong & Wentworth (2012), dengan persyaratan sebagai berikut:

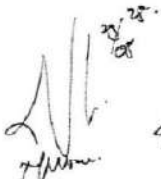
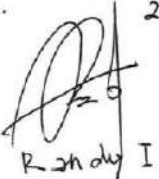


1. Berpengalaman dalam penelitian dan pengambilan keputusan berbasis keahlian di bidang teknik atau operasional IPAL.
2. Memiliki reputasi baik di kalangan profesional terkait pengelolaan limbah dan peralatan proses anaerob.
3. Bersedia berpartisipasi aktif dalam memberikan masukan berdasarkan pengetahuan lapangan.
4. Memiliki integritas, percaya diri, dan kemampuan beradaptasi dalam menilai risiko kegagalan peralatan.
5. Memahami secara mendalam sistem IPAL bioetanol, khususnya terkait Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) dan Event Tree Analysis (ETA).

Penilaian dilakukan oleh expert judgement yang memenuhi kriteria di atas. Harapannya, para ahli dapat membantu:

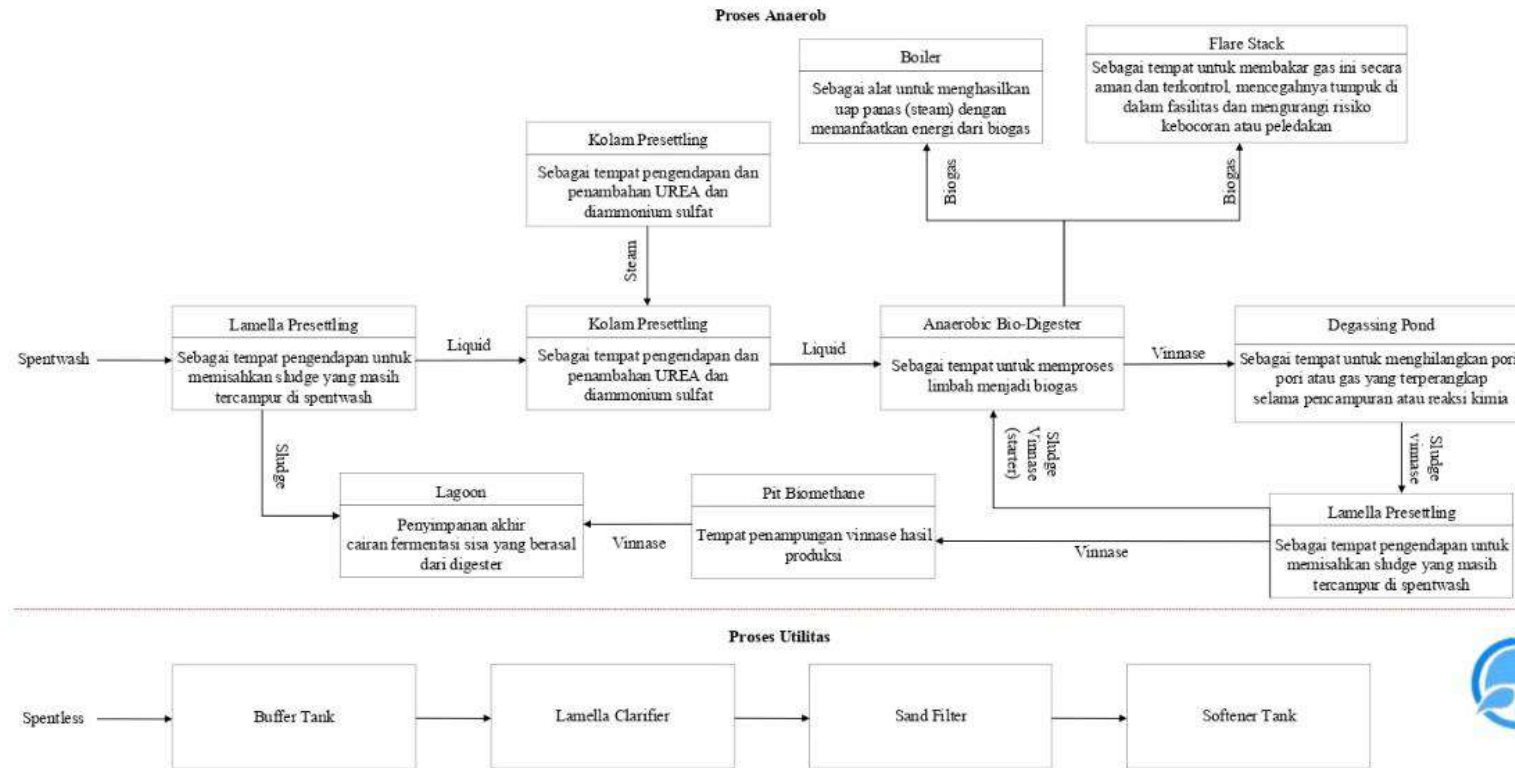
1. Memeriksa urutan kerja proses anaerob IPAL,
2. Mengidentifikasi potensi kegagalan komponen dan dampaknya, serta
3. Memberikan penilaian risiko berdasarkan metode FMEA dan ETA untuk menentukan prioritas perbaikan.

Surabaya, 28 Mei 2025

HSE Supervisor Maintenance Supervisor Manager BP

 28/5
 28/5
 28/05/2025
 Rodhy A

FBD ANAEROBIK IPAL



Surabaya, 28 Mei 2025

HSE Supervisor

Maintenance Supervisor

Manager BP

[Signature]
28/5/25

[Signature]
28/5/25
Rodhy I

[Signature]
28/5/2025
Rodhy A

TABEL KRITERIA

1. *Severity (Keparahan)*

Tabel 2. 1 Kriteria Tingkat Keparahan (S)

Dampak	Tingkat Keparahan	Peringkat
Sangat tinggi	Produk tidak dapat dioperasikan menghentikan pengoperasian sistem produksi	5
Tinggi	Mengganggu kelancaran sistem produksi	4
Sedang	Kinerja produk menurun karena beberapa fungsi tertentu mungkin tidak beroperasi	3
Rendah	Kinerja produk atau hasil menurun tetapi tidak memerlukan perbaikan	2
Tidak ada dampak	Tidak memiliki pengaruh	1

2. *Occurance (Kemungkinan Terjadi)*

Tabel 2. 2 Tingkat Kemungkinan Terjadi (O)

Peluang Terjadi Kegagalan	Tingkat Kemungkinan Kegagalan	Peringkat
Sangat Tinggi	Sering terjadi, setiap hari	5
Tinggi	Terjadi berulang, terjadi 1x dalam satu minggu	4
Sedang	Jarang terjadi, kemungkinan terjadi rata-rata atau terjadi 1x dalam satu bulan	3
Rendah	Sangat kecil terjadi, atau terjadi 1x dalam satu tahun	2
Sangat Rendah	Sangat jarang, hampir tidak pernah terjadi atau terjadi 1x kejadian selama ini	1


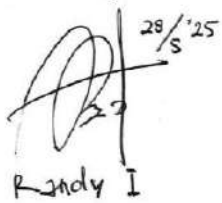
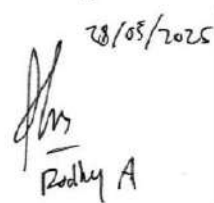
3. *Detection (Deteksi)*

Tabel 2. 3 Tingkat Deteksi Kejadian (D)

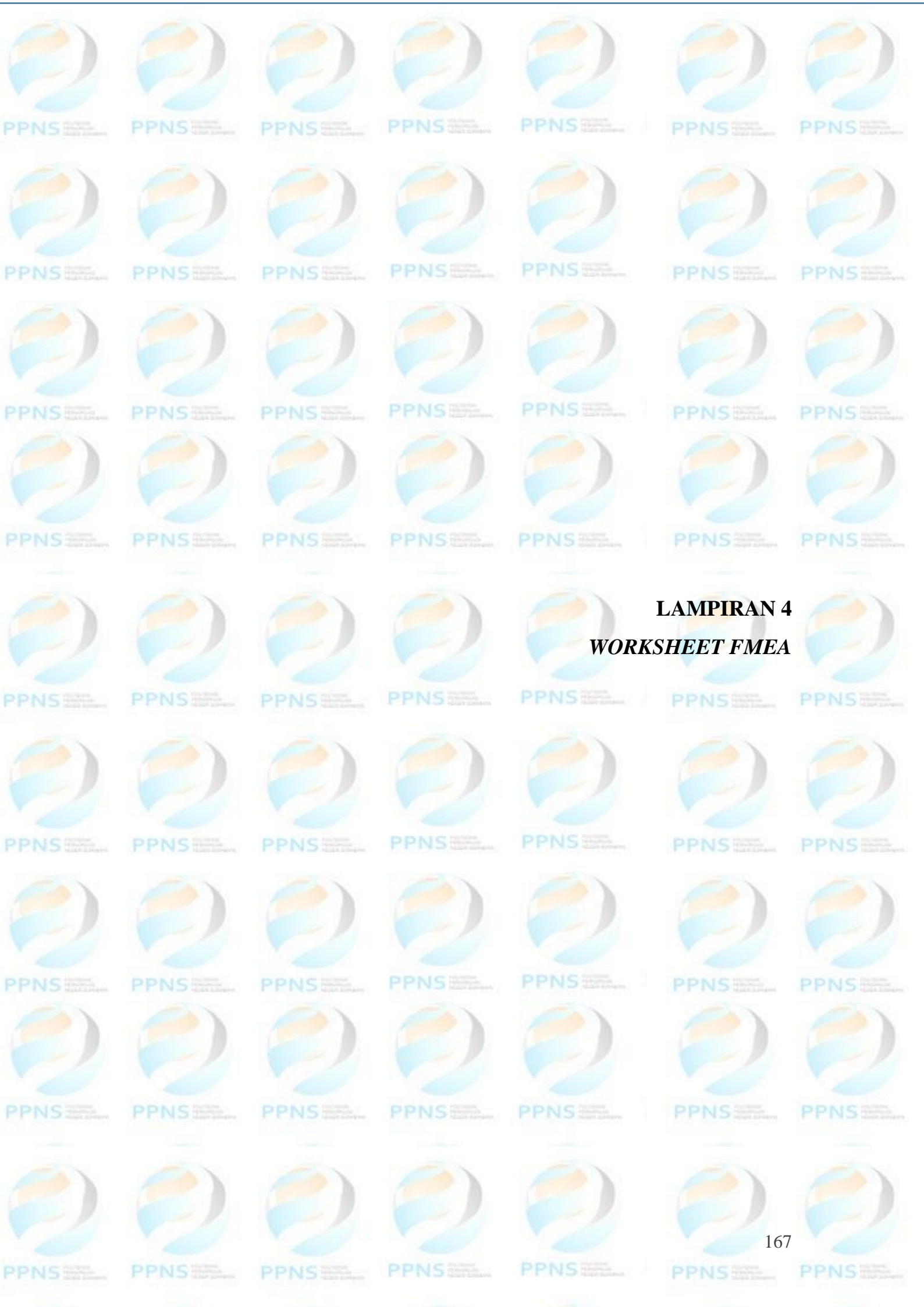
Kemungkinan Kegagalan Terdeteksi	Kriteria Berdasarkan Rancangan Pengendalian Saat ini	Peringkat
Hampir mustahil	Tidak ada kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	5
Tinggi	Terdapat sedikit kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	4
Sedang	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang/cukup untuk mendeteksi potensi kegagalan	3
Kecil	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	2
Hampir pasti	Kendali hampir pasti dapat mendeteksi potensi kegagalan	1

Sumber: Industri Bioetanol (2024)

Surabaya, 28 Mei 2025

<p>HSE Supervisor</p>  <p><i>28/5</i></p>	<p>Maintenance Supervisor</p>  <p><i>28/5 '25</i> Randy I</p>	<p>Manager BP</p>  <p><i>28/05/2025</i> Randy A</p>
---	---	--


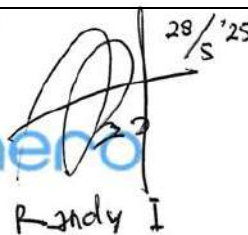
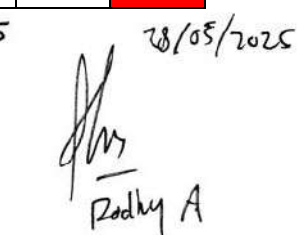
Halaman ini sengaja dikosongkan



LAMPIRAN 4
WORKSHEET FMEA

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
<i>System</i> : Lamella Presettling					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Year</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Lamella Presettling									
1	Wastewater Inlet	Valve macet	Kebocoran limbah, potensi pencemaran, aliran air limbah terhenti, menyebabkan sistem overflow	4	Penumpukan padatan dan sifat korosif limbah	1	Melakukan pengecekan, dan penggantian handle pin valve, sekaligus pemantauan mengenai flow aliran,	4	16
2	Flocculation Tank	Kebocoran	Kebocoran cairan kougulan	3	Korosi bahan kimia	2	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang bocor, dan dilakukan pemantauan mengenai aliran	4	24

 24/5
 28/5 '25
 28/05/2025

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
		Tersumbat	Kouglasi tidak terjadi	4	Endapan kougulan	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	16
3	Inlet Chamber with Baffles	Penumpukan lumpur berlebih	Aliran tersumbat, beban hidrolik meningkat	3	sludge tidak dikuras secara rutin	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
		Baffle rusak atau copot	Gangguan aliran, pengendapan tidak optimal	3	Sambungan longgar, korosi	1	Saat shutdown pabrik dilakukan penggantian baffle baru	4	12
4	Distribution Channel	Terhalang endapan atau kerak	Distribusi aliran tidak merata	3	Tidak ada agitasi atau flushing	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
		Kerusakan struktur akibat korosi	Sistem tidak dapat mengalirkan air sesuai desain	2	Paparan terus-menerus pada limbah korosif	1	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang bocor, saat shutdown pabrik dilakukan pengecatan bahan tahan korosif	4	8
5	Lateral Flow Ducts	Kebocoran	Aliran bocor, menurunkan efisiensi sistem	2	Tekanan atau getaran berlebih	1	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang bocor, dan dilakukan pemantauan mengenai aliran	4	8
		Tersumbat lumpur	Gangguan distribusi aliran	3	Endapan padatan	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
6	Plates	Tersumbat kerak atau endapan	Aliran terganggu, kinerja menurun	3	Proses tidak stabil atau pembersihan tidak rutin	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
7	Sediment Hopper	Retak struktural hingga terjadi kebocoran	Air limbah merembes ke luar	2	Umur material & beban berat	1	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang retak	4	8
8	Sediment Discharge	Tersumbat atau tidak mengalir lancar	Endapan mengendap	3	Sumbatan endapan atau padatan berat	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
9	Clean Water Out	Sambungan bocor	Spentwash tidak teralirkan	2	Karet seal aus / pemasangan tidak sempurna	1	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang bocor, dan dilakukan pemantauan mengenai aliran	4	8

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
		Aliran tertutup atau tersumbat	Potensi pencampuran air limbah dan air bersih milik masyarakat	3	Valve tertutup atau tertimbun endapan	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
Nama Peralatan : Pompa Sentrifugal Model FSA									
10	Casing	Korosi internal atau eksternal	Kekuatan struktur pompa menurun, potensi pecah	5	Bahan tidak tahan kimia	1	Melakukan pengecatan dengan cat tahan korosif	4	20
11	Casing Cover	Segel longgar	Cairan keluar, mengurangi efisiensi pompa	3	Baut longgar atau seal getas	1	Pengencangan ulang segel	4	12
12	Impeller	Longgar dari poros	Vibrasi tinggi, kegagalan total pompa	5	Penguncian tidak sempurna	2	Pengencangan ulang, dan dilakukan pemantauan visual getaran pada pompa	4	40
13	Shaft	Aus karena gesekan terus-menerus	Kebocoran di seal dan vibrasi	4	Pelumasan tidak cukup	1	Melakukan penggantian shaft yang baru	4	16
14	Impeller Key	Aus	Impeller tidak berputar dengan benar	4	Overload saat start	1	Inspeksi visual saat overhaul, dan penggantian key yang baru	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
15	Coupling Key	Aus	Hubungan antara motor dan pompa gagal	5	Pelumasannya tidak baik, torsi berlebih	1	Pemasangan coupling baru yang presisi dan alignment yang benar	4	20
16	Impeller Nut	Kendur	Impeller lepas saat operasi	5	Tidak dikunci dengan washer atau torque salah	1	Pemantauan visual getaran pompa, dan dilakukan pengencangan ulang dengan torsi	4	20
17	Impeller Nut Washer	Aus	Impeller nut tidak terkunci dengan baik	4	Umur pakai habis	1	Inspeksi visual saat overhaul, penggantian washer yang baru	4	16
18	Bearing Housing	Retak	Pelumasannya bocor, bearing cepat aus	4	Getaran tinggi	1	Penggantian bearing baru, pelumasannya dilakukan secara rutin	4	16
19	Bearing Cover	Retak	Debu masuk, kerusakan bearing lebih cepat	3	Umur material	1	Penggantian cover baru, dan koreksi alignment dari shaft dan bearing	4	12
20	Ball Bearing	Aus	Pompa berbunyi, getaran tinggi, potensi gagal total	4	Pelumasannya kurang	1	Penggantian ball bearing baru, dan pemantauan bagian shaft dan impeller agar tetap seimbang	4	16
21	Deflector	Aus	Pelumasannya tidak efektif, risiko korosi meningkat	3	Umur pakai	1	Saat shutdown pabrik dilakukan penggantian deflector yang baru	4	12
22	Bearing Support	Patah	Bearing tidak sejajar, poros pompa terganggu	5	Beban pompa tidak rata	1	Penggantian bearing support yang baru, dan pemantauan visual getaran pompa	4	20

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
23	Casing Ring	Aus	Kesenjangan impeller meningkat, efisiensi berkurang	3	Gesekan berulang dengan impeller	1	Penggantian casing ring dengan yang baru, dan saat shutdown pabrik dilakukan pemantauan clearance casing ring	4	12
24	Mechanical Seal	Aus	Kebocoran, risiko bahaya pada pekerja dan pencemaran	5	Suhu tinggi, gesekan terus-menerus	1	Penggantian seal dengan yang baru	4	20
25	Plug	Kendur	Bocor, cairan keluar dari sistem	3	Tidak dikunci dengan benar	1	Pengencangan ulang plug, dan dikencangkan dengan tape ulir	4	12
26	O-Ring	Aus atau getas karena suhu	Kebocoran kecil hingga besar pada pompa	3	Tidak tahan kimia	2	Penggantian O-Ring yang baru	4	24
27	Spring Holder	Pegas tidak menekan seal dengan tepat	Seal gagal berfungsi optimal, kebocoran	4	Korosi	1	Kalibrasi pegas, penggantian spring holder dengan yang baru	4	16
28	Coil Spring	Pegas patah	Gaya tekan hilang, seal tidak bekerja	4	Usia pakai	1	Penggantian coil spring dengan yang baru	4	16
29	Bellows	Aus	Seal mekanik gagal, kebocoran	4	Getaran, suhu tinggi	1	Penggantian bellows dengan yang baru	4	16
30	Seal Ring	Aus karena gesekan	Seal kehilangan kemampuan menahan tekanan	4	Suhu tinggi	1	Penggantian seal ring dengan yang baru	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
31	Matting Ring	Aus	Segel tidak rata, terjadi kebocoran	3	Gesekan tidak seimbang	1	Penggantian matting ring baru	4	12
32	Cup Gasket	Aus	Kebocoran pada sambungan antara casing dan cover	3	Suhu tinggi, dan tekanan berlebih	1	Penggantian cup basket yang baru	4	12
33	Lantern Ring Bushing	Tersumbat	Pendinginan dan pelumasan pada gland packing terganggu	4	Tidak ada flushing, partikel masuk	1	Melakukan pembersihan dengan cairan flushing, pemantauan aliran flushing ke seal	4	16
34	Gland	Longgar	Tekanan tidak merata pada packing, bocor	3	Torsi salah saat pemasangan	1	Pengencangan gland dengan torsi yang tepat	4	12
35	Gland Bolt	Kendor	Gland tidak terkunci, terjadi kebocoran	3	Umur material	1	Pengencangan gland bot dengan torsi yang tepat	4	12
36	Gland Packing	Aus karena tekanan atau suhu	Kebocoran pada poros pompa, kehilangan cairan	4	Usia pakai habis	1	Penggantian packing secara berkala atau saat kebocoran tidak dapat dikendalikan	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System</i> : Kolam Presettling					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Years</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Kolam Presettling									
1	Beton bertulang, volume 30m ³	Retak Struktural	Robohnya unit	5	Kualitas pencampuran beton yang buruk	1	Inspeksi manual secara visual	4	20

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System</i> : Cooling Tower					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Years</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Cooling Tower									
1	Motor	Overheat	Downtime sistem	5	Overload	1	Pembersihan pendingin motor dari kotoran	4	20

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
2	Fan	Baling-baling patah	Pendinginan terganggu	3	Terkena objek asing	1	Pemberian tutup agar tidak terkena benda asing, pemasangan baling-baling sesuai torsi	4	12
3	Fan Guard	Rusak	Risiko keselamatan operator	4	Baut longgar	1	Penggaantian fan guard dengan yang baru	4	16
4	Belt Cover	Longgar	Potensi kecelakaan	1	Baut longgar	1	Inspeksi visual	4	4
5	Fan Casing	Retak	Gangguan pendinginan	3	Retakan akibat suhu tinggi secara terus menerus	1	Pemasangan fan casing pada struktur yang stabil	4	12
6	Upper Water Basin	Bocor	Distribusi air pendingin terganggu	3	Seal rusak	1	Saat shutdown pabrik dilakukan pengecatan tahan korosi	4	12
7	Framework	Patah	Roboh	4	Sambungan lemah	1	Inspeksi visual dan pengencangan baut pada sambungan framework, saat shutdown pabrik dilakukan penggantian framework baru	4	16
8	Fill	Rusak	Pendinginan tidak efektif, suhu naik	3	Material aus	1	Penggantian fill baru saat shutdown pabrik	4	12
9	Lower Frame	Retak	Mengganggu kestabilan sistem	4	Getaran	1	Dilakukan injeksi epoksi pada keretakan saat shutdown pabrik	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
10	Lower Water Basin	Retak	Air tidak tertampung dengan baik	4	Retak karena tekanan berlebih	1	Dilakukan injeksi epoksi pada area yang retak saat shutdown pabrik	4	16
11	Casing Panel	Lepas	Komponen internal terbuka	4	Sambungan longgar	1	Inspeksi visual dan pengencangan pengikat casing	4	16
12	Ladder	Longgar	Risiko jatuh bagi pekerja saat akses	4	Baut pengunci aus	1	Inspeksi visual dan dilakukan pengencangan pada semua baut dan sambungan ladder	4	16
13	Louver	tertutup sludge	Sistem pendingin tidak optimal	3	Tidak dilakukan pembersihan	1	Melakukan pembersihan dengan air	4	12
14	Overflow Pipe	Tersumbat	Air meluap tidak terkendali	4	Tersumbat karena endapan	1	Pemasangan saringan inlet, dan saat shutdown pabrik dilakukan flushing	4	16
15	Inspection Door	Seal rusak	Kebocoran	4	Usia material	1	Penggantian seal yang baru, dan dilakukan inspeksi visual pada seal saat membuka/menutup inspection door	4	16
Nama Peralatan : Pompa Casing Volute ICB									
16	Casing Power	Retak	Kebocoran cairan	4	Getaran tinggi, tekanan berlebih	1	Inspeksi visual untuk mendeteksi tingkat keparahan, tambal menggunakan karet ban	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
17	Support Foot	Patah karena getaran	Pompa tidak stabil	5	Getaran terus-menerus, mur longgar	1	Pemasangan support foot yang baru	4	20
		Mur baut longgar	Getaran tinggi	4	Beban tidak merata	1	Pengencangan ulang baut	4	16
18	Pump Aligment	Tidak sejajar	Kebocoran	4	Instalasi tidak presisi, fondasi tidak rata	1	Pengecekan alignment	4	16
19	Stub Shaft	Aus	Putaran keras, tidak presisi, dan bunyi	4	Keausan karena gesekan dan pelumasan buruk	1	Pelumasan bearing, penggantian dengan bearing yang baru	4	16
20	Impeller	Patah	Aliran terganggu	5	Tekanan fluida tinggi	1	Pemasangan impeller baru saat shutdown pabrik dan memberikan impeller balance	4	20
21	Motor Lantern	Korosi	Kinerja menurun	3	Bahan tidak tahan kimia	1	Pembersihan dari tumpahan bahan kimia, saat shutdown pabrik melakukan pengecatan dengan bahan tahan korosi	4	12
22	Gasket	Aus	Kebocoran fluida dari sambungan	4	Suhu/tekanan tinggi, material getas	1	Penggantian gasket baru	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
23	O-Ring	Rusak karena suhu / tekanan	Kebocoran	4	Umur material	1	Penggantian O-Ring baru sekaligus diberikan pelumas yang kompatibel saat pemasangan	4	16
24	Mechanical Seal	Aus	Berasap, kebocoran cairan dari housing pompa	4	Gesekan berlebih, pelumasan tidak cukup	2	Penggantian seal baru dan setting ulang	4	32
25	Wear Ring	Aus karena friksi dengan impeller	Efisiensi pompa menurun	3	Gesekan konstan dengan impeller	1	Penggantian wear ring baru	4	12
26	Fixing Ring	Retak	Komponen internal tidak stabil	5	Getaran, kualitas pemasangan rendah	1	Penggantian fixing ring baru, dengan pengencangan baut yang tidak terlalu kencang, dan dilakukan inspeksi visual untuk memantau keadaan	4	20
27	Washer	Aus	Baut tidak terkunci sempurna risiko lepas	4	Gaya putar berlebih	1	Penggantian washer yang baru	4	16
28	Bevelwasher	Aus	Sambungan tidak kencang	4	Usia material, pemasangan tidak rata	1	Penggantian bevelwasher yang baru	4	16
29	Bevelcup	Retak	Kerusakan rotasi	5	Tekanan berlebih	1	Penambalan dengan karet ban	4	20

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
			Kebocoran	5	Material aus	1	Pemasangan gasket yang baru	4	20
			Komponen terlepas	5	Material aus	1	Melakukan pengencangan baut	4	20
30	Guard Plate	Lepas	Akses langsung ke komponen berputar	5	Baut longgar, tidak dikunci ulang	1	Pengencangan ulang baut	4	20
31	Flange Motor	Retak	Getaran tinggi	4	Getaran berlebih	1	Penambalan dengan karet ban, saat shutdown pabrik dilakukan perbaikan flange motor yang benar dan alignment	4	16
32	Hexagonal Screw	Patah	Rangkaian komponen bisa terlepas	5	Usia material	1	Penggantian screw dengan yang baru	4	20
33	Stud	Aus	Baut tidak bisa dikencangkan, koneksi longgar	4	Overload mekanis	1	Pembersihan ulir dan penggantian stud baru	4	16
34	Grub Screw	Aus	Komponen seperti impeller atau gear bisa bergeser	4	Aus karena vibrasi	1	Penggantian grub screw baru, dilakukan pengecekan dan pengencangan	4	16
35	Drain Plug	Tersumbat	Proses drain tidak lancar	4	Segel rusak	1	Saat shutdown pabrik dilakukan flushing peralatan	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
		Bocor	Cairan bocor	4	Usia material	1	Diberikan tape ulir, dan penggantian gasket dan plug	4	16
36	Hexagonal Nut	Aus	Komponen terlepas	5	Ulir aus	1	Inspeksi visual dan pengencangan dan penggantian nut	4	20
37	Impeller Nut	Lepas	Impeller copot saat operasi	5	Lepas karena getaran	1	Pengencangan impeller nut dengan torsi yang benar, pemasangan washer pengunci	4	20
38	Key	Aus	Transfer daya dari motor ke shaft terganggu	2	Aus karena beban putaran terus-menerus	1	Pemasangan key dan penggantian yang baru presisi dan kencang	4	8

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
<i>System</i> : Anaerobic Bio-Digester (CSTR)					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Years</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Anarobic Bio-Digester (CSTR)									
1	Shell & Roof Structure	Retak	Gas bocor, bahaya ledakan / pencemaran	5	Korosi	1	Pemantauan tekanan dalam digester, Biogas disalurkan ke boiler dan flare stack, proses perbaikan dilakukan saat shutdown pabrik	2	10
2	Spare Liquid Inlet	Sambungan longgar	Kebocoran limbah	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pengencangan baut, pemberian gasket pada sambungan, dan dilakukan pemantauan untuk area	4	12
3	Liquid Inlet	Tersumbat	Aliran limbah terganggu, proses fermentasi terhambat	4	Pembersihan tidak rutin	1	Dilakukan pemantauan aliran pada pipa, dan flushing dilakukan saat shutdown pabrik	4	16
		Bocor	Pencemaran lingkungan	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Inspeksi visual untuk kebocoran pada pipa atau sambungan, perbaikan dilakukan saat shutdown pabrik	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
4	Central Agitator Port	Seal rusak	Kebocoran di titik agitator	3	Usia material	1	Diberikan pelumasan, dan perbaikan dilakukan saat shutdown pabrik	4	12
5	Gas Vent with Valve	Valve macet	Tekanan gas meningkat, risiko ledakan	4	Tersumbat kotoran	1	Inspeksi visual kondisi valve, pelumasan valve steam dilakukan	2	8
		Bocor	Pelepasan gas terus-menerus	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Penggunaan tape ulir pada sambungan, dan dilakukan inspeksi memonitor kebocoran gas, perbaikan maupun penggantian O-Ring dilakukan saat shutdown pabrik	2	6
6	Pressure Gauge with Plug	Tidak terbaca / error	Tekanan tidak terpantau, overpressure tidak diketahui	3	Sensor aus	1	Inspeksi visual dan kalibrasi pressure gauge dilakukan	2	6
		Bocor pada plug	Kebocoran gas / cairan	3	Usia material	1	Pembersihan plug dari penyumbatan, pengencangan plug dengan torsi yang tepat, dan pemberian tape ulir	2	6
7	Pressure /Vacuum Relief Valve	Tidak aktif saat overpressure	Ledakan, kegagalan struktural	5	Usia material	1	Kalibrasi dan pengujian relief valve, pembersihan valve dari penyumbatan, dan inspeksi visual keadaan	2	10

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
							valve, perbaikan dilakukan saat shutdown pabrik		
8	Biogas Outlet	Bocor	Potensi kebakaran / pencemaran	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pemasangan pipa dan sambungan dilakukan dengan rapat, kuat dan kedap gas, penggunaan gasket, pemberan tape ulir pada sambungan yang bocor untuk penanganan sementara dan inspeksi visual untuk pengecekan kebocoran gas	2	6
		Tersumbat	Gas tidak terbuang, menimbulkan tekanan	4	Pembersihan tidak rutin	1	Pemasangan condensate drain pada jalur biogas, melakukan pemantauan aliran biogas, dan pembersihan pipa biogas saat shutdown pabrik	2	8
9	Spare with Blind Flange	Flange retak	Tidak bisa digunakan saat dibutuhkan	2	Tekanan dan getaran berlebih	1	Dilakukan inspeksi visual, saat shutdown pabrik dilakukan perbaikan flange motor yang benar dan alignment	4	8
		Baut longgar	Gas/cairan bocor	2	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pengencangan baut flange, dan pemasangan washer pengunci	4	8

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
10	Digested Spent Wash Out	Korosi	Bocor, berakibat pencemaran lingkungan	3	Terpapar bahan kimia	1	Pengecatan dengan cat anti korosi	4	12
		Tersumbat lumpur	Cairan fermentasi tidak keluar, risiko overflow	3	Pembersihan tidak rutin	1	Pemantauan aliran spentwash out, flushing peralatan saat shutdown pabrik	4	12
11	Pressure Transmitter Connection	Kendor	Sensor tidak membaca tekanan	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pengencangan sambungan transmitter dengan torsi yang tepat, penggunaan tape ulir dan dilakukan inspeksi visual	2	6
		Error sinyal	Kontrol otomatis tidak akurat	3	Sensor aus	1	Kalibrasi pressure pada transmitter, perlindungan transmitter dari getaran berlebih, pembersihan penyumbatan dilakukan saat shutdown pabrik	2	6
12	Sample Point	Valve rusak	Tidak bisa ambil sampel	4	Usia material	1	Penggantian valve yang rusak dengan yang baru saat shutdown pabrik	4	16
		Bocor	Limbah tumpah, risiko pencemaran lingkungan	3	Terlalu sering dibuka tutup	1	Pengencangan baut valve, penggunaan tape ulir dan penutupan valve dengan rapat setelah dilakukan pengambilan sampel	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
13	Lateral Agitator Connection	Getaran tinggi	Merusak struktur tank	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pemeriksaan alignment agitator, balancing agitator blade dan shaft, dan pemasangan support yang kokoh untuk agitator	4	12
		Seal bocor	Kebocoran cairan	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pemberian tape ulir untuk sementara dan penggantian seal saat shutdown pabrik	4	12
14	Drain System	Tersumbat oleh lumpur	Air tidak keluar saat cleaning	3	Pembersihan tidak rutin	1	Pemasangan saringan di inlet drain untuk mencegah padatan berukuran besar, flusing dilakukan saat shutdown pabrik	4	12
15	Safety System	Alarm tidak aktif	Petugas tidak mendapat peringatan	4	Sensor aus	1	Kalibrasi untuk sensor-sensor yang terhubung dalam sistem alarm, pemeriksaan rutin mengenai sistem kontrol alarm	2	8
		Tidak berfungsi saat darurat	Risiko kebakaran / ledakan tidak dapat dicegah	4	Sensor aus	1	Kalibrasi untuk sensor-sensor yang terhubung dalam sistem alarm, pemeriksaan rutin mengenai sistem kontrol alarm	2	8

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
16	Spentwash Out Pipe	Tersumbat	Proses lanjutan terhambat	4	Pembersihan tidak rutin	1	Flushing dilakukan saat shutdown pabrik, inspeksi visual mengenai aliran spentwash	2	8
		Bocor	Limbah keluar, pencemaran lingkungan	3	Tekanan berlebih	1	Pengisolasian sementara menggunakan tape ulir untuk area yang bocor, penambalan dilakukan saat shutdown pabrik	2	6
17	Tangga & Platform	Tidak kokoh	Risiko jatuh bagi petugas	3	Usia material	1	Pemasangan pijakan dengan pengikat yang kuat dan bahan tahan korosi, inspeksi visual mengenai kondisi pijakan	4	12
18	Agitator (Mixer Shaft)	Longgar dari motor	Tidak berputar	4	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pemasangan coupling dan key yang tepat dan presisi antara agitator shaft dan motor, pemeriksaan alignment agitator shaft dan motor, pengencangan baut kopling dengan torsi yang benar	4	16
		Shaft patah	Agitasi tidak efektif	5	Tekanan dan getaran berlebih	1	Penggantian agitator dilakukan saat shutdown pabrik	4	20

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
19	Bottom Sloped Plate	Korosi	Bocor	3	Terpapar bahan kimia	1	Pengecatan dengan cat anti korosi, perbaikan dilakukan saat shutdown pabrik	4	12
		Tertutup lumpur	Endapan tidak keluar optimal	3	Pembersihan tidak rutin	1	Melakukan pembersihan	4	12
20	Safety Guard	Tidak kuat	Jatuh saat disentuh, cedera pekerja	1	Usia material	1	Penggantian guard yang baru dengan bahan yang kuat dan tahan korosi	4	4
Nama Peralatan : Blower type BO									
21	Casing	Retak	efisiensi menurun	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pemantauan getaran blower secara visual, pemasangan blower dengan fondasi yang rata tanah dan kokoh	4	12
22	Housing	Korosi	Gangguan dudukan komponen internal	4	Terpapar bahan kimia	1	Melakukan pengecatan dengan bahan tahan korosi, pembersihan dari tumpahan cairan	4	16
23	Gear Cover	Gasket bocor	Kebocoran oli dari gear chamber	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pengencangan baut gear cover pada torsi yang tepat, inspeksi visual dan pembersihan oli di area sekitaran gear cover	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
24	Rotor Shaft	Aus	Kerusakan bearing	4	Usia material	1	Pelumasan bearing, pemasangan seal, melakukan pemantauan pada getaran blower, dan penggantian rotor jika sudah rusak dilakukan saat shutdown pabrik	4	16
25	Discharge Flange	Kebocoran sambungan	Tekanan udara menurun	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pengencangan baut flange pada posisi yang tepat, pemasangan gasket yang seukuran dengan discharge flange	4	12
26	Timing Gear	Aus	Downtime	5	Usia material	1	Melakukan pelumasan timing gear, pemantauan level oli di gearbox	4	20
27	Blower Pulley	Aus	Downtime	5	Usia material	1	Penggantian belt pulley saat sudah longgar, dilakukan pemantauan alignment dan inspeksi visual pada pulley untuk melihat tanda-tanda keausan	4	20
28	Bearing L	Aus	Kerusakan poros	4	Usia material	1	Melakukan pelumasan bearing, melakukan pembersihan area sekitaran bearing dari kontaminan	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
29	Gear Stop Nut	Kendor	Timing gear bergeser	4	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pengencangan nut dengan torsi yang tepat dan diberikan lock washer	4	16
30	Conical Spring Washer	Pegas melemah	Getaran berlebih	3	Sambungan longgar	1	Penggantian washer saat inspeksi visual didapati bahwa pegas mulai melemah	4	12
31	V-Seal	Aus	Cairan masuk kedalam bearing	3	Usia material	1	Penggantian v-seal baru saat kebocoran mulai terdeteksi, pemasangan v-seal yang tepat	4	12
32	Snap Ring	Patah	Komponen keluar dari posisi	4	Tekanan dan getaran berlebih	1	Penggantian snap ring dengan yang baru	4	16
33	Grease Nipple	Tersumbat	Bearing tidak terlumasi, overheat	4	Pembersihan tidak rutin	1	Pembersihan grease nipple sebelum dilakukan pemberian oli, pelumasan, penggantian grease nipple dengan yang baru	4	16
34	Oil Gauge	Rusak	Level oil tidak terpantau	3	Usia material	1	Penggantian oil gauge dengan yang baru, pembersihan permukaan gauge agar mudah terbaca	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
35	Oil Cap	Tidak tertutup rapat	Kebocoran oli	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pengencangan oil cap yang benar setelah pengisian oli, penggunaan gasket pada oil cap, dan penggantian oil cap dilakukan jika segel rusak	4	12
36	Pulley Check Key	Patah	Rotasi gagal	5	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pemasangan key yang fit kencang, inspeksi visual pada alignment pulley	4	20
37	Pulley Check Plate	Tidak dikencangkan	Pulley tidak stabil	4	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pengencangan pulley dengan baut yang tepat, inspeksi visual dan pengecekan kekencangan dilakukan rutin	4	16
38	Gasket for Gear Cover	Aus	Kebocoran oli	3	Usia material	1	Pengencangan baut gear cover pada torsi yang tepat, inspeksi visual dan pembersihan oli secara rutin di area sekitaran gear cover	4	12
39	Gasket for Housing	Rusak	Kebocoran oli	3	Usia material	1	Pengencangan baut gear cover pada torsi yang tepat, inspeksi visual dan pembersihan oli secara rutin di area sekitaran gear cover	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
40	Gasket for Disc. Flange	Kompresi tidak merata	Kebocoran biogas	4	Tekanan dan getaran berlebih	1	Pengencangan baut flange dengan torsi yang benar, pembersihan flange sebelum pemasangan gasket, penggantian gasket setiap terdapat indikasi kerusakan	4	16
41	Pulley Check Bolt	Patah	Pulley bergeser	4	Tekanan dan getaran berlebih	1	Penggantian dengan bolt yang baru , pengencangan bolt dengan torsi yang benar	4	16
42	Oil Drain Plug	Bocor	Kebocoran oli	3	tekanan dan getaran berlebih	1	Pemasangan tape ulir pada plug, penggunaan gasket pada plug, dan inspeksi visual untuk memantau kebocoran oli di area plug	4	12
43	Slinger	Penyebaran oli tidak merata	Gear tidak terlumasi	4	Beban berlebih	1	Inspeksi visual slinger dan level oli, pemasangan slinger harus pada torsi yang benar, cleaning slinger dan penggantian oli	4	16
44	O Ring for Bearing	Pecah	Kebocoran pelumas	3	Tekanan dan getaran berlebih	1	Penggantian O-Ring dengan yang baru, melakukan pelumasan dan inspeksi visual pada O-Ring	4	12
45	Sprinkle Plate	Tersumbat	Distribusi oli tidak merata	3	Pembersihan tidak rutin	1	Pembersihan sprinkle plate dan filter oli secara rutin	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
46	Check Valve	Bocor	Tekanan sistem buruk	4	Tekanan dan getaran berlebih	1	Penggantian check valve yang dengan yang baru, inspeksi visual getaran dan suara valve, pembersihan rutin check valve	4	16
47	Safety Valve	Tidak membuka saat overpressure	Risiko kerusakan sistem	4	Tekanan berlebih	2	Kalibrasi untuk safety valve, pembersihan valve dari sumbatan	4	32

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System : Degassing Pond</i>					<i>Date :</i>				
<i>Subsystem :</i>					<i>Years :</i>				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Degassing Pond Silinder Vertical Packed Tower Stainless Steel SA 336									
1	Main Vessel	Retak	Kebocoran	5	Karena tekanan berlebih	1	Inspeksi visual pada permukaan vessel untuk mendeteksi retakan	4	20

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
		Korosi	Gagal fungsi	4	Akibat bahan kimia	1	Pelapisan dengan cat anti korosi, inspeksi visual secara rutin untuk melihat tanda tanda korosi	4	16
2	Valve	Kebocoran	Pencemaran lingkungan, penurunan efisiensi proses	4	Seal rusak	1	Pemilihan material valve yang sesuai, pemasangan gasket dengan valve sesuai torsi, inspeksi visual dan pengencangan hex bolts, penggantian gasket dilakukan jika kebocoran terindikasi parah	4	16
		Stuck	Aliran tidak bisa dikontrol, risiko overpressure	4	Penyumbatan kotoran	1	Pelumasan stem valve, pembersihan valve dari endapan fluida, inspeksi visual mengenai kondisi valve dan aktuator	4	16
3	Nipple	Retak	Bocor di sambungan pipa	3	Karena tekanan berlebih	1	Pemasangan nipple sesuai torsi, inspeksi visual untuk retakan di area nipple, jika parah dilakukan penggantian nipple baru	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
4	Hex Bolts	Kendur	Komponen tidak terikat sempurna, risiko kebocoran	3	Karena getaran terjadi secara terus menerus	1	Pengencangan baut dengan torsi yang tepat, penggunaan washer, inspeksi visual peralatan dan dilakukan pengencangan baut pada seluruh komponen	4	12
		Patah	Struktur terlepas	4	Usia material	1	Penggantian baut dengan yang baru, pemilihan baut sesuai grade, pengencangan baut dengan torsi yang tepat	4	16
5	Spring Washer	Aus	Baut mudah kendur, risiko kebocoran atau getaran	3	Usia material	1	Penggantian dengan spring washer yang baru, dan melakukan inspeksi visual untuk memantau kondisi komponen	4	12
6	Hex Nut	Berkarat	Sulit terbuka, menyebabkan maintenance terganggu	2	Akibat bahan kimia	1	Pelapisan dengan cat anti korosi, penggunaan grease pada ulir baut sebelum pemasangan, penggantian nut dilakukan jika dalam kondisi berkarat parah	4	8
7	Bolts	Over torque	Sambungan tidak sesuai standar, risiko kerusakan	3	Karena getaran dan tekanan berlebih secara terus menerus	1	Penggunaan torque wrench saat pengencangan baut	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
8	8" Elbow Components	Retak	Bocor pada tikungan	3	Tekanan dan beban berlebih	1	Pemantauan getaran pada jalur pipa secara visual, pemasangan elbow dengan support untuk mencegah beban berlebih	4	12
9	Seal	Aus	Kebocoran	3	Karena bahan kimia	1	Inspeksi visual pada komponen untuk melihat tanda tanda getas, penggantian dengan seal baru	4	12
10	Foundation Bolts	Pemuaian logam	Struktur bergeser, risiko roboh	4	Usia material	1	Inspeksi visual mengenai pergerakan struktur vessel, penggunaan anchor bolt untuk meminimalisir pergerakan	4	16
11	Pressure Gauge	Kalibrasi meleset atau rusak	Pembacaan tekanan salah risiko overpressure tidak terdeteksi	4	Sensor aus	1	Kalibrasi, pembersihan penyumbatan koneksi gauge, penggantian pressure gauge dengan yang baru	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System : Lamella Digester</i>					<i>Date :</i>				
<i>Subsystem :</i>					<i>Years :</i>				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Lamella Digester									
1	Wastewater Inlet	Valve macet	Kebocoran limbah, potensi pencemaran, aliran air limbah terhenti, menyebabkan sistem overflow	4	Penumpukan padatan dan sifat korosif limbah	2	Melakukan pengecekan, dan penggantian handle pin valve, sekaligus pemantauan mengenai flow aliran,	4	32
2	Inlet Chamber with Baffles	Penumpukan lumpur berlebih	Aliran tersumbat, beban hidrolis meningkat	3	sludge tidak dikuras secara rutin	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
		Baffle rusak atau copot	Gangguan aliran, pengendapan tidak optimal	3	Sambungan longgar, korosi	1	Saat shutdown pabrik dilakukan penggantian baffle baru	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
3	Distribution Channel	Terhalang endapan atau kerak	Distribusi aliran tidak merata	3	Tidak ada agitasi atau flushing	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
		Kerusakan struktur akibat korosi	Sistem tidak dapat mengalirkan air sesuai desain	2	Paparan terus-menerus pada limbah korosif	1	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang bocor, saat shutdown pabrik dilakukan pengecatan bahan tahan korosif	4	8
4	Lateral Flow Ducts	Kebocoran	Aliran bocor, menurunkan efisiensi sistem	2	Tekanan atau getaran berlebih	1	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang bocor, dan dilakukan pemantauan mengenai aliran	4	8

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
		Tersumbat lumpur	Gangguan distribusi aliran	3	Endapan padatan	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
5	Plates	Tersumbat kerak atau endapan	Aliran terganggu, kinerja menurun	3	Proses tidak stabil atau pembersihan tidak rutin	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
6	Sediment Hopper	Retak struktural hingga terjadi kebocoran	Air limbah merembes ke luar	2	Umur material & beban berat	1	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang retak	4	8

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
7	Sediment Discharge	Tersumbat atau tidak mengalir lancar	Endapan mengendap	3	Sumbatan endapan atau padatan berat	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
8	Clean Water Out	Sambungan bocor	Spentwash tidak teralirkan	2	Karet seal aus / pemasangan tidak sempurna	1	Melakukan pengecekan, dan dilakukan penambalan pada area yang bocor, dan dilakukan pemantauan mengenai aliran	4	8
		Aliran tertutup atau tersumbat	Potensi pencampuran air limbah dan air bersih milik masyarakat	3	Valve tertutup atau tertimbun endapan	1	Melakukan pengecekan terhadap sumbatan, dilakukan pembersihan sementara sekaligus pemantauan mengenai flow aliran, saat shutdown pabrik akan dilakukan flushing terhadap peralatan	4	12
Nama Peralatan : Pompa Sentrifugal Model FSA									
10	Casing	Korosi internal atau eksternal	Kekuatan struktur pompa menurun, potensi pecah	5	Bahan tidak tahan kimia	1	Melakukan pengecatan dengan cat tahan korosif	4	20

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
11	Casing Cover	Segel longgar	Cairan keluar, mengurangi efisiensi pompa	3	Baut longgar atau seal getas	1	Pengencangan ulang segel	4	12
12	Impeller	Longgar dari poros	Vibrasi tinggi, kegagalan total pompa	5	Penguncian tidak sempurna	2	Pengencangan ulang, dan dilakukan pemantauan visual getaran pada pompa	4	40
13	Shaft	Aus karena gesekan terus-menerus	Kebocoran di seal dan vibrasi	4	Pelumasannya tidak cukup	2	Melakukan penggantian shaft yang baru	4	32
14	Impeller Key	Aus	Impeller tidak berputar dengan benar	4	Overload saat start	1	Inspeksi visual saat overhaul, dan penggantian key yang baru	4	16
15	Coupling Key	Aus	Hubungan antara motor dan pompa gagal	5	Pelumasannya tidak baik, torsi berlebih	1	Pemasangan coupling baru yang presisi dan alignment yang benar	4	20
16	Impeller Nut	Kendur	Impeller lepas saat operasi	5	Tidak dikunci dengan washer atau torque salah	1	Pemantauan visual getaran pompa, dan dilakukan pengencangan ulang dengan torsi	4	20
17	Impeller Nut Washer	Aus	Impeller nut tidak terkunci dengan baik	4	Umur pakai habis	1	Inspeksi visual saat overhaul, penggantian washer yang baru	4	16
18	Bearing Housing	Retak	Pelumasannya bocor, bearing cepat aus	4	Getaran tinggi	1	Penggantian bearing baru, pelumasannya dilakukan secara rutin	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
19	Bearing Cover	Retak	Debu masuk, kerusakan bearing lebih cepat	3	Umur material	1	Penggantian cover baru, dan koreksi alignment dari shaft dan bearing	4	12
20	Ball Bearing	Aus	Pompa berbunyi, getaran tinggi, potensi gagal total	4	Pelumasan kurang	1	Penggantian ball bearing baru, dan pemantauan bagian shaft dan impeller agar tetap seimbang	4	16
21	Deflector	Aus	Pelumasan tidak efektif, risiko korosi meningkat	3	Umur pakai	1	Saat shutdown pabrik dilakukan penggantian deflector yang baru	4	12
22	Bearing Support	Patah	Bearing tidak sejajar, poros pompa terganggu	5	Beban pompa tidak rata	1	Penggantian bearing support yang baru, dan pemantauan visual getaran pompa	4	20
23	Casing Ring	Aus	Kesenjangan impeller meningkat, efisiensi berkurang	3	Gesekan berulang dengan impeller	1	Penggantian casing ring dengan yang baru, dan saat shutdown pabrik dilakukan pemantauan clearance casing ring	4	12
24	Mechanical Seal	Aus	Kebocoran, risiko bahaya pada pekerja dan pencemaran	5	Suhu tinggi, gesekan terus-menerus	1	Penggantian seal dengan yang baru	4	20
25	Plug	Kendur	Bocor, cairan keluar dari sistem	3	Tidak dikunci dengan benar	1	Pengencangan ulang plug, dan dikencangkan dengan tape ulir	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
26	O-Ring	Aus atau getas karena suhu	Kebocoran kecil hingga besar pada pompa	3	Tidak tahan kimia	1	Penggantian O-Ring yang baru	4	12
27	Spring Holder	Pegas tidak menekan seal dengan tepat	Seal gagal berfungsi optimal, kebocoran	4	Korosi	1	Kalibrasi pegas, penggantian spring holder dengan yang baru	4	16
28	Coil Spring	Pegas patah	Gaya tekan hilang, seal tidak bekerja	4	Usia pakai	1	Penggantian coil spring dengan yang baru	4	16
29	Bellows	Aus	Seal mekanik gagal, kebocoran	4	Getaran, suhu tinggi	1	Penggantian bellows dengan yang baru	4	16
30	Seal Ring	Aus karena gesekan	Seal kehilangan kemampuan menahan tekanan	4	Suhu tinggi	1	Penggantian seal ring dengan yang baru	4	16
31	Matting Ring	Aus	Segel tidak rata, terjadi kebocoran	3	Gesekan tidak seimbang	1	Penggantian matting ring baru	4	12
32	Cup Gasket	Aus	Kebocoran pada sambungan antara casing dan cover	3	Suhu tinggi, dan tekanan berlebih	1	Penggantian cup basket yang baru	4	12
33	Lantern Ring Bushing	Tersumbat	Pendinginan dan pelumasan pada gland packing terganggu	4	Tidak ada flushing, partikel masuk	1	Melakukan pembersihan dengan cairan flushing, pemantauan aliran flushing ke seal	4	16
34	Gland	Longgar	Tekanan tidak merata pada packing, bocor	3	Torsi salah saat pemasangan	1	Pengencangan gland dengan torsi yang tepat	4	12

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
35	Gland Bolt	Kendor	Gland tidak terkunci, terjadi kebocoran	3	Umur material	1	Pengencangan gland bot dengan torsi yang tepat	4	12
36	Gland Packing	Aus karena tekanan atau suhu	Kebocoran pada poros pompa, kehilangan cairan	4	Usia pakai habis	1	Penggantian packing secara berkala atau saat kebocoran tidak dapat dikendalikan	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System</i> : Pit Biomethane					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Years</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Pit Biomethane									
1	Beton bertulang, volume 20m ³	Retak	Kebocoran air limbah, kerusakan struktural	5	Kualitas pencampuran beton yang buruk	1	Inspeksi manual secara visual	5	25

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
System : Lagoon					Date :				
Subsystem :					Years :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Lagoon									
1	Kolam dengan Volume 80.000m ³	kebocoran pada dinding atau dasar lagoon	Volume efektif lagoon berkurang, perlu pengurasan rutin	4	Tekanan dan beban berlebih	1	Observasi air sumur area sekitar lagoon, memberikan tumpukan material karung berisi pasir	5	20
2	Cover Lagoon (Geomembrane 2.5 mm)	Mengalami ekspansi termal berlebih tanpa kompensasi gerakan	Pelapisan melipat atau sobek, menimbulkan area bocor	4	Tekanan berlebih, dan faktor lingkungan	2	Penambalan HDPE	4	32

Failure Mode and Effect Analysis Worksheet									
<i>System</i> : <i>Flare Stack</i>					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Years</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : <i>Flare Stack FL-4201 Schedule 40 Carbon Steel</i>									
1	Pilot Burner	Aus	Kinerja pembakaran tidak stabil	4	Terkena uap panas secara terus menerus	1	Bahan material pilot burner tahan terhadap suhu tinggi, sekaligus diberikan pengecatan tahan korosi, pembersihan pilot burner dilakukan saat shut down pabrik	4	16
		Tidak menyala	Risiko akumulasi gas	4	Penumpukann kotoran pada nozzle	1	Ketersediaan pasokan biogas yang stabil, pembersihan nozzle dilakukan saat shutdown pabrik	4	16
2	Wind Shield	Rusak	Flare tidak berfungsi	4	Usia material	1	Material wind shield yang tahan korosi dan degradasi akibat panas, penggantian wind shield baru dilakukan shutdown pabrik	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
3	Flare Tip	Retak	Nyala api tidak stabil	4	Terkena suhu panas dan temperatur tinggi secara terus menerus	1	Desain flare tip tahan terhadap suhu ekstrem dankejut termal	4	16
		Terhalang kerak	Backpressure meningkat	3	Penumpukan kotoran	1	Desain flare tip yang fungsinya meminimalisir area penumpukan kerak, pembersihan flare tip dilakukan saat shut down pabrik	4	12
4	Flare Stack Body	Retak	Kebocoran gas, berakibat risiko keselamatan dan pencemaran udara	5	Terkena suhu panas dan temperatur tinggi secara terus menerus	1	Inspeksi visual secara manual pada peralatan untuk pengecekan keretakan sekaligus pengecekan menggunakan gas detektor, desain flare stack body didesain sesuai dengan kondisi area kerja, pemilihan bahan flare stack body tahan terhadap suhu dan korosi	4	20

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
5	PCD 1220	Melengkung	Struktur stack rusak	4	Terkena panas secara terus menerus	1	Inspeksi visual untuk mendeteksi kelengkungan, desain flensa kuat menopang beban dan tekanan, melakukan pengecekan dan pengencangan baut flensa dengan tepat	4	16
6	16 NB Flange	Valve rusak	Kebocoran gas	4	Usia material	1	Penggantian pin helical gear baru, pengencangan baut flange dengan tepat, inspeksi visual sekaligus pengecekan menggunakan gas detektor untuk kebocoran di area sambungan	4	16
		Aus	flare tidak terkunci, risiko pelepasan gas tidak terkendali	4	Usia material	1	Pemilihan material flange yang tahan korosi, inspeksi visual pada permukaan flange untuk mengecek tanda-tanda aus, pembersihan permukaan flange dilakukan saat shutdown pabrik	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
7	Flare Mounting Plate "A"	Baut sambungan terlepas	Struktur tidak aman	4	Terkena cuaca	1	Pengencangan baut mounting plate dengan torsi yang sesuai, inspeksi visual dilakukan untuk mendeteksi kelonggaran maupun korosi	4	16
		Retak	Flare stack tidak terpasang stabil, risiko roboh atau oleng	4	Usia material	1	Desain mounting plate sesuai dengan kondisi area kerja dan beban statis maupun dinamis dari flare stack, inspeksi visual untuk mendeteksi retakan	4	16
8	Anchor Bolts	Longgar	Struktur bisa terguncang atau roboh saat ada tekanan angin atau ekspansi termal	4	Getaran secara terus menerus	1	Penggunaan epoksi disekitar anchor untuk mengikat fondasi, inspeksi visual untuk melihat tanda-tanda kelonggara maupun retakan di beton	4	16
9	Inlet Nozzle	Tersumbat	Gas tidak dapat mengalir ke flare	4	Penumpukan kotoran	1	Desain inlet nozzle meminimalkan area penumpukan padatan, pembersihan inlet nozzle dilakukan saat shutdown pabrik	4	16

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
		Retak	Kebocoran gas sebelum flare, risiko ledakan	4	Terkena suhu panas dan temperatur tinggi secara terus menerus	1	Desain inlet nozzle yang tahan terhadap suhu, tekanan, dan korosi gas, Inspeksi visual sekaligus pengecekan menggunakan gas detektor pada inlet nozzle.	4	16


<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
<i>System</i> : Boiler MT040G					<i>Date</i> :				
<i>Subsystem</i> :					<i>Years</i> :				
No	Component	Potential Failure Mode	Effect of Failure	Severity (S)	Potential Cause of Failure	Occurance (O)	Current Control	Detection (D)	RPN
Nama Peralatan : Boiler MT040G									
1	Thermostat (L4006A2114)	Kontak listrik terbakar	Potensi bahaya listrik	5	Usia material	1	Pemasangan circuit breaker untuk perlindungan overcurrent, pemeriksaan koneksi kabel listrik agar tidak ada tanda tanda panas berlebih	2	10

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
		Sensor error	Sistem rusak	4	Sensor aus	1	Kalibrasi sensor suhu, pembersihan pocket sensor dari kerak, pemantauan suhu air keluar, penggantian sensor jika pembacaan suhu masih tidak akurat	2	8
2	3/4 Short Well	Bocor	Kebocoran fluida	3	Berkarat	1	Pengencangan ulir well dengan torsi yang tepat, inspeksi visual untuk mendeteksi kebocoran air, penggantian well saat shutdown pabrik jika ditemukan retak atau rusak	4	12
		Tersumbat	Sensor tidak membaca suhu dengan benar	2	Endapan air	1	Pembersihan well dari endapan kerak atau kotoran saat shutdown pabrik, pemantauan suhu air untuk mendeteksi penurunan efisiensi pemanasan	4	8
3	Clean Out Cover	Gasket bocor	Kebocoran	2	Gasket rusak	1	Pengencangan baut clean out cover dengan torsi yang tepat, inspeksi visual untuk kebocoran air disekitar clean out cover	4	8
4	Outer Gasket	Aus	Kebocoran	3	Aus karena suhu tinggi	2	Penggantian dengan gasket baru, material gasket tahan	4	24

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
							terhadap suhu dan bahan kimia		
5	Inner Gasket	Terbakar	Kerusakan komponen	4	Overheating	1	Penggunaan thermostat, material gasket tahan terhadap suhu dan bahan kimia, penggantian gasket baru	4	16
6	M10 x 30mm Carriage Bolt	Patah	Sambungan lepas	3	Berkarat	1	Pengencangan bolt dengan torsi yang tepat, material bolt yang kuat menahan tekanan dan beban pada clean out cover, inspeksi visual untuk melihat tanda-tanda korosi, penggantian dengan bolt baru	4	12
7	M10 Flat Washer	Aus	Mur dapat longgar	2	Gesekan antar komponen	1	Penggantian dengan washer yang baru, material yang tahan korosi	4	8
8	M10 Hex Nut	Kendur	Mur lepas	3	Getaran tinggi	1	Pengencangan nut dengan torsi yang tepat, penggunaan lock washer, inspeksi visual kekencangan nut	4	12
9	Cap	Bocor	Kebocoran fluida	2	Seal rusak	1	Inspeksi visual untuk kebocoran fluida area cap, pengencangan cap dengan torsi yang benar,	4	8

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
							penggunaan tape ulir yang sesuai, penggunaan gasket		
10	Cap Insulation	Terbakar terkena suhu tinggi	Efisiensi energi turun	4	Material tidak tahan panas	1	Desain cap insulation tahan suhu tinggi, pencegahan overheating dengan thermostat, inspeksi visual untuk mengecek kondisi insulation	4	16
11	M4 Flat Washer	Aus	Sambungan tidak presisi	2	Terlalu kencang saat pemasangan	1	Material washer tahan aus dan korosi, penggantian washer dengan yang baru	4	8
12	M4 x 10m Machine Screw	Patah	Komponen terlepas	3	Korosi	1	Penggantian screw dengan yang baru, dengan kekuatan yang sesuai dan tahan korosi, pengencangan screw dengan torsi yang tepat	4	12
13	Anode Rod	Patah	Reaksi galvanik tidak berjalan optimal	3	Terpakai habis akibat reaksi elektrokimia	1	Penggantian anode rod dengan yang baru, dengan kekuatan yang sesuai dengan kualitas air	4	12
		Korosi	umur alat pendek	2	Usia material	1	Material anode rod sesuai dengan kualitas air dan perlindungan dari korosi	4	8

<i>Failure Mode and Effect Analysis Worksheet</i>									
14	Rubber Anode Gasket	Rusak terkena suhu dan tekanan	kebocoran fluida	3	Tekanan tinggi terus-menerus	1	Material gasket tahan terhadap suhu dan tekanan tinggi, penggantian gasket baru dilakukan bersama anode rod, pemasangan gasket hingga segelnya rapat mencegah pemasangan tidak tepat	4	12
15	Insulating Gasket	Pecah	Korosi cepat	3	Usia material	1	Penggantian gasket baru, material insulting gasket tahan suhu dan tekanan, memiliki sifat isolasi terhadap listrik	4	12
16	M8 Flat Washer	Aus	Sambungan mur longgar	2	Gesekan antar komponen	1	Material washer tahan aus dan korosi, penggantian washer yang baru	4	8
17	M8 Lock Washer	Pegas hilang	Mur terlepas	3	Hilangnya gaya tekan	1	Penggantian lock washer yang baru, material yang tahan aus dan korosi, dan pengencangan mur yang sesuai dengan torsi	4	12
18	M8 Brass Hex Nut	Aus	Kebocoran	3	Korosi	1	Penggantian dengan nut yang baru, material yang tahan korosi	4	12

 28/5
 Randy I
 28/5
 28/05/2025
 Radhy A

LAMPIRAN 5
GAMBAR KOMPONEN FMEA TERTINGGI

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

1. Tangki Flokulan



2. Impeller



3. Kolam



4. Motor Cooling tower



5. Mechanical Seal



6. Agitator (mixer shaft)



7. Safety Valve



8. Main Vessel



9. Valve Wastewater Inlet



10. Cover Lagoon

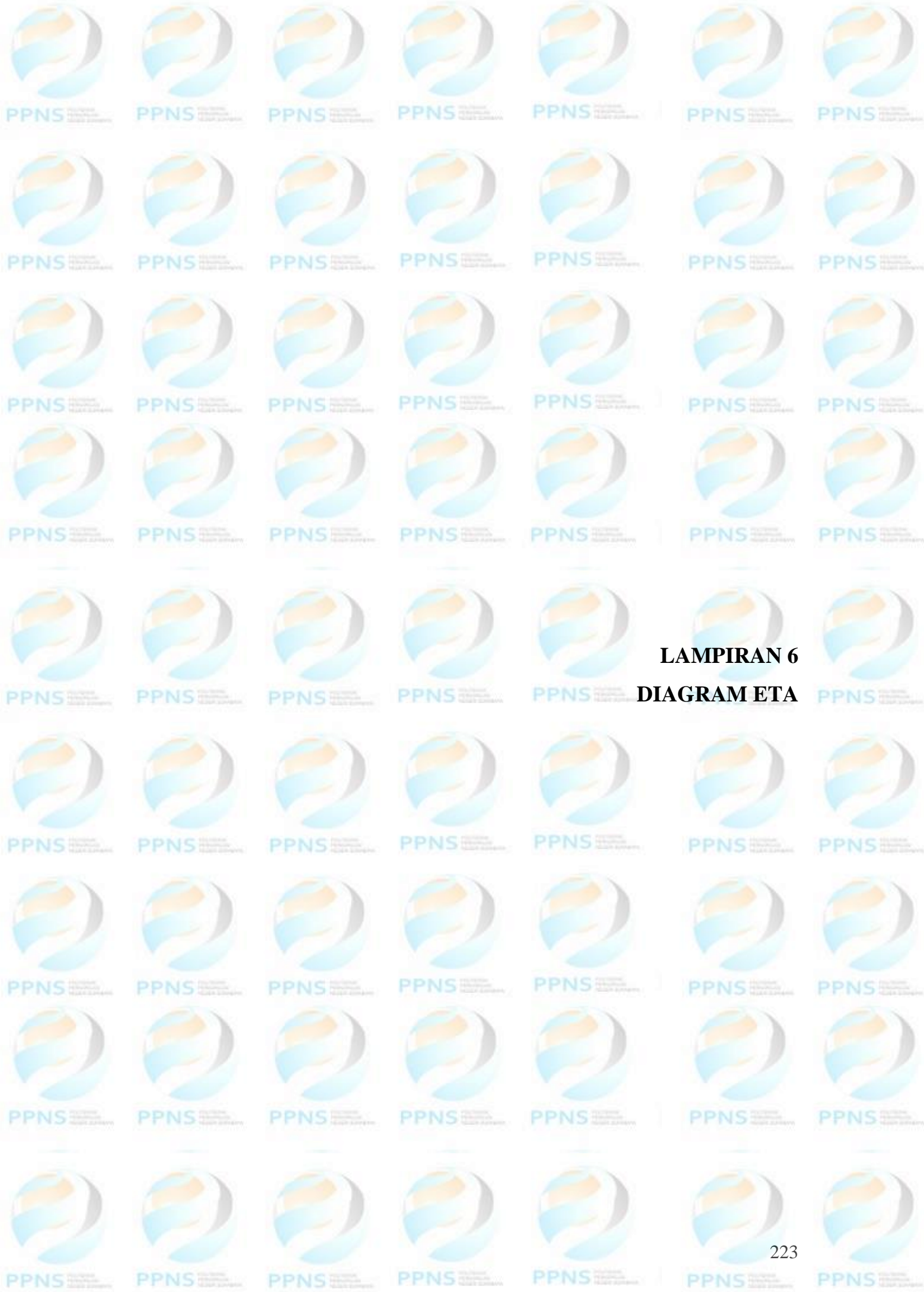


11. Flare Stack



12. Outer Gasket

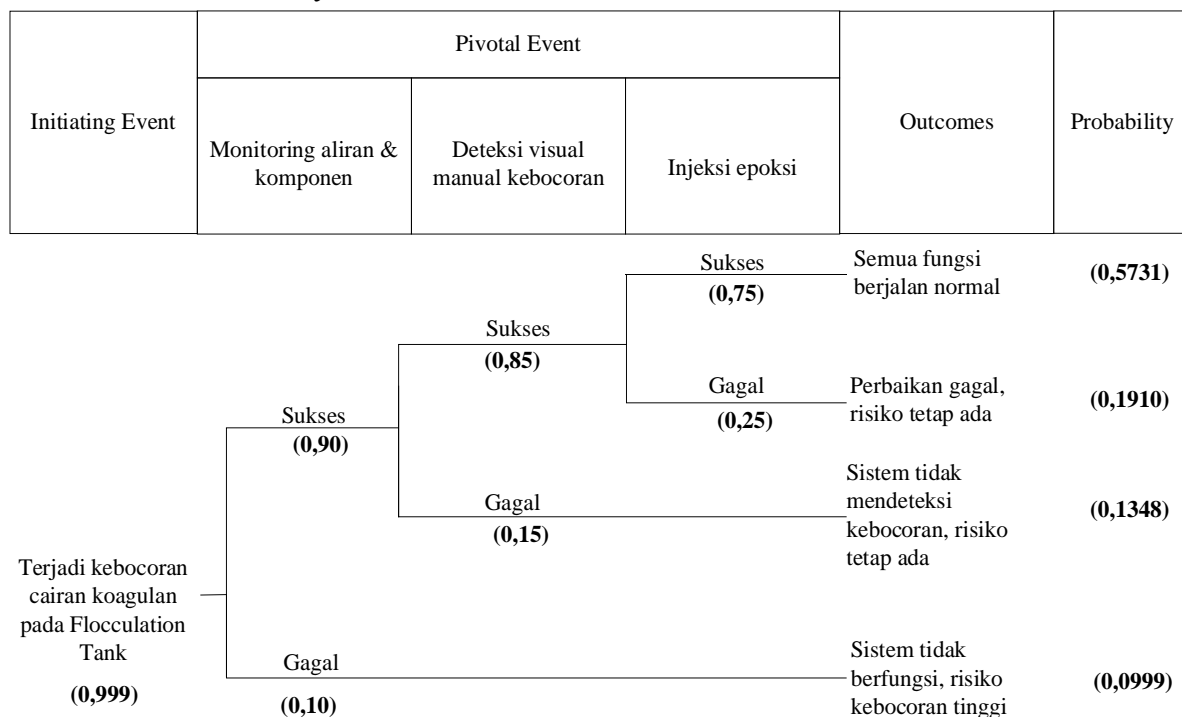




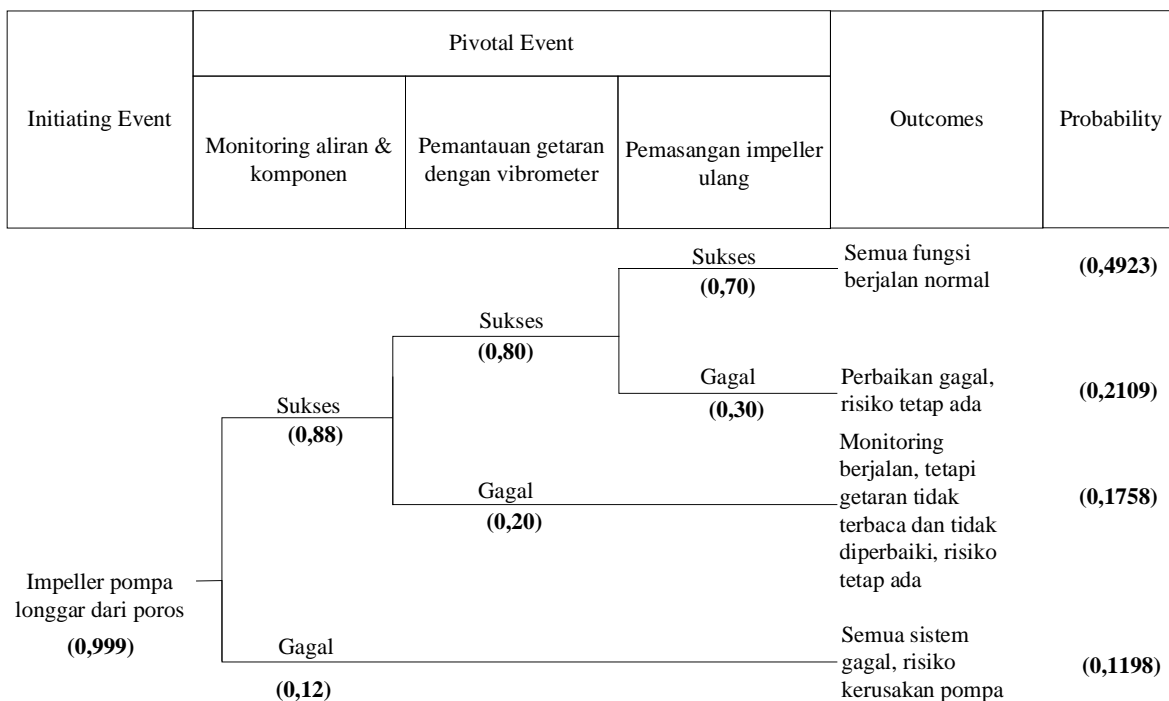
LAMPIRAN 6
DIAGRAM ETA

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

1. Event Tree Analysis Flocculation Tank



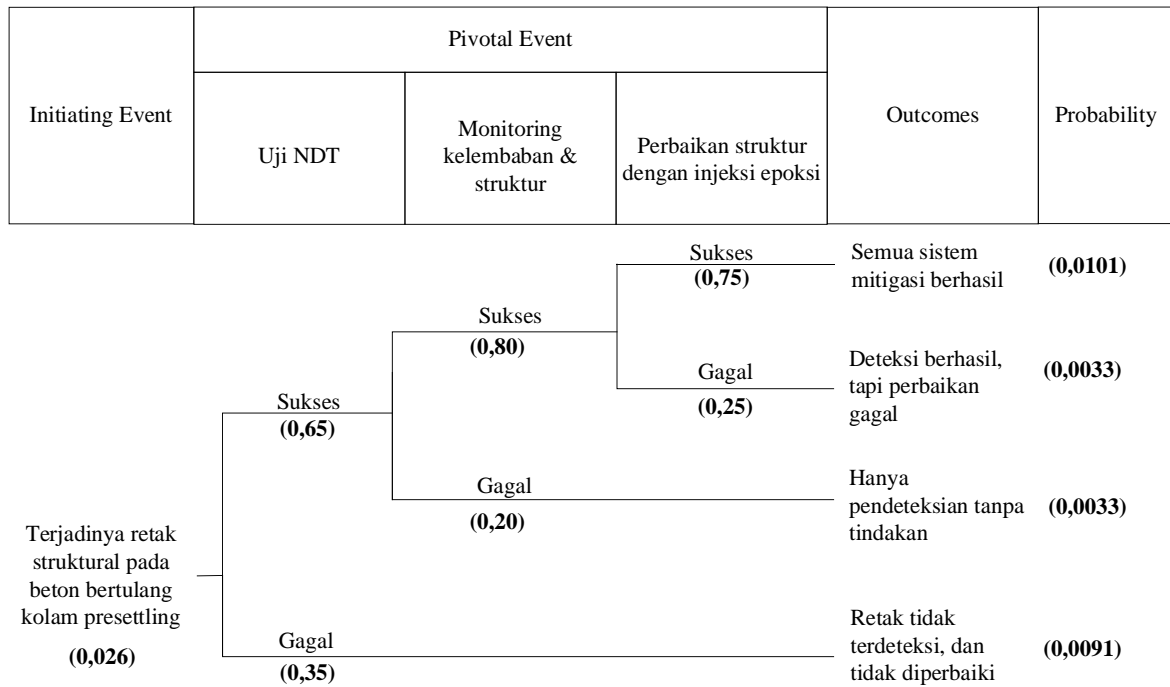
2. Event Tree Analysis Impeller Pompa



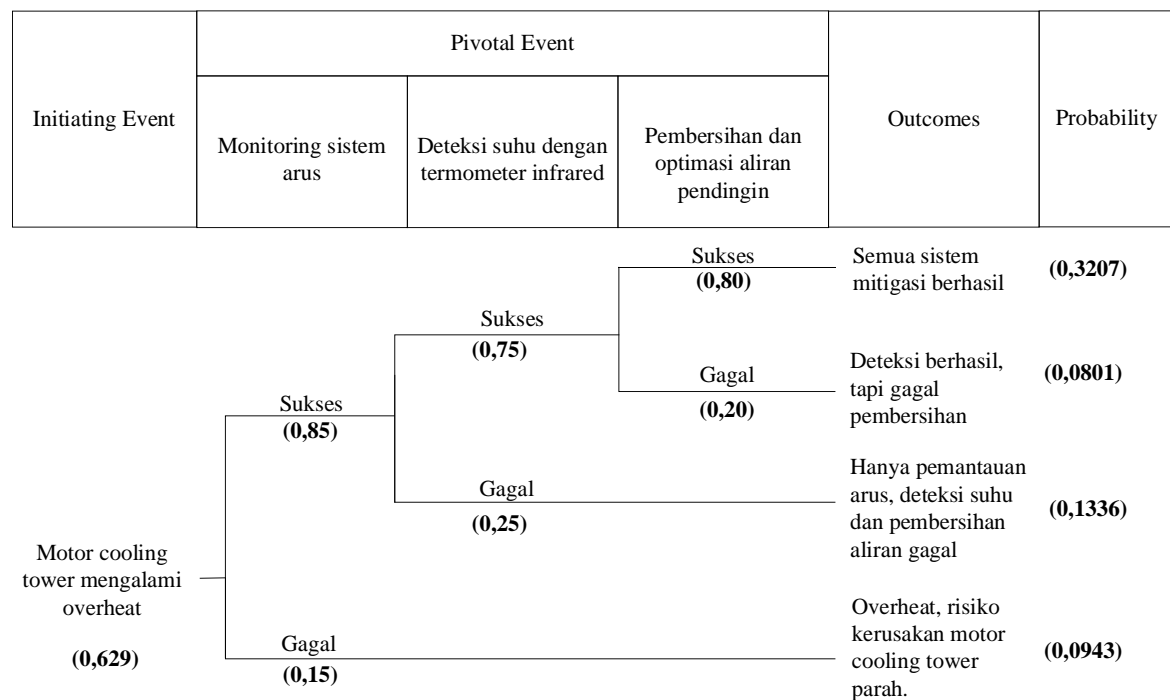
28/5/25
Randy I

28/05/2025
Rodky A

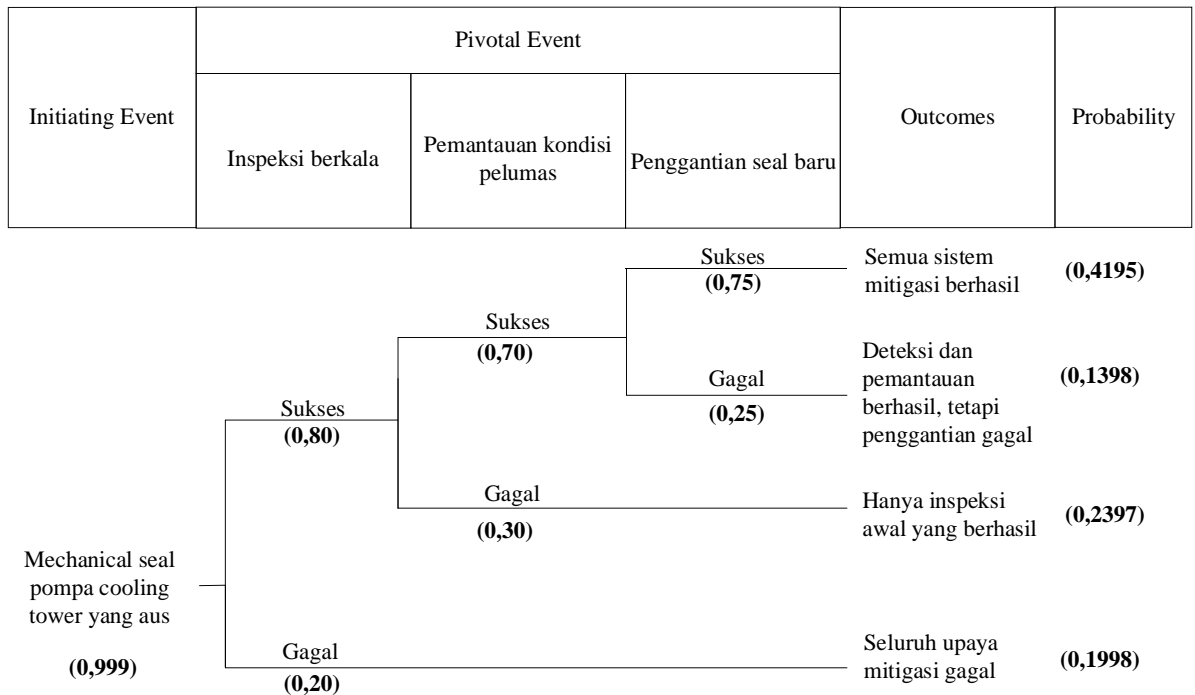
3. Event Tree Analysis Beton Kolam Presettling



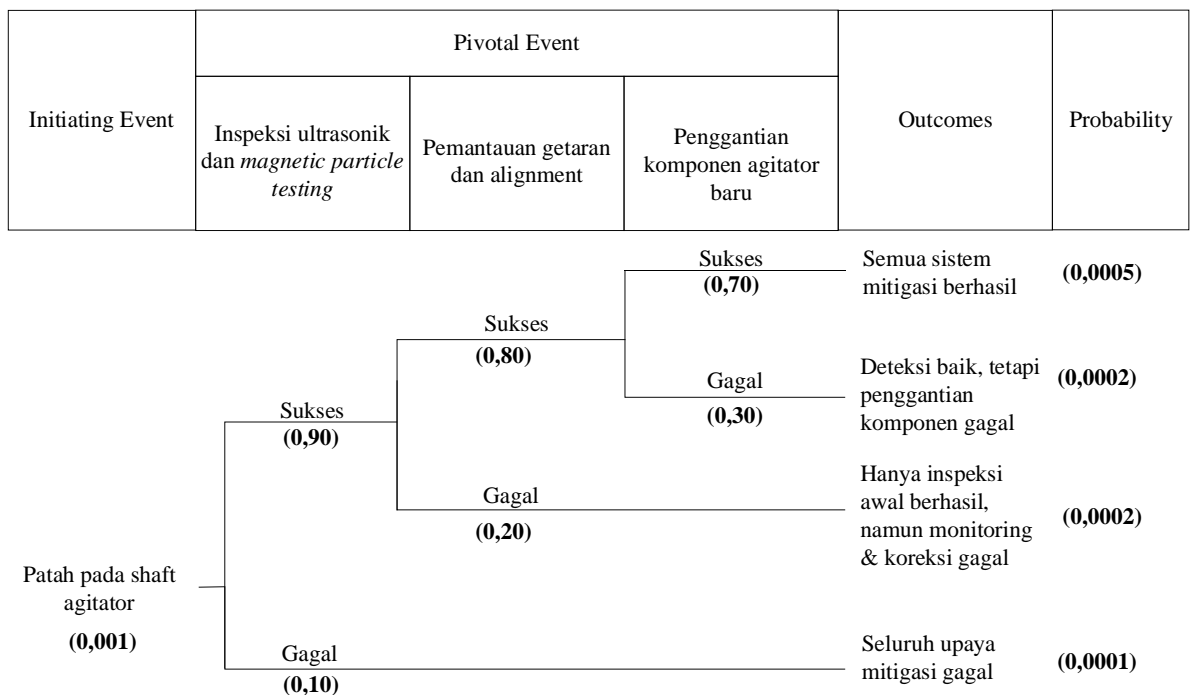
4. Event Tree Analysis Motor Cooling Tower



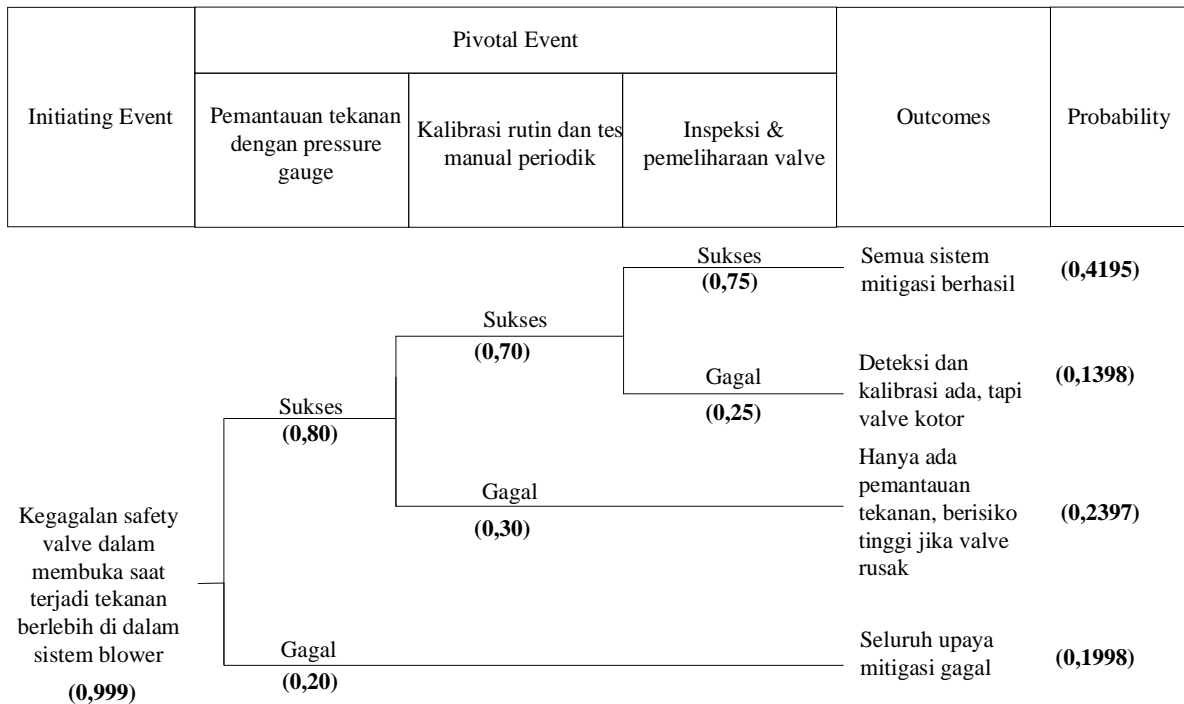
5. Event Tree Analysis Mechanical Seal Pompa



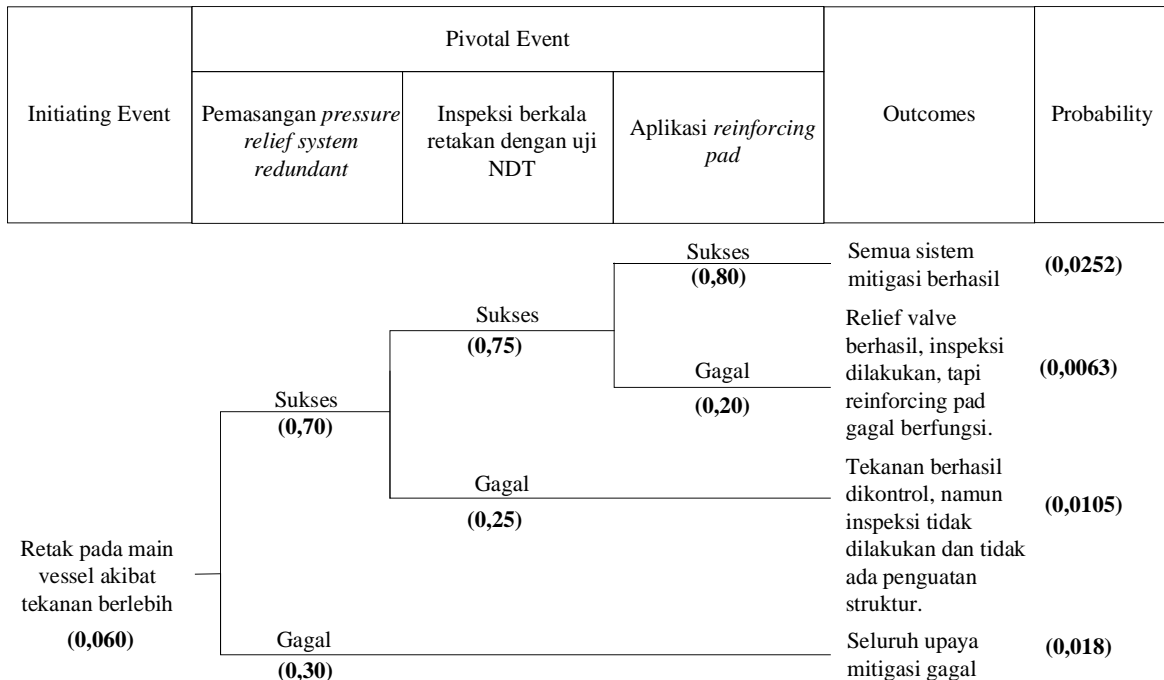
6. Event Tree Analysis Shaft Agitator Digester



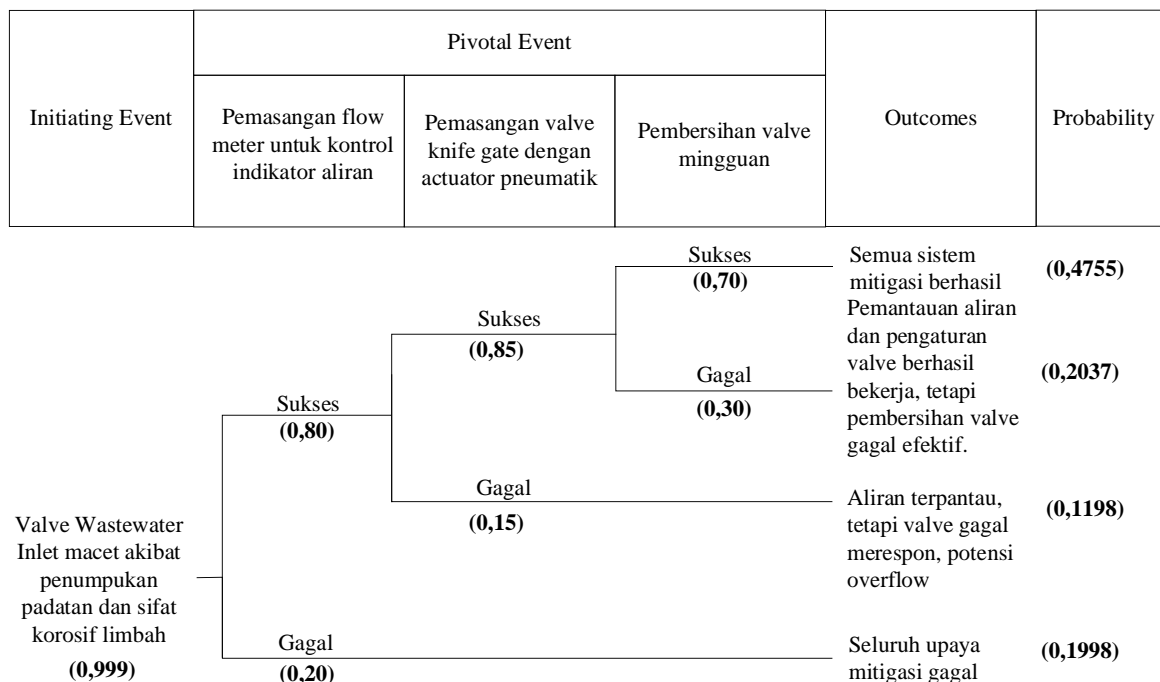
7. Event Tree Analysis Safety Valve Blower



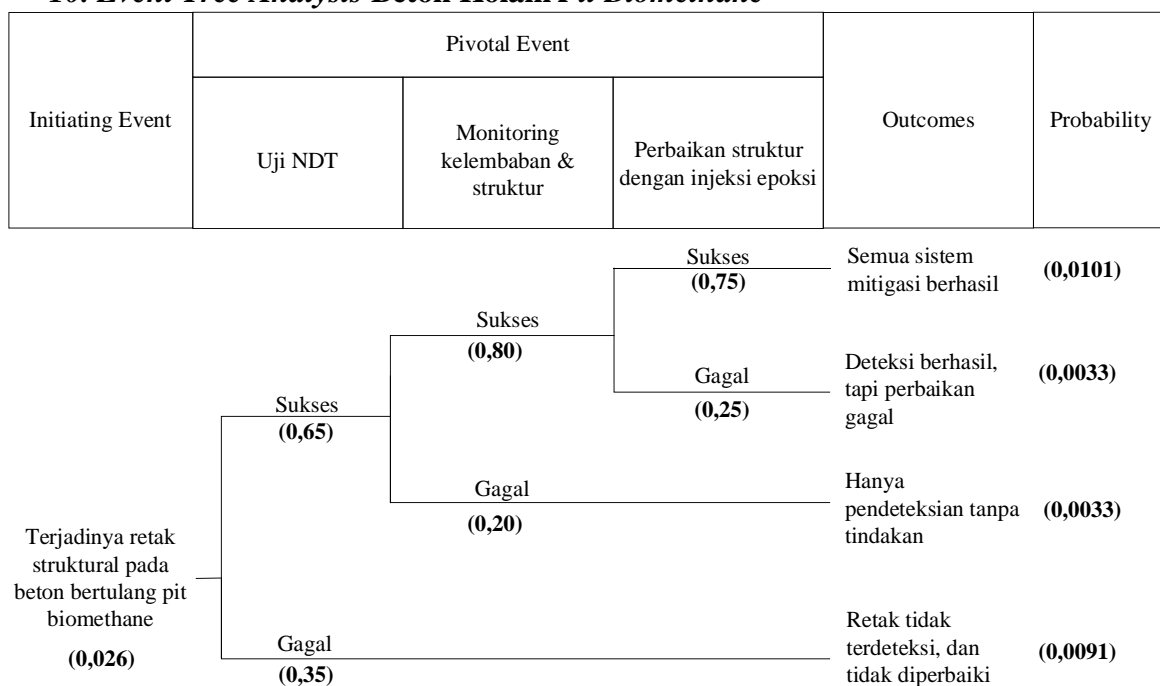
8. Event Tree Analysis Main Vessel Degassing Pond



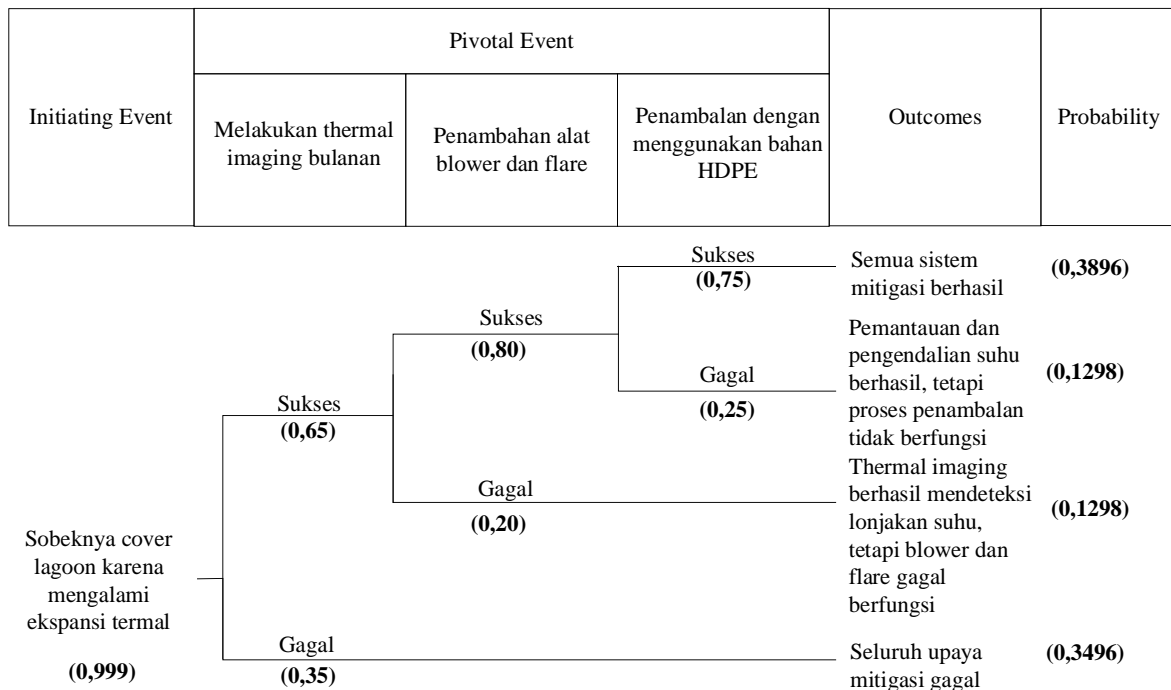
9. Event Tree Analysis Valve Wastewater Inlet



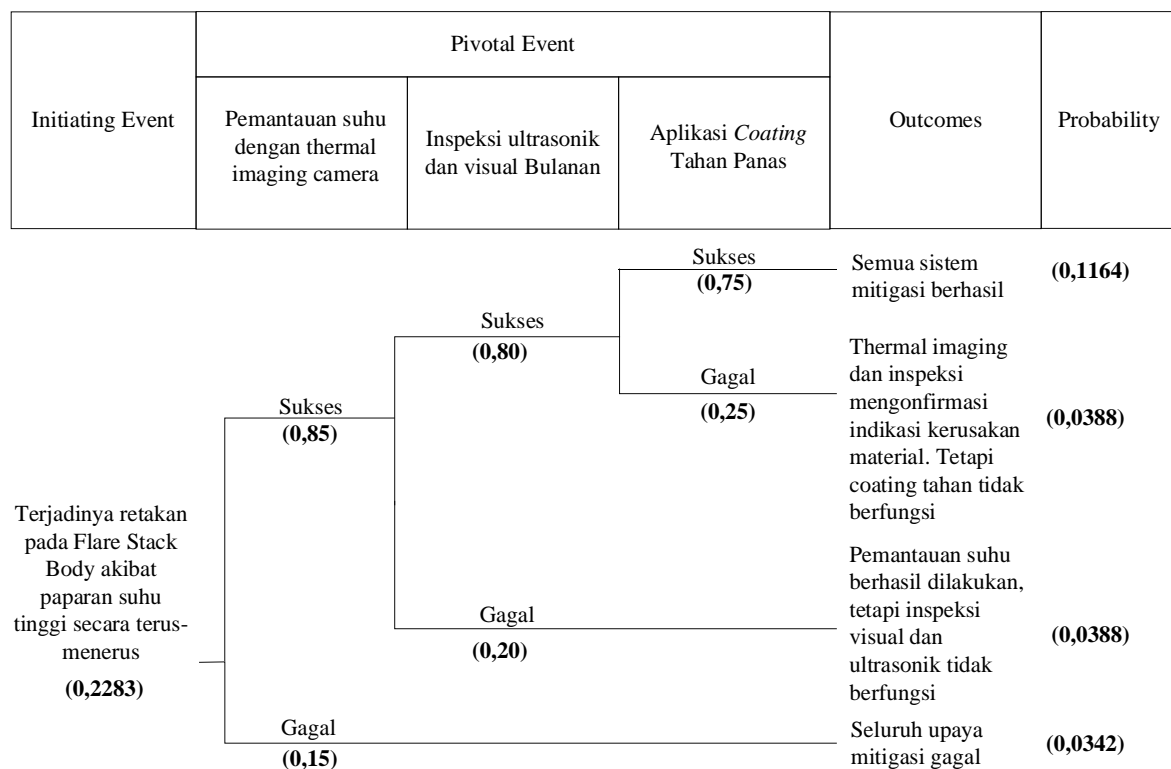
10. Event Tree Analysis Beton Kolam Pit Biomethane



11. Event Tree Analysis Cover Lagoon



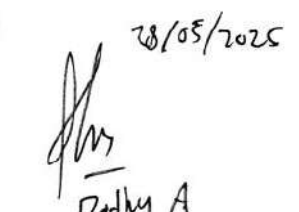


12. Event Tree Analysis Flare Stack Body

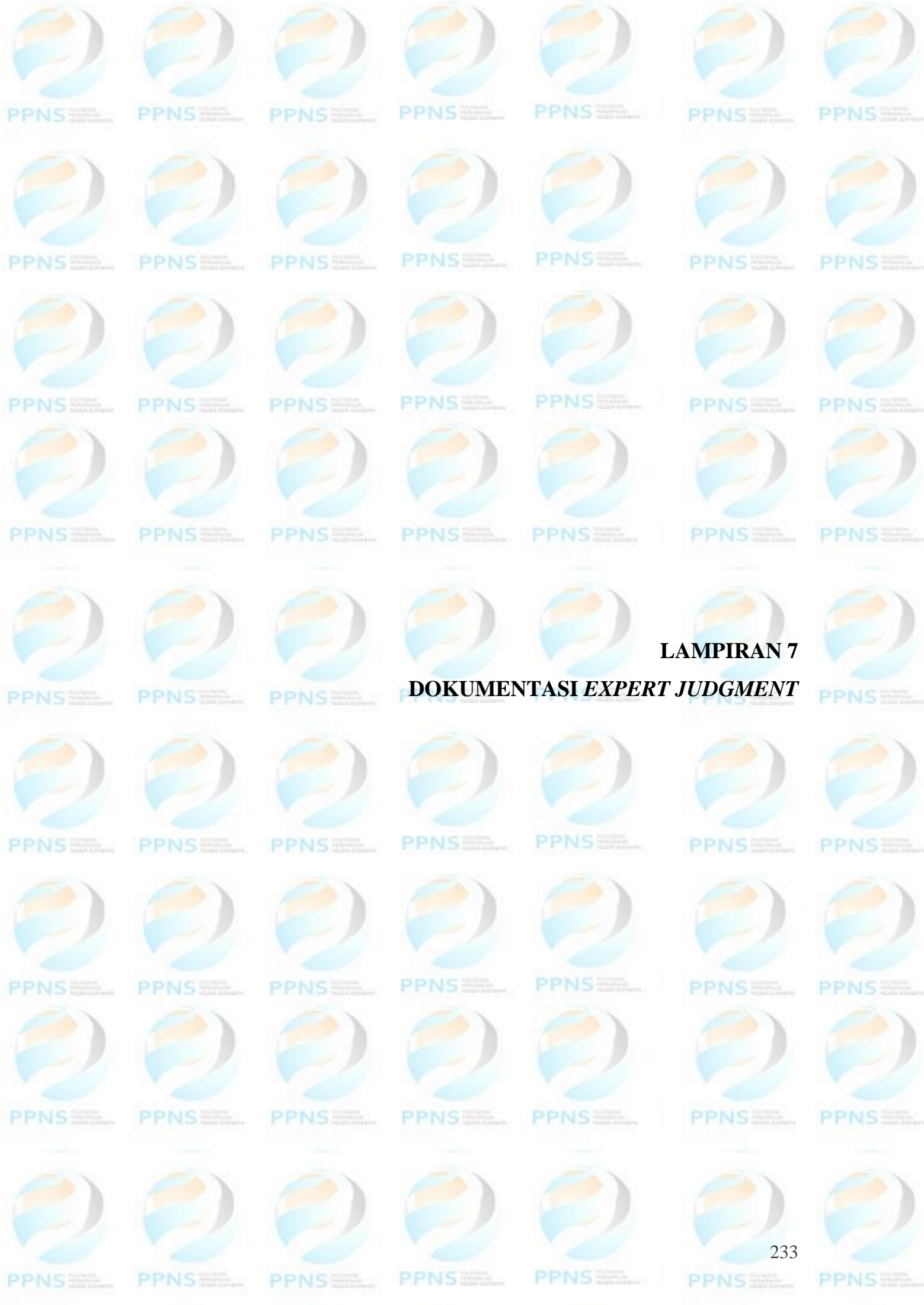


13. Event Tree Analysis Insulating Gasket Boiler

Initiating Event	Pivotal Event			Outcomes	Probability
	Deteksi suhu menggunakan sensor suhu	Inspeksi termal	Penggantian gasket PTFE		
Outer gasket aus karena suhu tinggi (0,999)	Sukses (0,85)	Sukses (0,80)	Sukses (0,75)	Semua sistem mitigasi berhasil	(0,5094)
			Gagal (0,25)	Sensor aktif, tetapi perbaikan gagal. Gasket tetap dapat aus	(0,1698)
	Gagal (0,15)	Gagal (0,20)		Gasket aus dan tidak terdeteksi	(0,1698)
				Seluruh upaya mitigasi gagal	(0,1498)

 28/5/25
 28/5/25
 28/05/2025
 Randy I
 Randy A

****Halaman ini sengaja dikosongkan****



LAMPIRAN 7
DOKUMENTASI *EXPERT JUDGMENT*

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

Dokumentasi Bersama Team Expert Judgment



Diskusi bersama foreman area, untuk membahas mengenai kondisi peralatan anaerob



Presentasi sekaligus diskusi mengenai hasil pengerjaan tugas akhir kepada *HSE supervisor* perusahaan.



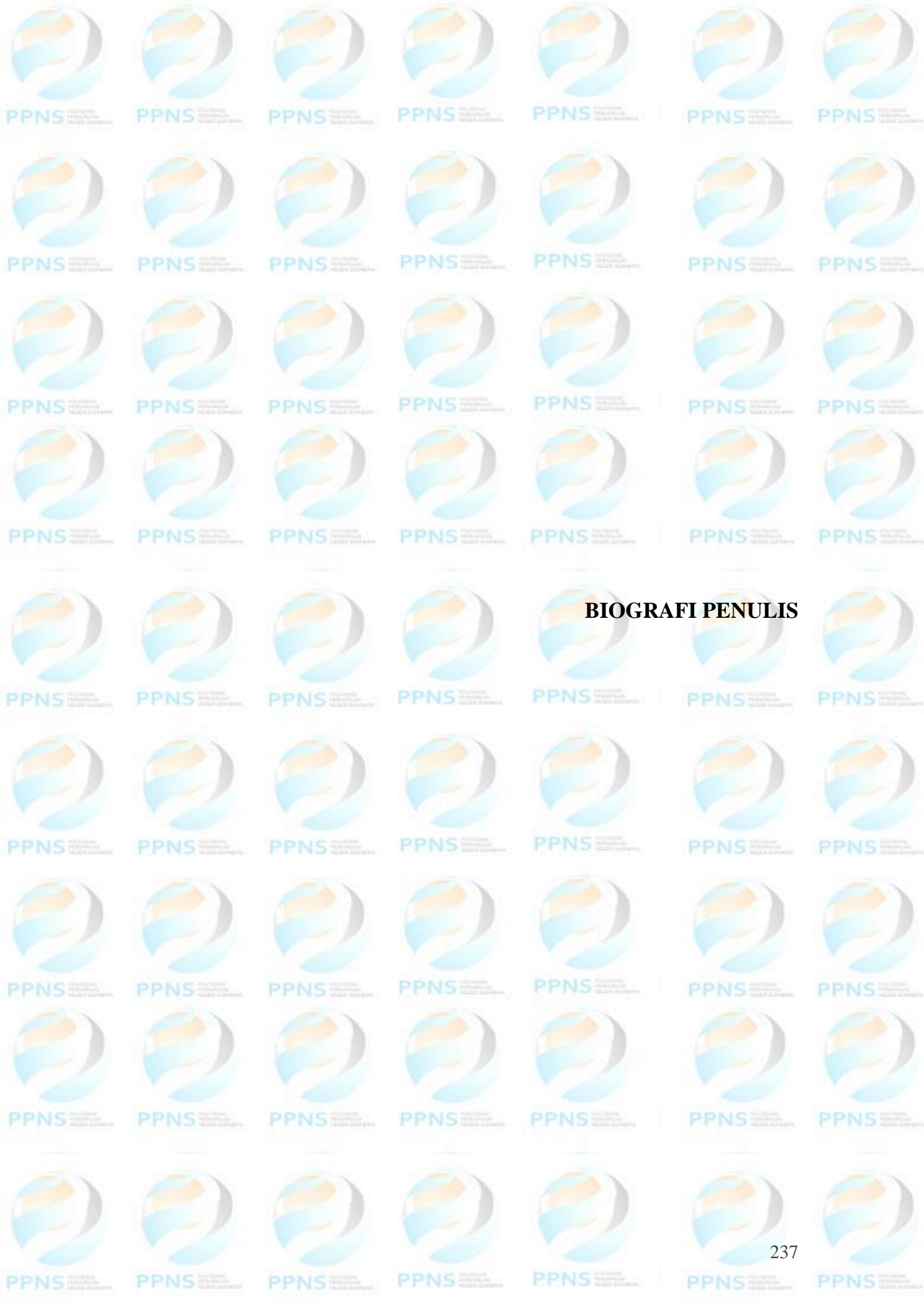
Proses tanda tangan persetujuan hasil pengerjaan tugas akhir kepada *HSE supervisor* perusahaan.



Proses tanda tangan persetujuan hasil pengerjaan tugas akhir kepada *Maintenance supervisor* perusahaan.



Proses tanda tangan persetujuan hasil pengerjaan tugas akhir kepada *Manager area Biogas Plant* perusahaan.



BIOGRAFI PENULIS

****Halaman ini sengaja dikosongkan****

BIOGRAFI PENULIS



Irina Kartika Utami adalah nama penulis Tugas Akhir ini. Penulis lahir dari pasangan Boedi Oetomo dan Siti Prihatin. Penulis dilahirkan di Dusun Keleng, RT 02 RW 01, Kecamatan Ngebel, Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur, pada tanggal 17 Oktober 2003. Penulis menempuh pendidikan dimulai dari SDN Rangkah 1 Surabaya (lulus tahun 2015), kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 15 Surabaya (lulus tahun 2018), dan pendidikan menengah atas di SMAN 7 Surabaya (lulus tahun 2021). Setelah lulus dari pendidikan menengah atas, penulis melanjutkan pendidikan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, pada program studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja. Selama menjadi mahasiswa, penulis tidak hanya aktif dalam bidang akademik, namun juga memiliki pengalaman di dunia industri. Penulis telah melaksanakan *On The Job Training* (OJT) di dua perusahaan, yaitu di PT PAL Indonesia sebagai bagian dari dukungan produksi pada unit kerja kapal niaga, serta di PT Energi Agro Nusantara sebagai bagian dari tim Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Untuk penyusunan Tugas Akhir, penulis melakukan penelitian di industri bioetanol dengan judul “Analisis Kegagalan Peralatan pada Proses Anaerob IPAL Industri Bioetanol Menggunakan Metode FMEA dan ETA”. Kritik dan saran untuk penyempurnaan penelitian ini dapat disampaikan melalui e-mail irinakartikau@gmail.com.

****Halaman ini sengaja dikosongkan****