

Total Productive Maintenance dan Fishbone Diagram dalam Mengidentifikasi Penyebab Kegagalan Membrane Permeate Incinerator (MPI): Studi Kasus di PT XYZ

Total Productive Maintenance and Fishbone Diagram in Identifying the Causes of Membrane Permeate Incinerator (MPI) Failures: A Case Study at PT XYZ

Choirul Anang^{*1}, Ardhana Putri Farahdiansari²

¹Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Bojonegoro

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Bojonegoro

ARTICLE INFO

Article history:

Diterima 20-09-2025

Diperbaiki 30-11-2025

Disetujui 05-12-2025

Kata Kunci:

Membrane Permeate Incinerator (MPI), Total Productive Maintenance (TPM), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Mean Time Between Failures (MTBF), Prediktif Maintenance, Keandalan Operasional.

Keywords:

Membrane Permeate Incinerator (MPI), Total Productive Maintenance (TPM), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Mean Time Between Failures (MTBF), Predictive Maintenance, Operational Reliability.

ABSTRAK

PT XYZ merupakan unit bisnis strategis dalam eksplorasi dan produksi migas di Jawa Timur, dengan operasi yang harus efisien, aman, dan berkelanjutan. Salah satu komponen kritis adalah Membrane Permeate Incinerator (MPI), yang berfungsi menghancurkan sisa hidrokarbon sebelum dilepas ke atmosfer. MPI sering mengalami gangguan operasional dengan downtime 15% dan MTBF 1.200 jam, lebih rendah dari standar industri 2.000 jam, serta biaya perawatan tinggi dan risiko pelanggaran regulasi. Untuk mengatasi hal ini, Total Productive Maintenance (TPM) dan Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) diterapkan untuk mengidentifikasi akar penyebab dan menyusun strategi perawatan yang lebih efektif, termasuk predictive maintenance pada komponen berisiko tinggi.

ABSTRACT

PT XYZ is a strategic business unit in oil and gas exploration and production in East Java, with operations that must be efficient, safe, and sustainable. One critical component is the Membrane Permeate Incinerator (MPI), which functions to destroy residual hydrocarbons before they are released into the atmosphere. The MPI frequently experiences operational disruptions, with 15% downtime and an MTBF of 1,200 hours, lower than the industry standard of 2,000 hours, along with high maintenance costs and the risk of regulatory violations. To address these issues, Total Productive Maintenance (TPM) and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) are applied to identify root causes and develop more effective maintenance strategies, including predictive maintenance for high-risk components.

1. Pendahuluan

Format Industri migas memiliki peran strategis dalam mendukung ketahanan energi nasional, sehingga aspek efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan lingkungan menjadi prioritas utama dalam operasionalnya. PT XYZ sebagai salah satu unit bisnis strategis PT Pertamina, berfokus pada pengelolaan Lapangan Gas X yang merupakan proyek vital nasional. Salah satu komponen penting dalam sistem pengolahan gas adalah *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) yang berfungsi menghancurkan sisa hidrokarbon sebelum gas buang dilepas ke atmosfer. Peran strategis MPI menjadikannya kunci dalam menjaga kualitas emisi dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan. Namun, hasil pengamatan lapangan menunjukkan MPI sering mengalami gangguan operasional dengan downtime mencapai 15% per tahun. Nilai *Mean Time Between Failures* (MTBF) hanya sebesar 1.200 jam, jauh lebih rendah dibanding standar industri 2.000 jam, serta biaya perawatan komponen kritis seperti burner dan *refractory lining* mencapai Rp 200 juta per tahun. Kondisi ini berpotensi menimbulkan pelanggaran regulasi, khususnya PP No. 22 Tahun 2021 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup [1]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan analisis yang sistematis, salah satunya melalui *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan, menilai tingkat risiko melalui *Risk Priority Number* (RPN), dan menyusun strategi perawatan seperti *predictive maintenance* sehingga keandalan MPI dapat ditingkatkan, downtime berkurang, biaya perawatan menurun, serta kepatuhan terhadap regulasi tetap terjaga.

2. Metode Penelitian

2.1 Metode Pengumpulan Data

Dalam pelaksanaan Kerja Praktik Industri ini, data dikumpulkan melalui beberapa metode berikut:

a. Partisipasi (Magang)

Selama periode kerja praktik, penulis terlibat langsung dalam kegiatan operasional di unit *Membrane Permeate Incinerator* (MPI). Keterlibatan ini memungkinkan penulis untuk memahami secara mendalam proses kerja, prosedur pemeliharaan, serta tantangan operasional yang dihadapi oleh tim di lapangan. Pengalaman langsung ini menjadi sumber informasi penting dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitas dan keandalan mesin *Membrane Permeate Incinerator* (MPI).

b. Observasi

Penulis melakukan observasi langsung secara sistematis dengan memantau aktivitas operasional harian MPI di *Gas Processing Facility* (GPF). Peneliti secara aktif mengamati dan mencatat parameter operasional

kritis seperti suhu pembakaran, tekanan sistem, dan laju alir gas. Selain itu, dokumentasi menyeluruh terhadap prosedur pemeliharaan rutin dan inspeksi harian dilaksanakan, termasuk pemeriksaan visual terhadap kondisi fisik komponen-komponen kritis seperti *burner*, *refractory lining*, dan sistem kontrol untuk mengidentifikasi tanda-tanda degradasi atau kerusakan.

c. Wawancara

Untuk melengkapi data yang diperoleh melalui observasi, penulis melakukan wawancara dengan beberapa personel yang terlibat langsung dalam operasional dan pemeliharaan *Membrane Permeate Incinerator* (MPI), seperti operator, teknisi, dan supervisor. Wawancara Mendalam dilaksanakan melalui serangkaian diskusi terstruktur dengan berbagai pihak terkait. Peneliti berinteraksi langsung dengan operator *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) untuk memahami tantangan operasional harian, berdiskusi dengan teknisi pemeliharaan mengenai masalah teknis yang sering muncul, serta berkonsultasi dengan supervisor produksi mengenai kebijakan operasi dan pemeliharaan. Wawancara juga dilakukan dengan engineer reliability untuk memperoleh data historis performa peralatan, dengan fokus utama pada identifikasi failure mode dan pencarian akar masalah.

2.2 Gas Permeate

Gas permeate merujuk pada gas yang dihasilkan sebagai produk sampingan dalam proses pemisahan gas, khususnya dalam proses pengolahan gas alam. Dalam *Gas Processing Facility* (GPF), *gas permeate* adalah hasil dari proses filtrasi atau pemisahan menggunakan teknologi membrane, yang bertujuan untuk memisahkan berbagai komponen gas yang tidak diinginkan dari aliran gas utama [2]. *Gas permeate* sering kali mengandung berbagai senyawa, termasuk hidrokarbon ringan, karbon dioksida (CO₂), dan senyawa lainnya yang mungkin tidak diinginkan dalam aliran gas utama atau gas yang dilepaskan ke atmosfer.

Pada dasarnya, *gas permeate* mengandung komponen-komponen yang masih dapat berpotensi berbahaya atau mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan benar. Salah satu komponen utama yang sering ada dalam *gas permeate* adalah hidrokarbon mentah yang tercampur dengan CO₂. Meskipun gas CO₂ itu sendiri tidak berbahaya dalam konsentrasi tertentu, namun jika bercampur dengan hidrokarbon, dapat meningkatkan risiko kebakaran dan potensi polusi udara yang lebih besar [3].

2.3 Pengertian *Membrane Permeate Incinerator* (MPI)

Gambar diletakkan *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) adalah teknologi yang dirancang untuk mengolah gas limbah yang dihasilkan dari proses industri, terutama dalam fasilitas produksi minyak dan gas. *Membrane*

Permeate Incinerator (MPI) berfungsi sebagai sistem pembakaran termal untuk menghilangkan impurities dalam aliran gas hasil produksi, seperti hidrokarbon mentah, yang masih bercampur dalam aliran gas hasil produksi sebelum gas dilepaskan ke lingkungan [4].

Salah satu unit utama yang berfungsi untuk menghilangkan impurities dalam aliran gas adalah *Acid Gas Removal Unit* (AGRU), yang di fasilitas ini secara internal dikenal sebagai Unit 241 dan 242. Unit 241 (*H₂S Removal Unit*) berfungsi untuk menghilangkan *hidrogen sulfida* (H₂S), sedangkan Unit 242 (*CO₂ Removal Unit*) bertugas untuk memisahkan karbon dioksida (CO₂) dari aliran gas. Namun, *impurities* lain yang tersisa, seperti hidrokarbon mentah yang masih bercampur dengan CO₂ dari proses sumuran, diolah lebih lanjut menggunakan unit 460 *Membrane Permeate Incinerator* (MPI). MPI membakar hidrokarbon untuk memisahkannya dari CO₂, sehingga gas yang di-venting hanya mengandung CO₂ murni yang aman dilepaskan ke lingkungan sesuai dengan standar lingkungan yang berlaku.

2.4 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) merupakan salah satu metode analisa identifikasi mode kegagalan dari tiap komponen dan menentukan tingkat prioritas risiko kegagalan [5]. *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) menggunakan 3 kriteria untuk menentukan nilai *Risk Priority Number* (RPN) yaitu tingkat keparahan atau kerusakan (*severity*), frekuensi kegagalan yang terjadi (*occurrence*), dan tingkat deteksi (*detection*). Metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) bertujuan untuk mengidentifikasi mode kegagalan, kemungkinan terjadinya dan pengaruh terhadap sistem. Dari FMEA akan ditemukan function, function failure, failure mode, dan failure effect. Dalam penentuan nilai SOD dapat melihat rumus berikut ini:

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

Dengan:

$S = \text{Severity}$

$O = \text{Occurrence}$

$D = \text{Detection}$

2.5 Fishbone Diagram

Fishbone Diagram merupakan salah satu cara meningkatkan kualitas yang ditemukan oleh ilmuwan Jepang pada tahun 1960-an. Dr. Kaoru Ishikawa adalah seorang ilmuwan yang lahir di Tokyo, Jepang pada tahun 1915 dan juga merupakan alumnus Teknik Kimia di Universitas Tokyo [6]. *Fishbone* merupakan alat kendali mutu yang digunakan untuk mendeteksi masalah yang terjadi di perusahaan. *Fishbone* digunakan dalam penerapannya untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang menjadi masalah. Oleh karena itu, keberadaan *fishbone* dapat memicu eksplorasi secara terus menerus sehingga

dapat ditemukan akar permasalahan di perusahaan tersebut.

Fishbone Diagram merupakan suatu metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi masalah kualitas dan check point yang meliputi empat jenis bahan atau peralatan, tenaga kerja dan metode [7]. Alasan yang terkait dengan setiap kategori terkadang terikat pada *branch bone* yang berbeda di sepanjang proses curah pendapat. Oleh karena itu, menurut pemahaman para ahli tentang *fishbone*, dapat disimpulkan bahwa *fishbone* adalah bagan yang berbentuk seperti tulang ikan, digunakan untuk mengidentifikasi berbagai penyebab atau faktor utama yang mempengaruhi pengendalian kualitas masalah yang persisten. Penyebab atau faktor utama tersebut dapat diuraikan menjadi Banyak kategori terkait, termasuk orang, material, dan mesin, prosedur dan kebijakan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Historis Downtime

Persamaan Analisis data historis *downtime* dilakukan untuk mengetahui seberapa sering kegagalan terjadi dan berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan. Dari data tersebut kemudian dihitung dua indikator utama, yaitu *Mean Time Between Failure* (MTBF) yang menggambarkan rata-rata waktu antar kegagalan, serta *Mean Time to Repair* (MTTR) yang menunjukkan rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan [8]. Kedua parameter ini akan menjadi dasar dalam mengevaluasi efektivitas kegiatan pemeliharaan dan sebagai masukan bagi pengembangan program *Total Productive Maintenance* (TPM) di unit operasi MPI. Berikut ini ditampilkan data historis downtime MPI yang menjadi dasar perhitungan MTBF dan MTTR:

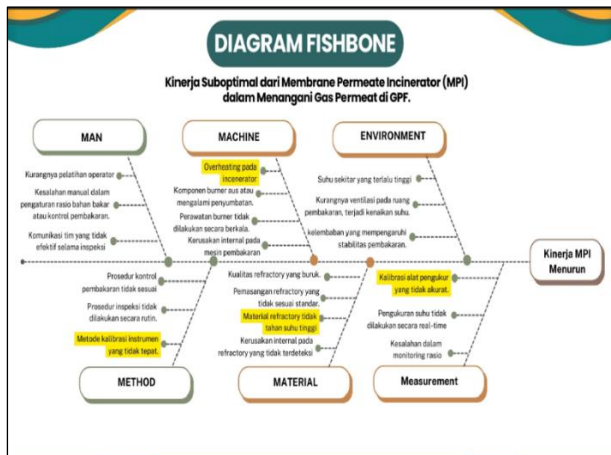
Table 1 Data Historis Downtime

Bulan		Loading Time (menit)	Planned Downtime (menit)	Unplanned Downtime (menit)	Operating Time (menit)
Jan	31	44640	550	500	43590
Feb	29	41760	600	800	40360
Mar	31	44640	550	900	43190
Apr	30	43200	620	700	41880
Mei	31	44640	580	650	43410
Jun	30	43200	590	750	41860
Jul	31	44640	600	720	43320
Agu	31	44640	570	600	43470
Sep	30	43200	610	680	41910
Okt	31	44640	600	650	43390

3.2 Root Cause Analysis (RCA) dengan Fishbone Diagram

Pada setiap Untuk mengidentifikasi akar penyebab dari menurunnya kinerja Membrane Permeate Incinerator (MPI) dalam menangani gas permeate di Gas Processing Facility (GPF), telah dilakukan analisis menggunakan Diagram Fishbone (Ishikawa Diagram). Diagram ini membantu memetakan berbagai faktor yang berkontribusi terhadap permasalahan secara sistematis, berdasarkan enam kategori utama yaitu Man, Machine, Method, Material, Environment, dan Measurement [9].

Gambar 1. Diagram Fishbone



Hasil dari analisis menunjukkan bahwa penurunan kinerja *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) disebabkan oleh berbagai faktor yang saling terkait. Beberapa poin kritis yang menjadi sorotan dalam analisis ini adalah *overheating* pada incinerator, material refractory yang tidak tahan suhu tinggi, dan kalibrasi alat ukur yang tidak akurat, yang ditandai secara khusus dalam diagram, masalah tersebut paling berpengaruh terhadap kegagalan *Membrane Permeate Incinerator* (MPI). Temuan-temuan ini menjadi dasar penting untuk perumusan tindakan korektif dan perbaikan berkelanjutan guna meningkatkan kinerja *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) secara keseluruhan. Berikut adalah akar penyebab utamanya yang menjadi fokus utama pada pembahasan selanjutnya:

a. Burner dan Combustion:

Masalah:

- *Burner* mengalami masalah operasional sehingga menyebabkan runtuhnya *refractory*.
- *Refractory* yang runtuh menjadi tidak mampu menahan panas, menyebabkan hotspot dan berpotensi ledakan.

Akar Penyebab:

- *Burner*: *Burner* mungkin mengalami kerusakan fisik atau penyumbatan, sehingga pembakaran tidak merata dan menyebabkan peningkatan panas di beberapa area.

- *Combustion Control*: Rasio antara bahan bakar, oksigen, dan permeate tidak sesuai karena kegagalan pada sistem kontrol pembakaran (instrumentasi).

b. Refractory dan Hotspot:

Masalah:

- *Refractory* runtuh akibat paparan suhu ekstrem yang tidak tertangani dengan baik, menyebabkan pembentukan hotspot dan potensi ledakan.

Akar Penyebab:

- Ketidakstabilan suhu di *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) yang diakibatkan oleh kerusakan *burner* atau ketidakcocokan rasio pembakaran.
- Kurangnya pemantauan kondisi *refractory*, sehingga kondisi kerusakan tidak terdeteksi dini.

c. Instrumentasi dan Fuel Ratio:

Masalah:

- Ketidakesesuaian rasio bahan bakar, oksigen, dan permeate yang menyebabkan suhu tinggi dan meningkatkan risiko gagal kontrol.

Akar Penyebab:

- Sistem instrumentasi mungkin mengalami kesalahan kalibrasi atau kerusakan sensor, yang menyebabkan data rasio pembakaran tidak akurat.
- Kurangnya Monitoring Rasio: Tidak ada sistem monitoring otomatis yang dapat mendeteksi kesalahan rasio bahan bakar sebelum mencapai kondisi kritis.

Data kerusakan komponen pada unit *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) diperoleh melalui dua pendekatan utama, yaitu analisis data historis dari *log downtime* dan hasil observasi visual selama pelaksanaan kegiatan *preventive maintenance* dan *shutdown*. Berdasarkan hasil inspeksi dan dokumentasi lapangan, beberapa jenis kerusakan yang teridentifikasi adalah sebagai berikut:

a. Kerusakan pada Ceramic Wool

Lapisan *ceramic wool* mengalami cacat (*defect*) berupa sobekan dan hilangnya ketebalan material di beberapa area, sehingga menyebabkan bagian anchor terekspos. Kondisi ini mengindikasikan kegagalan fungsi isolasi termal dan meningkatkan risiko kebocoran panas di *Membrane Permeate Incinerator* (MPI).



Gambar 2. Kerusakan pada Ceramic Wool

b. Keretakan pada *Castable Refractory*

Retakan ditemukan pada beberapa bagian dinding *castable refractory*, terutama di sekitar area *burner*. Keretakan ini berpotensi menurunkan integritas struktural serta menyebabkan ketidakseimbangan suhu dalam proses pembakaran.

Gambar 3. Keretakan pada *Castable Refractory*c. Adanya Serpihan *Material Castable Refractory*

Ditemukan serpihan material *castable refractory* yang berjatuhan di dasar, menunjukkan adanya degradasi material akibat suhu tinggi. Hal ini dapat mengganggu aliran gas buang dan memperkecil volume ruang pembakaran.

Gambar 4. Serpihan Material *Castable Refractory*d. Degradasi Inswool (*Isolasi Wool*)

Beberapa bagian inswool menunjukkan tanda-tanda kerusakan seperti terbakar, aus, atau terkontaminasi. Penurunan kualitas isolasi ini berdampak pada efisiensi termal dan meningkatkan konsumsi energi selama proses insinerasi gas permeat.

Gambar 5. Kondisi *Inswool*3.3 *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)

Penggunaan metode ini untuk mengidentifikasi mode kegagalan, efek kegagalan, dan menentukan nilai Risk Priority Number (RPN). Efek dari mode kegagalan memiliki nilai berupa angka yang menggambarkan tingkat keparahan (*severity*), tingkat frekuensi kegagalan (*occurrence*), dan tingkat dalam mendeteksi keberadaan mode kegagalan (*detection*) [10]. Maka dari itu, didapatkan nilai RPN pada setiap *failure mode* komponen

Membrane Permeate Incinerator (MPI) dari hasil perkalian *severity*, *occurrence*, dan *detection*.

Tabel 1. Perhitungan SOD

No.	Komponen	Failure Mode	Effect of Failure	Responden 1 (Teknisi A)			Responden 2 (Teknisi B)			Responden 3 (Operator)		
				S	O	D	S	O	D	S	O	D
1	<i>Ceramic Wool</i>	Sobek, terbakar	Panas bocor, suhu casing naik, potensi <i>overheat</i>	8	7	7	7	6	6	8	5	8
2	<i>Castable Refractory</i>	Retakan struktural	Fluktuasi suhu, penurunan efisiensi bakar, risiko trip <i>burner</i>	9	6	8	9	5	8	9	4	7
		<i>Spalling</i> / serpihan lepas	Gangguan aliran gas, pengurangan volume ruang insinerasi	6	4	5	7	4	6	7	3	5
3	<i>Inswool</i> (Isolasi)	Hangus, berubah	Isolasi tidak maksimal, konsumsi energi naik, suhu casing meningkat	6	5	6	6	5	5	6	5	4

Tabel 2. Perhitungan Risk Priority Number

No.	Komponen	Failure Mode	Effect of Failure	Cause of Failure	Current Control	S	O	D	RPN
1	<i>Ceramic Wool</i>	Sobek dan terbakar	Panas bocor, suhu casing naik, potensi <i>overheat</i>	Material aus karena paparan suhu tinggi terus-menerus dan usia pakai	Visual inspection saat <i>shutdown</i> , monitoring suhu casing	8	6	7	336
2	<i>Castable Refractory</i>	Retakan struktural	Fluktuasi suhu, penurunan efisiensi bakar, risiko trip <i>burner</i>	<i>Thermal shock</i> akibat pendinginan mendadak	Monitoring suhu, inspeksi bulanan ruang bakar	9	5	8	360

No.	Komponen	Failure Mode	Effect of Failure	Cause of Failure	Current Control	S	O	D	RPN
		Spalling / serpih an lepas	Gangguan aliran gas, pengurangan volume ruang insinerasi	Degradasi akibat siklus pemanasan-dingin, getaran mekanis, material menua	Visual check saat shutdown, jadwal penggantian berkala lining	7	4	5	140
4	Inswool (Isolasi)	Hangus, berubuh warna	Isolasi tidak maksimal, konsumsi energi naik, suhu casing meningkat	Terpapar panas langsung, waktu pakai terlalu lama, kualitas insulasi menurun	Inspeksi visual saat shutdown, pengecekan ketebalan secara manual	6	5	5	150

Tabel 3. Komponen Dengan Nilai RPN Tertinggi

Function	Function Failure	Failure Mode	Failure Effect	S	O	D	RPN
Menyediakan permukaan reaksi yang stabil untuk proses pembakaran gas permeate	Ketidakmampuan menahan fluktuasi suhu operasional (thermal cycling)	Retakan struktural	Fluktuasi suhu, penurunan efisiensi bakar, risiko trip burner	9	5	8	360

3.4 Perhitungan Keandalan: MTBF & MTTR

Dalam upaya meningkatkan keandalan operasional *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) di PT Pertamina EP Cepu, analisis *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) menjadi salah satu pendekatan penting. Kedua indikator ini memberikan gambaran menyeluruh terkait performa peralatan, frekuensi kegagalan, serta efektivitas kegiatan perawatan yang telah dilakukan [11].

Berdasarkan hasil *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), terdapat tiga komponen utama yang menjadi fokus perhatian, yaitu Castable Refractory, Ceramic Wool, dan Inswool Insulation. Komponen Castable Refractory dan Ceramic Wool masuk kategori risiko sangat tinggi ($RPN > 300$) sehingga memerlukan tindakan perawatan segera. Sementara itu, Inswool Insulation berada pada kategori risiko sedang ($RPN 100-200$) dengan kebutuhan peningkatan inspeksi dan penggantian berkala.

Dengan memahami hasil perhitungan MTBF dan MTTR, perusahaan dapat menyusun strategi *Total Productive Maintenance* (TPM) yang lebih efektif, memprioritaskan sumber daya pada komponen berisiko tinggi, serta mengurangi potensi downtime tak terencana yang dapat mengganggu proses produksi maupun kepatuhan terhadap standar emisi. Berikut Perhitungan MTBF dan MTTR.

a. Rumus MTBF (*Mean Time Between Failure*)

MTBF digunakan untuk mengukur waktu rata-rata antar kegagalan. Biasanya dipakai pada sistem repairable (bisa diperbaiki) [12].

$$MTBF = \frac{\text{Total Waktu Operasi (jam)}}{\text{Jumlah Kegagalan}}$$

b. Rumus MTTR (*Mean Time to Repair*)

MTTR mengukur waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk memperbaiki kegagalan sampai mesin kembali beroperasi [13].

$$MTBF = \frac{\text{Total Downtime (jam)}}{\text{Jumlah Kegagalan}}$$

Tabel 4. Rekapitulasi Jumlah Kegagalan dan Total Downtime per Komponen

Month	Component	Start	End	Duration (hours)
2024-01	Castable Refractory	2024-01-02 15:00:00	2024-01-03 00:41:44	9,7
2024-01	Membrane Filter	2024-01-05 00:00:00	2024-01-05 01:42:25	1,71
2024-01	Membrane Filter	2024-01-06 03:00:00	2024-01-06 04:11:33	1,19
2024-01	Castable Refractory	2024-01-06 15:00:00	2024-01-07 09:46:59	18,78
2024-01	Ceramic Wool	2024-01-10 08:00:00	2024-01-10 16:42:56	8,72
2024-01	Membrane Filter	2024-01-14 10:00:00	2024-01-14 13:20:22	3,34
2024-01	Membrane Filter	2024-01-15 03:00:00	2024-01-15 06:58:08	3,97
2024-01	Membrane Filter	2024-01-16 20:00:00	2024-01-16 21:43:40	1,73
2024-01	Inswool Insulation	2024-01-18 03:00:00	2024-01-18 05:21:21	2,36
2024-01	Inswool Insulation	2024-01-19 19:00:00	2024-01-19 22:53:00	3,88
2024-01	Castable Refractory	2024-01-25 12:00:00	2024-01-25 21:00:21	9,01
2024-02	Castable Refractory	2024-02-07 02:00:00	2024-02-07 11:12:58	9,22
2024-02	Burner	2024-02-07 14:00:00	2024-02-07 14:43:33	0,73
2024-02	Ceramic Wool	2024-02-11 04:00:00	2024-02-11 12:51:03	8,85
2024-02	Ceramic Wool	2024-02-16 05:00:00	2024-02-16 10:21:41	5,36
2024-02	Castable Refractory	2024-02-17 10:00:00	2024-02-17 22:57:41	12,96
2024-03	Castable Refractory	2024-03-01 14:00:00	2024-03-01 19:02:18	5,04
2024-03	Ceramic Wool	2024-03-03 08:00:00	2024-03-03 22:42:52	14,71
2024-03	Burner	2024-03-06 09:00:00	2024-03-06 11:50:19	2,84
2024-03	Membrane Filter	2024-03-09 06:00:00	2024-03-09 09:22:38	3,38
2024-03	Castable Refractory	2024-03-11 19:00:00	2024-03-12 07:54:43	12,91
2024-03	Castable Refractory	2024-03-12 07:00:00	2024-03-13 03:25:53	20,43

2024-03	Ceramic Wool	2024-03-13 17:00:00	2024-03-14 00:57:52	7,96
2024-03	Ceramic Wool	2024-03-15 06:00:00	2024-03-15 16:18:11	10,3
2024-03	Ceramic Wool	2024-03-20 09:00:00	2024-03-20 19:56:10	10,9 4
2024-03	Ceramic Wool	2024-03-21 09:00:00	2024-03-21 18:06:43	9,11
2024-03	Membrane Filter	2024-03-21 13:00:00	2024-03-21 17:31:16	4,52
2024-03	Castable Refractory	2024-03-27 04:00:00	2024-03-27 10:41:42	6,69
2024-04	Membrane Filter	2024-04-03 10:00:00	2024-04-03 15:30:16	5,5
2024-04	Sistem Kontrol	2024-04-06 21:00:00	2024-04-06 23:33:22	2,56
2024-04	Castable Refractory	2024-04-10 06:00:00	2024-04-10 18:39:28	12,6 6
2024-04	Inswool Insulation	2024-04-13 13:00:00	2024-04-13 20:46:55	7,78
2024-04	Inswool Insulation	2024-04-14 07:00:00	2024-04-14 16:19:19	9,32
2024-04	Ceramic Wool	2024-04-14 11:00:00	2024-04-14 23:45:01	12,7 5
2024-04	Castable Refractory	2024-04-18 16:00:00	2024-04-19 07:13:45	15,2 3
2024-04	Castable Refractory	2024-04-21 06:00:00	2024-04-21 18:06:05	12,1
2024-05	Ceramic Wool	2024-05-04 04:00:00	2024-05-04 12:32:35	8,54
2024-05	Ceramic Wool	2024-05-04 16:00:00	2024-05-04 23:38:20	7,64
2024-05	Inswool Insulation	2024-05-09 05:00:00	2024-05-09 12:02:06	7,03
2024-05	Ceramic Wool	2024-05-09 14:00:00	2024-05-09 20:03:27	6,06
2024-05	Castable Refractory	2024-05-17 23:00:00	2024-05-18 10:49:02	11,8 2
2024-05	Castable Refractory	2024-05-18 02:00:00	2024-05-18 05:15:34	3,26
2024-05	Burner	2024-05-18 20:00:00	2024-05-18 23:40:40	3,68
2024-05	Castable Refractory	2024-05-23 02:00:00	2024-05-23 07:00:41	5,01
2024-05	Inswool Insulation	2024-05-24 05:00:00	2024-05-24 10:31:47	5,53
2024-05	Castable Refractory	2024-05-24 22:00:00	2024-05-25 08:21:52	10,3 6
2024-05	Inswool Insulation	2024-05-27 10:00:00	2024-05-27 16:31:13	6,52
2024-06	Ceramic Wool	2024-06-01 10:00:00	2024-06-01 16:21:11	6,35
2024-06	Ceramic Wool	2024-06-02 20:00:00	2024-06-03 01:08:34	5,14
2024-06	Burner	2024-06-06 17:00:00	2024-06-06 18:41:57	1,7
2024-06	Castable Refractory	2024-06-08 18:00:00	2024-06-09 01:00:02	7
2024-06	Ceramic Wool	2024-06-10 22:00:00	2024-06-11 05:34:51	7,58
2024-06	Castable Refractory	2024-06-13 02:00:00	2024-06-13 18:16:09	16,2 7
2024-06	Castable Refractory	2024-06-14 10:00:00	2024-06-14 18:58:36	8,98
2024-06	Sistem Kontrol	2024-06-14 12:00:00	2024-06-14 14:57:44	2,96
2024-06	Castable Refractory	2024-06-15 03:00:00	2024-06-15 09:21:09	6,35
2024-06	Inswool Insulation	2024-06-19 22:00:00	2024-06-20 04:19:08	6,32
2024-06	Ceramic Wool	2024-06-27 03:00:00	2024-06-27 16:25:04	13,4 2
2024-06	Inswool Insulation	2024-06-27 05:00:00	2024-06-27 07:14:47	2,25

Tabel 5. Hasil Perhitungan MTBF (*Mean Time Between Failure*) per Komponen

Month	Planned Time (hours)	Downtime (hours)	Operating Time (hours)	Failures
2024-01	720	64,39	655,61	11
2024-02	720	37,12	682,88	5
2024-03	720	108,83	611,17	12
2024-04	720	77,9	642,1	8
2024-05	720	75,45	644,55	11
2024-06	720	84,32	635,68	12

Tabel 6. Hasil Perhitungan MTTR (*Mean Time to Repair*) per Komponen

Component	Failures	Total Repair (hours)	MTBF (hours)	MTTR (hours)
Castable Refractory	20	213,78	216	10,69
Ceramic Wool	16	143,43	270	8,96
Inswool Insulation	9	50,99	480	5,67
Membrane Filter	8	25,34	540	3,17
Burner	4	8,95	1080	2,24
Sistem Kontrol	2	5,52	2160	2,76

Tabel 7. Rekapitulasi MTBF dan MTTR Keseluruhan MPI

Total Operating Time (hours)	Total Failures	Total Downtime (hours)	Overall MTBF (hours)	Overall MTTR (hours)
4320	59	448,01	73,22	7,59

3.4.1 Analisis MTBF (*Mean Time Between Failures*)

- Nilai MTBF rata-rata 73,22 jam menunjukkan bahwa setiap ± 3 hari sekali terjadi kegagalan. Ini berarti terjadi relatif cukup sering, menandakan sistem masih membutuhkan peningkatan keandalan.
- Per bulan, variasi MTBF terlihat jelas, yaitu pada Bulan Februari memiliki MTBF tertinggi (≈ 136 jam/failure), artinya lebih jarang terjadi kerusakan. Pada Bulan Maret memiliki MTBF terendah (≈ 51 jam/failure), artinya kerusakan lebih sering muncul.
- Fluktuasi ini bisa disebabkan oleh:
 - Kondisi operasional tertentu (misalnya beban tinggi di bulan tertentu).
 - Faktor komponen yang sudah menurun kinerjanya.
 - Pola pemeliharaan yang belum konsisten.

3.4.2 Analisis MTTR (*Mean Time to Repair*)

- a. Nilai MTTR rata-rata 7,59 jam berarti setiap kali terjadi kerusakan, butuh $\pm 7,5$ jam untuk perbaikan hingga sistem kembali beroperasi. Waktu ini relatif panjang, sehingga berpotensi mengganggu ketersediaan sistem.
- b. Variasi per bulan:
 - Bulan Februari menunjukkan MTTR relatif rendah ($\approx 7,4$ jam total downtime/5 failure = $\pm 7,42$ jam/failure).
 - Bulan Maret meskipun sering gagal, MTTR tidak meningkat signifikan (≈ 9 jam/failure).
- c. Faktor yang mungkin memengaruhi tingginya MTTR:
 - Ketersediaan spare part yang lambat.
 - Kompleksitas kerusakan (kerusakan mayor dan minor).
 - Efisiensi tim perawatan.

3.5 Penerapan *Total Productive Maintenance* (TPM)

Berdasarkan data *downtime* aktual yang telah dihitung, diperoleh nilai *Mean Time Between Failures* (MTBF) rata-rata sebesar 73,22jam. Nilai ini menunjukkan bahwa dalam kondisi operasional normal, kegagalan mesin terjadi setiap interval waktu kurang lebih 3 hari. Nilai ini masih tergolong rendah apabila dibandingkan dengan standar keandalan peralatan industri migas yang idealnya >100 jam untuk peralatan utama [14].

Selain itu, diperoleh pula nilai *Mean Time to Repair* (MTTR) rata-rata sebesar 7,59 jam. Dari kombinasi kedua nilai tersebut, tingkat ketersediaan (*availability*) peralatan tercatat sebesar 90,6%, yang masih berada di bawah standar keandalan industri migas ($\geq 95\%$). Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pemeliharaan yang berjalan saat ini masih perlu diperbaiki, baik dari sisi frekuensi perawatan maupun kecepatan perbaikan.

Untuk mengatasi permasalahan rendahnya MTBF dan tingginya MTTR, dilakukan pendekatan *Total Productive Maintenance* (TPM). TPM merupakan strategi pemeliharaan komprehensif yang bertujuan meningkatkan efektivitas peralatan dengan melibatkan seluruh komponen organisasi, mulai dari operator, teknisi, hingga manajemen [15]. Strategi implementasi TPM pada sistem peralatan dapat dibagi ke dalam tiga tahapan:

- a. Jangka Pendek (0–6 bulan):
 - Penyusunan checklist inspeksi harian bagi operator.
 - Penerapan *autonomous maintenance* dengan aktivitas pembersihan, pelumasan, dan pengecekan rutin.
- b. Jangka Menengah (6–12 bulan):
 - Perawatan preventif terjadwal berbasis data MTBF.
 - Peningkatan manajemen suku cadang agar kebutuhan spare part dapat terpenuhi tanpa keterlambatan.

- Pelatihan teknisi untuk mempercepat proses identifikasi kerusakan dan menekan MTTR.
- c. Jangka Panjang (>12 bulan):
 - Penerapan *predictive maintenance* dengan dukungan sensor monitoring kondisi (*condition-based monitoring*).
 - Evaluasi desain komponen kritis untuk mengurangi risiko kegagalan.

3.6 Rekomendasi dan Perbaikan

3.6.1 Berdasarkan Hasil FMEA

Berdasarkan hasil analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), berikut adalah strategi pengendalian risiko yang disusun sesuai Hierarki Pengendalian (dari yang paling efektif hingga tambahan), untuk meminimalkan kegagalan komponen dan meningkatkan kinerja *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) [16]:

- a. Eliminasi Risiko (Tingkat Paling Efektif)

Salah satu rekomendasi utama untuk meningkatkan keandalan *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) adalah dengan mengganti material *refractory konvensional* (seperti *Greencast 94 Plus* atau *Mizzou Castable*) dengan material *refractory* generasi terbaru berbasis *high alumina* dan *low silica phosphate bonded*, seperti *calcined bauxite*.
- b. Prosedur Administratif (*Administrative Control*)

Perawatan Rutin dan Jadwal Inspeksi Burner. Pembersihan berkala setiap 2 minggu menggunakan *high-pressure air lance* dan Inspeksi visual *burner block* serta *nozzle* untuk hindari *clogging*. Pembersihan *flaking refractory* setelah setiap *shutdown* dan Inspeksi ketebalan material dengan *ultrasonic gauge* setiap 6 bulan.

3.6.2 Berdasarkan Implementasi TPM

Dari hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa nilai MTBF yang rendah dan MTTR yang relatif tinggi menjadi indikator bahwa sistem pemeliharaan yang berjalan saat ini belum optimal. Penerapan TPM melalui pilar-pilar utamanya berpotensi untuk [17]:

- a. Meningkatkan MTBF melalui *autonomous maintenance* dan *planned maintenance*.
- b. Menurunkan MTTR dengan training teknisi, standarisasi prosedur, serta manajemen suku cadang.
- c. Mengurangi *downtime* total melalui eliminasi kegagalan berulang pada komponen kritis.

Dengan demikian, implementasi TPM secara konsisten dapat meningkatkan keandalan peralatan, menekan biaya pemeliharaan, serta mendukung keberlanjutan operasional Gas Processing Facility.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis FMEA dan perhitungan keandalan melalui MTBF dan MTTR, dapat disimpulkan bahwa penerapan konsep *Total Productive Maintenance* (TPM) pada sistem *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) memberikan gambaran yang jelas mengenai kondisi keandalan peralatan dan prioritas perawatan. Hasil FMEA menunjukkan bahwa komponen *Castable Refractory* dan *Ceramic Wool* memiliki nilai RPN > 300, yang menandakan risiko sangat tinggi terhadap terjadinya breakdown tak terencana dan potensi pelanggaran emisi. Hal ini sejalan dengan hasil perhitungan MTBF dan MTTR, di mana kedua komponen tersebut memiliki frekuensi kegagalan yang lebih tinggi dan durasi perbaikan yang relatif lama dibandingkan komponen lainnya.

Sementara itu, *Inswool Insulation* berada pada kategori risiko sedang (RPN 100–200), dengan nilai MTBF yang lebih panjang namun masih memerlukan penggantian berkala untuk menjaga kestabilan operasional. Penerapan TPM dengan pendekatan pilar *Planned Maintenance* dan *Quality Maintenance* diharapkan mampu membantu perusahaan dalam mengidentifikasi prioritas tindakan pemeliharaan preventif dan prediktif, sehingga dapat meminimalkan *downtime*, meningkatkan *availability* peralatan, dan mendukung pencapaian standar emisi.

Dengan demikian, penerapan TPM pada unit MPI ini tidak hanya berperan dalam meningkatkan keandalan peralatan (*reliability*), tetapi juga mendukung keberlanjutan operasi perusahaan melalui efisiensi biaya perawatan dan pengendalian risiko lingkungan.

Referensi

- [1] A. Purnomo and E. Sisdiyanto, “Analisis Kritis Terhadap Pendekatan Keberlanjutan Csr Pt Pertamina: Implikasi Pada Komunitas Lokal Dan Lingkungan,” *Jurnal Media Akademik (Jma)*, vol. 2, no. 12, 2024.
- [2] N. A. Hanan, R. Resnawaty, and M. Irfan, “Analisis Implementasi Program Corporate Social Responsibility Pt Pertamina Dalam Upaya Meningkatkan Kesejahteraan Masyarakat,” *Focus: Jurnal Pekerjaan Sosial*, vol. 7, no. 1, pp. 74–79, 2024.
- [3] J. A. Prasetyo and R. R. B. Chasana, “Strategi Respon Pemerintah dan PT Pertamina Dalam Krisis Kenaikan Harga Bahan Bakar Minyak (BBM) Tahun 2022: Analisis Situasional Crisis Communication Theory (SCCT),” *Prodi Ilmu Komunikasi, Fakultas Komunikasi dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Surakarta*, pp. 1–29, 2023.
- [4] M. Purwanti and Y. D. Lestari, “Praktik Pengungkapan Sustainability Report dan Environmental Incidents: Studi pada Sustainability Report Perusahaan BUMN PT. Pertamina (Persero) Tahun 2017-2018,” *Portofolio: Jurnal Ekonomi, Bisnis, Manajemen, dan Akuntansi*, vol. 18, no. 1, pp. 84–100, 2022.
- [5] J. Of, I. Health, and A. Ration, “Effectiveness of Failure Modes Effect Analysis (FMEA) to Reduce Medical Error * Putri Ingen Setiasih, ** Purnawan Junadi,” vol. 02, no. 2, pp. 25–29, 2017.
- [6] A. Setiawan et al., “Studi Kasus Analisis Defect Pada Komponen Otomotif Disertai Pemecahan Masalah Menggunakan Diagram Pareto Dan Fishbone,” *Jurnal Ilmiah Research Student*, vol. 2, no. 2, pp. 53–63, 2025.
- [7] A. N. Rouf and K. Muhammad, “Analisis Perbaikan Penulisan List of Material Program Preservasi Menggunakan Metode Root Cause Analysis (RCA) E - ISSN: 2746-0835 Volume 4 No 4 (2023) JUSTI (Jurnal Sistem Dan Teknik Industri),” *JUSTI (Jurnal Sistem Dan Teknik Industri)*, vol. 4, no. 4, pp. 452–459, 2023.
- [8] R. Sukwandi, “Analisis Perbedaan Antara Faktor – Faktor Kinerja Perusahaan Sebelum Dan Sesudah Menerapkan Strategi Total Productive Maintenance (TPM),” *Tesis*, no. 1, 2007.
- [9] S. Hidayat et al., “E -ISSN: 2746-0835 Volume 5 No 4 (2024) JUSTI (Jurnal Sistem Dan Teknik Industri) Analisis Pengendalian Kualitas Defect Produk Sandal Kulit Dengan Menggunakan Metode Failure Mode And Effect Analisis (FMEA) Dan Root Cause Analisis (RCA), Studi,” vol. 5, no. 4, 2024.
- [10] A. Dahlia and A. Profita, “Penerapan Metode FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) untuk Menganalisis Risiko Kecacatan pada Produk Plywood,” *Jurnal Teknik Industri (JATRI)*, vol. 2, no. 1, pp. 71–83, 2024.
- [11] Minto Rahayu, “Penerapan Total Productive Maintenance (TPM) untuk Meningkatkan Efektivitas Kinerja Mesin Skiving AIOH-TEC di PT. XYZ,” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, pp. 1859–1867, 2022.
- [12] R. B. Ulum, A. Widarman, A. N. Mayumi, and H. Iskandar, “Analisis Implementasi Teknis Reliability, Availability, Maintainability and Safety (Rams) Pada Resor Jalan Rel Berdasarkan Sni Iec 62278-2002 Bidang Perkeretaapian Di Stasiun Purwakarta,” *Journal of Management and Industrial Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 46–55, 2024.
- [13] W. S. Daulay and J. Theis, “Analisis Perkembangan Dan Tren Metode Analytical Hierarchy Process: Analisis Bibliometrik,” *IdeaLogist Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 95–108, 2024.
- [14] F. Fahri, B. Harahap, and S. Suliawati, “Analisis Efektivitas Preventive Maintenance dengan Metode Periodic Inspection untuk Meningkatkan Kinerja pada Unit WA800-3,” *Blend Sains Jurnal Teknik*, vol. 3, no. 3, pp. 246–267, 2025.
- [15] C. Harnawan, W. Kosasih, and H. J. Kristina, “Penerapan Total Productive Maintenance (Tpm) Dalam Meningkatkan Efektivitas Mesin Pengemas Di Perusahaan Farmasi,” *Jurnal Mitra Teknik Industri*, vol. 3, no. 3, pp. 264–274, 2025.
- [16] A. S. Utami, R. Fahmy, and Z. M. Putri, “Peran Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) terhadap Mutu Pelayanan Rumah Sakit: Systematik Review,”

- Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi, vol. 20, no. 3, p. 932, 2020.
- [17] G. Muhaemin and A. E. Nugraha, "*Penerapan Total Productive Maintenance (TPM) Pada Perawatan Mesin Cutter di PT. XYZ*," Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan, vol. 8, no. 9, pp. 205–219, 2022.