

Pendekatan OEE dan Fuzzy FMEA untuk Evaluasi Kinerja dan Analisis Risiko Membrane Permeate Incinerator (Studi Kasus: PT XYZ)

OEE and Fuzzy FMEA Approach for *Performance* Evaluation and Risk Analysis of Membrane Permeate Incinerator (Case Study: PT XYZ)

Anita Sari Al Khoirina^{*1}, Ardana Putri Farahdiansari²

^{1,2}Program Studi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Bojonegoro

ARTICLE INFO

Article history:

Diterima 17-10-2025

Diperbaiki 25-10-2025

Disetujui 15-12-2025

Kata Kunci:

Fuzzy failure mode and effect analysis; Membrane permeate incinerator; Overall equipment effectiveness; Evaluasi kinerja; Analisis Risiko

ABSTRAK

Membrane Permeate Incinerator (MPI) merupakan unit penting dalam pemrosesan gas yang berfungsi memastikan emisi buang memenuhi standar lingkungan. Gangguan operasi pada unit ini dapat menyebabkan *downtime* dan menurunkan efisiensi produksi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja MPI serta mengidentifikasi potensi kegagalan yang memengaruhi keandalannya. Metode *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) digunakan untuk menilai kinerja melalui indikator *availability*, *performance rate*, dan *performance*, sedangkan analisis risiko dilakukan menggunakan *Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis* (*Fuzzy FMEA*) untuk meminimalkan subjektivitas penilaian dan menentukan prioritas kegagalan. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan, wawancara, dan dokumentasi *downtime*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai OEE berada di bawah standar kelas dunia karena rendahnya *availability* dan *performance rate*. Analisis *Fuzzy FMEA* mengidentifikasi kegagalan kritis pada sistem pembakaran dan insulasi termal yang berdampak pada penurunan keandalan. Temuan ini menegaskan perlunya peningkatan pemeliharaan preventif dan penguatan sistem monitoring untuk mendukung efektivitas dan keberlanjutan operasi MPI.

ABSTRACT

The Membrane Permeate Incinerator (MPI) is a critical unit in gas processing that ensures exhaust emissions meet environmental standards. Operational disruptions in this unit can cause downtime and reduce production efficiency. This study aims to evaluate the *performance* of the MPI and identify potential failures that affect its reliability. The Overall Equipment Effectiveness (OEE) method is used to assess *performance* through *availability*, *performance rate*, and *performance* indicators, while risk analysis is conducted using *Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis* (*Fuzzy FMEA*) to minimize assessment subjectivity and determine failure priorities. Data were collected through field observations, interviews, and downtime documentation. The results show that the OEE value is below world-class standards due to low *availability* and *performance* rates. The *Fuzzy FMEA* analysis identified critical failures in the combustion system and thermal insulation that impact reliability degradation. These findings emphasize the need for increased preventive maintenance and strengthened monitoring systems to support the effectiveness and sustainability of MPI operations.

Keywords:

Fuzzy failure mode and effect analysis; Membrane permeate incinerators; Overall equipment effectiveness; *Performance* evaluation; Risk analysis

1. Pendahuluan

Industri minyak dan gas menuntut tingkat keandalan dan efisiensi peralatan yang tinggi untuk menjaga kontinuitas produksi, memastikan kepatuhan lingkungan, dan menjamin keselamatan operasional[1]. Salah satu unit penting dalam pemrosesan gas alam adalah *Membrane Permeate Incinerator* (MPI), yang berfungsi sebagai tahap akhir pengolahan aliran gas permeat dari sistem pemisahan membran[2]. Unit ini melakukan pembakaran termal terhadap sisa gas hidrokarbon yang tidak memenuhi spesifikasi gas jual sehingga mencegah pelepasannya secara langsung ke atmosfer[3]. Selain peran lingkungannya, MPI juga berkontribusi dalam menjaga stabilitas proses hulu, melindungi peralatan kompresi, serta mendukung upaya minimisasi *flare* sesuai praktik operasi berkelanjutan.

Meskipun memiliki fungsi yang vital, MPI kerap mengalami gangguan operasi seperti *unplanned downtime*, penurunan efisiensi pembakaran, dan degradasi komponen secara prematur. Gangguan ini berdampak pada ketidakstabilan produksi, peningkatan risiko keselamatan, serta potensi ketidakpatuhan terhadap regulasi lingkungan[4]. Di fasilitas pengolahan gas, kegagalan berulang pada MPI dikaitkan dengan tingginya biaya pemeliharaan, peningkatan emisi buang, dan penurunan efisiensi operasional yang dapat menyebabkan kerugian finansial signifikan[5]. Kondisi ini menunjukkan pentingnya dilakukan evaluasi kinerja dan analisis risiko secara sistematis untuk memastikan keandalan MPI tetap terjaga.

Berbagai studi sebelumnya telah menggunakan metode *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) untuk menilai kinerja peralatan berdasarkan indikator *availability*, *performance rate*, dan *performance rate*[6]. OEE memberikan gambaran kuantitatif mengenai efektivitas pemanfaatan peralatan, namun belum mampu mengungkap penyebab utama hilangnya kinerja maupun tingkat risiko dari setiap mode kegagalan[7]. Pada sistem dengan perilaku kegagalan yang kompleks seperti MPI, penggunaan OEE secara tunggal dinilai belum cukup untuk menghasilkan strategi perbaikan yang komprehensif[8].

Di sisi lain, metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) banyak digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan, menilai tingkat keparahan, frekuensi kejadian, serta kemampuan deteksi, sehingga menghasilkan prioritas risiko[9]. Namun, FMEA tradisional memiliki keterbatasan dalam hal subjektivitas penilaian dan kesulitan dalam menangani ketidakpastian[10]. Integrasi logika *fuzzy* ke dalam FMEA, atau yang dikenal dengan *Fuzzy FMEA*, memberikan solusi yang lebih kuat dengan memanfaatkan variabel linguistik dan bilangan *fuzzy*

untuk menghasilkan penilaian risiko yang lebih objektif dan akurat[11].

Berdasarkan keterbatasan OEE dan FMEA konvensional, penelitian ini mengintegrasikan metode OEE dan *Fuzzy FMEA* untuk menyusun kerangka evaluasi yang komprehensif dalam menilai efektivitas kinerja dan potensi risiko kegagalan pada *Membrane Permeate Incinerator* di PT XYZ. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang hanya berfokus pada pengukuran kinerja atau pemeringkatan risiko, studi ini menghubungkan hasil analisis OEE dengan temuan risiko berbasis *fuzzy* sehingga menghasilkan diagnosis keandalan MPI yang lebih menyeluruh. Nilai kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan terpadu antara analisis performa kuantitatif dan pemetaan risiko berbasis ketidakpastian, yang menghasilkan dasar perbaikan yang lebih terarah dan relevan.

Sejalan dengan itu, tujuan utama penelitian ini adalah mengidentifikasi penyebab utama kehilangan kinerja, menganalisis mode kegagalan dominan, serta merumuskan strategi perbaikan praktis untuk meningkatkan efektivitas operasi, keandalan, dan keberlanjutan jangka panjang *Membrane Permeate Incinerator* dalam operasi pemrosesan gas. Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat berupa rekomendasi peningkatan pemeliharaan preventif, penguatan sistem pemantauan, serta dasar pengambilan keputusan yang lebih tepat bagi pengelolaan keandalan peralatan kritis di industri migas.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) serta menganalisis potensi kegagalan komponen yang memengaruhi efektivitas operasinya.

2.1 Objek dan Sampel Penelitian

Objek penelitian ini adalah unit *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) yang mengalami penurunan kinerja. Sampel penelitian berupa jenis kerusakan komponen yang berdampak pada performa unit. Penilaian risiko diperoleh dari tiga responden yang memiliki pengalaman lebih dari lima tahun dan memahami operasional MPI, terdiri dari:

- Dua teknisi pemeliharaan yang menangani inspeksi dan perbaikan komponen.
- Satu operator proses yang memantau parameter dan alarm melalui sistem kontrol.

2.2 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui tiga teknik utama:

- Observasi langsung dilakukan pada sistem MPI untuk menilai kondisi fisik, perilaku pembakaran,

siklus operasi, dan kejadian waktu henti. Observasi ini penting untuk mengidentifikasi gejala kegagalan yang terlihat dan memvalidasi abnormalitas operasional.

- b. Wawancara semi-terstruktur dilakukan dengan operator dan teknisi untuk mendapatkan wawasan kualitatif mengenai riwayat kegagalan, aktivitas pemeliharaan rutin, dan penilaian ahli mengenai tingkat keparahan, kejadian, dan kemampuan deteksi kegagalan. Kombinasi perspektif manajerial dan operasional meningkatkan akurasi penilaian risiko.
- c. Tinjauan dokumen pemeliharaan, laporan waktu henti, dan catatan operasional historis diperiksa untuk melacak frekuensi kegagalan, tindakan perbaikan, dan tren kinerja peralatan secara keseluruhan. Dokumentasi ini memperkuat validitas data triangulasi.

Semua data yang dikumpulkan termasuk catatan observasi, transkrip wawancara, dan catatan pemeliharaan disusun dan diverifikasi secara sistematis sebelum dianalisis.

2.3 Metode Analisis

2.3.1 Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Metode OEE digunakan untuk mengukur kinerja peralatan secara kuantitatif[12]. OEE ditentukan dengan mengalikan tiga parameter utama, yaitu *availability*, *performance*, dan *quality*[13]. Rumusnya dituliskan sebagai berikut:

$$OEE = Availability \times Performance \times Quality \quad (1)$$

Setiap komponen dihitung berdasarkan data operasional seperti *planned production time*, durasi *downtime*, jumlah proses, dan jumlah produk reject. Hasil analisis OEE digunakan untuk mengidentifikasi sumber kerugian terbesar serta menilai apakah performa MPI telah memenuhi standar industri ideal sebesar 85%[14].

2.3.2 Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis

Penerapan FMEA pada sistem kritis bertujuan untuk menentukan prioritas perbaikan atau tindakan mitigasi berdasarkan risiko komponen[15]. Metode *Fuzzy FMEA* kemudian digunakan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan memprioritaskan mode kegagalan yang berpotensi terjadi pada sistem MPI[16]. Pendekatan ini merupakan pengembangan dari FMEA konvensional karena memasukkan logika *fuzzy* untuk mengatasi ketidakpastian dan subjektivitas[17]. Prosedur pelaksanaannya meliputi beberapa tahapan sebagai berikut:

- a. Identifikasi mode kegagalan, efek, dan penyebabnya melalui diskusi dengan responden.

- b. Pemberian skor terhadap tingkat keparahan (*severity*), peluang kejadian (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*) menggunakan variabel linguistik seperti rendah, sedang, dan tinggi.
- c. Konversi variabel linguistik tersebut ke dalam bentuk triangular *fuzzy numbers*.
- d. Penggabungan penilaian responden menggunakan prinsip logika *fuzzy* untuk memperoleh nilai teragregasi.
- e. Perhitungan *Fuzzy Risk Priority Number* (FRPN) untuk setiap mode kegagalan melalui proses inferensi dan defuzzifikasi.

Formula FRPN dinyatakan sebagai berikut:

$$FRPN = f(S, O, D) \quad (2)$$

Semakin tinggi nilai FRPN, semakin tinggi pula prioritas penanganan terhadap mode kegagalan tersebut[18]. Hasil prioritisasi ini digunakan sebagai dasar dalam penyusunan rekomendasi peningkatan efektivitas pemeliharaan.

3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 1. Data Operasional Unit MPI

No.	Bulan	Loading Time (menit)	Planned Downtime (menit)	Unplanned Downtime (menit)	Operating Time (menit)	Total Siklus Pembakaran	Ideal Cycle Time (menit)	Failed Combustion
1	Januari	44640	510	7200	36930	5129	7.2	190
2	Februari	41760	500	7480	33780	4692	7.2	195
3	Maret	44640	525	7321	36794	5110	7.2	201
4	April	43200	505	7110	35585	4942	7.2	186
5	Mei	44640	540	7428	36672	5093	7.2	240
6	Juni	43200	518	7100	35582	4942	7.2	198
7	Juli	44640	530	7368	36742	5103	7.2	235
8	Agustus	44640	540	7005	37095	5152	7.2	260
9	September	43200	480	7290	35430	4921	7.2	192
10	Oktober	44640	565	7125	36950	5132	7.2	185

Tabel 1 menyajikan data operasional Unit *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) pada fasilitas pengolahan gas selama periode Januari hingga Oktober 2024. Data tersebut mencakup beberapa parameter penting, meliputi jumlah hari kerja, waktu kerja mesin (*loading time*), *downtime* terencana untuk kegiatan pemeliharaan, *downtime* tidak terencana akibat gangguan teknis, waktu operasi efektif, jumlah siklus pembakaran, waktu siklus ideal, serta jumlah kegagalan proses pembakaran.

3.1 Penghitungan Overall Equipment Effectiveness (OEE)

3.1.1 Availability Ratio

Availability Ratio digunakan untuk mengetahui persentase waktu mesin beroperasi dibandingkan waktu operasi yang direncanakan untuk menilai efektivitas mesin[19]. Rumusnya adalah:

$$A = \frac{\text{Loading Time} - \text{Downtime}}{\text{Loading Time}} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

- Loading time* merupakan waktu operasi yang direncanakan[20]
- Downtime* merupakan waktu berhenti mesin, baik terencana maupun tidak terencana[21]

Pada Januari 2024, *downtime* tidak terencana tercatat 7.200 menit dan *loading time* sebesar 44.640 menit. Dengan demikian, nilai *Availability* dihitung sebagai berikut:

$$A = \frac{44.640 - 7.200}{44640} \times 100\% = 83,8\% \quad (4)$$

Artinya, mesin hanya mampu beroperasi 83,8% dari waktu yang seharusnya, dan kehilangan kinerja dominan berasal dari *downtime* tidak terencana.

3.1.2 Performance Ratio

Performance Ratio digunakan untuk mengukur kecepatan produksi aktual dibandingkan kecepatan ideal[19]. Rumusnya adalah:

$$P = \frac{\text{Processed Amount} \times \text{Ideal Cycle Time}}{\text{Operation Time}} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

- Processed Amount* merupakan jumlah siklus pembakaran yang diproses[21].
- Ideal Cycle Time* merupakan waktu ideal per satu siklus (7,2 menit)
- Operation Time* merupakan waktu operasi efektif mesin[20]

Pada Januari 2024, *processed amount* tercatat 5.129 siklus dan *operation time* sebesar 44.640 menit, sehingga:

$$P = \frac{5.129 \times 7,2}{44.640} \times 100\% = 82,7\% \quad (6)$$

Nilai ini menunjukkan bahwa kecepatan produksi aktual masih berada di bawah kecepatan ideal, sehingga terdapat *performance loss* yang cukup signifikan.

3.1.3 Quality Ratio

Quality Ratio digunakan untuk mengetahui persentase produk yang memenuhi standar kualitas[19]. Rumusnya adalah:

$$Q = \frac{\text{Processed Amount} - \text{Defect Amount}}{\text{Processed Amount}} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan:

- Processed Amount* merupakan total unit yang diproses

- Defect Amount* merupakan unit yang gagal atau tidak memenuhi standar[21]

Pada Januari 2024, *processed amount* adalah 5.129 dan *defect amount* 190, sehingga:

$$Q = \frac{5.129 - 190}{5.129} \times 100\% = 96,3\% \quad (8)$$

3.1.4 Substitusi OEE

OEE dihitung dengan mengalikan ketiga komponen sebelumnya, yaitu *Availability*, *Performance*, dan *Performance*:

$$OEE = \text{Availability} \times \text{Performance} \times \text{Quality} \quad (9)$$

$$OEE = 83,8\% \times 82,7\% \times 96,3\%$$

$$OEE = 0,838 \times 0,827 \times 0,963$$

$$OEE = 0,6681 \text{ atau } 66,81\%$$

Berdasarkan perhitungan, nilai OEE pada bulan Januari 2024 menunjukkan bahwa efektivitas operasi MPI berada pada level 66,81%, masih jauh di bawah standar *world class* sebesar 85%. Komponen yang paling berkontribusi terhadap rendahnya nilai OEE adalah *Availability* dan *Performance*, yang mengindikasikan tingginya *downtime* tidak terencana serta kecepatan produksi yang belum mencapai kondisi ideal.

Tabel berikut menyajikan ringkasan *availability*, *performance*, *quality ratio* dan nilai OEE dari Januari hingga Oktober:

Tabel 2. Interpretasi dan Nilai Parameter OEE

No.	Bulan	Availability	Performance	Quality Rate	OEE
1	Januari	83.87%	82.73%	96.30%	66.81%
2	Februari	82.09%	80.89%	95.84%	63.64%
3	Maret	83.60%	82.42%	96.07%	66.20%
4	April	83.54%	82.37%	96.24%	66.23%
5	Mei	83.36%	82.15%	95.29%	65.25%
6	Juni	83.56%	82.37%	95.99%	66.07%
7	Juli	83.49%	82.31%	95.39%	65.56%
8	Agustus	84.31%	83.10%	94.95%	66.52%
9	September	83.13%	82.01%	96.10%	65.51%
10	Oktober	84.04%	82.77%	96.40%	67.05%
Total		83.50%	82.31%	95.86%	65.89%

Berdasarkan perhitungan OEE untuk *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) dari Januari hingga Oktober 2024, rata-rata efektivitas mencapai 65,89%, yang masih di bawah patokan ideal sebesar 85%. Hal ini menunjukkan perlunya perbaikan yang komprehensif baik dalam aspek teknis maupun operasional. Di antara komponen OEE, *performance* menunjukkan nilai rata-rata terendah (82,31%) dibandingkan dengan *availability* (83,50%) dan *quality* (95,86%), yang menunjukkan adanya kerugian efisiensi selama operasi.

Untuk mengidentifikasi akar penyebab kinerja yang rendah, pendekatan *Fuzzy FMEA* diterapkan. Data kegagalan yang diperoleh dari observasi dan wawancara diproses melalui fungsi keanggotaan *fuzzy* untuk *Severity*, *Occurrence*, dan *Detectability*, diikuti oleh evaluasi aturan *fuzzy* IF-THEN untuk menghasilkan RPN *fuzzy*. Hasilnya kemudian didefuzzifikasi untuk mendapatkan

nilai RPN akhir yang digunakan untuk memprioritaskan tindakan perbaikan[22].

3.2 Identifikasi Komponen dan Potensi Kegagalan

Data kerusakan komponen pada *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) diperoleh melalui dua metode utama, yaitu analisis catatan *downtime* historis dan inspeksi visual langsung selama kegiatan preventive maintenance dan shutdown. Berdasarkan hasil observasi lapangan dan dokumentasi teknis, beberapa kondisi kerusakan yang berpotensi memengaruhi keandalan unit teridentifikasi sebagai berikut:

3.2.1 Kerusakan pada Ceramic Wool

Ceramic Wool menunjukkan beberapa bentuk degradasi, seperti sobekan dan penipisan lokal yang menyebabkan struktur anchor menjadi terlihat. Kondisi ini menunjukkan penurunan kemampuan isolasi termal sehingga meningkatkan risiko kebocoran panas di dalam unit MPI.



Gambar 1. Kerusakan pada ceramic wool

3.2.2 Retak pada Castable Refractory

Castable Refractory memperlihatkan retakan di beberapa bagian dinding, terutama di area sekitar burner. Retakan ini berpotensi mengurangi kekuatan struktural dan menyebabkan ketidakseimbangan temperatur selama proses pembakaran.



Gambar 2. Keretakan pada castable refractory

3.2.3 Akumulasi Material Castable Refractory

Pada bagian dasar ruang bakar ditemukan akumulasi pecahan material castable refractory. Kondisi ini mengindikasikan degradasi material akibat paparan suhu tinggi dalam jangka panjang. Penumpukan material tersebut dapat menghambat aliran gas buang dan mengurangi volume efektif ruang bakar.



Gambar 3. Adanya serpihan material castable refractory

3.2.4 Kerusakan pada Inswool

Beberapa bagian Inswool menunjukkan tanda-tanda kerusakan seperti terbakar, aus, dan terkontaminasi. Penurunan kualitas material isolasi ini berdampak pada berkurangnya efisiensi termal dan meningkatnya kebutuhan energi selama proses pembakaran gas permeate.



Gambar 4. Degradasi inswool (isolasi wool)

3.3 Penilaian Fuzzy FMEA

Untuk menganalisis lebih lanjut akar penyebab kinerja rendah, pendekatan FMEA *Fuzzy* diterapkan dengan fokus pada kegagalan komponen di *Membrane Permeate Incinerator* (MPI). Setiap responden melakukan penilaian menggunakan lembar evaluasi linguistik, memberikan skor untuk tiga parameter FMEA utama berdasarkan pengalaman mereka: *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detectability* (D). Skala linguistik yang digunakan ditunjukkan di bawah ini:

Tabel 3. Interpretasi Skala Penilaian pada Metode FMEA

Skala	Kategori	Keterangan		
		S	O	D
1-3	Rendah	Dampak Ringan	Jarang Terjadi	Mudah Dideteksi
4-6	Sedang	Dampak Sedang	Kadang Terjadi	Terdeteksi Bantuan
7-10	Tinggi	Dampak Berat	Sering Terjadi	Sulit Dideteksi

3.3.1 Hasil Penilaian Awal FMEA

Nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detectability* (D) yang diberikan responden dikonversi menjadi nilai numerik dan dirata-rata. Hasilnya disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4. Hasil Penilaian Awal FMEA oleh Responden

No.	Komponen	Failure Mode	Responden 1 (Teknisi A)			Responden 2 (Teknisi B)			Responden 3 (Operator)			Rata-Rata		
			S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D
1	Ceramic Wool	Sobek, terbakar	8	7	7	7	6	6	8	5	8	7.67	6.00	7.00
2	Castable Refractory	Retakan struktural	9	6	8	9	5	8	9	4	7	9.00	5.00	7.67
		Spalling / serpihan lepas	6	4	5	7	4	6	7	3	5	6.67	3.67	5.33
3	Inswool (Isolasi)	Hangus, berubah	6	5	6	6	5	5	6	5	4	6.00	5.00	5.00

Nilai rata-rata *Severity* (S), *Occurance* (O), dan *Detectability* (D) yang diperoleh dari konversi linguistik ke numerik kemudian digunakan sebagai masukan untuk proses evaluasi fuzzy.

3.3.2 Penerapan Fuzzy Logic

Metode fuzzy digunakan untuk mengatasi ketidakpastian dan subjektivitas penilaian manusia[23]. Setiap parameter input (S, O, D) dimodelkan sebagai fungsi keanggotaan segitiga (Trimf) pada rentang 1–100, dengan tiga kategori linguistik: *Low*, *Medium*, *High* dan Kategori trimf yang digunakan *Low* (1, 1, 4), *Medium* (2, 3, 5), *High* (6, 10, 10).



Gambar 5. Fungsi keanggotaan variabel input

Untuk variabel output berupa *Fuzzy Risk Priority Number* (FRPN), digunakan fungsi keanggotaan pada rentang 1–1000 dengan kategori yaitu *Low* (100, 100, 300), *Medium* (250, 500, 750), *High* (700, 900, 1000).



Gambar 6. Fungsi keanggotaan variabel output

3.3.3 Fuzzy Rule Base

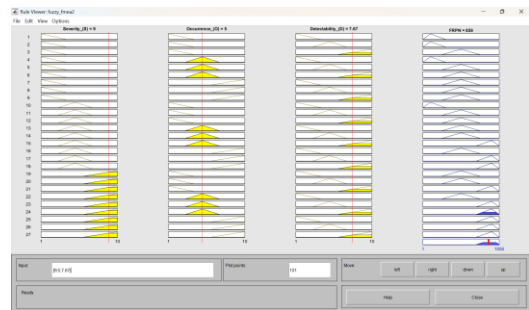
Sebanyak 27 aturan IF–THEN disusun untuk mencakup seluruh kombinasi input linguistik S, O, dan D. Rule base ini menghubungkan kondisi input terhadap estimasi nilai FRPN. Setiap aturan merepresentasikan hubungan logis antara tingkat keparahan (*Severity*), frekuensi kejadian (*Occurrence*), dan kemampuan deteksi (*Detectability*) sehingga menghasilkan prioritas risiko yang lebih akurat. Dengan demikian, Fuzzy Rule Base memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih objektif dalam menentukan tindakan mitigasi dan perbaikan pada komponen yang memiliki risiko tinggi.

3.3.4 Simulasi dan Hasil Perhitungan FRPN

Sebagai validasi model, dilakukan simulasi pada salah satu mode kegagalan, yaitu retakan struktural pada Castable Refractory. Input fuzzy yang dimasukkan berasal dari hasil rata-rata responden:

- Severity* (S) = 9.0
- Occurrence* (O) = 5.7
- Detectability* (D) = 6.7

Nilai-nilai tersebut difuzzifikasi, diproses melalui *rule base*, kemudian melalui tahap defuzzifikasi. Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 7. Proses Simulasi Inferensi Fuzzy pada Komponen Refractory

Hasil akhir menghasilkan nilai FRPN = 859, yang mengindikasikan kategori risiko tinggi. Dengan demikian, retakan struktural pada Castable Refractory merupakan kegagalan yang membutuhkan prioritas penanganan tertinggi.

3.4 Perbandingan RPN Konvensional dan FRPN

Perhitungan RPN konvensional dilakukan dengan:

$$RPN = S \times O \times D \quad (10)$$

Namun metode konvensional ini bersifat deterministik dan tidak dapat mengakomodasi ketidakpastian penilaian ahli. Sebaliknya, *Fuzzy FMEA* mengubah setiap nilai S, O, dan D ke dalam bentuk fuzzy, kemudian diproses menggunakan inferensi fuzzy sehingga menghasilkan FRPN yang lebih representatif.

Tabel 5 menunjukkan perbandingan nilai RPN dan FRPN untuk seluruh mode kegagalan.

Tabel 5. Hasil Perbandingan RPN dan Fuzzy RPN

No.	Komponen	Failure Mode	Effect of Failure	Rata-Rata			RPN	FRPN
				S	O	D		
1	Ceramic Wool	Sobek, terbakar	Panas bocor, suhu casing naik, potensi overheating	7.67	6.00	7.00	322	856
2	Castable Refractory	Retakan struktural	Fluktuasi suhu, penurunan efisiensi bakar, risiko trip burner	9.00	5.00	7.67	345	859
		Spalling / serpihan lepas	Gangguan aliran gas, pengurangan volume ruang insinerasi	6.67	3.67	5.33	130.4	631
3	Inswool (Isolasi)	Hangus, berubah	Isolasi tidak maksimal, konsumsi energi naik, suhu casing meningkat	6.00	5.00	5.00	150	500

3.5 Klasifikasi Rasio FRPN

Untuk mendukung interpretasi hasil, nilai FRPN dikelompokkan menjadi tiga kategori risiko, yaitu *low* (1–400), *medium* (401–700), dan *high* (701–1000). Berdasarkan klasifikasi ini, diperoleh temuan utama sebagai berikut:

- a. Ceramic Wool (FRPN 856 – Risiko Tinggi)
Mode kegagalan sobek dan terbakar menempatkan komponen ini pada kategori risiko tinggi. Kondisi ini umumnya dipicu oleh kurangnya penahan mekanis serta paparan aliran udara bersuhu tinggi.
- b. Castable Refractory – Retakan Struktural (FRPN 859 – Risiko Tinggi)
Nilai FRPN tertinggi menunjukkan bahwa retakan pada refractory menyebabkan penurunan kinerja insinerasi secara signifikan. Material eksisting hanya tahan hingga $\pm 700^{\circ}\text{C}$, sehingga direkomendasikan penggantian refractory berbasis calcined bauxite yang mampu bertahan hingga 1650°C dan lebih tahan terhadap thermal shock.
- c. Castable Refractory – Spalling (FRPN 631 – Risiko Sedang)
Spalling menyebabkan penyempitan ruang bakar dan gangguan aliran gas. Risiko berada pada kategori sedang, sehingga tindakan mitigasi berupa inspeksi berkala, perbaikan titik rawan, serta kontrol temperatur sudah cukup untuk menjaga keandalan.
- d. Inswool (FRPN 500 – Risiko Sedang)
Kerusakan berupa hangus atau perubahan fisik menunjukkan penurunan kualitas isolasi termal. Meskipun risikonya sedang, komponen ini tetap memerlukan evaluasi rutin dan pengendalian operasi agar tidak meningkat menjadi risiko tinggi.

4. Kesimpulan

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai OEE MPI masih berada di bawah standar ideal, terutama disebabkan oleh rendahnya nilai *availability* dan *performance*. Hal ini mengindikasikan bahwa efektivitas operasi peralatan belum optimal dan masih memerlukan peningkatan pada pengendalian *downtime* serta stabilitas proses pembakaran.

Melalui penerapan *Fuzzy FMEA*, diperoleh bahwa Castable Refractory dan Ceramic Wool merupakan komponen dengan prioritas risiko tertinggi berdasarkan nilai FRPN. Kondisi tersebut menegaskan perlunya perbaikan teknis, termasuk penggunaan material refractory dengan ketahanan panas lebih tinggi serta penguatan sistem isolasi termal untuk menekan peluang kegagalan. Temuan ini juga menunjukkan bahwa pendekatan *fuzzy* mampu memberikan gambaran risiko yang lebih representatif dibandingkan metode FMEA konvensional.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada ketergantungan terhadap penilaian subjektif teknisi, keterbatasan data operasional harian, serta penggunaan model *fuzzy* yang masih sederhana. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan data pemantauan real-time dan mengembangkan model prediktif untuk mendukung perawatan berbasis kondisi. Evaluasi jangka panjang terhadap material dan perbaikan teknis yang direkomendasikan juga diperlukan untuk memastikan peningkatan keandalan MPI secara berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT. XYZ atas kesempatan dan dukungan yang diberikan selama proses pengumpulan data dan pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada para teknisi dan operator unit *Membrane Permeate Incinerator* (MPI) yang telah menyediakan informasi teknis serta membantu dalam proses penilaian lapangan. Selain itu, penulis berterima kasih kepada dosen pembimbing dan pihak-pihak lain yang turut memberikan arahan, masukan, serta dukungan yang berharga sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Tak lupa pula terima kasih disampaikan kepada Tim JIETRI yang telah meluangkan waktu untuk menerima, menelaah, dan mereview artikel ini. Semoga seluruh tim senantiasa diberikan kesehatan, umur yang panjang, serta kelancaran rezeki.

Referensi

- [1] E. U. Olugu, K. Y. Wong, J. Y. Chung Ee, and Y. D. Mammedov, "Incorporating Sustainability and Maintenance for Performance Assessment of Offshore Oil and Gas Platforms: A Perspective," Jan. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/su14020807.
- [2] A. A. A. Latif, K. K. Lau, S. C. Low, and B. Azeem, "Multicomponent spiral wound membrane separation model for co2 removal from natural gas," *Membranes (Basel)*, vol. 11, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.3390/membranes11090654.
- [3] G. Gómez, P. Argumosa, A. Corroero, and J. Maellas, "Proposal of a new technique to obtain some fuel cell internal parameters using polarization curve tests and eis results," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 21, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14217161.
- [4] P. Kaźmierczak, K. Żywicki, and P. Rewers, "The Impact of Downtime on the Stability of the Production Schedule," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/app15010150.
- [5] J. L. Sorrels, A. Baynham, D. Randall, and C. Hancy, "Chapter 2 - Incinerators and Oxidizers," 2017.

- [6] D. Nusraningrum and E. G. Senjaya, "Over all Equipment Effectiveness (OEE) Measurement Analysis on Gas Power Plant with Analysis of Six Big Losses," 2019. [Online]. Available: www.ijbmm.com
- [7] A. Kusuma Wardhani, O. Novareza, and E. Bin Mohamad, "V06 N.2 COMBINATION OF OEE AND FMEA METHODS TO ANALYZE THE EFFECTIVENESS OF PRODUCTION MACHINES," pp. 163–175, 2025, doi: 10.21776/MECHTA.2025.006.02.1.
- [8] Y. Suwardana, Y. P. Negoro, and M. Gresik, "ANALISIS METODE OEE DAN FMEA PADA MESIN PRODUKSI DI PT. ETEX BUILDING PERFORMANCE INDONESIA ANALYSIS OF OEE AND FMEA METHODS ON PRODUCTION MACHINES AT PT. ETEX BUILDING PERFORMANCE INDONESIA," *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, vol. 8, no. 3, p. 2025.
- [9] W. Anggraini *et al.*, "Jurnal Hasil Penelitian dan Karya Ilmiah dalam Bidang Teknik Industri 86," 2020.
- [10] M. Yucesan, M. Gul, and E. Celik, "A holistic FMEA approach by fuzzy-based Bayesian network and best–worst method," *Complex and Intelligent Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 1547–1564, Jun. 2021, doi: 10.1007/s40747-021-00279-z.
- [11] L. P. S. Hartanti, J. Mulyono, and V. Mayang, "PENERAPAN FMEA DAN FUZZY FMEA DALAM PENILAIAN RISIKO LEAN WASTE DI INDUSTRI MANUFAKTUR," *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, vol. 11, no. 2, pp. 293–304, Aug. 2022, doi: 10.23887/jstundiksha.v11i2.50552.
- [12] H. H. Purba, C. Jaqin, S. Hasibuan, U. Amrina, and I. Syifaul Qulub, "Analisis Penerapan Overall Equipment Effectiveness (OEE) pada Industri Manufaktur Komponen Elektronik," *Journal of Community Services in Sustainability*, vol. 2, no. 2, pp. 18–25, Mar. 2025, doi: 10.52330/jocss.v2i2.332.
- [13] R. Dwi Putera *et al.*, "Total Productive Maintenance pada Mesin Press Paving Block: Analisis OEE, Six Big Losses, dan FMEA," *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan (JTMIT)*, vol. 4, no. 3, pp. 671–685, 2025.
- [14] S. Ariyanto and Y. Pandu Negoro, "ANALISIS OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE) DAN TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (TPM) PADA MESIN PENGUPAS KULIT PADI MERK SATAKE DI UD. SUMBER TANI," vol. 5, no. 2, 2024.
- [15] F. Muhammad, F. Suryani, T. Tamalika, R. A. N. Moulita, and D. D. Maryadi, "Aplikasi Failure Mode and Effect Analysis dan Reliability Centered Maintenance pada Preventive Maintenance Kendaraan Application of Failure Mode and Effect Analysis and Reliability Centered Maintenance in Preventive Maintenance of Vehicle." [Online]. Available: <http://jietri.univ-tridinantia.ac.id>
- [16] A. Zuniawan, "A Systematic Literature Review of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation in Industries," 2020. [Online]. Available: <http://publikasi.mercubuana.ac.id/index.php/ijiem>
- [17] A. Fiha, I. Hakim, and F. Hannadiya Lubis, "Simulation and Analysis of Production Risk Using Fuzzy Computation and FMEA Method in MATLAB," *Jurnal Riset Ilmu Teknik*, vol. 2, no. 1, pp. 13–25, May 2024, doi: 10.59976/jurit.v2i1.68.
- [18] L. P. S. Hartanti, J. Mulyono, and V. Mayang, "PENERAPAN FMEA DAN FUZZY FMEA DALAM PENILAIAN RISIKO LEAN WASTE DI INDUSTRI MANUFAKTUR," *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, vol. 11, no. 2, pp. 293–304, Aug. 2022, doi: 10.23887/jstundiksha.v11i2.50552.
- [19] H. Ariyah Jurusan Teknik Industri, F. Sains dan Teknologi, U. H. Sultan Syarif Kasim Riau Jl Soebrantas No, and S. Baru, "Penerapan Metode Overall Equipment Effectiveness (OEE) Dalam Peningkatan Efisiensi Mesin Batching Plant (Studi Kasus: PT. Lutvindo Wijaya Perkasa)," *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan (JTMIT)*, vol. 1, pp. 70–77, 2022.
- [20] A. Kurniawan, D. Emirbuwono Basuki, R. A. Apriani, B. Putri, R. Aulia, and R. N. Mukarim, "ANALISIS MENGGUNAKAN METODE OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE) UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI MESIN PENGGIILING DI PT MADU BARU ANALYSIS USING THE OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE) METHOD TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF GRINDING MACHINERY AT PT MADU BARU," *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, vol. 6, no. 2, 2023.
- [21] Mickhael Apriliano Lie, "Analisis Efektivitas Mesin Produksi Menggunakan Metode OEE pada Industri Makanan: Studi Kasus di PT 'Y,'" *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 1, May 2025, doi: 10.47134/jme.v2i1.3966.
- [22] E. Krisnaningsih, A. B. Sulisty, A. Rahim, and S. Dwiyatno, "Fuzzy risk priority number assessment to detect midsole product defects," *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri*, vol. 6, no. 1, pp. 77–88, Jun. 2022, doi: 10.30656/jsmi.v6i1.4013.
- [23] J. J. Cardiel-Ortega and R. Baeza-Serrato, "Failure Mode and Effect Analysis with a Fuzzy Logic Approach," *Systems*, vol. 11, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/systems11070348.

