

Pendekatan Berbasis Risiko dalam Pemeliharaan AHU di PT. XYZ Menggunakan Metode FMEA dan FTA

Chasandra Ramdhani^{*1)}, Nazmalila Ardy Kheisya²⁾, Dwita Suastiyanti³⁾

^{1,2,3)} Program Studi Teknik Industri Institut Teknologi Indonesia

E-mail: c_ramadhani@iti.ac.id¹⁾, ardya.kheisya@iti.c.id²⁾, dwita_suastiyanti@iti.ac.id³⁾

ABSTRAK

Air Handling Unit (AHU) merupakan komponen vital dalam sistem HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) yang berperan penting dalam menjaga kualitas udara melalui proses sirkulasi, filtrasi, pendinginan, serta pengaturan suhu dan kelembaban. Keandalan AHU sangat menentukan efektivitas sistem secara keseluruhan, sehingga diperlukan analisis risiko yang terstruktur untuk mengidentifikasi potensi kegagalan pada komponennya. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan pendekatan berbasis risiko dalam pemeliharaan AHU di PT. XYZ menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* dan *Fault Tree Analysis (FTA)*. Analisis difokuskan pada tiga mode kegagalan utama yang sering terjadi, yaitu *filter* tersumbat, *coil* bocor, dan *fan motor* rusak. Melalui metode FMEA, setiap kegagalan dianalisis berdasarkan tingkat keparahan (*severity*), frekuensi kejadian (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*) untuk menentukan nilai *Risk Priority Number (RPN)*. Nilai RPN tertinggi menunjukkan komponen dengan tingkat risiko paling kritis terhadap penurunan performa sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *fan motor* rusak memiliki nilai RPN paling tinggi dengan hasil 363,80 dibandingkan dengan *coil* bocor dan *filter* tersumbat, sehingga dikategorikan sebagai komponen paling berisiko terhadap gangguan operasional. Analisis FTA selanjutnya digunakan untuk menelusuri hubungan logis antar penyebab kegagalan. Kombinasi metode FMEA dan FTA terbukti efektif dalam mengidentifikasi prioritas risiko serta memahami struktur penyebab kegagalan pada sistem AHU di PT. XYZ..

Kata Kunci: *Air Handling Unit, Detection, Failure Mode and Effect Analysis, Fault Tree Analysis, Occurrence, Risk Priority Number, Severity.*

ABSTRACT

The Air Handling Unit (AHU) is a vital component in the HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) system that plays an essential role in maintaining air quality through circulation, filtration, cooling, and temperature and humidity control processes. The reliability of the AHU determines the overall effectiveness of the system, making a structured risk analysis necessary to identify potential component failures. This study aims to apply a risk-based approach to AHU maintenance at PT. XYZ using the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA) methods. The analysis focuses on three main failure modes: clogged filters, leaking coils, and damaged fan motors. Using FMEA, each failure is analyzed based on severity, occurrence, and detection to determine the Risk Priority Number (RPN). The highest RPN indicates the most critical risk component affecting system performance. Results show that the fan motor has the highest RPN value of 363.80 compared to the leaking coil and clogged filter, thus categorized as the component with the highest operational risk. FTA is then used to trace the logical relationship between failure causes. The combination of FMEA and FTA proves effective in identifying risk priorities and understanding the causal structure of failures in the AHU system at PT. XYZ.

Keywords: *Air Handling Unit, Detection, Failure Mode and Effect Analysis, Fault Tree Analysis, Occurrence, Risk Priority Number, Severity.*

1. PENDAHULUAN

Sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) memiliki peran penting dalam menjaga kualitas udara, suhu, dan kelembapan di lingkungan industri, terutama pada area produksi yang memerlukan kestabilan kondisi udara agar proses berjalan optimal. Salah satu komponen utama dalam sistem HVAC adalah *Air Handling Unit* (AHU), yang berfungsi untuk mensirkulasikan dan mengatur udara agar sesuai dengan kebutuhan proses produksi maupun kenyamanan operator [1]. Keandalan AHU sangat menentukan performa sistem HVAC secara keseluruhan. Namun, dalam praktiknya, AHU sering mengalami penurunan kinerja akibat faktor *filter* tersumbat, *coil* bocor, maupun *fan motor* rusak.

Pendekatan berbasis risiko dalam pemeliharaan digunakan untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan potensi kegagalan yang dapat berdampak besar terhadap keandalan sistem. Salah satu metode yang sering digunakan adalah *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), yang menganalisis setiap mode kegagalan berdasarkan tiga parameter utama, yaitu tingkat keparahan (*severity*), frekuensi kejadian (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*). Hasil dari metode ini menghasilkan *Risk Priority Number* (RPN) yang digunakan untuk menentukan prioritas tindakan pemeliharaan. Menurut Margana [2], penerapan metode FMEA pada sistem AHU terbukti efektif dalam mendukung strategi *Reliability Centered Maintenance* (RCM), karena mampu menentukan komponen yang paling kritis terhadap penurunan performa sistem.

Selain itu, metode *Fault Tree Analysis* (FTA) digunakan untuk menelusuri hubungan logis antar penyebab kegagalan agar dapat diketahui akar masalah dari suatu kegagalan sistem. Penelitian oleh Muhdor [3], menunjukkan bahwa kombinasi metode FMEA dan FTA dapat memberikan hasil analisis risiko yang lebih komprehensif dalam menentukan penyebab utama

kegagalan pada sistem mekanis. Pendekatan serupa juga digunakan oleh Erni dan Wijaya [4], yang menerapkan metode FTA untuk menganalisis faktor penyebab kecelakaan kerja di industri manufaktur, dan hasilnya menunjukkan bahwa FTA efektif dalam mengidentifikasi struktur penyebab kegagalan yang kompleks.

Dalam konteks sistem HVAC, penerapan FMEA juga telah dikaji oleh Ab Ghani [5] yang mengombinasikan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan FMEA untuk menentukan prioritas pemeliharaan pada kompresor semi-hermetik, dan hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode FMEA efektif dalam menentukan strategi pemeliharaan yang optimal untuk sistem HVAC. Sementara itu, De Fazio [6] mengembangkan penerapan FTA dalam skenario *predictive maintenance*, yang menunjukkan bahwa metode ini mampu memberikan analisis mendalam terhadap potensi kegagalan dan meningkatkan efektivitas sistem pemeliharaan berbasis prediksi.

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan pendekatan berbasis risiko dalam pemeliharaan AHU di PT. XYZ dengan menggunakan metode FMEA dan FTA. Analisis difokuskan pada tiga mode kegagalan utama yang sering terjadi, yaitu *filter* tersumbat, *coil* bocor, dan *fan motor* rusak. Melalui metode FMEA, setiap mode kegagalan dianalisis untuk menentukan nilai RPN dan mengidentifikasi komponen dengan risiko tertinggi. Selanjutnya, metode FTA digunakan untuk menganalisis hubungan logis antar penyebab kegagalan agar akar permasalahan dapat diketahui secara sistematis.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) merupakan metode analisis risiko yang digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan potensial pada suatu sistem dan mengevaluasi dampak kegagalan tersebut berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN)

yang dihitung dari tiga parameter utama, yaitu *severity* (S), *occurrence* (O), dan *detection* (D). Metode ini banyak digunakan dalam sistem pemeliharaan industri untuk menentukan prioritas risiko dan strategi perbaikan preventif maupun korektif. Menurut Pishvaei dan Pakmehr, penerapan FMEA mampu menurunkan tingkat downtime hingga 25% melalui peningkatan akurasi identifikasi mode kegagalan pada sistem pemeliharaan industri [7].

Dalam konteks sistem HVAC, FMEA telah digunakan sebagai alat pendukung pengambilan keputusan terkait strategi pemeliharaan komponen kritis. Penelitian oleh Margana et al. menunjukkan bahwa penerapan FMEA pada AHU dapat membantu menentukan komponen yang paling berisiko dan perlu mendapatkan prioritas dalam pemeliharaan berbasis keandalan [2]. Selain itu, penelitian oleh Ab Ghani et al. mengintegrasikan metode FMEA dengan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk menilai prioritas pemeliharaan kompresor pada sistem HVAC dan menunjukkan hasil yang signifikan dalam penentuan strategi perawatan sistem [5].

2.2 Fault Tree Analysis (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) merupakan metode analisis kegagalan berbasis pendekatan deduktif untuk menelusuri penyebab dasar suatu kegagalan sistem. Metode ini menggunakan diagram pohon logika yang tersusun oleh gerbang *AND* dan *OR* untuk menjelaskan hubungan antara *basic events* dan *top event*. Menurut Chen et al., FTA efektif dalam menganalisis struktur penyebab kegagalan pada sistem HVAC kompleks melalui pemetaan logika akar masalah [8].

Pendekatan FTA juga telah terbukti dapat meningkatkan efektivitas perencanaan pemeliharaan karena mampu mengidentifikasi jalur penyebab yang paling kritis. Dalam penelitian oleh Kumar et al., penerapan metode FTA pada sistem AHU digunakan sebagai dasar

pengembangan strategi predictive maintenance berbasis risiko [9]. Selain itu, De Fazio et al. menyatakan bahwa penggunaan FTA dalam skenario pemeliharaan prediktif mampu memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai struktur penyebab kegagalan sehingga dapat mendukung peningkatan keandalan sistem [6].

2.3 Integrasi FMEA dan FTA dalam Analisis Risiko

Integrasi metode FMEA dan FTA dilakukan untuk memperoleh hasil analisis risiko yang lebih komprehensif, di mana hasil FMEA—khususnya mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi—dijadikan *top event* pada analisis FTA. Integrasi ini mampu meningkatkan akurasi dalam menentukan risiko dan memahami penyebab utama kegagalan secara sistematis. Penelitian oleh Kumar et al. menyatakan bahwa kombinasi FMEA dan FTA memberikan gambaran hierarkis mengenai struktur penyebab kegagalan serta meningkatkan efektivitas analisis risiko pada sistem AHU [9].

Pendekatan serupa juga diterapkan oleh Rahman dan Abdullah, yang menyimpulkan bahwa integrasi kedua metode tersebut dapat mengoptimalkan keputusan perawatan berbasis risiko dan membantu menentukan strategi mitigasi yang tepat [10]. Temuan tersebut diperkuat oleh Singh dan Alam yang menyatakan bahwa *fan motor* merupakan komponen dengan tingkat risiko tertinggi dalam sistem HVAC karena beban mekanis dan termal yang tinggi, sehingga perlu mendapatkan perhatian khusus dalam pemeliharaan preventif [11].

3. METODE PENELITIAN

3.1 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan setiap komponen, menilai dampaknya, serta menentukan prioritas risiko

berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN). Nilai RPN dihitung berdasarkan tiga parameter, yaitu:

$$RPN = S \times O \times D$$

di mana:

- **S (Severity)** = tingkat keparahan akibat kegagalan,
- **O (Occurrence)** = frekuensi terjadinya kegagalan, dan
- **D (Detection)** = kemampuan sistem mendeteksi kegagalan.

Penelitian oleh H. R. Pishvae dan S. M. E. Pakmehr [7] menyatakan bahwa penerapan FMEA dalam sistem pemeliharaan industri mampu menurunkan downtime hingga 25% dengan identifikasi mode kegagalan yang lebih akurat.

3.2 Fault Tree Analysis (FTA)

Setelah mode kegagalan utama diidentifikasi menggunakan FMEA, tahap selanjutnya adalah analisis logika kegagalan dengan metode *Fault Tree Analysis* (FTA). FTA digunakan untuk menelusuri hubungan antara *top event* (kegagalan utama) dan *basic events* (penyebab dasar) secara deduktif.

Metode ini digambarkan dalam bentuk diagram pohon logika yang menggunakan simbol gerbang AND dan OR untuk menjelaskan hubungan sebab-akibat. Menurut penelitian oleh C. Chen et al. [8], metode FTA efektif digunakan untuk memahami interaksi antar penyebab kegagalan serta menentukan jalur penyebab yang paling kritis pada sistem HVAC kompleks.

3.3 Integrasi FMEA dan FTA dalam Analisis Risiko

Integrasi antara metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) dilakukan untuk memperoleh hasil analisis risiko yang lebih komprehensif. Proses integrasi dilakukan dengan menjadikan hasil FMEA — khususnya mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi — sebagai *top event* dalam

analisis FTA. Dengan demikian, FTA digunakan untuk menelusuri penyebab logis dari mode kegagalan yang paling kritis.

Menurut S. Kumar et al. [9], kombinasi FMEA dan FTA dapat meningkatkan akurasi identifikasi risiko karena FMEA memberikan prioritas berdasarkan tingkat risiko, sementara FTA menguraikan hubungan logis antar penyebab kegagalan. Pendekatan ini juga terbukti efektif untuk sistem HVAC yang kompleks karena mampu menampilkan struktur penyebab secara hierarkis dan kuantitatif.

Selain itu, penelitian oleh M. A. Rahman dan F. S. Abdullah [10] menegaskan bahwa integrasi kedua metode ini mampu mengoptimalkan keputusan perawatan berbasis risiko dengan memberikan gambaran menyeluruh terhadap penyebab dominan yang memicu kegagalan sistem, sehingga membantu dalam penentuan strategi mitigasi yang tepat.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

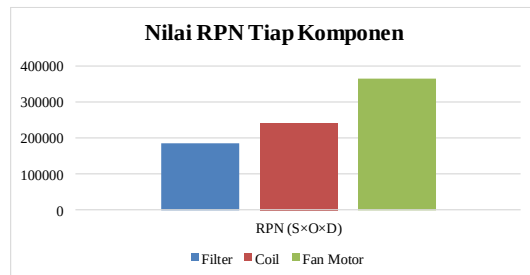
Hasil analisis risiko terhadap sistem *Air Handling Unit* (AHU) di PT. XYZ berdasarkan 30 data hasil penilaian FMEA yang dikumpulkan melalui kuesioner. Analisis ini dilakukan untuk menentukan tingkat risiko pada tiga komponen utama AHU, yaitu filter, coil, dan fan *motor*.

Penilaian menggunakan tiga parameter utama, yaitu tingkat keparahan (*Severity*), kemungkinan kejadian (*Occurrence*), dan kemampuan deteksi (*Detection*). Hasil perkalian ketiga parameter tersebut menghasilkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) yang digunakan untuk mengidentifikasi prioritas risiko komponen.

Analisis Nilai RPN Tiap Komponen:

Tabel 1. Nilai RPN Tiap Komponen

Komponen	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN (SxOxD)
Filter	59	56	56	185024
Coil	68	58	61	240584
Fan Motor	84	71	61	363804



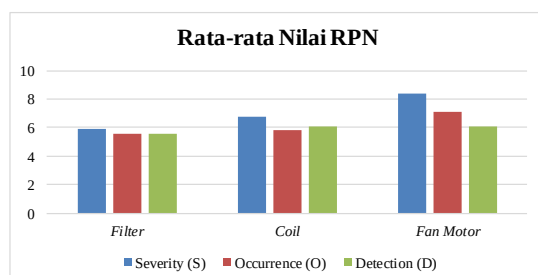
Gambar 1. Nilai RPN Tiap Komponen

Dari **Tabel 1** dan **Gambar 1**, diketahui bahwa nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi terdapat pada komponen *fan motor* dengan nilai sebesar 363.804, diikuti oleh *coil* sebesar 240.584, dan *filter* sebesar 185.024. Nilai tersebut menunjukkan bahwa *fan motor* merupakan komponen dengan tingkat risiko tertinggi terhadap gangguan operasional sistem AHU, karena memiliki nilai *severity* (84) dan *occurrence* (71) yang paling tinggi dibandingkan komponen lainnya.

Rekapitulasi Rata-rata Nilai RPN:

Table 2. Rekapitulasi Rata-rata Nilai RPN

Komponen	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN (SxOxD)
Filter	5,9	5,6	5,6	185,02
Coil	6,8	5,8	6,1	240,58
Fan Motor	8,4	7,1	6,1	363,80



Gambar 2. Rekapitulasi Rata-rata Nilai RPN

Pada **Tabel 2** dan **Gambar 2**, diperoleh bahwa komponen *fan motor* memiliki nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi yaitu sebesar 363,80, diikuti oleh *coil* sebesar 240,58, dan *filter* sebesar 185,02. Nilai ini menunjukkan bahwa *fan motor* merupakan komponen dengan tingkat risiko paling tinggi terhadap gangguan operasional sistem AHU. Hal tersebut disebabkan oleh nilai *severity* (8,4) dan *occurrence* (7,1) yang lebih besar dibandingkan dua komponen lainnya, menandakan bahwa kegagalan *fan motor* memiliki dampak signifikan terhadap performa sistem dan frekuensi kerusakannya cukup tinggi.

Pembahasan Hasil FMEA

Berdasarkan hasil perhitungan, dapat disimpulkan bahwa komponen dengan nilai RPN tertinggi adalah *fan motor*, dengan nilai rata-rata 363,80. Hal ini menunjukkan bahwa *fan motor* memiliki tingkat risiko paling tinggi terhadap kegagalan operasional AHU.

Faktor utama yang mempengaruhi tingginya nilai RPN *fan motor* meliputi:

- Tingkat keparahan (S) yang tinggi, karena kegagalan *fan motor* menyebabkan berhentinya aliran udara dalam sistem AHU.

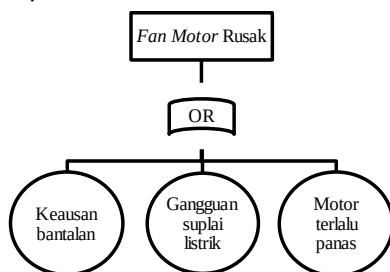
- Frekuensi kejadian (O) yang relatif sering, disebabkan oleh faktor keausan *bearing*, gangguan suplai listrik, dan *overheating*.
- Kemampuan deteksi (D) yang rendah, karena kerusakan internal sering kali baru diketahui setelah AHU gagal beroperasi.

Sebaliknya, komponen *filter* memiliki nilai RPN paling rendah 185,02, menunjukkan bahwa kegagalannya lebih mudah dideteksi dan berdampak ringan terhadap performa sistem secara keseluruhan. Sedangkan *coil* berada di tingkat risiko menengah dengan nilai rata-rata RPN 240,58.

Temuan ini konsisten dengan penelitian oleh R. K. Singh dan M. T. Alam [11], yang menyebutkan bahwa komponen fan motor pada sistem HVAC merupakan penyebab utama gangguan karena beban mekanik dan termal yang tinggi.

Pembahasan Hasil Fault Tree Analysis (FTA)

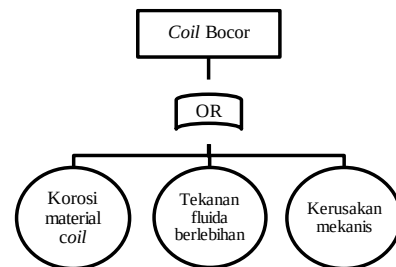
Analisis Fault Tree Analysis (FTA) digunakan untuk menelusuri penyebab dasar (*basic events*) dari setiap kegagalan utama pada sistem Air Handling Unit (AHU). Pendekatan ini membantu memahami hubungan logis antara faktor penyebab hingga terjadinya kegagalan utama (*top event*) pada tiap komponen. Hasil analisis FTA dilakukan pada tiga komponen dengan tingkat risiko tertinggi, yaitu *fan motor*, *coil*, dan *filter*.



Gambar 3. FTA *Fan Motor*

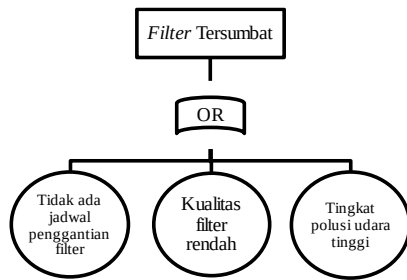
Gambar 3 menunjukkan bahwa kerusakan fan motor dapat disebabkan oleh beberapa faktor utama, yaitu keausan bantalan, gangguan suplai listrik, dan motor terlalu panas yang dihubungkan dengan gerbang OR. Artinya,

kegagalan pada salah satu faktor tersebut sudah cukup untuk menyebabkan kerusakan pada *fan motor*. Keausan bantalan terjadi akibat gesekan dan kurangnya pelumasan, gangguan suplai listrik berkaitan dengan ketidakstabilan arus daya, sedangkan *motor* terlalu panas biasanya dipicu oleh beban berlebih atau sistem pendinginan yang tidak optimal. Hasil analisis ini menegaskan bahwa *fan motor* merupakan komponen dengan risiko tinggi dan memerlukan pemeliharaan rutin untuk mencegah terjadinya kegagalan fungsi.



Gambar 4. FTA *Coil*

Gambar 4 menunjukkan bahwa kebocoran coil dapat disebabkan oleh tiga faktor utama, yaitu korosi material *coil*, tekanan fluida berlebihan, dan kerusakan mekanis, yang dihubungkan oleh gerbang OR. Artinya, terjadinya salah satu faktor tersebut sudah cukup untuk menimbulkan kebocoran pada *coil*. Korosi material biasanya muncul akibat reaksi kimia antara fluida dan permukaan logam yang tidak dilindungi dengan baik, sementara tekanan fluida berlebih dapat menyebabkan retakan atau kebocoran pada sambungan pipa. Selain itu, kerusakan mekanis juga berpotensi terjadi karena getaran berlebih atau benturan dari peralatan sekitar.



Gambar 5. FTA Filter

Gambar 5 menunjukkan kegagalan *filter* tersumbat menunjukkan bahwa kegagalan tersebut dapat disebabkan oleh tiga faktor utama, yaitu tidak ada jadwal penggantian *filter*, kualitas *filter* rendah, dan tingkat polusi udara tinggi, yang dihubungkan oleh gerbang OR. artinya, terjadinya salah satu faktor tersebut sudah cukup untuk menimbulkan penyumbatan pada *filter*. tidak adanya jadwal penggantian *filter* merupakan penyebab yang berhubungan dengan aspek pemeliharaan preventif, di mana *filter* tidak diganti sesuai *interval* waktu yang direkomendasikan sehingga akumulasi partikel mencapai batas sumbatan. sementara itu, kualitas *filter* yang rendah dapat mempercepat waktu penyumbatan karena kemampuan filtrasi material yang kurang optimal, dan tingkat polusi udara tinggi, yang merupakan faktor lingkungan eksternal, menambah beban partikel yang harus disaring oleh *unit* AHU.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) terbukti efektif dalam mengidentifikasi dan memprioritaskan risiko kegagalan pada sistem *Air Handling Unit* (AHU) di PT. XYZ. Hasil analisis menunjukkan bahwa *fan motor* merupakan komponen dengan tingkat risiko tertinggi dengan nilai RPN sebesar 363,80, sehingga menjadi komponen paling kritis yang berpotensi mengganggu operasional sistem HVAC. Temuan ini diperkuat oleh analisis FTA yang mengidentifikasi keausan bantalan,

gangguan suplai listrik, dan *overheating* sebagai penyebab utama kegagalan *fan motor*.

Berdasarkan hasil tersebut, perusahaan disarankan untuk memfokuskan strategi pemeliharaan pada peningkatan preventive maintenance secara terjadwal, penerapan sistem monitoring kondisi yang lebih akurat, serta peningkatan manajemen pelumasan dan inspeksi listrik untuk meminimalkan kegagalan komponen kritis. Untuk penelitian selanjutnya, direkomendasikan penggunaan metode tambahan seperti *Reliability Centered Maintenance* (RCM) atau *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk memperkuat penentuan prioritas pemeliharaan dan mengembangkan strategi *predictive maintenance* yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. H. Kurniawan and K. K. Ayuningtiyas, "Implementasi Reliability Centered Maintenance untuk Mengurangi Downtime Mesin pada Perusahaan Manufaktur Kertas," *Journal of Energy, Materials, & Manufacturing Technology*, vol. 2, no. 2, 2023.
- [2] A. S. Margana, W. S. Ayu, dan E. I. Khoirunnisaa, "Analisis Sistem Perawatan Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance Dengan Bantuan Failure Mode Effect Analysis Pada Air Handling Unit G4," *J. Mekanik Terapan*, vol. 5, no. 1, pp. 16–24, Apr. 2024.
- [3] M. Muhdor, H. Abdillah, dan M. Sidik, "Analisa Pemeliharaan Mesin Bubut dengan Fault Tree Analysis (FTA) dan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) di CV. Maja Teknik, Pandeglang," *J. Vocational Educ. Automotive Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 174–183, Dec. 2023.

- [4] N. Erni dan A. S. Wijaya, “Peningkatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Menggunakan Metode Fault Tree Analysis dan 5W1H pada PT. Homeware International Indonesia,” *INOVISI*, 2023.
- [5] A. F. Ab Ghani, M. A. S. Rizam, et al., “Analytical Hierarchy Process and Failure Mode and Effect Analysis on HVAC Semi-Hermetic Compressor Maintenance Strategy,” *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 32, no. 3, 2022.
- [6] R. De Fazio, S. Marrone, L. Verde, V. Reccia, dan P. Valletta, “Towards an Extension of Fault Trees in the Predictive Maintenance Scenario,” *arXiv pre-print*, Mar. 2024.
- [7] H. R. Pishvaei and S. M. E. Pakmehr, “Integrating FMEA with Risk Assessment in Industrial Maintenance Systems,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 228, pp. 108–119, 2022.
- [8] C. Chen, L. Wang, and P. Zhang, “Fault Tree Analysis Approach for Complex HVAC Failure Diagnosis,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 372–385, 2022.
- [9] S. Kumar, R. Sharma, and N. Gupta, “Risk-Based Fault Tree Approach for Predictive Maintenance of Air Handling Units,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 156, pp. 1–14, 2024.
- [10] M. A. Rahman and F. S. Abdullah, “Integration of FMEA and FTA for Risk-Based Maintenance Decision in Industrial HVAC Systems,” *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 41, no. 2, pp. 210–228, 2022.
- [11] R. K. Singh and M. T. Alam, “Fault Tree Analysis for Reliability Assessment in HVAC Systems,” *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 13, no. 3, pp. 55–67, 2023.