

ANALISIS *PREVENTIVE MAINTENANCE* PADA MESIN QUASSER MV 184 C MENGUNAKAN METODE FMEA

Kesya Naufal Danishadwa

S1 Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: kesya.22051@mhs.unesa.ac.id

Nur Aini Susanti

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: nursusanti@unesa.ac.id

Abstrak

Mesin CNC merupakan salah satu peralatan penting dalam mendukung proses produksi karena mampu menghasilkan produk dengan tingkat ketelitian dan efisiensi yang tinggi. Namun, kerusakan komponen mesin dapat menyebabkan penurunan kualitas produk, *downtime*, serta terganggunya kontinuitas produksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan pada komponen mesin CNC Quasser MV 184 C di PT. Sum Hing Indonesia, menyusun usulan *Preventive Maintenance* berdasarkan hasil analisis *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), serta menganalisis perubahan nilai *Risk Priority Number* (RPN) awal dan RPN prediksi setelah usulan *Preventive Maintenance* divalidasi. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan teknik pengumpulan data berupa observasi, wawancara, dokumentasi, dan data riwayat kerusakan mesin. Penilaian dan validasi usulan *Preventive Maintenance* melibatkan tiga responden, yaitu Kepala *Maintenance*, teknisi *Maintenance*, dan operator mesin CNC yang memiliki pengetahuan dan pengalaman terkait pengoperasian serta pemeliharaan mesin. Analisis FMEA dilakukan berdasarkan nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) untuk menghitung RPN dan menentukan prioritas pemeliharaan. Hasil penelitian menunjukkan terdapat delapan komponen yang memiliki potensi kegagalan, yaitu *Spindle*, *Oil cooler*, sistem oli dan coolant, *Pressure gauge*, *Worktable*, panel kontrol, *Indicator lamp*, dan *Magazine tool* (ATC). Nilai RPN awal berada pada rentang 100–288, dengan *Spindle* memiliki nilai tertinggi sebesar 288. Setelah penyusunan dan validasi usulan *Preventive Maintenance*, seluruh komponen menunjukkan penurunan RPN prediksi sebesar 60,00%–67,86%. Penurunan tertinggi terjadi pada *Oil cooler* dan *Magazine tool* (ATC) sebesar 67,86%, sedangkan penurunan terendah terjadi pada *Indicator lamp* sebesar 60,00%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa usulan *Preventive Maintenance* berpotensi menurunkan risiko kegagalan komponen, meskipun penurunan tersebut masih bersifat prediksi karena usulan belum diimplementasikan secara langsung.

Kata Kunci: *Failure mode and Effects Analysis*, *Preventive Maintenance*, *Risk Priority Number*, mesin CNC.

Abstract

Computer Numerical Control (CNC) machines are important equipment in supporting production processes because they are capable of producing products with high precision and efficiency. However, component failures can lead to decreased product quality, machine downtime, and disruptions to production continuity. This study aims to identify potential failures in the components of the CNC Quasser MV 184 C machine at PT. Sum Hing Indonesia, develop Preventive Maintenance recommendations based on Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), and analyze changes in the initial Risk Priority Number (RPN) and predicted RPN after the proposed Preventive Maintenance actions. This study employed a quantitative approach with a descriptive quantitative design. Data were collected through observation, interviews, documentation, and historical machine failure records. FMEA was conducted by assessing Severity (S), Occurrence (O), and Detection (D), which were then used to calculate the RPN and determine maintenance priorities. The assessment involved three respondents: the Head of Maintenance, a Maintenance Technician, and a CNC machine operator. The results identified eight components with potential failure, namely the spindle, oil cooler, oil and coolant system, pressure gauge, worktable, control panel, indicator lamp, and tool magazine (Automatic Tool Changer). The initial RPN values ranged from 100 to 288, with the spindle having the highest RPN of 288. After the Preventive Maintenance recommendations were developed and validated, all components showed a decrease in predicted RPN values, ranging from 60.00% to 67.86%. The highest reduction occurred in the oil cooler and tool magazine (Automatic Tool Changer), at 67.86%, while the lowest reduction occurred in the indicator lamp, at 60.00%. These results indicate that the proposed Preventive Maintenance actions have the potential to reduce component failure risks, although the reductions remain predictive because the recommendations have not yet been directly implemented.

Keywords: *Failure mode and Effects Analysis*, *Preventive Maintenance*, *Risk Priority Number*, CNC Machine

PENDAHULUAN

Peralatan mesin merupakan salah satu faktor penting dalam mendukung kelancaran proses produksi. Kondisi mesin yang baik dapat membantu perusahaan mempertahankan kualitas produk, meningkatkan produktivitas, serta menjaga kontinuitas proses produksi. Secara ideal, mesin produksi dapat beroperasi secara

optimal dengan gangguan dan risiko kegagalan yang minimal. Kondisi tersebut dapat didukung melalui kegiatan pemeliharaan yang terencana, sistematis, dan disesuaikan dengan kondisi serta tingkat risiko masing-masing komponen. Pemeliharaan yang tepat diharapkan mampu mencegah atau mengurangi kemungkinan terjadinya

kerusakan sehingga *downtime*, gangguan proses produksi, dan biaya pemeliharaan dapat diminimalkan.

Salah satu mesin yang digunakan dalam kegiatan produksi di PT. Sum Hing Indonesia adalah mesin CNC Quasser MV 184 C. Mesin tersebut memiliki berbagai komponen yang saling mendukung dalam proses pemesinan serta memiliki fungsi dan potensi kegagalan yang berbeda. Berdasarkan hasil observasi, wawancara, dokumentasi, dan data riwayat kerusakan mesin, masih terdapat komponen yang berpotensi mengalami kegagalan dan dapat mengganggu proses produksi apabila tidak dilakukan pemeliharaan secara tepat. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan antara kondisi ideal yang diharapkan, yaitu mesin dapat beroperasi secara optimal dengan risiko kegagalan yang minimal, dengan kondisi aktual mesin yang masih memiliki potensi dan risiko kegagalan pada beberapa komponennya. Oleh karena itu, diperlukan identifikasi terhadap potensi kegagalan serta penentuan prioritas pemeliharaan agar tindakan pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih terarah berdasarkan tingkat risiko setiap komponen.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi risiko kegagalan tersebut adalah penerapan *Preventive Maintenance*. *Preventive Maintenance* merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara terencana untuk mencegah atau mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan mesin. Penerapan *Preventive Maintenance* perlu disesuaikan dengan tingkat risiko masing-masing komponen agar kegiatan pemeliharaan dapat dilakukan secara efektif dan efisien. Oleh karena itu, diperlukan metode yang mampu mengidentifikasi potensi kegagalan serta menentukan komponen yang menjadi prioritas pemeliharaan. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), yang dapat membantu mengidentifikasi potensi kegagalan dan menentukan prioritas tindakan pemeliharaan berdasarkan tingkat risiko yang dihasilkan (Hidayatulloh & Sukmono, 2020).

FMEA digunakan untuk mengidentifikasi *failure mode*, penyebab kegagalan, dan dampak yang ditimbulkan dari kegagalan suatu komponen. Setiap potensi kegagalan dinilai berdasarkan tiga parameter, yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN) dengan persamaan $RPN = S \times O \times D$. Nilai RPN digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas pemeliharaan, di mana nilai RPN yang lebih tinggi menunjukkan tingkat risiko kegagalan yang lebih besar (Wu & Wu, 2021).

Dalam penelitian ini, analisis FMEA dilakukan terhadap delapan komponen mesin CNC Quasser MV 184 C, yaitu *Spindle*, *Oil cooler*, sistem oli dan coolant, *Pressure gauge*, *Worktable*, panel kontrol, *Indicator lamp*, dan *Magazine tool* (ATC). Pemilihan komponen tersebut didasarkan pada kondisi mesin, data riwayat kerusakan, serta hasil diskusi dengan pihak *Maintenance* mengenai komponen yang memiliki potensi mengalami masalah. Analisis dilakukan untuk mengetahui *failure mode*, penyebab, dampak, serta tingkat risiko kegagalan pada setiap komponen sebagai dasar dalam menentukan prioritas pemeliharaan.

Hasil analisis FMEA selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menyusun usulan *Preventive Maintenance*. Usulan pemeliharaan meliputi kegiatan inspeksi kondisi komponen, pelumasan, pembersihan, pemeriksaan sistem, kalibrasi, serta penggantian komponen sesuai kondisi dan umur pakai. Usulan tersebut kemudian divalidasi melalui *expert judgment* oleh Kepala *Maintenance*, Teknisi *Maintenance* dan Operator Mesin PT. Sum Hing Indonesia yang memiliki pengetahuan dan pengalaman dalam pemeliharaan mesin CNC Quasser MV 184 C. Validasi dilakukan secara kuantitatif menggunakan Aiken's V untuk mengetahui kesesuaian dan kelayakan usulan *Preventive Maintenance* berdasarkan penilaian ahli.

Setelah usulan *Preventive Maintenance* divalidasi, dilakukan perhitungan RPN prediksi untuk mengetahui potensi perubahan tingkat risiko kegagalan apabila usulan pemeliharaan diterapkan. Nilai *Occurrence* dan *Detection* disesuaikan berdasarkan pengaruh yang diperkirakan dari tindakan pemeliharaan yang diusulkan. Perbandingan antara RPN awal dan RPN prediksi digunakan untuk memberikan gambaran mengenai potensi penurunan risiko kegagalan setelah tindakan pemeliharaan direncanakan. Namun, RPN prediksi dalam penelitian ini merupakan nilai yang bersifat *prediktif* karena usulan *Preventive Maintenance* belum diimplementasikan dan diuji secara langsung pada mesin.

Penelitian terdahulu mengenai penerapan FMEA pada mesin CNC telah dilakukan untuk mengidentifikasi *failure mode* dan menentukan prioritas pemeliharaan berdasarkan nilai RPN. (Saputra & Sukmono, 2026), (Yanda & Maulana, 2023) serta (Husna & Tjaja, 2022) menerapkan FMEA untuk mengidentifikasi risiko kegagalan dan menentukan prioritas pemeliharaan pada mesin. Sementara itu, (Ivancan, 2023) mengembangkan pendekatan *fuzzy* dan *neuro-fuzzy* dalam analisis risiko kegagalan. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa FMEA dapat digunakan sebagai pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan risiko kegagalan pada komponen mesin.

Meskipun demikian, penelitian terdahulu masih memiliki keterbatasan dalam tahapan tindak lanjut hasil FMEA. Sebagian penelitian lebih berfokus pada identifikasi *failure mode* dan penentuan prioritas berdasarkan RPN awal, sehingga analisis terutama menggambarkan tingkat risiko sebelum tindakan pemeliharaan dilakukan. Selain itu, usulan tindakan pemeliharaan belum banyak disertai dengan validasi kuantitatif berdasarkan penilaian ahli untuk memastikan kesesuaiannya dengan kondisi pemeliharaan pada objek penelitian. Analisis terhadap potensi perubahan nilai RPN setelah usulan pemeliharaan juga masih terbatas, sehingga hasil FMEA belum sepenuhnya memberikan gambaran mengenai potensi perubahan tingkat risiko apabila tindakan pemeliharaan diterapkan.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi dengan mengembangkan analisis FMEA tidak hanya sampai pada identifikasi dan penentuan prioritas risiko berdasarkan RPN awal, tetapi dilanjutkan dengan penyusunan usulan *Preventive Maintenance*, validasi usulan secara kuantitatif menggunakan Aiken's V, serta perhitungan RPN prediksi. Pendekatan tersebut

memungkinkan penelitian memberikan informasi yang lebih terstruktur mengenai komponen yang menjadi prioritas, tindakan pemeliharaan yang diusulkan, tingkat kesesuaian usulan berdasarkan penilaian ahli, serta potensi perubahan tingkat risiko melalui perbandingan RPN awal dan RPN prediksi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan bahan pertimbangan yang lebih terarah bagi PT. Sum Hing Indonesia dalam menentukan prioritas *Preventive Maintenance* pada mesin CNC Quasser MV 184 C sebelum tindakan pemeliharaan diterapkan secara langsung di lapangan.

Berdasarkan permasalahan dan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan pada komponen mesin CNC Quasser MV 184 C menggunakan metode FMEA, menyusun usulan *Preventive Maintenance* berdasarkan tingkat risiko kegagalan, serta menganalisis perubahan nilai RPN awal dan RPN prediksi setelah usulan *Preventive Maintenance* divalidasi. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi perusahaan dalam menentukan prioritas pemeliharaan dan mendukung peningkatan keandalan mesin serta kontinuitas proses produksi.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil identifikasi potensi kegagalan (*failure mode*) pada komponen mesin CNC Quasser MV 184 C menggunakan metode FMEA di PT. Sum Hing Indonesia?
2. Bagaimana usulan *Preventive Maintenance* untuk mengurangi potensi kegagalan pada mesin CNC Quasser MV 184 C berdasarkan hasil analisis FMEA di PT. Sum Hing Indonesia?
3. Bagaimana perbandingan nilai *Risk Priority Number* (RPN) awal dengan nilai RPN prediksi berdasarkan penilaian (*expert judgment*) setelah disusunnya usulan *Preventive Maintenance* pada mesin CNC Quasser MV 184 C di PT. Sum Hing Indonesia?

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi potensi kegagalan (*failure mode*) pada komponen mesin CNC Quasser MV 184 C menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) di PT. Sum Hing Indonesia.
2. Memberikan usulan *Preventive Maintenance* guna mengurangi potensi kegagalan pada mesin CNC Quasser MV 184 C berdasarkan hasil analisis FMEA di PT. Sum Hing Indonesia.
3. Membandingkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) awal dengan nilai RPN prediksi berdasarkan penilaian (*expert judgment*) setelah disusunnya usulan *Preventive Maintenance* pada mesin CNC Quasser MV 184 C di PT. Sum Hing Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif. Pendekatan kuantitatif digunakan karena data penelitian berupa nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), *Detection* (D), dan *Risk Priority Number* (RPN) yang diperoleh melalui analisis menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Data tersebut disajikan dalam bentuk angka, kemudian dianalisis secara sistematis untuk mengidentifikasi tingkat risiko kegagalan pada setiap komponen mesin serta menentukan prioritas usulan *Preventive Maintenance*.

Lembar *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA).

Lembar FMEA merupakan instrumen utama yang digunakan dalam penelitian untuk mengidentifikasi potensi kegagalan, dampak kegagalan, penyebab kegagalan, serta menentukan nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). Nilai S, O, dan D kemudian digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN) sebagai dasar dalam menentukan prioritas risiko dan penyusunan usulan *Preventive Maintenance*. Penilaian *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) menggunakan skala 1–10, dengan indikator *Severity* mengacu pada tingkat keparahan dampak kegagalan terhadap fungsi mesin dan proses produksi, Skala pengukuran nilai *severity* disajikan pada tabel 1.

Tabel 1 Skala dan Kriteria Nilai *Severity* (S)

Skor	Parameter	Skala
10	Sangat Berbahaya	Mesin berhenti total, berpotensi menyebabkan kerusakan besar.
9	Sangat Tinggi	Menghentikan proses produksi dan memerlukan perbaikan segera.
8	Tinggi	Produksi terganggu dan kualitas produk menurun.
7	Cukup Tinggi	Fungsi mesin terganggu tetapi masih dapat beroperasi terbatas.
6	Sedang	Mengurangi performa mesin.
5	Agak Sedang	Gangguan ringan pada proses produksi.
4	Rendah	Dampak kecil terhadap operasi mesin.
3	Sangat Rendah	Gangguan hampir tidak memengaruhi produksi.
2	Minor	Dampak sangat kecil.
1	Tidak Ada	Tidak berdampak pada operasi mesin.

Occurrence mengacu pada frekuensi atau kemungkinan terjadinya suatu moda kegagalan. Skala penilaian *Occurrence* yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Skala dan Kriteria Nilai *Occurrence* (O)

Skor	Parameter	Skala
10	Sangat Sering	Hampir setiap hari terjadi.
9	Sangat Tinggi	Beberapa kali dalam satu minggu.
8	Tinggi	Sekitar satu kali per minggu.
7	Cukup Tinggi	Beberapa kali dalam satu bulan.
6	Sedang	Sekitar satu kali per bulan.
5	Agak Sedang	Setiap 2–3 bulan.
4	Rendah	Setiap 4–6 bulan.
3	Sangat Rendah	Sekitar satu kali per tahun.
2	Jarang	Lebih dari satu tahun sekali.
1	Hampir Tidak Pernah	Sangat kecil kemungkinan terjadi.

Detection mengacu pada kemampuan untuk mendeteksi atau mengidentifikasi suatu moda kegagalan. Skala pengukuran nilai *detection* yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Skala dan Kriteria Nilai *Detection* (D)

Skor	Parameter	Skala
10	Tidak Terdeteksi	Hampir tidak mungkin dideteksi sebelum gagal.
9	Sangat Sulit	Sangat sulit diketahui sebelum terjadi kegagalan.
8	Sulit	Membutuhkan pemeriksaan khusus.
7	Agak Sulit	Hanya dapat diketahui melalui inspeksi berkala.
6	Sedang	Dapat diketahui dengan pemeriksaan rutin.
5	Cukup Baik	Umumnya dapat dideteksi operator.
4	Baik	Mudah dideteksi saat inspeksi.
3	Sangat Baik	Cepat diketahui melalui indikator mesin.
2	Hampir Pasti	Hampir selalu terdeteksi sebelum gagal.
1	Pasti Terdeteksi	Selalu terdeteksi sebelum terjadi kegagalan.

Pemberian nilai SOD berupa skor dengan skala 1-10 yang kemudian digunakan untuk menentukan nilai RPN. Nilai RPN didapat dari hasil perkalian ketiga nilai SOD. Nilai RPN digunakan untuk mengetahui rasio prioritas dari setiap komponen. Berdasarkan nilai RPN yang didapat dari analisis terhadap FMEA dilakukan pemilihan tindakan yang efektif untuk setiap komponen mesin CNC.

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

Keterangan:

S = *Severity* dengan nilai ranging 1-10

O = *Occurrence* dengan nilai ranging 1-10

D = *Detection* dengan nilai ranging 1-10

Tabel 4 Kriteria Penilaian RPN

Nilai RPN	Kategori Risiko	Tindakan yang Disarankan
1 – 100	Rendah	Dapat diterima, pemantauan rutin
101 – 300	Sedang	Perlu perbaikan atau pemeriksaan lebih lanjut
301 – 1000	Tinggi	Segera dilakukan tindakan korektif

Validasi Usulan Preventive Maintenance

Aiken's V adalah koefisien yang digunakan untuk mengukur validitas isi (*content validity*) suatu item berdasarkan penilaian sejumlah ahli (*expert judgment/validator*). Dalam penelitian ini, Aiken's V dipakai untuk memvalidasi apakah usulan Tindakan *Preventive Maintenance* yang dihasilkan dari analisis FMEA (RPN tertinggi) benar-benar relevan, tepat, dan layak diterapkan menurut penilaian para ahli/validator. Pada penelitian ini, setiap validator memberikan penilaian terhadap setiap usulan *Preventive Maintenance* menggunakan skala penilaian 1–5, dengan kriteria:

Tabel 5 Skala dan Kriteria Nilai Aiken's V

Penilaian	Kriteria	Nilai Aikens'V
5	Sangat Sesuai	0,81-1,00
4	Sesuai	0,61-0,80
3	Cukup Sesuai	0,41-0,60
2	Tidak Sesuai	0,21-0,40
1	Sangat Tidak Sesuai	0,00

Nilai validitas setiap butir dihitung menggunakan rumus Aiken's V sebagai berikut:

$$V = \frac{\sum s}{n(c - 1)}$$

Keterangan:

s = r – lo (skor yang diberikan validator - skor terendah dalam kategori penilaian)

n = jumlah validator/rater

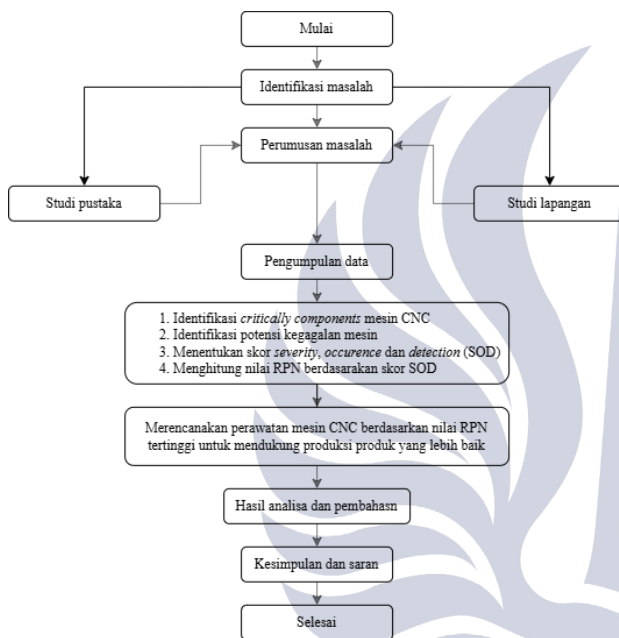
c = jumlah kategori penilaian

Subjek dan Objek Penelitian

Subjek penelitian terdiri atas tiga orang, yaitu Kepala *Maintenance*, teknisi *Maintenance*, dan operator mesin CNC di PT. Sum Hing Indonesia. Ketiganya dipilih secara *purposive* karena memiliki pengetahuan, pengalaman, dan keterlibatan langsung dalam pengoperasian maupun pemeliharaan mesin CNC Quasser MV 184 C. Kepala *Maintenance* berperan sebagai pihak yang memahami kebijakan, jadwal, dan standar pemeliharaan di perusahaan. Teknisi *Maintenance* berperan sebagai pihak yang menangani perawatan dan perbaikan komponen mesin secara langsung. Operator mesin CNC berperan sebagai pihak yang mengoperasikan mesin setiap hari sehingga mengetahui gejala awal dan kondisi kerja komponen.

Objek penelitian adalah mesin CNC Quasser MV 184 C yang digunakan dalam kegiatan produksi di PT. Sum

Hing Indonesia. Mesin ini terdiri atas berbagai komponen yang memiliki fungsi dan potensi kegagalan berbeda. Dari seluruh komponen tersebut, dipilih delapan komponen untuk dianalisis menggunakan FMEA, yaitu *Spindle*, *Oil cooler*, sistem oli dan *coolant*, *Pressure gauge*, *Worktable*, panel kontrol, *Indicator lamp*, dan *Magazine tool* (*Automatic Tool Changer/ATC*). Pemilihan komponen didasarkan pada kondisi aktual mesin, data riwayat kerusakan, serta hasil diskusi dengan pihak *Maintenance* mengenai komponen yang berpotensi mengalami masalah dan dapat mengganggu proses produksi. Pada setiap komponen dianalisis moda kegagalan, efek, penyebab, serta tingkat risiko yang dinyatakan dalam nilai RPN sebagai dasar penyusunan usulan *Preventive Maintenance*.



Gambar 1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian pada Gambar 1 digunakan sebagai acuan dalam pelaksanaan penelitian secara sistematis dan terarah. Setiap tahapan dilakukan secara berurutan sebagai berikut.

Penelitian diawali dengan identifikasi masalah, yaitu mengenali potensi kegagalan komponen pada mesin CNC Quasser MV 184 C di PT. Sum Hing Indonesia yang dapat menimbulkan penurunan kualitas produk dan *downtime*. Masalah tersebut dirumuskan pada tahap perumusan masalah, kemudian dilanjutkan dengan studi pustaka untuk memperoleh landasan teori mengenai *Preventive Maintenance*, FMEA, RPN, dan validasi *expert judgment*, serta studi lapangan untuk memahami kondisi aktual mesin dan proses pemeliharaannya.

Tahap berikutnya adalah pengumpulan data melalui observasi, wawancara dengan Kepala *Maintenance*, teknisi *Maintenance*, dan operator mesin CNC, dokumentasi, serta data riwayat kerusakan mesin. Data tersebut digunakan untuk mengidentifikasi komponen kritis mesin CNC, mengidentifikasi moda, efek, dan penyebab potensi kegagalan, menentukan skor *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) berdasarkan Tabel

1 sampai Tabel 3, dan (4) menghitung RPN awal dengan persamaan $RPN = S \times O \times D$. Nilai RPN awal kemudian dikategorikan dan diurutkan untuk menentukan komponen yang menjadi prioritas pemeliharaan.

Berdasarkan hasil FMEA tersebut, disusun usulan *Preventive Maintenance* yang meliputi inspeksi, pelumasan, pembersihan, kalibrasi, dan penggantian komponen. Usulan difokuskan pada penyebab kegagalan dengan tujuan menurunkan nilai *Occurrence* dan meningkatkan kemampuan *Detection*. Usulan tersebut selanjutnya divalidasi melalui *expert judgment* menggunakan koefisien Aiken's V.

Setelah usulan dinyatakan valid, dilakukan perhitungan RPN prediksi dengan mempertahankan nilai *Severity* karena dampak kegagalan tidak berubah, serta menyesuaikan nilai *Occurrence* dan *Detection* berdasarkan perkiraan pengaruh tindakan pemeliharaan. RPN awal dan RPN prediksi kemudian dibandingkan untuk mengetahui besar dan persentase penurunan risiko pada setiap komponen. Karena usulan belum diimplementasikan secara langsung, hasil perbandingan ini bersifat *prediktif*.

Tahap terakhir adalah analisis hasil dan pembahasan, yang kemudian dirangkum dalam kesimpulan dan saran sesuai dengan tujuan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Identifikasi Potensi Kegagalan

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi, wawancara dengan Kepala *Maintenance*, teknisi *Maintenance*, dan operator mesin CNC, dokumentasi, serta data riwayat kerusakan mesin. Data tersebut digunakan untuk mengidentifikasi kondisi, moda kegagalan, penyebab, dan dampak kegagalan sebagai dasar analisis FMEA. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh identifikasi potensi kegagalan pada komponen mesin CNC Quasser MV 184 C yang disajikan sebagai berikut:

Tabel 6 Identifikasi Moda Potensial Dari Kegagalan

No	Komponen	Mode Kegagalan Potensial
1	<i>Spindle</i>	<i>Spindle</i> mengalami <i>overheat</i> sehingga putaran tidak stabil.
2	<i>Oil cooler</i>	Kebocoran pada selang atau unit <i>Oil cooler</i> .
3	Sistem Oli dan <i>Coolant</i>	Aliran oli atau <i>Coolant</i> tersumbat sehingga pelumasan dan pendinginan tidak optimal.
4	<i>Pressure gauge</i>	<i>Pressure gauge</i> rusak sehingga pembacaan tekanan tidak akurat.
5	Meja <i>Moulding</i>	Meja mengalami <i>misalignment</i> sehingga benda kerja tidak presisi.
6	Panel kontrol	Sistem kontrol mengalami <i>error</i> atau gagal merespons perintah.
7	<i>Indicator lamp</i>	Lampu indikator menyala tidak sesuai kondisi mesin.
8	<i>Magazine tool</i>	<i>Tool</i> tidak dapat berpindah

Tabel 7 Identifikasi Efek Potensial Dari Kegagalan

No	Komponen	Efek Potensial Dari Kegagalan
1	<i>Spindle</i>	Hasil pemesinan tidak presisi.
2	<i>Oil cooler</i>	Suhu oli meningkat sehingga pelumasan menurun dan komponen cepat aus.
3	Sistem Oli dan <i>Coolant</i>	<i>Tool</i> dan <i>Spindle</i> cepat panas, menyebabkan keausan dan penurunan kualitas pemesinan.
4	<i>Pressure gauge</i>	Tekanan udara tidak terpantau dengan benar sehingga sistem <i>Pneumatik</i> bekerja tidak optimal.
5	Meja <i>Moulding</i>	Posisi benda kerja bergeser sehingga hasil pemesinan tidak sesuai spesifikasi.
6	Panel kontrol	Mesin tidak dapat menjalankan program dengan normal.
7	<i>Indicator lamp</i>	Indicator lamp tidak menunjukkan kondisi mesin sehingga gangguan terlambat diketahui.
8	<i>Magazine tool</i>	Proses pergantian <i>tool</i> gagal sehingga proses pemesinan berhenti.

Tabel 8 Identifikasi Penyebab Potensial Kegagalan

No	Komponen	Penyebab Potensial Kegagalan
1	<i>Spindle</i>	Pelumasan tidak optimal, <i>Bearing</i> aus, atau sistem pendinginan <i>Spindle</i> tidak bekerja dengan baik.
2	<i>Oil cooler</i>	Selang retak, seal aus, atau sambungan longgar akibat umur pakai.
3	Sistem Oli dan <i>Coolant</i>	Filter atau saluran tersumbat oleh kotoran, endapan, atau kurangnya perawatan.
4	<i>Pressure gauge</i>	Kerusakan mekanisme pengukur tekanan.
5	Meja <i>Moulding</i>	Benturan, beban berlebih, atau penyetakan meja yang kurang tepat.
6	Panel kontrol	Kerusakan modul kontrol, kabel longgar, atau kesalahan sistem.
7	<i>Indicator lamp</i>	Kerusakan lampu indikator, sensor, atau rangkaian kelistrikan.
8	<i>Magazine tool</i>	Sensor ATC bermasalah, mekanisme <i>Magazine</i> macet, atau kurang pelumasan pada sistem ATC.

Berdasarkan tabel di atas, setiap komponen memiliki moda, dampak, dan penyebab kegagalan yang berbeda sesuai dengan fungsinya. Informasi tersebut menjadi dasar penilaian *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) dalam analisis FMEA. Nilai S, O, dan D selanjutnya digunakan untuk menghitung Risk Priority Number (RPN) sebagai dasar penentuan prioritas Preventive Maintenance.

Berdasarkan hasil penilaian tersebut, nilai S, O, D, dan RPN awal disajikan pada tabel berikut:

Tabel 9 Analisis Nilai SOD dan RPN Awal

No	Komponen	S	O	D	RPN
1	<i>Spindle</i>	9	8	4	288
2	<i>Oil cooler</i>	8	7	4	224
3	Sistem oli dan <i>coolant</i>	8	8	4	256
4	<i>Pressure gauge</i>	7	6	4	168
5	<i>Worktable</i>	8	6	4	192
6	Panel kontrol	10	6	4	240
7	<i>Indicator lamp</i>	5	5	4	100
8	<i>Magazine tool</i>	9	7	4	252

Hasil penilaian menunjukkan bahwa nilai *Risk Priority Number* (RPN) awal berada pada rentang 100–288. *Spindle* memiliki RPN tertinggi sebesar 288 (S=9, O=8, D=4), sehingga menjadi komponen dengan prioritas utama dalam pemeliharaan. Selanjutnya, sistem oli dan *coolant* memiliki RPN sebesar 256, *Magazine tool* (ATC) sebesar 252, panel kontrol sebesar 240, *Oil cooler* sebesar 224, *Worktable* sebesar 192, *Pressure gauge* sebesar 168, dan *Indicator lamp* sebesar 100. Perbedaan nilai RPN tersebut menunjukkan adanya tingkat risiko kegagalan yang berbeda pada setiap komponen, sehingga prioritas tindakan pemeliharaan perlu disesuaikan dengan tingkat risiko masing-masing komponen.

Nilai RPN tertinggi pada *Spindle* sebesar 288 menunjukkan bahwa komponen tersebut menjadi prioritas utama *Preventive Maintenance* karena memiliki risiko kegagalan yang tinggi terhadap kestabilan putaran dan kualitas pemesinan. Nilai *Severity* 9 dan *Occurrence* 8 menunjukkan dampak serta kemungkinan kegagalan yang tinggi, sedangkan *Detection* 4 menunjukkan kegagalan masih dapat dideteksi melalui pemeriksaan tertentu. Oleh karena itu, pemeliharaan *Spindle* difokuskan pada pelumasan, pemeriksaan *bearing*, pemantauan getaran, dan sistem pendinginan untuk mengurangi risiko kegagalan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Saputra & Sukmono, 2026) yang menerapkan FMEA pada mesin CNC untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dan menentukan prioritas pemeliharaan berdasarkan nilai RPN. Komponen dengan nilai RPN lebih tinggi menunjukkan risiko kegagalan yang lebih besar sehingga memerlukan prioritas pemeliharaan. Penelitian (Sinambela dkk., 2026) juga menunjukkan bahwa analisis FMEA dapat digunakan untuk menentukan prioritas risiko kegagalan komponen yang selanjutnya menjadi dasar dalam penyusunan strategi *preventive maintenance*, seperti inspeksi berkala, pemantauan kondisi komponen, dan penggantian komponen sebelum mencapai batas umur. Pada penelitian ini, RPN awal tidak hanya digunakan untuk menentukan prioritas, tetapi juga sebagai dasar penyusunan *Preventive Maintenance* dan perhitungan RPN prediksi. Dengan demikian, hasil analisis FMEA menjadi dasar penentuan tindakan

pemeliharaan dan perkiraan perubahan tingkat risiko setelah usulan diterapkan. Pendekatan ini menghubungkan identifikasi risiko, penentuan prioritas pemeliharaan, dan potensi penurunan risiko kegagalan pada mesin CNC Quasser MV 184 C.

2. Usulan Preventive Maintenance

Berdasarkan hasil analisis FMEA, seluruh komponen memerlukan tindakan pemeliharaan untuk mengurangi risiko kegagalan. Usulan *Preventive Maintenance* difokuskan pada penurunan *Occurrence* (O) dan peningkatan kemampuan *Detection* (D), Usulan *Preventive Maintenance* berdasarkan hasil analisis FMEA disajikan sebagai berikut:

Tabel 10 Usulan *Preventive Maintenance*

No	Komponen	Usulan <i>Preventive Maintenance</i>
1	<i>Spindle</i>	Melakukan pelumasan <i>Spindle</i> sesuai jadwal, inspeksi kondisi <i>Bearing</i> dan getaran <i>Spindle</i> , serta membersihkan sistem pendinginan secara berkala.
2	<i>Oil cooler</i>	Memeriksa kebocoran pada selang dan sambungan, membersihkan radiator atau heat exchanger, serta memastikan sistem pendingin berfungsi dengan baik.
3	Sistem Oli dan <i>Coolant</i>	Memeriksa level oli dan <i>Coolant</i> , membersihkan filter serta saluran, mengganti oli dan <i>Coolant</i> sesuai jadwal, dan memastikan aliran tetap lancar.
4	Tekanan Angin	Memeriksa kondisi <i>Pressure gauge</i> , melakukan kalibrasi secara berkala, serta memeriksa kebocoran pada sistem <i>Pneumatik</i> dan tekanan kompresor.
5	Meja <i>Moulding</i>	Membersihkan permukaan meja, memeriksa kerataan (<i>alignment</i>), mengencangkan baut pengikat, dan memberikan pelumasan pada bagian yang bergerak.
6	<i>Panel kontrol</i>	Memeriksa kondisi kabel dan konektor, membersihkan panel dari debu, mengencangkan terminal listrik, serta melakukan inspeksi fungsi tombol dan sistem kontrol.
7	<i>Indicator lamp</i>	Memeriksa fungsi <i>lampu</i> indikator, mengganti <i>lampu</i> yang rusak, serta memeriksa rangkaian kelistrikan dan sensor yang terhubung dengan indikator.
8	<i>Magazine tool</i>	Membersihkan <i>Magazine tool</i> , melumasi mekanisme ATC, memeriksa sensor dan aktuator.

Berdasarkan tabel di atas, usulan *Preventive Maintenance* meliputi inspeksi rutin, pelumasan,

pembersihan, kalibrasi, dan penggantian komponen sesuai kondisi. Tindakan tersebut disusun berdasarkan *failure mode* dan penyebab kegagalan hasil analisis FMEA untuk mengurangi risiko kegagalan dan *downtime* mesin.

Pada komponen *Spindle*, usulan pemeliharaan meliputi pelumasan secara berkala, pemeriksaan kondisi *bearing*, pemeriksaan getaran, dan pembersihan sistem pendingin. Pada *Oil cooler*, tindakan yang diusulkan berupa pemeriksaan kebocoran pada selang dan sambungan, pembersihan bagian pendingin, serta pemeriksaan fungsi sistem pendingin. Sistem oli dan *coolant* dilakukan pemeriksaan level, pembersihan filter dan saluran, serta penggantian oli atau *coolant* secara berkala. Pada *Pressure gauge*, dilakukan pemeriksaan kondisi dan kalibrasi secara berkala serta pemeriksaan sistem tekanan. *Worktable* dilakukan pembersihan, pemeriksaan kesejajaran, pengencangan baut, dan pelumasan bagian yang bergerak. Pada panel kontrol dilakukan pemeriksaan kabel dan konektor, pembersihan debu, serta pemeriksaan sistem kontrol. *Indicator lamp* dilakukan pemeriksaan fungsi dan rangkaian kelistrikan serta penggantian apabila mengalami kerusakan. Sementara itu, pada *Magazine tool* (ATC) dilakukan pembersihan, pelumasan mekanisme ATC, pemeriksaan sensor dan aktuator, serta pengujian proses pergantian *tool* secara berkala.

Usulan *Preventive Maintenance* yang telah disusun selanjutnya divalidasi melalui *expert judgment* oleh Kepala *Maintenance* PT. Sum Hing Indonesia yang memiliki pengetahuan dan pengalaman dalam pemeliharaan mesin CNC Quasser MV 184 C. Validasi dilakukan untuk menilai kesesuaian dan kelayakan usulan pemeliharaan berdasarkan kondisi serta kebutuhan pemeliharaan mesin di perusahaan. Berdasarkan hasil validasi menggunakan Aiken's V, seluruh usulan *Preventive Maintenance* dinyatakan layak untuk digunakan sebagai acuan pemeliharaan preventif. Berikut tabel hasil validasi Aiken's V.

Tabel 11 Kriteria Penilaian Validasi Aiken's V

Aspek yang Dinilai	Nilai Aiken's V	Kategori
Kesesuaian usulan dengan penyebab kegagalan	0,93	Sangat Valid
Kelayakan penerapan usulan	0,91	Sangat Valid
Kemampuan usulan mengurangi kemungkinan kegagalan	0,92	Sangat Valid
Kemampuan usulan meningkatkan deteksi kegagalan	0,91	Sangat Valid
Rata-rata	0,92	Sangat Valid

Hasil validasi menunjukkan bahwa seluruh aspek memperoleh nilai *Aiken's V* di atas 0,80 sehingga usulan *Preventive Maintenance* dinilai layak berdasarkan penilaian *expert*. Penggunaan penilaian ahli dalam menentukan tindakan pemeliharaan. Hal sejalan dengan penelitian (Herdanarpati & Kurniawati, 2026) yang menggunakan penilaian dari personel berpengalaman

untuk menentukan tingkat kritis komponen dan selanjutnya menetapkan kebijakan pemeliharaan yang sesuai berdasarkan hasil analisis risiko. Dengan demikian, usulan *Preventive Maintenance* disusun berdasarkan nilai RPN dan divalidasi oleh pihak berpengalaman agar sesuai dengan kondisi komponen mesin CNC.

Berbeda dengan penelitian yang menggunakan *Aiken's V* untuk menguji validitas instrumen, penelitian ini menggunakannya untuk memvalidasi usulan *Preventive Maintenance* hasil analisis FMEA. Hasil *Aiken's V* di atas 0,80 menunjukkan bahwa seluruh usulan dinilai sesuai oleh *expert* dan dapat dilanjutkan pada perhitungan RPN prediksi. Tahapan ini menghubungkan hasil FMEA, validasi *expert*, dan prediksi perubahan risiko dalam penyusunan *Preventive Maintenance*.

3. Perbandingan RPN Awal dan RPN Prediksi

Perbandingan nilai RPN awal dan RPN prediksi dilakukan untuk mengetahui perubahan tingkat risiko kegagalan setelah usulan *Preventive Maintenance* diterapkan.

Tabel 12 Perbandingan Nilai RPN Awal Dengan RPN Prediksi

No	Komponen	RPN Awal	RPN Prediksi
1	<i>Spindle</i>	288	108
2	<i>Oil cooler</i>	224	72
3	Sistem Oli dan <i>Coolant</i>	256	96
4	Tekanan Angin	168	56
5	<i>Meja Moulding</i>	192	64
6	<i>Panel kontrol</i>	240	80
7	<i>Indicator lamp</i>	100	40
8	<i>Magazine tool</i>	252	81

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa seluruh komponen mengalami penurunan nilai RPN prediksi dibandingkan RPN awal.

Tabel 13 Persentase Penurunan Nilai RPN Awal Dengan RPN Prediksi

No	Komponen	Penurunan RPN	Penurunan (%)
1	<i>Spindle</i>	180	62,50
2	<i>Oil cooler</i>	152	67,86
3	Sistem Oli dan <i>Coolant</i>	160	62,50
4	Tekanan Angin	112	66,67
5	<i>Meja Moulding</i>	128	66,67
6	<i>Panel kontrol</i>	160	66,67
7	<i>Indicator lamp</i>	60	60,00
8	<i>Magazine tool</i>	171	67,86

Tabel tersebut menunjukkan besarnya penurunan nilai RPN dan persentase penurunan RPN pada delapan komponen mesin CNC Quasser MV 184 C setelah usulan *Preventive Maintenance* disusun. Seluruh komponen mengalami penurunan RPN sebesar 60,00%–67,86%. Penurunan terbesar secara nilai terdapat pada *Spindle*, yaitu sebesar 180 poin dengan persentase 62,50%,

sedangkan persentase penurunan tertinggi terdapat pada *Oil cooler* dan *Magazine tool* (ATC), yaitu sebesar 67,86%. Sementara itu, *Indicator lamp* memiliki persentase penurunan terendah sebesar 60,00%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa usulan *Preventive Maintenance* berpotensi menurunkan tingkat risiko kegagalan pada seluruh komponen yang dianalisis.

Temuan tersebut sejalan dengan penelitian (Nafiuddin, 2025) yang menggunakan FMEA untuk menentukan prioritas risiko dan menyusun rekomendasi perbaikan berdasarkan nilai RPN. Penelitian tersebut menghasilkan rekomendasi berupa pemeriksaan rutin dan pemeliharaan mesin pada faktor kegagalan dengan nilai RPN tinggi. Hasil tersebut juga didukung oleh (Dwianda, 2021) yang menerapkan FMEA pada sistem pneumatik mesin CNC milling untuk mengidentifikasi komponen kritis berdasarkan nilai RPN dan memberikan usulan perbaikan berupa penggantian komponen yang rusak serta optimalisasi *preventive maintenance*. Perbedaanannya, penelitian ini tidak hanya berhenti pada penentuan prioritas dan penyusunan rekomendasi berdasarkan RPN awal, tetapi juga melakukan validasi terhadap usulan *Preventive Maintenance* dan menghitung RPN prediksi setelah usulan tersebut disusun. Hasil penelitian menunjukkan penurunan RPN pada seluruh delapan komponen dengan persentase 60,00%–67,86%. Dengan demikian, penelitian ini memberikan tambahan analisis berupa perkiraan perubahan tingkat risiko yang dapat digunakan untuk melihat potensi efektivitas usulan *Preventive Maintenance* sebelum diterapkan secara langsung pada mesin.

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, analisis FMEA pada mesin CNC Quasser MV 184 C di PT. Sum Hing Indonesia mengidentifikasi delapan komponen yang memiliki potensi kegagalan, yaitu *Spindle*, *Oil cooler*, sistem oli dan *coolant*, *Pressure gauge*, *Worktable*, panel kontrol, *Indicator lamp*, dan *Magazine tool* (ATC). Setiap komponen memiliki moda, efek, dan penyebab kegagalan yang berbeda sesuai dengan fungsinya. Nilai RPN awal berada pada rentang 100–288, dengan urutan prioritas dari tertinggi ke terendah adalah *Spindle* (288), sistem oli dan *coolant* (256), *Magazine tool* (252), panel kontrol (240), *Oil cooler* (224), *Worktable* (192), *Pressure gauge* (168), dan *Indicator lamp* (100). Dengan demikian, *Spindle* menjadi komponen dengan prioritas pemeliharaan utama.

Usulan *Preventive Maintenance* disusun berdasarkan *failure mode*, penyebab kegagalan, dan tingkat risiko setiap komponen, meliputi inspeksi kondisi, pelumasan, pembersihan, kalibrasi, pemeriksaan sistem, dan penggantian komponen sesuai kondisi. Usulan difokuskan pada penurunan nilai *Occurrence* dan peningkatan kemampuan *Detection*, kemudian divalidasi melalui *expert judgment* menggunakan *Aiken's V* dengan nilai 0,91–0,93 pada seluruh aspek dan rata-rata 0,92 (kategori sangat valid), sehingga seluruh usulan dinyatakan sesuai dan layak digunakan sebagai acuan pemeliharaan preventif.

Perbandingan RPN awal dan RPN prediksi menunjukkan bahwa seluruh komponen mengalami

penurunan sebesar 60,00%–67,86%. Penurunan terbesar secara nilai terjadi pada *Spindle*, yaitu 180 poin (dari 288 menjadi 108 atau 62,50%), sedangkan persentase penurunan tertinggi terjadi pada *Oil cooler* dan *Magazine tool* (ATC) sebesar 67,86% dan yang terendah pada *Indicator lamp* sebesar 60,00%. Berdasarkan kriteria Tabel 4, tujuh komponen berada pada kategori risiko rendah setelah RPN prediksi dihitung, sedangkan *Spindle* (108) masih berada pada kategori sedang sehingga tetap memerlukan pemantauan. Hasil ini menunjukkan bahwa usulan *Preventive Maintenance* berpotensi menurunkan risiko kegagalan pada seluruh komponen yang dianalisis.

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi PT. Sum Hing Indonesia dalam menentukan prioritas pemeliharaan, menyusun tindakan *Preventive Maintenance* yang lebih terarah, serta mengurangi potensi *downtime* dan menjaga kontinuitas proses produksi. Namun, penurunan RPN yang diperoleh masih bersifat prediktif karena usulan belum diimplementasikan dan diuji secara langsung pada mesin, dan penilaian dilakukan oleh sejumlah kecil responden di satu perusahaan sehingga hasilnya belum dapat digeneralisasi.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas Negeri Surabaya dan Fakultas Teknik, serta PT. Sum Hing Indonesia, khususnya Kepala *Maintenance* dan teknisi *Maintenance*, yang telah memberikan izin, informasi, dan dukungan selama proses penelitian. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing atas arahan dan masukan dalam penyusunan penelitian ini, serta kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan hingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Dwianda, Y. (2021). Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of Pneumatic System of CNC Milling Machine. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace*, 65(1), 14–18.
- Herdanarpati, L., & Kurniawati, D. (2026). Prioritization of Drilling Machine Failure Risk with the FMEA Approach. *Jurnal Manajemen dan Teknologi Rekayasa*, 07(41), 195–204.
- Hidayatulloh, N., & Sukmono, T. (2020). Penentuan Interval Perawatan Peralatan Instrumentasi Produksi Pada Industri Kertas. *Prozima*, 4(1), 23–31.
- Husna, A., & Tjaja, A. (2022). Upaya Peningkatan Efektivitas Mesin CNC Milling Menggunakan Failure Mode and Effect Analysis. *E-Proceeding FTI*, 1(1), 1–10.
- Ivančan, J., Lisjak, D., Pavleti', D., & Kolar, D. (2023). Improvement of Failure Mode and Effects Analysis Using Fuzzy and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Machines*, 11(7), 739.
- Nafiuddin, M., & Mukhtar, M. (2025). Penerapan Metode FMEA dan RCM untuk Penjadwalan Preventive Maintenance Mesin CNC Laser Cutting. *Jurnal Manajemen dan Teknologi Rekayasa*, 4(2), 81–90.
- Saputra, A. E., & Sukmono, T. (2026). CNC Milling Maintenance Risk Prioritization Using FMEA Analysis: Penentuan Prioritas Risiko Pemeliharaan Mesin Penggilingan CNC Menggunakan Analisis FMEA. *Indonesian Journal Of Innovation Studies*, 27(1), 1–13.
- Sinambela, M., Ginting, R., & Sembiring, A. (2026). Analisis Risiko Kegagalan Komponen Mesin Screw Press Menggunakan Metode Failure Mode And Effects Analysis Sebagai Dasar Penyusunan Preventive Maintenance Pada Industri Kelapa Sawit. *Junal Ilmiah Teknik Industri Prima*, 9(2), 1026.
- Wu, X., & Wu, J. (2021). The Risk Priority Number Evaluation of FMEA Analysis Based on. *Complexity*, 8817667, 15.
- Yanda, H., & Maulana, S. (2023). Perawatan dan Analisis Kerusakan Mesin CNC Oxyfuel Cutting Koike Maxigraph D600 dengan Pendekatan Failure Mode Effect Analysis. *Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal Dan Termal*, 1(2), 1–7.