

Desain Optimasi Pemeliharaan Mesin Industri Tissue Converting dengan Metode OMMP (*Overall Measure of Maintenance Performance*) dan MQFD (*Maintenance Quality Function Deployment*) Melalui Simulasi Monte Carlo Sebagai Data Generate

Hery Setia Wardana*, Ni Luh Putu Hariastuti

Institut Teknologi Adhitama Surabaya, Indonesia

Email: herysetiawardana.92@gmail.com*, putu_hrs@itats.ac.id

Keywords:

Monte Carlo Simulation; Overall Measure of Maintenance Performance (OMMP); Maintenance Quality Function Deployment (MQFD).

Abstract

The tissue converting industry has a high level of dependence on the reliability of production machines. The high frequency of damage and downtime in Interfolder, Logsaw, and Packaging machines at PT. XYZ leads to increased maintenance costs as well as decreased production effectiveness. This study aims to design a machine maintenance optimization model through the integration of the Overall Measure of Maintenance Performance (OMMP), Maintenance Quality Function Deployment (MQFD), and Monte Carlo simulation methods. The research uses a quantitative approach with a case study on PT. XYZ Mojokerto. Monte Carlo simulations are used to generate machine failure and repair data based on the corresponding probability distribution. Furthermore, maintenance performance measurements were carried out using the Mean Time Between Failure (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR), Availability, Reliability, and Maintenance Cost Ratio (MCR) indicators integrated in the OMMP method. The results of the evaluation showed that the OMMP value of the Packaging machine was 0.550, Interfolder was 0.535, and Logsaw was 0.324, so that the Logsaw machine was the top priority for improvement. The MQFD analysis resulted in technical strategy priorities in the form of providing critical spare parts (27.6%), improving technician competence (19.2%), scheduled preventive maintenance (19.0%), preparation of maintenance SOPs (18.9%), and monitoring of engine condition (15.2%). The integration of OMMP, MQFD, and Monte Carlo simulations has been proven to be able to produce a more comprehensive maintenance model in improving machine reliability, reducing downtime, and supporting the effectiveness of the company's maintenance system.

Kata Kunci:

Simulasi Monte Carlo ; Overall Measure Of Maintenance Performance (OMMP); Maintenance Quality Function Deployment (MQFD).

Abstrak

Industri tissue converting memiliki tingkat ketergantungan yang tinggi terhadap keandalan mesin produksi. Tingginya frekuensi kerusakan dan downtime pada mesin Interfolder, Logsaw, dan Packaging di PT. XYZ menyebabkan peningkatan biaya perawatan serta penurunan efektivitas produksi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang model optimasi pemeliharaan mesin melalui integrasi metode *Overall Measure of Maintenance Performance* (OMMP), *Maintenance Quality Function Deployment* (MQFD), dan simulasi Monte Carlo. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan studi kasus pada PT. XYZ Mojokerto. Simulasi Monte Carlo digunakan untuk menghasilkan data kegagalan dan perbaikan mesin

berdasarkan distribusi probabilitas yang sesuai. Selanjutnya dilakukan pengukuran kinerja pemeliharaan menggunakan indikator *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), *Availability*, *Reliability*, dan *Maintenance Cost Ratio* (MCR) yang diintegrasikan dalam metode OMMP. Hasil evaluasi menunjukkan nilai OMMP mesin Packaging sebesar 0,550, Interfolder sebesar 0,535, dan Logsaw sebesar 0,324, sehingga mesin Logsaw menjadi prioritas utama perbaikan. Analisis MQFD menghasilkan prioritas strategi teknis berupa penyediaan *spare part* kritis (27,6%), peningkatan kompetensi teknisi (19,2%), *preventive maintenance* terjadwal (19,0%), penyusunan SOP maintenance (18,9%), dan monitoring kondisi mesin (15,2%). Integrasi OMMP, MQFD, dan simulasi Monte Carlo terbukti mampu menghasilkan model pemeliharaan yang lebih komprehensif dalam meningkatkan keandalan mesin, menurunkan *downtime*, dan mendukung efektivitas sistem maintenance perusahaan.

PENDAHULUAN

Perkembangan industri manufaktur global saat ini menuntut perusahaan untuk meningkatkan produktivitas, kualitas produk, efisiensi biaya, serta ketepatan waktu pengiriman secara berkelanjutan. Transformasi menuju industri berbasis data dan otomatisasi menyebabkan peran mesin produksi menjadi semakin strategis dalam menjaga daya saing perusahaan (Molęda et al., 2023; Anjos dos et al., 2025). Dalam lingkungan industri yang kompetitif, gangguan pada sistem produksi akibat kerusakan mesin dapat menimbulkan kerugian yang signifikan, baik dalam bentuk kehilangan output produksi, peningkatan biaya operasional, maupun penurunan kualitas produk (Moemenishahraki, 2025; Jabani et al., 2024). Oleh karena itu, sistem pemeliharaan (*maintenance system*) menjadi salah satu faktor kunci dalam menjaga keberlangsungan operasi perusahaan. Pergeseran paradigma pemeliharaan dari *corrective maintenance* menuju *predictive maintenance* menunjukkan bahwa perusahaan modern tidak lagi hanya berfokus pada perbaikan setelah terjadi kerusakan, tetapi juga pada upaya pencegahan dan peningkatan keandalan aset produksi secara berkelanjutan (Molęda et al., 2023; Tamanna & Rahman, 2022).

Salah satu sektor yang sangat bergantung pada keandalan mesin adalah industri tissue converting. Industri ini memiliki karakteristik proses produksi kontinu yang melibatkan mesin-mesin yang saling terintegrasi, seperti mesin Interfolder, Logsaw, dan Packaging. Pada sistem produksi yang bersifat sekuensial, kegagalan pada satu mesin akan mengakibatkan terhentinya seluruh aliran produksi sehingga berdampak langsung terhadap produktivitas perusahaan. Tingginya frekuensi kerusakan mesin umumnya dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti tingginya intensitas penggunaan mesin, usia peralatan, kurang optimalnya program *preventive maintenance*, keterbatasan ketersediaan suku cadang, kompetensi teknisi yang belum memadai, serta dominasi pendekatan *corrective maintenance* yang masih banyak diterapkan pada industri manufaktur (Nurhayati & Ramadhan, 2023; Moemenishahraki, 2025). Faktor-faktor tersebut menyebabkan tingkat kegagalan mesin meningkat dan mengurangi efektivitas sistem pemeliharaan yang dijalankan perusahaan.

Permasalahan sistem pemeliharaan yang belum optimal memberikan dampak yang luas terhadap kinerja perusahaan. Tingginya frekuensi kerusakan mesin akan meningkatkan *downtime* produksi, menurunkan *availability* dan *reliability* mesin, memperbesar biaya pemeliharaan, serta menyebabkan ketidakstabilan kapasitas produksi (Moemenishahraki, 2025; Sugiharto & Basuki, 2022). Selain itu, keterlambatan proses perbaikan akibat kurangnya ketersediaan suku cadang atau lambatnya respons teknisi dapat memperpanjang waktu berhenti produksi sehingga berpotensi menurunkan tingkat pelayanan kepada pelanggan. Dalam jangka panjang, kondisi tersebut dapat mengurangi daya saing perusahaan dan menimbulkan kerugian ekonomi yang cukup besar (Moemenishahraki, 2025; Jabani et al., 2024). Oleh karena itu, perusahaan membutuhkan suatu pendekatan pemeliharaan yang mampu mengevaluasi performa sistem secara menyeluruh sekaligus menghasilkan rekomendasi strategis yang dapat diterapkan secara efektif untuk meningkatkan kinerja mesin dan efisiensi operasional (Bukowski & Werbinska-Wojciechowska, 2025; Sugiharto & Basuki, 2022).

Upaya peningkatan kinerja sistem pemeliharaan memerlukan pendekatan yang tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga mampu mengintegrasikan evaluasi performa, kebutuhan pengguna mesin, serta analisis ketidakpastian yang terjadi dalam sistem produksi. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam evaluasi kinerja pemeliharaan adalah *Overall Measure of Maintenance Performance* (OMMP). Metode ini mampu mengintegrasikan berbagai indikator utama pemeliharaan seperti *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), *Availability*, *Reliability*, dan *Maintenance Cost Ratio* ke dalam satu indeks komposit yang merepresentasikan kondisi aktual sistem pemeliharaan secara menyeluruh (Sugiharto & Basuki, 2022; Mayita et al., 2024). Namun demikian, OMMP memiliki keterbatasan karena hanya menghasilkan nilai evaluasi kinerja tanpa memberikan rekomendasi teknis yang spesifik mengenai tindakan perbaikan yang harus dilakukan. Di sisi lain, *Maintenance Quality Function Deployment* (MQFD) merupakan metode yang mampu menerjemahkan kebutuhan pengguna mesin ke dalam karakteristik teknis pemeliharaan melalui pendekatan *House of Quality* (HOQ). Metode ini memungkinkan perusahaan untuk menentukan prioritas tindakan pemeliharaan yang paling sesuai dengan kebutuhan operasional dan harapan pengguna mesin (Sugiharto & Basuki, 2022; Pujitresnani et al., 2021). Akan tetapi, MQFD belum mempertimbangkan hasil evaluasi kinerja aktual sistem pemeliharaan sehingga strategi yang dihasilkan berpotensi kurang sesuai dengan kondisi nyata di lapangan.

Selain tantangan dalam evaluasi dan perancangan strategi pemeliharaan, keterbatasan data historis kerusakan dan waktu perbaikan juga menjadi kendala yang sering dihadapi perusahaan dalam pengambilan keputusan berbasis data. Data yang tidak lengkap atau tidak konsisten dapat menyebabkan hasil analisis menjadi kurang akurat (Firmansyah & Widiasih, 2023; Kosasih et al., 2021). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, simulasi Monte Carlo dapat digunakan sebagai pendekatan probabilistik yang mampu menghasilkan data berdasarkan distribusi tertentu sehingga dapat merepresentasikan kondisi sistem secara lebih realistis. Simulasi Monte Carlo telah banyak digunakan dalam analisis *reliability*, optimasi biaya pemeliharaan, serta

perencanaan *preventive maintenance* karena kemampuannya dalam memodelkan ketidakpastian dan berbagai kemungkinan kondisi operasional (Kosasih et al., 2021; Mikaeil et al., 2022). Integrasi simulasi Monte Carlo dengan OMMP dan MQFD berpotensi menghasilkan pendekatan pemeliharaan yang lebih komprehensif karena mampu menggabungkan analisis probabilistik, evaluasi kinerja, dan perancangan strategi teknis dalam satu kerangka sistematis.

Berdasarkan hasil kajian literatur, sebagian besar penelitian terdahulu masih menggunakan pendekatan yang bersifat parsial. Penelitian Sugiharto dan Basuki (2022) hanya berfokus pada evaluasi kinerja menggunakan OMMP, sedangkan Bora et al. (2023), Rizal et al. (2023), dan Pujitresnani et al. (2021) menggunakan QFD untuk menerjemahkan kebutuhan pengguna tanpa mengintegrasikan indikator performa pemeliharaan. Sementara itu, penelitian Firmansyah dan Widiasih (2023), Kosasih et al. (2021), serta Cheikh et al. (2024) memanfaatkan simulasi Monte Carlo untuk analisis *reliability* dan optimasi biaya tanpa menghubungkannya dengan kebutuhan pengguna maupun evaluasi kinerja maintenance. Dengan demikian, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) berupa belum adanya model yang mengintegrasikan simulasi Monte Carlo, OMMP, dan MQFD secara simultan untuk menghasilkan desain optimasi pemeliharaan mesin yang mampu mengevaluasi performa, mengakomodasi kebutuhan pengguna, dan mempertimbangkan ketidakpastian sistem secara bersamaan. *Novelty* penelitian ini terletak pada pengembangan model integratif yang menggabungkan ketiga metode tersebut dalam satu kerangka optimasi pemeliharaan pada industri tissue converting.

Urgensi penelitian ini didasarkan pada tingginya tingkat downtime mesin dan biaya pemeliharaan yang terjadi pada PT. XYZ Mojokerto. Data perusahaan menunjukkan bahwa selama periode Januari–Desember 2025 terjadi *downtime* sebesar 11.203 menit dengan total biaya pemeliharaan mencapai Rp474.699.608. Tingginya downtime tersebut menunjukkan bahwa sistem pemeliharaan yang diterapkan masih belum mampu mengendalikan frekuensi kerusakan mesin secara optimal. Apabila kondisi ini terus berlanjut, maka perusahaan akan menghadapi peningkatan biaya operasional, penurunan produktivitas, serta berkurangnya efektivitas proses produksi.

Oleh karena itu, diperlukan suatu model optimasi pemeliharaan yang mampu mentransformasi sistem pemeliharaan dari pendekatan reaktif menjadi proaktif melalui pendekatan yang terukur dan berbasis data. Model tersebut harus mampu mengevaluasi kinerja pemeliharaan secara komprehensif, mengidentifikasi akar penyebab permasalahan, dan menghasilkan rekomendasi strategis yang spesifik serta terukur untuk meningkatkan *reliability* dan *availability* mesin secara sistematis. Pendekatan integratif yang menggabungkan simulasi Monte Carlo, OMMP, dan MQFD menjadi solusi yang tepat karena mampu mengatasi keterbatasan data historis, mengevaluasi kinerja secara multidimensi, dan menerjemahkan kebutuhan pengguna menjadi prioritas tindakan perbaikan yang terstruktur dan berbasis bukti.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik distribusi kerusakan dan waktu perbaikan mesin menggunakan simulasi Monte Carlo, mengevaluasi kinerja sistem

pemeliharaan melalui metode *Overall Measure of Maintenance Performance* (OMMP), mengidentifikasi kebutuhan pengguna mesin menggunakan *Maintenance Quality Function Deployment* (MQFD), serta merancang model optimasi pemeliharaan berbasis integrasi ketiga metode tersebut. Melalui pendekatan ini diharapkan dapat diperoleh strategi pemeliharaan yang lebih efektif dalam meningkatkan keandalan mesin, menurunkan *downtime*, serta meningkatkan efisiensi sistem produksi pada industri tissue converting. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan manfaat teoritis maupun praktis. Secara teoritis, penelitian ini dapat memperkaya kajian ilmiah mengenai integrasi metode OMMP, MQFD, dan simulasi Monte Carlo dalam bidang manajemen pemeliharaan mesin. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi referensi bagi pengembangan model optimasi pemeliharaan yang lebih komprehensif pada sektor manufaktur. Secara praktis, hasil penelitian dapat digunakan oleh perusahaan sebagai dasar dalam merancang kebijakan maintenance yang lebih efektif, menentukan prioritas tindakan pemeliharaan, meningkatkan kesiapan operasional mesin, mengurangi biaya pemeliharaan, serta mendukung keberlangsungan proses produksi secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis penelitian deskriptif analitis. Pendekatan tersebut dipilih karena penelitian berfokus pada pengukuran kondisi aktual sistem pemeliharaan mesin, identifikasi faktor-faktor yang memengaruhi kinerja pemeliharaan, serta perancangan strategi perbaikan yang dapat diterapkan pada lingkungan industri manufaktur. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan fenomena yang terjadi pada sistem pemeliharaan perusahaan secara faktual dan sistematis, sedangkan pendekatan analitis digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara kondisi operasional mesin, tingkat kerusakan, *downtime*, biaya perawatan, dan kebutuhan pengguna mesin sebagai dasar dalam penyusunan strategi optimasi pemeliharaan.

Penelitian ini dirancang untuk menghasilkan rekomendasi perbaikan sistem pemeliharaan yang tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis mesin, tetapi juga memperhatikan kebutuhan pengguna, efektivitas operasional, dan efisiensi biaya pemeliharaan. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan mampu memberikan solusi yang lebih komprehensif terhadap permasalahan *downtime* dan tingginya frekuensi kerusakan mesin yang terjadi pada perusahaan manufaktur.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada PT. XYZ yang merupakan perusahaan manufaktur yang bergerak di bidang tissue converting dan berlokasi di Mojokerto, Jawa Timur. Pemilihan lokasi penelitian dilakukan secara *purposive* karena perusahaan memiliki karakteristik sistem produksi kontinu yang sangat bergantung pada performa mesin produksi. Selain itu, perusahaan menghadapi permasalahan berupa tingginya frekuensi kerusakan mesin, *downtime* produksi, dan biaya pemeliharaan yang relatif besar sehingga relevan dengan tujuan penelitian yang dilakukan.

Pelaksanaan penelitian dilakukan selama enam bulan, dimulai dari tahap identifikasi permasalahan, pengumpulan data, pengolahan data, analisis hasil, hingga penyusunan rekomendasi perbaikan sistem pemeliharaan. Rentang waktu tersebut dianggap memadai untuk memperoleh data yang representatif mengenai kondisi operasional mesin serta memungkinkan proses verifikasi data melalui observasi langsung dan diskusi dengan pihak.

Objek Penelitian

Objek penelitian difokuskan pada sistem pemeliharaan mesin yang digunakan pada lini produksi tissue converting. Mesin yang menjadi fokus penelitian meliputi mesin Interfolder, Logsaw, dan Packaging. Ketiga mesin tersebut dipilih karena merupakan mesin utama yang menentukan kelancaran proses produksi dan memiliki kontribusi terbesar terhadap tingkat downtime perusahaan. Pada penelitian oleh Moemenishahraki, (2025) menyimpulkan bahwa Kerusakan yang terjadi pada salah satu mesin dapat mengakibatkan terhentinya seluruh rangkaian proses produksi sehingga berdampak langsung terhadap produktivitas perusahaan.

Pemilihan objek penelitian juga didasarkan pada data historis perusahaan yang menunjukkan bahwa ketiga mesin tersebut memiliki frekuensi kerusakan dan biaya pemeliharaan yang cukup tinggi selama periode pengamatan. Oleh karena itu, analisis terhadap sistem pemeliharaan mesin tersebut dianggap mampu memberikan gambaran yang representatif mengenai kondisi aktual manajemen pemeliharaan pada perusahaan.

Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi penelitian terdiri atas seluruh data aktivitas pemeliharaan mesin pada lini produksi tissue converting PT. XYZ selama periode Januari hingga Desember 2025. Data tersebut meliputi frekuensi kerusakan mesin, *downtime* produksi, waktu perbaikan, biaya pemeliharaan, serta informasi terkait aktivitas operasional yang berhubungan dengan sistem maintenance perusahaan.

Sampel penelitian ditentukan menggunakan teknik *purposive sampling* dengan mempertimbangkan relevansi data terhadap tujuan penelitian. Sampel yang digunakan meliputi data kerusakan dan perbaikan pada mesin Interfolder, Logsaw, dan Packaging selama satu tahun pengamatan. Selain data operasional, penelitian juga melibatkan lima orang responden yang dipilih berdasarkan kompetensi dan keterlibatannya dalam aktivitas pemeliharaan, yaitu satu orang kepala maintenance, satu orang supervisor produksi, satu orang teknisi senior, dan dua orang operator mesin. Pemilihan responden dilakukan untuk memperoleh informasi yang akurat mengenai kebutuhan pengguna mesin dan kondisi aktual sistem pemeliharaan perusahaan.

Secara keseluruhan, penelitian memanfaatkan 157 data kejadian kerusakan mesin yang terjadi pada tiga mesin utama selama satu tahun pengamatan. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi pola kerusakan mesin, mengevaluasi kinerja pemeliharaan, serta merancang strategi optimasi sistem maintenance yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Sumber dan Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis sumber data, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung melalui observasi lapangan, wawancara mendalam, dan diskusi dengan pihak yang terlibat dalam aktivitas pemeliharaan mesin. Data primer digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan pengguna mesin, kendala yang dihadapi dalam proses maintenance, serta harapan terhadap sistem pemeliharaan yang lebih efektif (Bora et al., 2023; Chandrahadinata & Raihandika, 2025).

Data sekunder diperoleh dari dokumen perusahaan yang terhadap aktivitas pemeliharaan mesin untuk memperoleh meliputi laporan kerusakan mesin, *downtime* produksi, waktu perbaikan, biaya pemeliharaan, jadwal maintenance, dan laporan produksi selama periode penelitian. Data tersebut digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual sistem pemeliharaan dan menjadi dasar dalam penyusunan rekomendasi perbaikan yang berbasis data (Firmansyah & Wideasih, 2023; Kosasih et al., 2021).

Pengumpulan data dilakukan melalui tiga teknik utama. Pertama, observasi langsung pemahaman mengenai kondisi operasional dan prosedur maintenance yang diterapkan perusahaan. Kedua, wawancara semi terstruktur dengan pihak yang terlibat dalam proses maintenance guna memperoleh informasi mengenai permasalahan yang dihadapi dan kebutuhan pengguna mesin. Ketiga, studi dokumentasi terhadap laporan historis perusahaan yang berkaitan dengan kerusakan mesin dan aktivitas pemeliharaan (Nurhayati & Ramadhan, 2023; Żyluk et al., 2025).

Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan terdiri atas lembar observasi, pedoman wawancara, dan formulir dokumentasi data. Lembar observasi digunakan untuk mencatat kondisi mesin, aktivitas pemeliharaan, dan kejadian kerusakan yang terjadi selama proses produksi berlangsung. Pedoman wawancara digunakan sebagai acuan dalam menggali informasi terkait kebutuhan pengguna mesin dan faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas sistem pemeliharaan perusahaan.

Selain itu, dokumen perusahaan digunakan sebagai instrumen pendukung untuk memperoleh data kuantitatif mengenai frekuensi kerusakan, *downtime*, waktu perbaikan, biaya pemeliharaan, dan output produksi. Penggunaan beberapa instrumen penelitian dilakukan untuk meningkatkan kelengkapan data serta memastikan bahwa informasi yang diperoleh mampu menggambarkan kondisi aktual perusahaan secara menyeluruh.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara bertahap dimulai dari proses verifikasi, reduksi, pengelompokan, hingga interpretasi data. Data yang telah terkumpul terlebih dahulu diperiksa kelengkapannya untuk memastikan kesesuaian dengan tujuan penelitian. Selanjutnya data dikelompokkan berdasarkan jenis informasi yang diperoleh, seperti data kerusakan mesin, *downtime*, biaya pemeliharaan, dan kebutuhan pengguna mesin.

Tahap berikutnya adalah melakukan analisis terhadap kondisi aktual sistem pemeliharaan untuk mengidentifikasi permasalahan utama yang menyebabkan rendahnya efektivitas maintenance. Hasil analisis kemudian digunakan untuk menentukan prioritas

perbaikan berdasarkan tingkat pengaruhnya terhadap kelancaran proses produksi. Selanjutnya dilakukan penyusunan rekomendasi strategis yang berorientasi pada peningkatan keandalan mesin, pengurangan downtime, peningkatan kesiapan operasional, serta efisiensi biaya pemeliharaan perusahaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam Penelitian ini, menggunakan data historis pemeliharaan selama periode Januari–Desember 2025 yang diperoleh dari Departemen Maintenance PT. XYZ. Data yang digunakan meliputi frekuensi kerusakan mesin, *downtime* produksi, waktu perbaikan, biaya pemeliharaan, kebutuhan pengguna mesin, serta data operasional yang berkaitan dengan aktivitas maintenance.

Gambaran Kerusakan Mesin Produksi

Analisis awal dilakukan terhadap data frekuensi kerusakan mesin selama periode penelitian. Hasil pengumpulan data menunjukkan bahwa terdapat 157 kejadian kerusakan yang terjadi pada mesin Interfolder, Logsaw, dan Packaging. Distribusi frekuensi kerusakan tersebut menunjukkan adanya variasi tingkat kegagalan antar mesin yang berpotensi memengaruhi efektivitas sistem pemeliharaan perusahaan.

Tabel 1. Frekuensi Kerusakan Mesin Tahun 2025

Mesin	Jumlah Kerusakan	Persentase (%)
Interfolder	34	21,7
Logsaw	41	26,1
Packaging	82	52,2
Total	157	100

Sumber: Data PT. XYZ (2025)

Berdasarkan Tabel 1 diketahui bahwa mesin Packaging merupakan mesin dengan tingkat kerusakan tertinggi yaitu sebanyak 82 kejadian atau 52,2% dari total kerusakan. Sementara itu, mesin Logsaw mengalami 41 kejadian kerusakan dan mesin Interfolder mengalami 34 kejadian kerusakan. Tingginya frekuensi kerusakan pada mesin Packaging mengindikasikan bahwa mesin tersebut memiliki tingkat keandalan yang lebih rendah dibandingkan mesin lainnya sehingga memerlukan perhatian khusus dalam penyusunan strategi pemeliharaan.

Analisis Downtime dan Biaya Pemeliharaan

Selama periode pengamatan, data terkait gangguan operasional dan aktivitas pemeliharaan dihimpun untuk melihat besarnya waktu henti (*downtime*) serta biaya yang timbul akibat kegiatan tersebut. Rekapitulasi hasil pengolahan data tersebut disajikan pada Tabel 2 yang memuat total *downtime*, total biaya pemeliharaan, serta nilai rata-rata perbulan dari masing-masing paramter.

Tabel 2. Rekapitulasi Downtime dan Biaya Pemeliharaan

Keterangan	Nilai
Total Downtime	11.203 menit
Total Biaya Pemeliharaan	Rp474.699.608
Rata-rata Downtime/Bulan	933,6 menit
Rata-rata Biaya/Bulan	Rp39.558.300

Sumber: Data PT. XYZ (2025)

Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa total *downtime* selama satu tahun mencapai 11.203 menit dengan total biaya pemeliharaan sebesar Rp474.699.608. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem pemeliharaan yang diterapkan masih belum mampu mengendalikan frekuensi kerusakan secara optimal. Tingginya *downtime* menyebabkan berkurangnya waktu produksi efektif dan meningkatkan biaya operasional perusahaan.

Hasil Simulasi Data Kerusakan Mesin

Tahap berikutnya adalah analisis pola kerusakan mesin berdasarkan distribusi probabilitas yang digunakan sebagai dasar pembentukan data simulasi. Pengujian distribusi dilakukan untuk memperoleh model yang paling sesuai dengan karakteristik kerusakan masing-masing mesin sehingga data yang dihasilkan dapat merepresentasikan kondisi aktual perusahaan.

Tabel 3. Distribusi Probabilitas Terbaik

Mesin	Distribusi
Interfolder	Weibull
Logsaw	Lognormal
Packaging	Lognormal

Sumber: Hasil pengolahan data menggunakan software EasyFit (2025)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa mesin Interfolder mengikuti distribusi Weibull, sedangkan mesin Logsaw dan Packaging mengikuti distribusi Lognormal. Perbedaan distribusi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik kerusakan pada masing-masing mesin dipengaruhi oleh faktor yang berbeda. Distribusi Weibull pada mesin Interfolder mengindikasikan adanya pengaruh keausan komponen akibat umur pakai, sedangkan distribusi Lognormal menunjukkan adanya variasi kerusakan yang dipengaruhi oleh kondisi operasional yang berubah-ubah.

Tahap berikutnya adalah penyajian hasil simulasi waktu antar kerusakan (*Time to Failure*) yang diperoleh dari hasil proses pemodelan berbasis probabilitas. Simulasi dilakukan sebanyak 1000 literasi untuk masing-masing mesin guna menghasilkan gambaran statistik yang lebih stabil dan representatif terhadap karakteristik kerusakan yang terjadi. Ringkasan hasil simulasi tersebut disajikan pada Tabel 4 yang memuat hasil nilai rata-rata dan standart deviasi TTF untuk mesin Interfolder, Logsaw dan packaging.

Tabel 4. Statistik Hasil Simulasi

Parameter	Interfolder	Logsaw	Packaging
Iterasi	1000	1000	1000
Mean TTF (Jam)	145,80	107,66	79,05
Standar Deviasi	143,94	177,11	139,18

Sumber: Hasil simulasi Monte Carlo menggunakan software @Risk (2025)

Berdasarkan hasil simulasi, mesin Interfolder memiliki rata-rata waktu kegagalan tertinggi yaitu 145,80 jam. Sebaliknya, mesin Packaging memiliki nilai rata-rata terendah sebesar 79,05 jam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa mesin Packaging mengalami kegagalan lebih cepat dibandingkan mesin lainnya sehingga berpotensi menyebabkan gangguan produksi yang lebih sering terjadi (Cheikh et al., 2024; Firmansyah & Widiasih, 2023).

Hasil Evaluasi Kinerja Pemeliharaan

Evaluasi kinerja pemeliharaan dilakukan menggunakan indikator utama yang terdiri dari MTBF, MTTR, *Availability*, *Reliability*, dan *Maintenance Cost Ratio*. Kelima indikator tersebut digunakan untuk menggambarkan performa sistem maintenance secara menyeluruh.

Tabel 5. Hasil Perhitungan MTTR

Mesin	MTTR (Jam)
Interfolder	5,49
Logsaw	4,55
Packaging	2,28

Sumber: Data sekunder PT. XYZ (2025) yang diolah

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa mesin Interfolder memiliki waktu perbaikan rata-rata tertinggi sebesar 5,49 jam. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses perbaikan pada mesin tersebut memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan mesin lainnya. Sebaliknya, mesin Packaging memiliki nilai MTTR paling rendah yaitu 2,28 jam sehingga proses perbaikannya relatif lebih cepat.

Tabel 6. Hasil *Availability* Mesin

Mesin	<i>Availability</i> (%)
Interfolder	96,37
Logsaw	95,95
Packaging	97,20

Sumber: Data sekunder PT. XYZ (2025) yang diolah

Nilai *availability* seluruh mesin berada di atas 95%, yang menunjukkan bahwa secara umum mesin masih memiliki tingkat kesiapan operasi yang cukup baik. Mesin Packaging memiliki *availability* tertinggi yaitu 97,20%, sedangkan mesin Logsaw memiliki nilai terendah sebesar 95,95%.

Tabel 7. Hasil *Reliability* Mesin

Mesin	<i>Reliability</i>
Interfolder	0,936
Logsaw	0,911
Packaging	0,904

Sumber: Data sekunder PT. XYZ (2025) yang diolah

Hasil analisis *reliability* menunjukkan bahwa mesin Interfolder memiliki probabilitas keberhasilan operasi tertinggi yaitu 93,6%, sedangkan mesin Packaging memiliki nilai terendah sebesar 90,4%. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan adanya variasi tingkat keandalan antar mesin yang perlu menjadi pertimbangan dalam penyusunan kebijakan pemeliharaan perusahaan.

Hasil Evaluasi Indeks Kinerja Pemeliharaan

Tabel 8. Hasil Evaluasi OMMP

Mesin	Nilai OMMP	Kategori
Interfolder	0,535	Sedang
Logsaw	0,324	Rendah
Packaging	0,550	Sedang

Sumber: Hasil perhitungan menggunakan metode OMM berdasarkan data sekunder PT. XYZ (2025)

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa mesin Packaging memperoleh nilai indeks tertinggi sebesar 0,550, diikuti mesin Interfolder sebesar 0,535. Sementara itu, mesin Logsaw memiliki nilai terendah sebesar 0,324 dan termasuk kategori rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa mesin Logsaw menjadi prioritas utama dalam program perbaikan sistem pemeliharaan karena memiliki performa maintenance yang paling rendah dibandingkan mesin lainnya.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemeliharaan PT. XYZ masih menghadapi tantangan berupa tingginya frekuensi kerusakan, *downtime*, dan ketidakstabilan performa mesin. Temuan ini menjadi dasar dalam penyusunan strategi optimasi pemeliharaan yang akan dijelaskan pada bagian pembahasan penelitian.

Kinerja Sistem Pemeliharaan Mesin pada Industri Tissue Converting

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemeliharaan yang diterapkan pada PT. XYZ masih menghadapi berbagai permasalahan yang berdampak terhadap efektivitas proses produksi. Selama periode Januari–Desember 2025 tercatat sebanyak 157 kejadian kerusakan mesin dengan total *downtime* mencapai 11.203 menit dan total biaya pemeliharaan sebesar Rp474.699.608. Tingginya frekuensi kerusakan dan *downtime* tersebut mengindikasikan bahwa sistem pemeliharaan yang diterapkan masih didominasi oleh pendekatan *corrective maintenance*, yaitu tindakan perbaikan yang dilakukan setelah mesin mengalami kerusakan. Kondisi ini sejalan dengan kajian Molęda et al. (2023) yang menyatakan bahwa sistem pemeliharaan reaktif cenderung menghasilkan tingkat

downtime yang tinggi, meningkatkan biaya operasional, dan mengurangi efektivitas pemanfaatan aset produksi.

Karakteristik industri tissue converting yang menggunakan sistem produksi berurutan menyebabkan kerusakan pada satu mesin dapat menghentikan seluruh aliran produksi. Temuan penelitian menunjukkan bahwa mesin Packaging menjadi mesin dengan frekuensi kerusakan tertinggi sebesar 52,2% dari total kerusakan, sedangkan mesin Logsaw memiliki performa pemeliharaan terendah berdasarkan nilai OMMP. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa frekuensi kerusakan yang tinggi tidak selalu identik dengan performa pemeliharaan yang paling rendah. Mesin Packaging memang mengalami kerusakan lebih sering, tetapi perusahaan relatif mampu melakukan perbaikan dengan cepat sehingga nilai *availability* dan MTTR masih berada pada kategori baik. Sebaliknya, mesin Logsaw menunjukkan kombinasi nilai *reliability* dan *availability* yang rendah sehingga berdampak pada rendahnya indeks kinerja maintenance secara keseluruhan.

Temuan ini menunjukkan bahwa pengukuran kinerja pemeliharaan tidak dapat hanya didasarkan pada jumlah kerusakan atau downtime saja, melainkan harus mempertimbangkan berbagai indikator yang saling berhubungan. Hal tersebut menjadi alasan mengapa penelitian ini menggunakan pendekatan multidimensi untuk mengevaluasi sistem pemeliharaan secara lebih komprehensif. Pendekatan tersebut memungkinkan perusahaan memahami akar permasalahan secara lebih mendalam dibandingkan hanya menggunakan satu indikator tunggal seperti MTBF atau OEE.

Analisis Penyebab Tingginya Kerusakan dan Downtime Mesin

Berdasarkan hasil observasi, wawancara, dan analisis data historis, terdapat beberapa faktor utama yang menyebabkan tingginya frekuensi kerusakan mesin pada PT. XYZ. Faktor pertama adalah belum optimalnya penerapan preventive maintenance. Hasil wawancara menunjukkan bahwa jadwal pemeliharaan berkala belum dilakukan secara konsisten sehingga beberapa komponen mengalami kerusakan akibat keausan yang tidak terdeteksi sejak dini. Kondisi ini diperkuat oleh hasil analisis distribusi Weibull pada mesin Interfolder yang menunjukkan nilai shape parameter lebih besar dari satu. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa kerusakan yang terjadi dipengaruhi oleh faktor usia pakai dan keausan komponen.

Faktor kedua adalah keterbatasan ketersediaan *spare part* kritis. Hasil identifikasi kebutuhan pengguna menunjukkan bahwa ketersediaan suku cadang menjadi salah satu kebutuhan yang memperoleh tingkat kepentingan tinggi. Ketika terjadi kerusakan, proses perbaikan sering kali tertunda akibat menunggu pengadaan komponen pengganti. Kondisi ini menyebabkan downtime menjadi lebih panjang dan berdampak terhadap terganggunya proses produksi. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Pujitresnani et al. (2021) yang menyatakan bahwa kesiapan *spare part* merupakan faktor penting dalam meningkatkan efektivitas sistem pemeliharaan.

Faktor ketiga adalah kompetensi teknisi dan kecepatan respons terhadap kerusakan mesin. Hasil wawancara menunjukkan bahwa keterlambatan diagnosis kerusakan dan proses *troubleshooting* masih terjadi pada beberapa kasus. Situasi tersebut

menyebabkan waktu perbaikan menjadi lebih lama dan berdampak terhadap meningkatnya *downtime*. Menurut Żyluk et al. (2025), kemampuan teknis personel maintenance merupakan faktor utama yang menentukan keberhasilan sistem pemeliharaan modern karena berkaitan langsung dengan kecepatan dan kualitas proses perbaikan.

Selain faktor teknis, variasi kondisi operasional juga menjadi penyebab tingginya tingkat kegagalan mesin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa mesin Logsaw dan Packaging mengikuti distribusi Lognormal dengan standar deviasi yang relatif tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan adanya ketidakstabilan pola kerusakan yang dipengaruhi oleh perubahan beban kerja, kondisi material, dan variasi operasional selama proses produksi berlangsung. Temuan ini sesuai dengan penelitian Cheikh et al. (2024) yang menyatakan bahwa ketidakpastian operasional merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan fluktuasi tingkat kegagalan pada sistem manufaktur.

Interpretasi Kinerja Maintenance Berdasarkan Hasil OMMP

Evaluasi menggunakan *Overall Measure of Maintenance Performance* (OMMP) menghasilkan nilai indeks sebesar 0,550 untuk mesin Packaging, 0,535 untuk mesin Interfolder, dan 0,324 untuk mesin Logsaw. Hasil ini menunjukkan bahwa performa pemeliharaan perusahaan masih berada pada kategori sedang hingga rendah. Mesin Logsaw menjadi prioritas utama perbaikan karena memiliki nilai OMMP terendah.

Rendahnya nilai OMMP pada mesin Logsaw menunjukkan bahwa perusahaan belum mampu menjaga keseimbangan antara *reliability*, *availability*, *maintainability*, dan efisiensi biaya secara optimal. Nilai *availability* yang relatif rendah menunjukkan bahwa mesin tidak selalu berada dalam kondisi siap operasi ketika dibutuhkan. Selain itu, nilai *reliability* yang lebih rendah dibandingkan mesin lain menunjukkan bahwa probabilitas terjadinya kegagalan masih cukup tinggi. Menurut Sugiharto dan Basuki (2022), kondisi tersebut merupakan indikasi bahwa sistem maintenance memerlukan perbaikan baik dari sisi teknis maupun manajerial.

Sementara itu, mesin Packaging memperoleh nilai OMMP tertinggi meskipun memiliki jumlah kerusakan paling besar. Temuan ini menunjukkan bahwa kemampuan perusahaan dalam melakukan tindakan perbaikan relatif baik sehingga waktu perbaikan dapat ditekan. Dengan kata lain, perusahaan memiliki kemampuan *corrective maintenance* yang cukup baik, namun belum memiliki sistem *preventive maintenance* yang optimal. Kondisi ini sesuai dengan pendapat Molęda et al. (2023) yang menyatakan bahwa organisasi yang masih berfokus pada *corrective maintenance* umumnya mampu menangani kerusakan setelah terjadi, tetapi belum mampu mencegah kegagalan secara proaktif.

Hasil penelitian ini memperlihatkan pentingnya penggunaan indeks komposit dalam mengevaluasi sistem pemeliharaan. Jika perusahaan hanya melihat jumlah kerusakan, maka mesin Packaging akan dianggap sebagai masalah utama. Namun ketika dilakukan evaluasi secara komprehensif menggunakan OMMP, diketahui bahwa mesin Logsaw justru menjadi prioritas utama dalam perbaikan sistem maintenance.

Efektivitas Strategi Pemeliharaan Berdasarkan MQFD

Hasil analisis MQFD menunjukkan bahwa penyediaan *spare part* kritis memperoleh bobot prioritas tertinggi sebesar 27,6%, diikuti peningkatan kompetensi teknisi sebesar 19,2%, preventive maintenance terjadwal sebesar 19,0%, penyusunan SOP maintenance sebesar 18,9%, dan monitoring kondisi mesin sebesar 15,2%.

Prioritas tertinggi pada penyediaan *spare part* menunjukkan bahwa permasalahan utama yang dirasakan pengguna bukan hanya frekuensi kerusakan, tetapi juga lamanya waktu tunggu perbaikan akibat keterbatasan komponen pengganti. Hasil ini menunjukkan bahwa strategi pemeliharaan tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis mesin, tetapi juga menyangkut manajemen persediaan dan pengelolaan rantai pasok suku cadang. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Pujitresnani et al. (2021) yang menempatkan kesiapan sumber daya pendukung sebagai faktor penting dalam meningkatkan kualitas sistem maintenance.

Peningkatan kompetensi teknisi juga menjadi prioritas karena berkaitan langsung dengan kemampuan diagnosis dan penyelesaian masalah di lapangan. Semakin tinggi kompetensi teknisi maka semakin cepat proses identifikasi kerusakan dan semakin rendah waktu perbaikan yang dibutuhkan. Menurut Tamanna dan Rahman (2022), investasi pada pengembangan sumber daya manusia memberikan dampak jangka panjang yang signifikan terhadap peningkatan keandalan sistem produksi.

Strategi *preventive maintenance* yang memperoleh prioritas tinggi menunjukkan bahwa perusahaan perlu mengubah paradigma pemeliharaan dari reaktif menjadi proaktif. *Preventive maintenance* memungkinkan perusahaan mendeteksi potensi kegagalan sebelum terjadi kerusakan yang lebih besar sehingga mampu mengurangi *downtime* dan biaya pemeliharaan secara keseluruhan (Molęda et al., 2023).

Dampak Implementasi Strategi Optimasi Pemeliharaan

Implementasi strategi yang dihasilkan penelitian ini berpotensi memberikan dampak positif yang signifikan terhadap kinerja perusahaan. Penyediaan *spare part* kritis dan peningkatan kompetensi teknisi diperkirakan mampu menurunkan MTTR sehingga waktu perbaikan menjadi lebih cepat. Selain itu, penerapan preventive maintenance yang terjadwal memungkinkan perusahaan meningkatkan MTBF dan *reliability* mesin sehingga frekuensi kerusakan dapat dikurangi.

Peningkatan *reliability* dan *availability* akan berdampak langsung terhadap berkurangnya *downtime* produksi. Dengan menurunnya *downtime*, kapasitas produksi efektif perusahaan dapat meningkat sehingga target produksi lebih mudah dicapai. Di sisi lain, penurunan frekuensi kerusakan juga akan mengurangi biaya *corrective maintenance* yang selama ini menjadi beban operasional perusahaan (Kosasih et al., 2021; Bukowski & Werbinska-Wojciechowska, 2025).

Secara strategis, implementasi model optimasi yang dihasilkan penelitian ini dapat membantu perusahaan bertransformasi dari sistem maintenance yang bersifat reaktif menuju sistem maintenance yang lebih proaktif, adaptif, dan berbasis data. Transformasi tersebut menjadi kebutuhan penting bagi industri manufaktur modern yang dituntut untuk menjaga kontinuitas produksi, meningkatkan efisiensi operasional, dan mempertahankan

daya saing dalam lingkungan bisnis yang semakin kompetitif (Molęda et al., 2023; Żyluk et al., 2025).

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk merancang model optimasi pemeliharaan mesin pada industri tissue converting melalui integrasi simulasi Monte Carlo, *Overall Measure of Maintenance Performance* (OMMP), dan *Maintenance Quality Function Deployment* (MQFD). Pendekatan tersebut digunakan untuk menghasilkan evaluasi kinerja pemeliharaan yang lebih komprehensif sekaligus merumuskan strategi perbaikan yang sesuai dengan kebutuhan operasional perusahaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemeliharaan pada PT. XYZ masih menghadapi tantangan berupa tingginya frekuensi kerusakan mesin, downtime produksi, serta ketidakseimbangan kinerja pemeliharaan antar mesin. Evaluasi kinerja mengidentifikasi bahwa mesin Logsaw merupakan prioritas utama perbaikan karena memiliki tingkat efektivitas pemeliharaan yang paling rendah dibandingkan mesin lainnya. Sementara itu, analisis kebutuhan pengguna menunjukkan bahwa ketersediaan *spare part*, kompetensi teknisi, konsistensi preventive maintenance, dan standarisasi prosedur kerja merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap peningkatan kualitas sistem pemeliharaan. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan model integratif yang menghubungkan analisis ketidakpastian sistem, pengukuran kinerja pemeliharaan, dan kebutuhan pengguna dalam satu kerangka pengambilan keputusan. Temuan ini memperkaya literatur manajemen pemeliharaan karena menawarkan pendekatan yang lebih komprehensif dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada satu metode atau satu aspek evaluasi. Secara praktis, hasil penelitian memberikan dasar yang lebih objektif bagi perusahaan dalam menentukan prioritas strategi pemeliharaan untuk meningkatkan keandalan mesin, mengurangi downtime, dan mendukung efisiensi operasional. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena dilakukan pada satu perusahaan dan berfokus pada tiga mesin utama dalam satu lini produksi sehingga generalisasi hasil penelitian masih terbatas. Selain itu, data yang digunakan berasal dari periode pengamatan tertentu sehingga belum sepenuhnya menggambarkan perubahan kondisi operasional dalam jangka panjang. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan pendekatan *predictive maintenance* berbasis sensor, *Internet of Things* (IoT), atau kecerdasan buatan serta memperluas objek penelitian pada berbagai sektor manufaktur agar model optimasi yang dihasilkan memiliki tingkat validitas dan penerapan yang lebih luas.

REFERENSI

- Anjos dos, R. C., Dzulinski, A. C., & Goecks, L. S. (2025). Performance indicators and maintenance management: scientific mapping. *Scientia Cum Industria*, 14(1), e251401–e251401.
- Bora, M. A., Prasetyo, J., & Lubis, A. L. (2023). Penerapan quality function deployment pada perancangan alat bantu ganti oli transmisi otomatis. *Jurnal Teknik Industri*, 24(1), 45–56.

- Bukowski, L., & Werbinska-Wojciechowska, S. (2025). Multidimensional maintenance maturity modeling: Fuzzy predictive model and case study on ensuring operational continuity under uncertainty. *Reliability Engineering and System Safety*, 257, 110845. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110845>
- Chandrahadinata, D., & Raihandika, H. (2025). Perencanaan peningkatan kualitas pelayanan pada bengkel menggunakan metode quality function deployment. *Jurnal Manajemen Industri*, 14(2), 89–101.
- Cheikh, K., Boudi, E. M., Rabi, R., & Mokhliss, H. (2024). Balancing maintenance strategies for decision making using Monte Carlo simulation. *International Journal of Industrial Engineering*, 31(4), 552–566.
- Cheikh, K., Boudi, E. M., Rabi, R., & Mokhliss, H. (2024). Development and optimization of maintenance using the Monte Carlo method. *Journal of Industrial Systems Engineering*, 17(3), 241–255.
- Cheikh, K., Boudi, E. M., Rabi, R., & Mokhliss, H. (2025). Monte Carlo simulation for evaluating and optimizing the efficiency of BR and QIR maintenance strategies. *Journal of Reliability and Maintenance Engineering*, 12(1), 33–49.
- Firmansyah, M. F., & Widiasih, W. (2023). Penjadwalan perawatan mesin milling pipe dengan pendekatan simulasi Monte Carlo pada PT. WPP. *Jurnal Teknik Industri Indonesia*, 14(2), 102–112.
- Fauzi, M. H., & Hariastuti, N. L. P. (2025). Perancangan strategi pemeliharaan dengan pendekatan CMMS dan OMMP menggunakan perspektif FMECA. *Jurnal Teknik Sistem Industri*, 9(1), 1–15.
- Gunawan, K., Akbar, M. A., & Hijuzaman, O. (2024). Analisis total productive maintenance menggunakan overall equipment effectiveness pada mesin dryer. *Jurnal Teknologi Industri*, 15(3), 210–221.
- Jabani, M., Pakata, A. S. S., & Erwin. (2024). Performance evaluation of maintenance management strategy using Malcolm Baldrige criteria. *Journal of Industrial Management*, 11(2), 88–101.
- Kosasih, W., Sriwana, I. K., & Purnama, W. J. (2021). Simulasi Monte Carlo dalam optimasi biaya pemeliharaan komponen kritis mesin produksi. *Jurnal Teknik Industri*, 22(2), 125–135.
- Mayita, F. P., Hamdy, M. I., Lubis, F. S., Harpito, & Taslim, R. (2024). Perencanaan perawatan mesin vacuum truck menggunakan reliability centered maintenance dan overall measure of maintenance performance. *Jurnal Teknik Industri dan Sistem Manufaktur*, 19(1), 54–67.
- Mikaeil, R., Khoshalan, H. A., Nasrollahi, M. H., & Ersmailzadeh, A. (2022). Reliability analysis of full-face tunnel boring machines with the Monte Carlo simulation technique. *Engineering Failure Analysis*, 138, 106350. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106350>
- Molęda, M., Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V., & Mrozek, D. (2023). From corrective to predictive maintenance: A review of maintenance approaches for the power industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113358. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113358>
- Moemenishahraki, P. (2025). Reliability and maintenance performance analysis of a 1600-ton press machine using MTBF, MTTR, KPI, and downtime indicators. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 221–234.

- Nurhayati, R., & Ramadhan, M. R. (2023). Analisis penerapan reliability centered maintenance pada mesin produksi di PT. ABC. *Jurnal Sistem Industri*, 22(1), 14–25.
- Pujitresnani, A., Gunawan, Mulyantno, Maktar, N., Husniawari, N., & Muhalifa, I. (2021). Analisis indeks preventive maintenance peralatan medis ruang intensive care unit menggunakan model Kano dan quality function deployment. *Jurnal Teknik Biomedis Indonesia*, 2(1), 45–56.
- Sugiharto, D. R. H., & Basuki, M. (2022). Mitigasi kegagalan operation and maintenance dengan pendekatan overall measure of maintenance performance dan multiattribute failure mode analysis. *Jurnal Teknik Industri*, 23(3), 201–214.
- Tamanna, S., & Rahman, M. M. (2022). Prioritization of effective lean tools for reliability analysis and maintenance strategy. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(8), 1451–1470. <https://doi.org/10.1108/JMTM-2021-0456>
- Zhu, L., & Husin, M. H. (2025). An enhanced multidimensional requirement-oriented quality function deployment method for sustainable self-service machine design. *Sustainable Manufacturing Journal*, 7(1), 15–29.
- Żyluk, A., Zieja, M., Kawka, K., & Głowczyk, B. (2025). Monitoring and improving aircraft maintenance processes using IT systems. *Aerospace Engineering Journal*, 12(4), 301–316.