BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Penulisan tinjauan pustaka pada tahapan ini berisikan perancangan sebelumnya dalam bentuk studi kasus ataupun pengembangan metode, dan membahas permasalahan serupa terkait permasalahan mesin yang mengalami hambatan secara tiba-tiba saat melakukan proses pengantongan. Melalui tinjauan pustaka, Tugas Akhir ini dapat menentukan metode yang tepat untuk mengatasi mesin yang mengalami hambatan dalam proses pengantongan.

Industri pupuk di Indonesia memiliki peran yang sangat strategis dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Pupuk majemuk NPK, termasuk Phonska, menjadi salah satu produk utama yang digunakan karena mengandung unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Permintaan pupuk di Indonesia terus meningkat seiring dengan intensifikasi sektor pertanian, sehingga kelancaran produksi dan distribusi pupuk menjadi faktor penting untuk menjaga ketersediaan di pasar (Atmadja et al., 2021). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberlangsungan proses produksi di setiap tahapan, termasuk pada departemen pengantongan dan pergudangan, sangat menentukan tercapainya target perusahaan.

Departemen pengantongan dan pergudangan merupakan tahap akhir dalam rantai produksi, di mana produk pupuk dikemas sesuai standar sebelum didistribusikan ke konsumen. Namun, dalam pelaksanaannya seringkali muncul hambatan berupa *shutdown* atau *downtime* yang mengganggu kelancaran proses pengantongan. *Downtime* dapat disebabkan oleh keterlambatan pemeliharaan, kerusakan komponen, maupun kesalahan operator. Kondisi ini menjadi salah satu faktor utama penyebab rendahnya nilai *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) pada lini pengemasan (Mncwango & Mdunge, 2025). Selain itu, perawatan mesin yang tidak tepat juga dapat meningkatkan risiko kerusakan mendadak yang berujung pada terhentinya proses produksi (García & Salgado, 2021).

Seiring dengan perkembangan metode pemeliharaan, pendekatan *preventive maintenance* banyak digunakan untuk mencegah terjadinya kerusakan melalui penjadwalan perawatan secara berkala. (Iskandar & Padmakusumah, 2021) menyatakan bahwa *preventive maintenance* mampu menurunkan frekuensi kerusakan serta meningkatkan efektivitas operasional mesin. Selain itu, pendekatan berbasis analisis seperti *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) juga dapat digunakan untuk

mengidentifikasi potensi kegagalan sebelum terjadi (Ojeda et al., 2025). Dengan demikian, *preventive maintenance* menjadi strategi penting dalam menjaga keberlangsungan sistem produksi.

Dalam mendukung perencanaan pemeliharaan, analisis keandalan menggunakan parameter *Mean Time to Failure* (MTTF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) banyak digunakan. MTTF digunakan untuk mengukur rata-rata waktu terjadinya kegagalan, sedangkan MTTR untuk mengukur rata-rata waktu perbaikan. (Naufal et al., 2026) menunjukkan bahwa MTTF dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan interval perawatan yang optimal, sementara MTTR berperan dalam mengevaluasi efektivitas proses perbaikan dan upaya pengurangan *downtime*.

Selain itu, metode simulasi juga mulai banyak digunakan untuk mendukung analisis pemeliharaan karena mampu memodelkan sistem yang kompleks dan mengandung ketidakpastian. Simulasi memungkinkan pengujian berbagai skenario tanpa mengganggu sistem nyata sehingga dapat membantu pengambilan keputusan yang lebih akurat. (Kosasih et al., 2021) menyatakan bahwa simulasi Monte Carlo dapat digunakan untuk mengoptimalkan biaya pemeliharaan, sedangkan (Firmansyah & Widiasih, 2023) menunjukkan bahwa metode ini mampu meningkatkan kinerja mesin melalui penentuan interval *preventive maintenance* berbasis probabilitas.

Lebih lanjut, pengembangan metode pemeliharaan juga mengarah pada pendekatan yang lebih prediktif, seperti *predictive maintenance*, yang memanfaatkan teknik analisis untuk mendeteksi potensi kerusakan sebelum terjadi. Pendekatan ini sering dikombinasikan dengan metode seperti FMEA untuk meningkatkan akurasi identifikasi risiko kegagalan (Ojeda et al., 2025). Penerapan pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional dan menjaga kestabilan proses produksi, sehingga relevan untuk diterapkan pada proses pengantongan pupuk.

Selain faktor pemeliharaan mesin, faktor ketersediaan *sparepart* mesin juga cukup berpengaruh apabila terjadi kerusakan mesin yang memerlukan *sparepart* penting. Ketersediaan *sparepart* yang tidak tepat dapat menyebabkan kondisi kelebihan *sparepart* yang dapat meningkatkan biaya atau kekurangan *sparepart* pada saat dibutuhkan. Kurangnya pengendalian persediaan *sparepart* tersebut terjadi di penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Amallynda & Wicaksono, 2024) pada perusahaan kayu lapis, penelitian oleh (Tampubolon & Budiman, 2020) pada dealer sepeda motor, penelitian oleh (Adelia & Mandala, 2021) pada bengkel kendaraan, dan penelitian oleh (Ari Pratama et al., 2025) di perusahaan penyedia layanan alat berat.

Terdapat ketidakpastian dalam persediaan dan permintaan *sparepart* secara nyata. Penggunaan *Economic Order Quantity* (EOQ) dan *Re-order Point* dapat menurunkan total biaya persediaan dan dapat memaksimalkan efisiensi pengadaan (Tampubolon & Budiman, 2020). Dengan menerapkan EOQ dan *Continuous Review System* juga dapat mengoptimalkan jumlah persediaan *sparepart* (Damayanti & Sukmono, 2024). Klasifikasi menggunakan ABC *Analysis* juga dapat digunakan untuk menentukan prioritas kepentingan *sparepart* atau menentukan *sparepart* kritis untuk menentukan jumlah persediaan yang dibutuhkan dengan mengelompokkan *sparepart* dengan kategori A, B, dan C supaya perusahaan dapat mengurangi kekurangan kebutuhan *sparepart* kritis (Adelia & Mandala, 2021) dan (Sofia et al., 2020).

Industri memiliki kompleksitas dan permintaan *sparepart* yang tidak pasti sehingga diperlukan penggunaan model simulasi Monte Carlo untuk mensimulasikan permintaan dan *lead time sparepart* dalam berbagai kondisi. Penelitian yang dilakukan oleh (Tikupadang & Rusdiansyah, 2024) dan (Farisan et al., 2025) menggunakan model simulasi tersebut menghasilkan *safety stock* dan *re-order point* yang lebih stabil dalam memenuhi kebutuhan *sparepart* dan menurunkan risiko kekurangan *sparepart*.

Perindustrian Petrokimia dan perusahaan dengan *hightech technology* memiliki kompleksitas yang lebih tinggi sehingga memerlukan model simulasi yang digabungkan dengan kecerdasan buatan. Penelitian (Innuphat & Toahchoodee, 2022) melakukan penerapan model simulasi untuk meramalkan kebutuhan menggunakan *Temporal Fusion Transformer* dengan *Discrete Event Simulation* untuk meningkatkan dan menstabilkan keakuratan dalam memprediksi kebutuhan dan persediaan. Pengembangan pengendalian penyimpanan dapat dilakukan dengan model transformasi komponen untuk memanfaatkan *sparepart* dapat memiliki fungsi alternatif (Güçdemir & Taşoğlu, 2024). Jumlah persediaan *sparepart* yang tidak optimal atau tidak terkendali dapat meningkatkan risiko *downtime* yang lebih lama karena kurangnya *sparepart* yang dibutuhkan. Penerapan metode EOQ, *Re-order Point*, *Contiunuous Review System*, ABC *Analysis*, dan Model Simulasi Monte Carlo dapat mengoptimalkan jumlah persediaan *sparepart*.

Tabel 2.1 Ringkasan Tinjauan Pustaka

No	Pustaka	Objek	Masalah	Solusi	Metode dan Tools	Hasil
1	Atmadja et al., 2021	Industri Pupuk di Indonesia	Keterlambatan distribusi dan ketidaktercapaian target produksi	Peningkatan kelancaran produksi dan distribusi melalui optimalisasi	Studi literatur sektor industri pupuk	Menunjukkan pentingnya kelancaran produksi dan distribusi untuk menjaga ketersediaan pupuk di pasar
2	Mncwango & Mdunge, 2025	Departemen *Kit Packing* pada perusahaan manufaktur otomotif di Afrika Selatan (OEM) yang menghadapi masalah efektivitas peralatan produksi (OEE) rendah	Nilai *Overall Equipment Effectiveness (OEE)* di bawah 60% akibat frekuensi *dowtime* tinggi. Ketidaksesuaian antara perencanaan dan pelaksanaan produksi menyebabkan backlog dan overproduction.	Identifikasi akar penyebab dan pengembangan solusi berbasis data menggunakan pendekatan DMAIC. Penerapan komunikasi terstruktur antar departemen, peningkatan pengawasan dan pelatihan operator, serta modernisasi sistem inventori.	Pendekatan *Lean Six Sigma* DMAIC	Penerapan tindakan korektif berpotensi mengurangi *dowtime* hingga 20%, meningkatkan OEE, serta menghemat ZAR 190.000 per tahun. Perbaikan sistem stok, pelatihan, dan komunikasi diproyeksikan meningkatkan efektivitas mesin dan produktivitas operator.
3	García & Salgado, 2021	Sebuah mesin *thermoforming multi* tahap (*multistage thermoforming machine*) yang digunakan untuk produksi kemasan makanan (terrine).	Frekuensi kerusakan tak terduga (*unplanned failure*) yang menyebabkan penghentian total produksi karena kegagalan satu komponen pada sistem *multistage.*	1. *Preventive Programming Maintenance (PPM)* pemeliharaan berdasarkan jadwal waktu operasi 2. Improved Preventive Programming Maintenance (IPPM) menambah stok suku cadang dan mengurangi waktu penggantian. 3. Algorithm Life Optimisation Programming (ALOP) berbasis sensor dan algoritma prediktif untuk menghitung Mean Time To Failure (MTTF) secara real time. 4. Digital Behaviour Twin (DBT) model digital perilaku mesin untuk mendeteksi anomali melalui pola sensor dan posisi encoder.	PLC (*Programmable Logic Controller*) untuk pengumpulan dan analisis data. Analisis perbandingan nilai efisiensi dan availability antar strategi	Kombinasi strategi *preventive* dan *predictive* maintenance (ALOP dan DBT) direkomendasikan sebagai sistem pemeliharaan optimal untuk mesin *multistage* industri.

Tabel 2.1 Ringkasan Tinjauan Pustaka (lanjutan)

No	Pustaka	Objek	Masalah	Solusi	Metode dan Tools	Hasil
4	Naufal et al., 2026	Mesin Spreader Roll pada industri manufaktur (PT XYZ Karawang).	Tingginya frekuensi kerusakan komponen (terutama bearing) yang menyebabkan peningkatan *downtime* produksi.	Penentuan interval *preventive maintenance* berbasis analisis keandalan.	*Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) dan *Fishbone Diagram*.	Interval *preventive maintenance* optimal diperoleh setiap 66 hari (lebih baik dari 90 hari sebelumnya), serta meningkatkan keandalan mesin dan menurunkan risiko *downtime*.
5	Kosasih et al., 2021	Komponen kritis mesin rotary injection moulding pada industri produksi sol sepatu.	Tingginya biaya pemeliharaan akibat penerapan *unplanned maintenance*.	Penentuan jadwal *preventive maintenance* optimal untuk menyeimbangkan biaya kerusakan dan biaya pencegahan.	Simulasi Monte Carlo dan Analisis biaya pemeliharaan (*failure cost* & *preventive cost*).	Jadwal *preventive maintenance* optimal mampu menurunkan biaya pemeliharaan sebesar 24,54%, 54,63%, dan 21,51% pada komponen kritis dibandingkan kondisi aktual.
6	Iskandar & Padmakusumah, 2021	Mesin produksi di salah satu perusahaan manufaktur lokal di Indonesia (perusahaan X).	Tingginya *dowtime* mesin dan rendahnya nilai OEE akibat kurang optimalnya sistem pemeliharaan serta keterlibatan operator yang rendah.	Penerapan *Total Productive Maintenance* (TPM) dengan fokus pada pilar *Autonomous Maintenance* dan *Planned Maintenance* untuk menekan *dowtime* dan meningkatkan produktivitas.	Pengukuran OEE (*Availability, Performance, Quality*). Identifikasi penyebab kerugian menggunakan Pareto Chart dan *Fishbone Diagram.*	Nilai OEE meningkat dari 70,8% menjadi 82,5% setelah penerapan TPM.

Tabel 2.1 Ringkasan Tinjauan Pustaka (lanjutan)

No	Pustaka	Objek	Masalah	Solusi	Metode dan *Tools*	Hasil
7	Firmansyah & Widiasih, 2023	Mesin produksi pada sistem manufaktur.	Ketidakpastian waktu kerusakan mesin yang menyulitkan penentuan jadwal *preventive maintenance*.	Penentuan interval *preventive maintenance* optimal berbasis simulasi.	Simulasi Monte Carlo dan Analisis distribusi waktu kerusakan (*failure time*).	Simulasi Monte Carlo menghasilkan interval *preventive maintenance* yang optimal serta membantu dalam pemilihan kebijakan pemeliharaan yang lebih efektif dalam kondisi ketidakpastian.
8	Ojeda et al., 2025	Proses produksi di industri otomotif.	Terjadi *downtime* tidak terencana yang mengakibatkan penurunan produktivitas, kerugian finansial dan gangguan kontinuitas produksi.	Menerapkan *predictive maintenance* berbasis *Machine Learning* (ML).	Menggunakan *Process Failure Mode and Effects Analysis* (PFMEA).	Penerapan model prediktif ini memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan efisiensi operasional. *Dowtime* berkurang, biaya pemeliharaan menurun, dan proses produksi menjadi lebih stabil.
9	Pratama et al., 2025	Perusahaan penyedia layanan alat berat.	Tidak adanya perencanaan jumlah persediaan sehingga kelebihan dan kekurangan stok *sparepart*.	Merancang sistem untuk mengelola persediaan berdasarkan perhitungan kebutuhan optimal untuk *sparepart* kritis.	*Economic Order Quantity* (EOQ), *Safety Stock, Re-order Point*.	Persediaan menjadi lebih optimal dan menurunnya resiko kelebihan atau kekurangan stok *sparepart*.
10	Tikupadang & Rusdiansyah, 2024	Layanan oli dan minyak.	Permintaan jumlah permintaan dan *lead time sparepart* yang tidak pasti menyebabkan ketidaktepatan jumlah pengadaan *sparepart*.	Menentukan jumlah permintaan *sparepart* menggunakan pendekatan probabilistik.	Simulasi Monte Carlo, Analisis stok, dan *Spreadsheet*.	Jumlah pengadaan menjadi optimal dan resiko kekurangan stok menjadi berkurang menggunakan model simulasi.
11	Innuphat & Toahchoodee, 2022	Perusahaan Petrokimia (*warehouse sparepart*).	Ketidakpastian persediaan *sparepart* menyebabkan keterlambatan penanganan.	Melakukan simulasi persediaan dengan berbagai kondisi sebelum diterapkan secara nyata.	*Discrete Event Simulation, Forecasting Temporal Fusion Transformer* (TFT), *Python*	Model simulasi menghasilkan peningkatan pengadaan dan efisiensi persediaan.

Tabel 2.1 Ringkasan Tinjauan Pustaka (lanjutan)

No	Pustaka	Objek	Masalah	Solusi	Metode dan Tools	Hasil
12	Farisan et al., 2025	Mesin produksi manufaktur PT. XYZ.	Kekurangan stok *sparepart* saat terjadinya kerusakan mesin secara mendadak.	Menentukan jumlah *safety stock* dan *re-order point* menggunakan peramalan dan simulasi.	*Monte Carlo Simulation, Exponential Smoothing*, Regresi Linier	*Safety stock* menjadi lebih fleksibel atau dapat memenuhi kebutuhan permintaan dengan berbagai kondisi.
13	Sofia et al., 2020	Suku cadang perusahaan manufaktur PT. XYZ.	Tingginya biaya persediaan dikarenakan tidak terdapat sistem untuk memprioritaskan pengadaan item yang dibutuhkan.	Menentukan jumlah *safety stock* dan *re-order* point menggunakan peramalan dan simulasi.	ABC *Analysis*; *Economic Order Quantity* (EOQ), dan *Re-order Point*.	Berkurangnya total biaya persediaan dan fokus pengadaan kembali terhadap *sparepart* kritis.
14	Damayanti & Sukmono, 2024	Perusahaan penyedia layanan alat berat.	Tidak terdapat sistem yang menghitung jumlah permintaan *sparepart*.	Menentukan jumlah pesanan yang optimal.	*Economic Order Quantity* (EOQ), dan *Continuous Review* (*Q System*).	Penurunan biaya persediaan dan meningkatkan penanganan perbaikan.
15	Güçdemir & Taşoğlu, 2024	Industri *high-tech technology*.	Banyaknya variasi permintaan *sparepart* dan perubahan *sparepart*.	Menerapkan model optimasi untuk mengontrol penyimpanan *sparepart*.	*Mathematical Modeling, Optimization*.	Meningkatnya keakuratan kontrol terhadap penyimpanan dan menurunnya resiko kehabisan *sparepart*.
16	Adelia & Mandala, 2021	Gudang *sparepart* manufaktur.	Penumpukan pada *sparepart* dengan jenis *slow-moving* dan kekurangan *sparepart* dengan jenis *fast-moving*.	Klasifikasi jenis *sparepart* berdasarkan tingkat prioritasnya.	ABC *Analysis*.	Persediaan *sparepart* kritis menjadi lebih optimal dan meningkatnya efisiensi gudang.
17	Tampubolon & Budiman, 2020	Persediaan pada *dealer* sepeda motor.	Biaya simpan yang tinggi dikarenakan tidak adanya pengendalian persediaan *sparepart*.	Melakukan optimasi terhadap jumlah dan frekuensi permintaan *sparepart*.	*Economic Order Quantity* (EOQ), dan *Re-order Point*.	Terkendalinya persediaan *stock sparepart* dan biaya persediaan.

Tabel 2.1 Ringkasan Tinjauan Pustaka (lanjutan)

No	Pustaka	Objek	Masalah	Solusi	Metode dan Tools	Hasil
18	Amallynda & Wicaksono, 2024	Persediaan suku cadang di industri kayu lapis.	Tidak akuratnya peramalan penggunaan *sparepart* sehingga terjadi kelebihan dan kekurangan *sparepart*.	Merancang strategi peramalan permintaan dan persediaan *sparepart*.	Peramalan *time series, Economic Order Quantity* (EOQ), dan *Safety Stock.*	Persediaan *sparepart* menjadi optimal serta biaya simpan menurun.

2.2 Dasar Teori

Penulisan dasar teori disusun berdasarkan studi literatur yang digunakan sebagai penyusunan Tugas Akhir. Dasar teori tersebut berfungsi sebagai pemahaman dasar atau pengetahuan dasar tentang konsep yang digunakan dalam Tugas Akhir. Mata kuliah yang terkait dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah *Maintenance System* (STIN65602), *Inventory System* (STIN72602), dan Simulasi Industri (STIN52703) serta beberapa buku dari berbagai sumber

2.2.1 Maintenance

Maintenance umumnya dipahami sebagai kegiatan pemeliharaan atau perawatan. Pemeliharaan merupakan serangkaian tindakan yang diperlukan untuk menjaga kualitas mesin agar tetap berfungsi dengan baik seperti pada kondisi awalnya (Pranowo, 2019)Kegiatan ini bertujuan untuk mempertahankan atau mengembalikan kemampuan mesin sehingga dapat beroperasi secara optimal. Selain itu, pemeliharaan berperan sebagai aktivitas pendukung yang memastikan mesin dan peralatan selalu siap digunakan ketika diperlukan. Dengan demikian, pemeliharaan mencakup seluruh upaya untuk menjaga mesin dan peralatan tetap berada dalam kondisi operasional yang aman, serta memungkinkan pengendalian ketika terjadi kerusakan.

Tujuan utama dari manajemen pemeliharaan adalah memastikan bahwa fasilitas produksi selalu tersedia dan dapat beroperasi secara optimal dengan pengeluaran biaya perawatan yang minimal. Upaya tersebut dilakukan dengan menekan waktu berhentinya mesin, meningkatkan mutu hasil produksi, memperpanjang umur penggunaan peralatan, menjamin keselamatan tenaga kerja, serta menjaga kemampuan mesin agar tetap berfungsi sesuai kebutuhan operasional. Dengan demikian, kegiatan pemeliharaan memegang peranan penting dalam meningkatkan efektivitas dan produktivitas perusahaan, sekaligus mendukung tercapainya keuntungan serta kepuasan pelanggan.

2.2.2 Jenis-Jenis *Maintenance*

Dalam manajemen pemeliharaan, kegiatan pemeliharaan dikelompokkan berdasarkan karakteristik *dependability*, yaitu kemampuan suatu sistem untuk beroperasi dan memenuhi fungsi yang dibutuhkan. Secara garis besar, pemeliharaan terbagi menjadi dua kategori, yaitu pemeliharaan yang menyebabkan perubahan pada karakteristik intrinsik sistem (*change of intrinsic dependability characteristics*) dan pemeliharaan yang tidak menyebabkan perubahan pada karakteristik tersebut (*no change of intrinsic dependability characteristics*). Pemeliharaan yang mengubah karakteristik intrinsik meliputi aktivitas *improvement*, yakni upaya peningkatan yang bertujuan untuk mengurangi potensi kegagalan melalui modifikasi atau penambahan elemen pelindung pada sistem. Sebaliknya, pemeliharaan yang tidak mengubah karakteristik

intrinsik diklasifikasikan menjadi pemeliharaan yang dilakukan sebelum terjadinya kegagalan (*before failure*) atau pemeliharaan preventif, serta pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadinya kegagalan (*after fault*) atau pemeliharaan korektif (Nurchayo & Nurdini, 2024)

Ditinjau dari aspek penurunan kondisi (*degradation*), pemeliharaan *preventive* dikelompokkan menjadi *predetermined maintenance* dan *condition based maintenance*. *Predetermined maintenance* dilaksanakan berdasarkan jadwal waktu atau tingkat pemakaian tertentu tanpa mempertimbangkan kondisi aktual komponen, sedangkan *condition based maintenance* dilakukan dengan mengacu pada hasil pemantauan kondisi fisik dan kinerja peralatan melalui kegiatan observasi, inspeksi, pengujian, serta pemantauan parameter operasi. Pendekatan ini memungkinkan pelaksanaan pemeliharaan yang lebih tepat sasaran sesuai dengan kondisi aktual aset (Nurcahyo & Nurdini, 2024).

2.2.3 Preventive Maintenance

Preventive maintenance merupakan suatu kegiatan pemeliharaan mesin yang dilakukan secara terencana dan berkala dengan tujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan secara tiba-tiba pada mesin atau peralatan produksi. Pemeliharaan ini dilakukan sebelum mesin mengalami gangguan sehingga kondisi mesin dapat tetap terjaga dan mampu beroperasi secara optimal selama proses produksi berlangsung. *Preventive maintenance* menjadi salah satu upaya penting yang diterapkan perusahaan untuk menjaga kelancaran proses produksi, meningkatkan keandalan mesin, serta mengurangi risiko terjadinya *downtime* yang dapat menghambat aktivitas operasional perusahaan (Siswanto, 2017).

Pelaksanaan *preventive maintenance* meliputi berbagai kegiatan pemeliharaan seperti inspeksi rutin, pelumasan, pembersihan, penyetelan, pengujian, serta penggantian komponen tertentu sesuai jadwal yang telah ditentukan. Kegiatan tersebut dilakukan untuk mendeteksi kondisi abnormal pada mesin sedini mungkin sehingga kerusakan yang lebih besar dapat dihindari. Selain itu, *preventive maintenance* juga dapat membantu memperpanjang umur pakai mesin dan menjaga performa mesin agar tetap stabil selama digunakan dalam proses produksi. Dengan adanya pemeliharaan yang dilakukan secara rutin, perusahaan dapat menekan biaya perbaikan darurat serta meningkatkan efektivitas dan efisiensi penggunaan mesin produksi (Siswanto, 2017).

Menurut (Nurchayo & Nurdini, 2024) *preventive maintenance* mulai diperkenalkan sejak tahun 1951 sebagai suatu pendekatan pemeliharaan yang berfokus pada pemeriksaan fisik peralatan guna mencegah terjadinya kerusakan serta memperpanjang umur pakai mesin. *Preventive Maintenance* (PM) mencakup aktivitas perawatan yang dilakukan secara berkala berdasarkan interval waktu tertentu atau tingkat penggunaan mesin. Pada tahap ini, fungsi

pemeliharaan telah dirancang secara sistematis dengan pendekatan *time-based maintenance* (TBM), yang didasarkan pada estimasi probabilitas terjadinya kegagalan atau penurunan kinerja dalam periode tertentu. Kegiatan yang dilakukan dalam *preventive maintenance* meliputi pelumasan, pembersihan, penggantian komponen, pengencangan, serta penyesuaian peralatan. Selain itu, selama pelaksanaan perawatan, dilakukan pula inspeksi untuk mendeteksi indikasi awal kerusakan pada peralatan produksi.

2.2.4 Diagram Pareto

Diagram Pareto merupakan metode analisis yang menyajikan data dalam bentuk persentase serta nilai kumulatif pada setiap kategori, bukan dalam bentuk angka asli. Penyajian data menggunakan persentase bertujuan untuk menormalkan data sehingga perbandingan antar kategori dapat dilakukan secara lebih jelas. Persentase kegagalan dihitung dengan membagi jumlah kegagalan pada masing-masing kategori terhadap total kegagalan, kemudian dikalikan seratus persen. Dengan menampilkan persentase dan akumulasi nilai tersebut, Diagram Pareto memudahkan identifikasi faktor-faktor utama yang paling berkontribusi terhadap terjadinya permasalahan, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam menetapkan prioritas perbaikan. Perhitungan persentase kegagalan diperlukan untuk mengubah data jumlah kejadian menjadi bentuk persentase sehingga dapat dianalisis menggunakan Diagram Pareto. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\text{Persentase Kegagalan} = \frac{\text{Frekuensi Kategori}}{\text{Total Frekuensi}} \times 100\% \quad (2.1)$$

2.2.5. *Mean Time to Repair* (MTTR)

Mean Time to Repair (MTTR) merupakan ukuran yang digunakan untuk mengetahui rata-rata waktu yang diperlukan dalam melakukan perbaikan suatu mesin atau sistem setelah terjadi kerusakan hingga dapat kembali beroperasi secara normal. Pengukuran MTTR menjadi salah satu parameter penting dalam analisis keandalan karena memiliki keterkaitan langsung dengan tingkat *downtime* serta efisiensi proses produksi. Berdasarkan penelitian (Naufal et al., 2026), MTTR digunakan bersamaan dengan indikator keandalan lainnya, seperti MTBF, untuk menilai kinerja mesin serta menentukan interval *preventive maintenance* yang paling optimal. Semakin kecil nilai MTTR, maka proses perbaikan dapat dikatakan semakin cepat dan efisien, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan *availability* sistem serta meminimalkan gangguan dalam kegiatan produksi.

2.2.6. *Mean Time to Failure* (MTTF)

Mean Time to Failure (MTTF) merupakan ukuran keandalan yang menunjukkan rata-rata waktu operasi suatu komponen atau sistem hingga mengalami kegagalan. Menurut (Haq & Riandadari, 2019) MTTF adalah waktu ekspektasi terjadinya kegagalan yang merepresentasikan rata-rata waktu kerusakan yang akan datang dari suatu sistem. Selain itu, MTTF juga didefinisikan sebagai masa kerja komponen sejak pertama kali dioperasikan hingga mengalami kerusakan. Oleh karena itu, parameter MTTF sering digunakan dalam analisis keandalan untuk memperkirakan umur pakai komponen serta sebagai dasar dalam penyusunan strategi perawatan yang bertujuan meningkatkan keandalan dan ketersediaan sistem.

2.2.7. *Inventory System*

Menurut (Destriana, 2024), *Inventory system* digunakan untuk mengelola dan mengawasi perencanaan kebutuhan, pengadaan, penyimpanan, dan pengendalian persediaan di dalam sebuah organisasi. *Inventory system* yang optimal akan mengatasi kebutuhan suatu barang dapat tersedia pada saat dibutuhkan sehingga tidak akan menganggu proses operasional dan meminimalisir risiko ketidaksesuaian kebutuhan. Tujuan utama dari *inventory sytem* yaitu meningkatkan efisiensi proses operasional, memastikan ketersediaan barang dalam mendukung proses operasional, mengoptimalkan kebutuhan serta permintaan, meminimalkan risiko kekurangan atau kelebihan barang, dan menjadi dasar dalam pengambilan keputusan. Pengelolaan persediaan yang optimal dapat membantu sebuah organisasi dalam meningkatkan tingkat pelayanan dan menyesuaikan kebutuhan barang sesuai dengan permintaan yang dapat berpengaruh terhadap keberlanjutan bisnis.

Menurut (Purnomo & Riana, 2018), pengendalian persediaan adalah bagian dari manajemen persediaan berfokus pada penentuan jumlah dan waktu pemesanan dengan tujuan untuk mengoptimalkan ketersediaan barang yang akan digunakan oleh suatu organisasi. Pengendalian persediaan yang optimal dapat berdampak juga dalam pengelolaan gudang penyimpanan dan memaksimalkan sumber daya. Selain itu, dengan menerapkan pengendalian persediaan, sebuah organisasi memastikan kelancaran proses operasional, merencanakan serta mengambil keputusan dalam persediaan.

Kemudian menurut (Setiaman, 2024), manajemen persediaan adalah perencanaan dan pengendalian sebuah persediaan yang dibutuhkan oleh suatu organisasi dengan tujuan untuk menentukan jumlah suatu barang yang dibutuhkan secara optimal supaya tidak terjadi kekurangan stok ataupun kelebihan stok.

Inventory system menggunakan metode analitik yang diklasifikasikan menjadi dua yaitu model deterministik dan model probabilistik. Klasifikasi tersebut berdasarkan informasi atau data yang dimiliki oleh sebuah perusahaan tentang jumlah permintaan, *lead time*, dan variabel lain yang dapat mempengaruhi pengendalian persediaan. Penelitian yang dilakukan oleh (Tikupadang & Rusdiansyah, 2024) menggunakan distribusi probabilitas diskrit yang memiliki batas atas dan batas bawah untuk menangani ketidakpastian *lead time* serta jumlah permintaan. Kemudian penelitian yang dilakukan oleh (Farisan et al., 2025) menggunakan distribusi probabilitas kontinu untuk melakukan perhitungan *safety stock*. Berikut merupakan penjelasan dari masing-masing model.

A. Model Deterministik

Model deterministik digunakan pada saat seluruh variabel bersifat pasti dan dapat diprediksi. *Economic Order Quantity* (EOQ) deterministik dapat digunakan untuk menentukan jumlah optimal yang harus dipesan untuk suatu barang dengan mempertimbangkan biaya pemesanan, biaya penyimpanan, dan jumlah permintaan. Tujuannya untuk mengurangi total biaya yang digunakan untuk melakukan persediaan dan penyimpanan suatu barang.

Rumus EOQ deterministik yang digunakan sebagai berikut.

$$Q^* = \sqrt{\frac{2\,D\,C}{H}} \tag{2.2}$$

Keterangan:

Q* = Jumlah pembelian optimal

D = Permintaan /periode

C = Biaya pemesanan /pesanan

H = Biaya penyimpanan /unit/tahun

B. Model Probabilistik

Model probabilistik digunakan pada saat adanya ketidakpastian dalam jumlah permintaan, *lead time*, dan variabel lainnya yang mempertimbangkan distribusi peluang. *Economic Order Quantity* (EOQ) probabilistik digunakan untuk menghitung Q dan *re-order point* yang saling bergantung yang dilakukan dengan iterasi sehingga dapat menghasilkan nilai optimal. Langkah-langkah yang digunakan untuk rumus EOQ Probabilistik sebagai berikut.

1. Menghitung nilai Q dengan E (M > B) = 0, rumus Q yang digunakan sebagai berikut.

$$Q = \sqrt{\frac{2\,D\,C}{H}} \tag{2.3}$$

2. Menghitung nilai P (M > B) dan B menggunakan rumus Q pada langkah 1.

$$P\,(M > B) = \frac{H\,Q}{A\,D} \tag{2.4}$$

$$B = ROP = \bar{M} + SS \tag{2.5}$$

$$SS = B - \bar{M} \tag{2.6}$$

3. Menghitung nilai E (M > B) menggunakan rumus B pada langkah 2.

$$E\,(M > B) = \sum_{M=B+1}^{M\,max} (M-B)\,P\,(M) \tag{2.7}$$

$$E\,(M > B) = \int_{B}^{\infty} (M-B)\,f(M)\,dM \tag{2.8}$$

Rumus (2.7) merupakan perhitungan untuk distribusi probabilitas diskrit yang dapat dihitung dengan batasan dan rumus (2.8) merupakan perhitungan untuk distribusi probabilitas kontinu yang nilai intervalnya tidak dapat dihitung.

4. Menghitung kembali nilai Q menggunakan rumus E (M > B) sebagai Q*.

$$Q^* = \sqrt{\frac{2\,D\,[C+A\,E\,(M > B)]}{H}} \tag{2.9}$$

5. Ulangi langkah 2, 3, dan 4 untuk melakukan perhitungan pada iterasi berikutnya.

Keterangan:

Q	= Jumlah Pembelian
P(M>B), f(B)	= Probabilitas *stockout*
B	= *Re-order point*
SS	= *Safety Stock*
$\bar{M}$	= Rata-rata *leadtime*
P(M)	= Probabilitas *leadtime* permintaan
E(M>B)	= Perkiraan *stockout* selama *leadtime*
Q*	= Jumlah pembelian optimal
D	= Permintaan per periode
C	= Biaya pemesanan per pesan
H	= Biaya penyimpanan per unit per tahun

A = Biaya kekurangan per unit

G = Biaya kekurangan per *downtime*

P = Harga barang per unit

Total biaya (O_T) dibutuhkan dalam mengelola persediaan yang terdiri dari ongkos pembelian (O_B) merupakan harga beli atau produksi setiap unit dengan cara perkalian antara jumlah pembelian barang (D) dengan harga barang per unit (P), ongkos pemesanan (O_p) merupakan biaya yang digunakan per pemesanan dengan cara perkalian antara frekuensi pemesanan (f) dengan ongkos setiap pemesanan (A), ongkos simpan (O_S) merupakan biaya yang terjadi karena penyimpanan suatu produk pada periode tertentu dengan perkalian antara rata-rata jumlah penyimpanan di gudang (M) dan ongkos simpan per periode (H), dan ongkos kekurangan persediaan (O_K) merupakan risiko tidak terpenuhinya suatu pesanan. Total biaya dapat dituliskan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$O_T = O_B + O_P + O_S + O_K \quad (2.10)$$

O_T = Total Biaya

O_B = Ongkos Pembelian

O_P = Ongkos Pemesanan

O_S = Ongkos Simpan

O_K = Ongkos Kekurangan

2.2.8 Simulasi Sistem Industri

Menurut (Budiharti, 2015) sistem industri merupakan model yang digunakan untuk menguji berbagai kondisi atau berbagai skenario yang dapat terjadi tanpa mengganggu sistem nyata yang sedang diterapkan. Model simulasi dapat memberikan gambaran terhadap perubahan atau ketidakpastian terhadap suatu kebutuhan atau permintaan. Simulasi dapat berfungsi untuk menganalisis kebutuhan dan ketersediaan barang serta mengukur efektivitas dari pengelolaan persediaan secara menyeluruh. Selain itu, simulasi juga dapat membantu sebuah organisasi untuk mengevaluasi dan memprediksi akibat yang dihasilkan dari perubahan-perubahan dalam permintaan, *lead time*, dan kondisi lainnya. Model simulasi memiliki beberapa komponen yang penting dalam penyusunan model simulasi, komponen-komponen tersebut sebagai berikut.

Tabel 2.2 Komponen Model Simulasi

No.	Komponen	Penjelasan
1	*Entity*	Objek yang bergerak, mengubah status, mempengaruhi hasil yang didapatkan dalam model simulasi.
2	*Attribute*	Setiap *entity* memiliki karakteristiknya masing-masing yang disebut dengan nama *attribute* yang terkait dengan *entity* tertentu.
3	*Variable*	Sebuah nilai yang menggambarkan karakteristik suatu sistem. *Variable* memiliki perbedaan dengan *attribute* yaitu tidak terikat oleh suatu *entity* tetapi terikat oleh suatu sistem sehingga suatu *entity* dapat memiliki *variable* yang sama.
4	*Resource*	Fasilitas yang digunakan sebagai sumber informasi yang dibutuhkan oleh suatu *entity* untuk melakukan proses dalam simulasi.
5	*Queue*	Tempat mengantri bagi suatu *entity* yang dapat disebabkan oleh *resource* yang tidak tersedia sehingga *entity* yang lain tidak dapat diproses dan harus menunggu.
6	*Event*	Sesuatu yang terjadi pada saat tertentu sehingga menyebabkan perubahan status pada model simulasi. *Event* yang dapat terjadi berupa kedatangan (*arrival*), *entity* meninggalkan sistem (*departure*), dan *the end* (berhenti).
7	*Simulation Clock*	Waktu yang digunakan dalam simulasi untuk mengatur urutan waktu pada saat terjadinya suatu *event*.
8	*Replication*	Pengulangan proses simulasi menggunakan *input* dan model yang sama tetapi terdapat bilangan acak untuk mendapatkan rata-rata hasil akhir yang lebih stabil.

2.2.9 Simulasi Monte Carlo

Simulasi merupakan suatu metode kuantitatif yang digunakan untuk merepresentasikan sistem nyata ke dalam bentuk model yang lebih sederhana, sehingga hubungan antar variabel dalam sistem dapat dianalisis dan digunakan untuk memprediksi kondisi di masa mendatang tanpa harus melakukan percobaan langsung pada sistem tersebut. Salah satu metode simulasi yang banyak digunakan adalah simulasi Monte Carlo, yaitu teknik analisis numerik yang memanfaatkan bilangan acak sebagai input dalam mengevaluasi model, khususnya pada permasalahan yang bersifat kompleks, non-linear, dan mengandung ketidakpastian (Hasugian et al., 2022)

Simulasi Monte Carlo juga dapat dipahami sebagai metode berbasis sampling statistik, di mana nilai input dihasilkan secara acak berdasarkan distribusi probabilitas yang merepresentasikan kondisi nyata. Dengan pendekatan ini, berbagai kemungkinan hasil dapat disimulasikan untuk melihat pengaruh variasi dan ketidakpastian terhadap kinerja sistem. Oleh karena itu, metode ini bersifat stokastik dan sangat efektif digunakan dalam analisis risiko, evaluasi sistem, serta peramalan karena mampu menggambarkan kondisi yang lebih realistis dibandingkan pendekatan deterministik (Hasugian et al., 2022)

2.2.10 Uji t-test

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Wibawa, 2020) pengujian hipotesis dilakukan jika terdapat hasil yang timpang tindih (*overlap*) dengan bantuan *software* Microsoft Excel menggunakan *tools Data Analysis* berupa "*t-Test two sample assuming unequal variances*".

Pengujian t-test dapat menggunakan rumus sebagai berikut.

$$t_{\text{hitung}} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \qquad (2.11)$$

Keterangan :

t_{hitung} = Uji hipotesis

$\bar{x}_1$ = Rata-rata sampel 1

$\bar{x}_2$ = Rata-rata sampel 2

s_1 = Standar deviasi sampel 1

s_2 = Standar deviasi sampel 2

n_1 = Jumlah sampel 1

n_2 = Jumlah sampel 2

Pengujian hipotesis akan ditolak jika t_{hitung} lebih besar dibandingkan t_{tabel} ($t_{\text{hitung}} > t_{\text{tabel}}$). Sebaliknya, hipotesis akan diterima jika t_{hitung} lebih kecil dibandingkan t_{tabel} ($t_{\text{hitung}} < t_{\text{tabel}}$). Hal ini dilakukan untuk membandingkan hasil rata-rata dari kedua sampel.

2.2.11 Uji Distribusi

Uji distribusi merupakan proses statistik yang digunakan untuk menentukan jenis distribusi probabilitas yang paling sesuai dengan karakteristik data yang diamati. Dalam analisis keandalan (reliability), uji distribusi dilakukan terhadap data waktu antar kerusakan (*Time to Failure/TTF*) maupun waktu perbaikan (*Time to Repair/TTR*) untuk memperoleh model distribusi yang mampu merepresentasikan perilaku kegagalan komponen secara akurat. Pemilihan distribusi yang tepat sangat penting karena akan memengaruhi hasil perhitungan

parameter keandalan, seperti *Mean Time to Failure* (MTTF), *Mean Time to Repair* (MTTR), fungsi keandalan (*reliability function*), serta laju kegagalan (*failure rate*) (Otaya,2016.)

Beberapa distribusi probabilitas yang umum digunakan dalam analisis keandalan meliputi distribusi Weibull, Eksponensial, Normal, dan Lognormal. Distribusi Weibull merupakan distribusi yang paling banyak digunakan karena memiliki tingkat fleksibilitas yang tinggi dalam menggambarkan berbagai pola kegagalan komponen, baik yang memiliki laju kegagalan menurun, konstan, maupun meningkat. Sementara itu, distribusi Eksponensial digunakan ketika laju kegagalan dianggap konstan, sedangkan distribusi Normal dan Lognormal lebih sesuai digunakan pada data yang memiliki karakteristik simetris atau data yang dipengaruhi oleh banyak faktor acak (Otaya, 2016).

2.3 Standar dan Kode Etik

Penyusunan jadwal *preventive maintenance* didasarkan pada dua standar utama, yaitu Standar ISO 55001 dan Standar ISO 14224, yang menjadi pedoman dalam pengelolaan aset serta pengumpulan data pemeliharaan secara sistematis. Standar ISO 55001 klausul 6 hingga klausul 10 merupakan standar yang mengatur manajemen aset dan menekankan bagaimana suatu organisasi mengelola asetnya secara optimal sepanjang siklus hidup. Standar ini mencakup berbagai prinsip penting seperti nilai aset, keselarasan antara aset dan tujuan organisasi, jaminan keberlanjutan, serta pengelolaan risiko. Di dalamnya juga terdapat elemen-elemen kunci seperti strategi aset, kebijakan pemeliharaan, prosedur pengendalian risiko, perencanaan siklus hidup, dan evaluasi kinerja. Dengan demikian, Standar ISO 55001 memastikan bahwa jadwal *preventive maintenance* yang dibuat tetap konsisten dengan tujuan operasional dan mendukung keandalan aset dalam jangka panjang.

Sementara itu, Standar ISO 14224 klausul 7 berperan sebagai standar yang mengatur metode pengumpulan, penyusunan, dan klasifikasi data keandalan serta pemeliharaan. Standar ini menyediakan format data yang terstruktur untuk mencatat informasi terkait peralatan, karakteristik komponen, mode kegagalan, penyebab kerusakan, serta tindakan pemeliharaan yang dilakukan. Standar ISO 14224 klausul 8 dan klausul 9 menjelaskan istilah dan parameter keandalan seperti MTBF, MTTR, tingkat kegagalan, dan performa aset berdasarkan riwayat kerusakan. Dengan adanya sistem klasifikasi kegagalan yang jelas dan konsisten, analisis akar masalah serta penentuan interval *preventive maintenance* dapat dilakukan lebih tepat sasaran dan berbasis data aktual. Melalui penerapan kedua standar tersebut, perancangan jadwal *preventive maintenance* menjadi lebih sistematis, terukur, dan mengikuti standar praktik terbaik internasional.

Kemudian perancangan sistem persediaan *sparepart* didasarkan pada prinsip pengelolaan pengadaan yang diatur dalam Peraturan Presiden No. 16 Tahun 2018 Pasal 6 dan pasal 7 ayat 1 tentang pengadaan barang dan jasa pemerintah yang berfokus pada efisiensi, transparansi, akuntabilitas, dan terhindar dari konflik kepentingan. Peraturan tersebut menjadi dasar yang dapat dipertanggungjawabkan dan dilakukan secara objektif dalam memilih vendor, negosiasi, dan evaluasi. Standar SNI ISO 9001 klausul 8.4 digunakan untuk merencanakan kebutuhan, memastikan spesifikasi *sparepart*, dan proses penerimaan barang dapat tercatat melalui prosedur dan terukur.

Pengelolaan persediaan menggunakan *American Production and Inventory Control Society* (APICS) yang sekarang masuk ke dalam *Association for Supply Chain Management* (ASCM) memberikan dasar dalam menghitung kebutuhan material, manajemen *Maintenance*, *Repair*, and *Operations* (MRO) *sparepart*, menentukan *safety stock*, dan mengendalikan persediaan berdasarkan permintaan dan *lead time*. Standar manajemen ISO 55001 klausul 6 hingga klausul 10 juga digunakan untuk menyesuaikan kebijakan persediaan dalam memastikan kesesuaian aset sehingga pengambilan keputusan pembelian aset berdasarkan komponen kritis, analisis risiko proses operasional, dan biaya daur hidup sebuah aset.

Dalam memastikan keamanan dan integritas rantai pasok diperlukan standar ISO 28000 klausul 4.2 dan klausul 4.3 untuk menghindari pemalsuan *sparepart*, gangguan dalam distribusi, dan penyimpangan logistik. Proses persediaan barang dari vendor juga harus dilakukan secara adil tanpa adanya sebuah kolusi ataupun manipulasi harga, peraturan tersebut tertulis Undang-Undang No. 5 Tahun 1999 pasal 5 dan pasal 22 tentang larangan monopoli. Diperlukan prinsip etika profesional dari *Chartered Institute of Procurement & Supply* (CIPS) *Code of Ethics* untuk menentukan pengambilan keputusan dalam pembelian, kerahasiaan data vendor, dan menghindari gratifikasi dalam proses transaksi.