BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka ini menyajikan kajian mengenai penelitian dan juga literatur yang relevan yang sesuai dengan persoalan efisiensi dan produktivitas pada PT. XYZ khususnya pada Departemen Produksi Mesin Cuci. Tinjauan pustaka ini nantinya dapat membantu mengidentifikasi pendekatan dan metode yang efektif untuk memecahkan masalah yang ada. Pengumpulan referensi dilakukan melalui pencarian pada Repositori Atma Jaya Yogyakarta, *Google Scholar*, dan juga sumber-sumber lain yang berupa jurnal dan juga buku. Kata kunci yang digunakan antara lain adalah "*downtime*", "produktivitas", "efisiensi", "mesin cuci", "produksi", "*maintenance*". Pemilihan kata kunci "produktivitas" dan "efisiensi" dilakukan karena kedua konsep ini merupakan indikator kinerja kunci dalam suatu sistem produksi, dan *downtime* merupakan faktor penghambat langsung terhadap pencapaian keduanya. Keseluruhan temuan diringkas dan dijabarkan secara lebih rinci pada Tabel 2.1. untuk memudahkan perbandingan dan juga analisis.

2.1.1 Penelitian Terdahulu Mengenai Tingginya *Downtime* dan Rendahnya Efektivitas Mesin *Overall Equipment Effectiveness* (OEE)

Berdasarkan analisis terhadap penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa tingginya *downtime* dan rendahnya *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) merupakan masalah yang memerlukan pendekatan komprehensif. Lacerda *et al*. (2025) Mengidentifikasi masalah *micro-Downtime* yang sering tidak terlihat namun berdampak sistemik. Dampaknya adalah hilangnya kapasitas produksi dan pemborosan biaya yang signifikan dengan metode kerangka kerja *Lean*-DMAIC-*Agile* yang dinamis untuk menghilangkan pemborosan, termasuk *micro-Downtime*. Okirie *et al*. (2025) Sepakat bahwa *downtime* yang tinggi, baik yang berskala besar maupun kecil, langsung berimbas pada rendahnya *availability* mesin, yang merupakan komponen kunci OEE, dan memberikan solusi dengan *predictive maintenance* berbasis simulasi Bayesian untuk memprediksi dan mencegah *downtime* skala besar sebelum terjadi. Pendekatan ini sejalan dengan Lestari & Mundari (2024) yang menerapkan *Total Productive Maintenance*, sebuah pilar *Lean Manufacturing*, untuk menciptakan budaya perawatan yang mencegah kerusakan. Sementara menurut Seedao *et al*. (2025) tanpa pengukuran yang akurat, *downtime* sering kali salah diklasifikasikan, sehingga akar penyebabnya tidak tertangani dan upaya perbaikan menjadi tidak tepat sasaran.

Penelitian lain oleh (Anggraini & Aditia, 2016) juga memanfaatkan Monte Carlo Simulation dalam penyusunan jadwal *preventive maintenance* pada mesin produksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menurunkan *downtime* secara signifikan dibandingkan dengan metode *corrective maintenance* yang sebelumnya digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa simulasi *Monte Carlo* efektif untuk mengevaluasi performa sistem pemeliharaan di bawah kondisi ketidakpastian.

2.1.2 Penelitian Terdahulu Mengenai Inefisiensi Proses dan Aliran Material

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan mengenai efisiensi pada proses dan aliran material menunjukkan bahwa hal ini sangat berpengaruh pada banyak hal, seperti output produk, downtime, total *manpower* yang dibutuhkan, penghematan biaya. Mrdjenovic *et al*. (2025) melakukan penelitian terkait permasalahan yang ada pada proses produksi kaleng aerosol akibat tipe produk yang bervariasi. Hal ini menyebabkan *downtime* dan biaya yang besar untuk menutup kerugian akibat *downtime*. Waktu *downtime* ini dapat ditekan dengan cara pengembangan model *binary decision variables* untuk penjadwalan produksi, serta penyeimbangan biaya material dengan biaya *downtime*. Tarigan *et al*. (2021) dan Ong dan Cornellia (2014) menambahkan bahwa *relayout* area stasiun kerja produksi dengan metode *Graph Theory Method* untuk mengelompokkan stasiun kerja yang sejenis, serta pengurutan ulang urutan produksi sehingga dapat meningkatkan efisiensi lini produksi. Rose *et al*. (2020) meningkatkan produktivitas, memotong jumlah operator dengan menerapkan prinsip Single Minute Exchange of Die (SMED) dan menerapkan *Value Stream Mapping* (VSM) untuk dapat meningkatkan produktivitas pada lini produksi.

2.1.3 Penelitian Terdahulu Mengenai Kualitas Produk dan Cacat Produksi

Berdasarkan analisis terhadap dua penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa tingginya produk cacat (*defect*) merupakan masalah kritis yang memerlukan pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi akar penyebab dan menerapkan solusi perbaikan yang tepat. (Afifa & Damayanti, 2023) Menginvestigasi masalah cacat pada komponen *wash* motor mesin cuci yang mengakibatkan tingginya biaya *rework*, penurunan produktivitas dan kualitas produk yang tidak konsisten. Metodologi Six Sigma dengan pendekatan DMAIC yang dilengkapi dengan *Five*-M *Checklist* untuk intervensi menyeluruh pada faktor *man, machine, method, material* dan *environment*.

2.1.4 Penelitian Terdahulu Mengenai Pengukuran Kinerja dan Optimasi Sistem yang Kompleks

Berdasarkan analisis terhadap dua penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa pengukuran kinerja dan optimasi sistem produksi yang kompleks memerlukan pendekatan inovatif. Dalam penelitiannya, Suh (2025) mengatasi keterbatasan pengukuran terpisah antara produktivitas dan keselamatan dengan mengembangkan *Productivity-Safety Effectiveness Index* (PSEI) menggunakan *Data Envelopment Analysis* (DEA). Indeks ini mengakibatkan kemampuan menilai efisiensi 15 industri manufaktur Korea, yang mengungkap rata-rata efisiensi masih rendah, sekaligus memberikan dasar kuantitatif untuk perbaikan strategis yang menyeimbangkan *output* produksi dengan kesejahteraan pekerja.

Di lingkungan produksi nyata pabrik Ford, Llopis *et al*. (2024) memperkenalkan konsep *sub-bottleneck* melalui tool I3oT yang memanfaatkan sensor *existing*. Dengan menganalisis *mini-terms* (*sub-cycle time*), *tool* ini tidak hanya mengidentifikasi *bottleneck* tradisional tetapi juga gangguan tersembunyi di tingkat komponen, yang mengakibatkan kemampuan melakukan optimasi presisi seperti penyesuaian kecepatan robot tertentu yang justru mengurangi konsumsi energi hingga 20,79% tanpa menurunkan *throughput*. Penelitian oleh (Kosasih et al., 2021) Menggunakan pendekatan Monte Carlo Simulation untuk mengoptimalkan biaya pemeliharaan mesin produksi. Studi ini menunjukkan bahwa penerapan simulasi probabilistik mampu mengevaluasi berbagai skenario pemeliharaan yang menghasilkan penurunan biaya yang signifikan dibandingkan dengan kondisi aktual.

2.1.5 Penelitian Terdahulu Mengenai Pendekatan Pemeliharaan Berbasis Keandalan dan Risiko

Secara fundamental, *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) didefinisikan sebagai pendekatan sistematis untuk menentukan kebutuhan pemeliharaan berdasarkan fungsi dan keandalam sistem menurut Afefy *et al*. (2019) dan Rizkya *et al*. (2019). Landasan teori ini menekankan pergeseran paradigma dari pemeliharaan berbasis waktu (*time-based*) menuju pemeliharaan berbasis kondisi dan risiko (*risk-based*). Afefy *et al*. (2019) mengembangkan kerangka kerja RCM yang terstruktur dan terukur. Secara teoritis, penelitian ini mengisi celah dalam RCM dengan mengusulkan model yang mencakup analisis metrik kinerja pemeliharaan dan alur kerja yang terintegrasi.

Di sisi lain, Rizkya *et al*. (2019) dan Cahyati *et al*. (2024) mengintegrasikan teori *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) ke dalam proses RCM. Secara teoritis, FMEA berfungsi sebagai alat untuk melakukan dekomposisi sistem ke dalam mode kegagalan potensial, menilai dampaknya, kemungkinan terjadinya, dan kemampuan deteksi. Hasil penilaian ini menghasilkan *Risk Priority Number* (RPN) yang memberikan dasar kuantitatif dan objektif untuk memprioritaskan intervensi pemeliharaan. Konsep Total Minimum *Downtime* (TMD) dan *Age Replacement Method* yang digunakan menunjukkan bahwa interval optimal dicapai pada titik keseimbangan (*trade-off*) antara biaya atau *downtime* akibat kegagalan tak terduga dengan biaya atau *downtime* akibat pemeliharaan *preventif* yang terlalu sering.

Penelitian oleh, (Naufal et al., 2026) melakukan analisis keandalan mesin menggunakan MTTF dan MTTR berdasarkan data historis. Studi ini bertujuan untuk menentukan interval *preventive maintenance* yang optimal pada komponen kritis dengan kerusakan tinggi. Hasilnya menunjukkan bahwa penerapan *preventive maintenance* mampu mengurangi *downtime* dan meningkatkan efisiensi dibandingkan dengan perawatan reaktif. Selanjutnya, penelitian (Marzuki, Ahmad, Suliantoro, 2013) menganalisis tingkat keandalan dan ketersediaan mesin menggunakan pendekatan *Reliability Engineering.* Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai keandalan mesin cenderung menurun seiring waktu. Penelitian ini menekankan pentingnya penggunaan parameter seperti MTTF dan laju kegagalan dalam menentukan strategi pemeliharaan yang efektif.

2.1.6 Ringkasan Tinjauan Pustaka Mengenai *Setup* atau *Changeover* Mesin

Secara teoritis, reduksi waktu *setup* merupakan inti dari prinsip *lean manufacturing* yang bertujuan untuk meminimalkan *waste* dan meningkatkan aliran produksi. Bangun *et al*. (2023) dan Fadilah *et al*. (2025) berhasil menerapkan Single *Minute Exchange of Die* (SMED) untuk mengurangi waktu *setup* dan meningkatkan produktivitas. Keyser *et al*. (2022) menggunakan *check sheet* dan perekaman video sebagai instrumen standardisasi prosedur yang sejalan dengan konsep *standardized work* dalam sistem produksi Toyota. Eusebio *et al*. (2025) memperluas teori SMED ke dalam paradigma Industri 4.0 melalui integrasi dengan TPM dan *Machine Learning*. Secara teoritis, penelitian ini menggabungkan pilar keandalan peralatan TPM dengan kemampuan prediktif yang sesuai dengan konsep *autonomous maintenance* dan *predictive analytics*. Integrasi ini tidak hanya mengurangi waktu *setup*, tetapi juga meningkatkan OEE melalui peningkatan *availability*, *performance*, dan *quality*.

2.1.7 Ringkasan Tinjauan Pustaka Mengenai Perancangan Perbaikan Proses Bisnis

Proses bisnis didefinisikan sebagai hubungan antar aktivitas yang saling terhubung dalam mendukung tujuan organisasi (Rahmatillah & Farhatinnisa, 2022; Maulana, Y.M, 2023). Harrington (1991) menyebutkan, *Business Process Improvement* (BPI) bukan hanya sekadar perbaikan, melainkan "*a breakthrough strategy for total quality, productivity, and competitiveness*". Sebuah proses harus efektif (menghasilkan *output* sesuai tujuan), efisien (tanpa membuang waktu, biaya, dan sumber daya), dan mampu beradaptasi (fleksibel terhadap perubahan). Pendekatan untuk mengatasi permasalahan seperti waktu transaksi lama, duplikasi data, dan waktu tunggu adalah *streamlining*, yang didefinisikan sebagai "*the trimming of waste and excess, attention to every minute detail that might lead to improved performance and quality*". Dalam penerapan, Harrington menyediakan 12 *tools*, termasuk *Bureaucracy Elimination, Duplication Elimination, Value-added Assessment, Simplification,* dan *Process Cycle-time Reduction*.

Rahmatillah & Farhatinnisa (2022) dan Saputri *et al*. (2024) menggunakan dengan 12 *tools streamlining* yang berhasil memangkas waktu transaksi kasir sebesar 2 jam 4 menit dan memperpendek waktu pendaftaran PDAM dari 15 hari menjadi 10 hari. Sementara itu, pendekatan BPR yang lebih radikal diterapkan oleh Oetomo & Ramdhani (2021) di PT Indorama dengan mengeliminasi seluruh divisi (*Office* dan *Leader*) dan merancang sistem informasi, sehingga efisiensi waktu proses melonjak 65,1%. Demikian pula Waluyo *et al*. (2020) menggabungkan BPR dengan SDLC untuk membangun sistem *database* terintegrasi di TLS Cargo, meningkatkan efisiensi *throughput* dari 56,47% menjadi 86,99%. Untuk memastikan perbaikan tidak hanya berhenti pada rekomendasi, Maulana, Y.M (2023) melengkapi dengan model BPM *Lifecycle* yang mencakup rencana implementasi berbasis *gap analysis* dan *monitoring & control* menggunakan *Key Performance Indicators* (KPI). Adapun pemodelan visual dan simulasi, Maulana, H *et al*. (2020) dan Rosalina *et al*. (2024) menggunakan BPMN dengan bantuan *Bizagi Modeler* untuk menggambarkan proses *as-is* dan *to-be*, kemudian menerapkan ESIA yang berhasil menurunkan waktu siklus hingga 48,9% pada proses pemesanan UMKM katering. Secara keseluruhan, hal ini menunjukkan bahwa perancangan ulang proses bisnis yang efektif memerlukan kombinasi pendekatan: BPI untuk penyederhanaan bertahap, BPR untuk perubahan radikal berbasis teknologi, BPM untuk perencanaan berkelanjutan, serta BPMN dan *Bizagi* sebagai alat pemodelan dan simulasi yang memungkinkan organisasi mengukur dampak perbaikan sebelum implementasi.

2.1.8 Ringkasan Tinjauan Pustaka Mengenai *Autonomous Maintenance*

Penerapan *autonomous maintenance* sebagai salah satu pilar *total productive maintenance* mampu meningkatkan efektivitas mesin melalui keterlibatan aktif operator. Mohamed *et al*. (2022) menunjukkan peningkatan MTBF dan reliabilitas mesin kritis setelah operator diberikan tanggung jawab perawatan dasar, sementara Wardani *et al*. (2021) melengkapi temuan tersebut dengan membuktikan bahwa desain *autonomous maintenance* berbasis *Overall Resource Effectiveness* (ORE) mampu mengatasi rendahnya *performance efficiency* pada mesin *paving molding*. Selain itu, Supriatna *et al*. (2017) memperkuat bahwa implementasi *autonomous maintenance* secara bertahap serta penggunaan *check sheet*, *one point lesson* (OPL), dan *abnormality tag* terbukti menaikkan nilai OEE mesin *roll forming* sekaligus mengurangi *waste* perawatan. Dengan demikian, ketiga penelitian saling melengkapi dan menunjukkan bahwa *autonomous maintenance* tidak hanya meningkatkan keandalan dan ketersediaan mesin, tetapi juga membangun kemandirian operator serta mendukung perbaikan berkelanjutan di lantai produksi.

2.1.9 Ringkasan Tinjauan Pustaka Mengenai Sistem Manajemen Perawatan Manual

Sistem perawatan yang masih mengandalkan catatan kertas atau *form* manual sering kali menyebabkan berbagai masalah seperti pencatatan kerusakan tidak lengkap, duplikasi data, keterlambatan informasi, serta kehilangan dokumen. Sialahi & Rachman (2025) dalam penelitiannya mengembangkan *Electronic Total Productive Maintenance* (E-TPM) berbasis *web* dan *QR Code* yang menggantikan kertas, memungkinkan pelaporan kerusakan secara *real-time* serta menghasilkan penghematan biaya operasional. Sementara itu, Tarigan *et al*. (2021) menyebutkan bahwa membangun sistem informasi TPM berbasis *web* yang menghilangkan proses *double input* dan mempercepat notifikasi kerusakan dari tim produksi ke teknisi, sehingga eksekusi perbaikan tidak lagi tertunda 1-2 hari. Di sisi lain, Arifin *et al*. (2025) memperkuat sudut pandang dari manajemen dan penjadwalan *maintenance* otomatis, mengintegrasikan data gardu distribusi, jadwal pemeliharaan *preventive*, serta laporan inspeksi digital yang sebelumnya tersimpan terpisah-pisah. Dengan demikian, ketiga penelitian ini secara saling melengkapi dan menunjukkan bahwa digitalisasi TPM tidak hanya menyelesaikan masalah administrasi manual, tetapi juga meningkatkan transparansi, akuntabilitas, dan ketepatan waktu pemeliharaan.

Tabel 2.1 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai tingkat *downtime*

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Lacerda *et al.* (2025)	Perusahaan Ban (*Tire Company*) di Brasil	*Micro downtime* pada proses *bottleneck* menurunkan OEE dan produktivitas, tanpa metodologi penanganan yang terpadu.	*Lean Manufacturing* untuk menghilangkan pemborosan dengan menggunakan *framework*.	*Framework DMAIC-Agil*, dan A3 *Report*.	Power BI, Ishikawa, 5 *Whys*	*Micro Downtime* turun menjadi 7,20%, estimasi penghematan USD 750.000/tahun dan meningkatkan efisiensi.
Okirie *et al.* (2025)	Unit Turbin GE MS5001	Tingkat kegagalan dan *Downtime* tinggi serta penjadwalan *preventive maintenance* yang tidak optimal.	Mengintegrasikan data operasional dengan model prediktif untuk meningkatkan akurasi perkiraan gagal dan merancang ulang jadwal *maintenance*.	Model prediktif yang dikembangkan dan dievaluasi menggunakan simulasi *Bayesian*	MATLAB	Penurunan *Downtime* sebesar 400-700 jam/tahun, dan tingkatan *availability* stabil di angkat 92-96%.
Lestari & Mundari (2024)	CV. XYZ, sebuah perusahaan *offset printing*	Nilai OEE mesin di bawah standar akibat *downtime* tinggi dan *Six Big Losses* menjadi keruhian terbesar.	Melakukan penjadwalan *preventive*, pelumasan, pemeriksaan rutin dan *troubleshooting* terstruktur.	*Total Productive Maintenance* (TPM) meliputi *Focused* dan *Autonomous Maintenance*.	Diagram pareto, diagram *fishbone*	Nilai OEE meningkat menjadi 75,25%, nilai *availability, performance,* dan *quality rate* juga mengalami peningkatan.
Seedao *et al.* (2025)	Prototype Mesin semi-otomatis di sebuah *workshop* prototipe	*Downtime* dan inefisiensi tinggi, kesulitan membedakan penyebab kerugian dan manusia, dan pengukuran OEE manual.	Penerapan perhitungan OEE berbasis waktu dan klasifikasi kerugian berdasarkan status sensor.	CAP-Do 7 langkah, OEE.	Diagram pareto, diagram 4M, (*Man, Machine, Material, Method*), sensor, PLC eksternal, dan *toolkit input* manual.	Berhasil identifikasi sumber *downtime*, perhitungan OEE lebih akurat.
Anggraini & Aditia (2016)	Mesin produksi utama yang berperan dalam pengolahan karet mentah dalam produk setengah jadi	Tingginya tingkat *downtime akibat sistem perawatan yang hanya dilakukan saat terjadi kerusakan menyebabkan* produksi tidak dapat mencapai target yang ada.	Melakukan perancangan komponen secara *preventive* dan melakukan evaluasi efektivitas melalui simulasi.	Identifikasi komponen kritis, simulasi skenario *maintenance.*	*Monte Carlo Simulation.*	Penerapan *preventive maintenance* dengan menggunakan simulasi dapat membantu menurunkan *downtime* secara signifikan dibandingkan metode sebelumnya.

Tabel 2.2 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai inefisiensi proses

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Mrdjenovic *et al.* (2025)	Proses Produksi Kaleng Aerosol 3 Bagian di Industri Kemasan Logam Sonoco	Proses produksi aerosol terhambat oleh pergantian mesin akibat variasi ukuran kaleng.	Mengembangkan model optimasi *binary programming* untuk menyeimbangkan biaya material dan biaya *downtime*.	Perumusan *binary decision variables,* implementasi.	*Microsoft Excel*	Mengurangi waktu *downtime* dan mendapatkan penghematan biaya tahunan.
Ong & Cornellia,. (2014)	Divisi Bodyshop PT.XYZ Cikarang	Ketidakseimbangan lini yang menurunkan efisiensi.	Perancangan ulang *layout* produksi.	S*traight line layout* (menggunakan RPW) dan u-s*hape layout* (menggunakan CTM).	*Software* ProModel7	Meningkatkan efisiensi hingga 99,8% dan mengurangi *balance delay* menjadi 0,2%.
Rose *et al.* (2020)	Lini produksi *woofer speaker* di sebuah perusahaan elektrik dan elektronik di Malaysia	12 aktivitas Non-Value Added (NVA) yang memperlambat proses, produktivitas rendah dan tingkat *persediaan* yang tinggi dan pergerakan material yang tidak efisien.	Mengidentifikasi dan menghilangkan aktivitas NVA serta memperbaiki aliran material dan informasi .	VSM, SMED, *U-Shaped cell layout, Kanban system, Finished Good Supermarket*	*Pacemaker process*	aktivitas NVA berhasil dihilangkan, produktivitas meningkat, *production lead time* turun, jumlah operator berkurang, persediaan berkurang berhasil dicapai dan *total processing time* turun.

Tabel 2.3 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai kualitas produk dan cacat produksi

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Afifa & Damayanti, (2023)	PT XYZ	Tingginya jumlah produk cacat pada komponen *wash motor* yang dipasok ke lini produksi mesin cuci.	Pelatihan operator, perawatan mesin, perubahan metode pelapisan, dan juga pengendalian suhu dan kelembapan.	Six Sigma dengan pendekatan DMAIC.	Diagram Pareto	Penurunan tingkat cacat dengan nilai rata-rata DPMO sebesar 251,69 dan tingkat sigma sebesar 4,99.

Tabel 2.4 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai pengukuran kinerja dan optimasi sistem

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Suh (2025)	15 Industri Manufaktur di Korea Selatan	Tidak ada ukuran terpadu untuk menilai efektivitas tercapainya produktivitas sekaligus menjaga keselamatan pekerja.	*Productivity-Safety Effectiveness Index* (PSEI), untuk mengukur efisiensi hubungan antara produktivitas (*output*) dan kinerja keselamatan (*input*).	*Data Envelopment Analysis* (DEA).	DEAP, MaxDEA, PyDEA	Rata-rata efisiensi (PSEI) industri manufaktur Korea adalah 41,86% (CCR) dan juga 50,30% (BCC).
Llopis *et al.* (2024)	*Twin lines* di pabrik Ford Almussafes, Valencia	Ketiadaan alat deteksi *sub-bottleneck real-time*, variabilitas mesin di lapangan, tekanan produksi menghambat operator dalam melakukan optimasi parameter.	Mengimplementasikan konsep *sub-bottleneck* dan alat I3oT berbasis sensor *existing* untuk meningkatkan efisiensi lini produksi.	Konsep I3oT Mini-terms, deteksi *Sub-bottleneck*, dan aplikasi perbaikan yang berupa penyesuaian kecepatan robot, prioritas perawatan dan *rebalancing* titik *welding* serta optimasi *trajectory* robot.	PLC, Cross-PLC, Sensor Industri	Deteksi *bottleneck* tradisional: Robot R-07 (34,217 detik), penurunan kecepatan robot yang tidak menjadi *bottleneck* sehingga konsumsi energi turun, prioritas *maintenance* berdasarkan *sub*-bottleneck dan *rebalancing welding point* untuk meningkatkan *throughput.*
Kosasih *et al.* (2021)	Komponen kristis pada mesin *rotary injection molding*	Pemeliharaan yang tidak terjadwal serta biaya perawatan yang tinggi, menimbulkan ketidakseimbangan antara biaya kerusakan dan biaya pencegahan.	Melakukan perancangan jadwal pemeliharaan *preventive* untuk meminimalkan total biaya.	Simulasi berbasis probabilistik, Simulasi Monte Carlo, dan optimasi biaya *maintenance*	*Excel*	Penerapan jadwal *preventive* yang optimal dapat membantu menurunkan biaya pemeliharaan secara signifikan dibandingkan kondisi aktual.

Tabel 2.5 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai pendekatan pemeliharaan berbasis keandalan dan risiko

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Afefy *et al.* (2019)	Lini produksi gula di Fayoum Sugar Works Company, Mesir.	Tidak ada alur kerja pemeliharaan yang terstruktur serta tingginya *downtime*.	Kerangka kerja RCM yang terstruktur dan lengkap (12 langkah).	*Functional Failure Analysis* (FFA), FMECA, *Logic Tree Analysis* (LTA).	*Microsoft Excel, Minitab*, FMECA *Worksheet*, LTA.	*Downtime* korektif turun, *downtime preventive* turun, biaya total turun. *Availability* naik dan *Reliability* menjadi 99,88%.
Rizkya *et al*. (2019)	Mesin sterilisasi di perusahaan pengolahan kelapa sawit, Sumatera Utara.	*Downtime* mesin sterilizer rata-rata 35,66 jam/bulan. Pemeliharaan korektif tidak menjamin kelancaran produksi.	Merencanakan pemeliharaan *preventive* berbasis prioritas risiko kegagalan.	FMEA untuk identifikasi risiko (RPN) dan RCM untuk perencanaan.	*Risk Priority Number* (RPN), Microsoft Excel, Minitab.	Diperoleh interval penggantian optimal untuk 5 komponen kritis (22-26 hari). Rata-rata *Downtime* kritis turun dan keandalan meningkat.
Cahyati *et al*. (2024)	Mesin kritis di Pabrik Sabiz.	Tingkat efisiensi rendah dengan *downtime* tinggi.	Mengoptimalkan perencanaan perawatan *preventive*.	*Reliability-Centered Maintenance* (RCM), FMEA.	FMEA *Worksheet*.	Peningkatan reliabilitas mesin dan penghematan biaya perawatan.
Naufal *et al.* (2026)	Mesin produksi dengan kerusakan tinggi yang seringkali mengakibatkan gangguan operasional.	Mesin sering mengalami kerusakan yang menyebabkan waktu berhenti produksi meningkat, karena perawatan masih bersifat menunggu kerusakan tanpa adanya perencanaan yang optimal.	Mleakukan penyusunan jadwal *preventive* berbasis data historis supaya kerusakan dapat dicegah sebelum terjadi dan *downtime* dapat ditekan.	Pengolahan data historis, MTTR, MTTF, Uji statistik, Penentuan interval optimal	Excel, *Software* statistik, perhittungan manual *reliability*.	Penerapan *preventive maintenance* dengan interval yang optimal mampu menurunkan waktu kerusakan mesin dan meningkatan efisensi operasional secara signifikan.
Marzuki *et al*.(2013),	Mesin *screw press* yang merupakan peralatan utama dalam proses pengolahan kelapa sawit.	Sistem *preventive maintenance* yang tidak berjalan efektif dan masih banyak *corrective maintenance*, sehingga banyak kerusakan mesin.	Melakukan evaluasi tingkat keandalan mesin untuk menentukan komponen kritis dan waktu penggantian yang tepat.	Analisis Kuantitatif Keandalan (*Reliability Engineering*)	MTTF, *Availability,* Laju Kegagalan.	Analisis menunjukkan bahwa keandalan mesin menurun seiring waktu dengan beberapa komponen teridentifikasi kritis dan memeperlukan perhatian khsusu dalam perawatan.

Tabel 2.6 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai *setup* atau *changeover* mesin

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Reyes, A *et al.* (2022)	UKM Metalworking di Peru.	Kehilangan produktivitas akibat *set-up time*, produk cacat, prosedur kerja yang tidak standar.	*Redesign* proses dengan kombinasi.	SMED, Poka Yoke, Standarisasi Kerja.	Stopwatch/*Time Study Software*, SOP, *Poka Yoke Devices*	Peningkatan efisiensi jam kerja, *setup time* berkurang, tingkat produk cacat turun.
Fadilah, R *et al*. (2025)	Mesin *Cage Press* di PT. XYZ.	Produktivitas menghambat karena jarak penyimpanan jauh, penempatan alat tidak teratur.	Perbaikan proses *changeover* dan desain ulang.	PDCA dan SMED.	5S *Checklist*, Spaghetti Diagram, *Microsoft* Excel.	Waktu *changeover* mesin berkurang dan *downtime* hilang.
Bangun, C *et al*. (2023)	Mesin ekstrusi PT. GTC.	Tidak mencapai target produksi.	Mengurangi waktu *setup*, perubahan *layout*.	SMED	AutoCAD/SketchUp, *Video Analysis*	Waktu *Setup* berkurang, pencapaian target produksi meningkat.
Keyser *et al*. (2022)	Mesin Koppers pabrik karton.	Produksi terhambat dan *setup* yang lama meningkatkan *lead time*.	Pengurangan waktu *setup*.	SMED	*Gant Chart*, OEE *Calculation Tools*	Waktu *Setup* berkurang dan kapasitas produksi meningkat tanpa tambahan mesin.
Eusebio *et al*. (2025)	Industri plastik di Peru.	OEE rendah, *downtime* tinggi dan banyak cacat produk.	Meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi *downtime* dan menekan cacat produk.	TPM, SMED, *Machine Learning*	Python/R/MATLAB, Sensor IoT, *Computerized Maintenance Management System* (CMMS)	Tingkat OEE naik, *setup time* turun, cacat produk turun.
Bragila *et al*. (2023)	Mesin resin-doming Italia.	Adanya inefisiensi, kurangnya alat yang terstruktur dan mengilangkan *losses* selama *Setup*	Pengembangan alat	L-Matrix, TC-Matrix, ECE-Matrix, SSD	*Matrix Analysis Software*/*Spreadsheets*, *Sub-system Decomposition* (SSD)	Efisiensi *setup* meningkat, total waktu *changeover* turun.

Tabel 2.7 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai perancangan proses bisnis

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Rahmatillah & Farhatinnisa, (2022)	Divisi Kasir Supermarket X	Waktu transaksi lama, kesalahan *input* data, pembukuan keuangan sering salah.	Menghilangkan aktivitas mengawasi antrian, ubah konfirmasi pembayaran jadi info promosi.	*Business Process Improvement* (BPI) (3 fase).	*Bizagi Modeler*, *Weighted Selection*, 12 *tools streamlining.*	Waktu turun 2 jam 4 menit, pelanggan terlayani naik dari 82 menjadi 110 per hari.
Maulana *et al*. (2020)	Dinas Perdagangan Kota XYZ	Berlum ada pemetaan proses bisnis.	Menambah sub-proses pengawasan pengiriman, hapus aktivitas "Memberi Kabar Pengiriman"	*Business Process Management Lifecycle* (BPM *Lifecycle*).	*Bizagi Modeler*, analisis *Value-Added* (VA), *Business Value-Added* (BVA), dan *Non Value-Added* (NVA).	3 rancangan perbaikan dan mengeliminasi NVA.
Waluyo *et al*. (2020)	TLS Cargo (jasa kirim)	Tidak ada koneksi antar divisi, *monitoring* sulit, *waste time*.	Perancangan sistem *login database* terintegrasi.	*Business Process Reenginering* (BPR) dan *System Development Life Cycle* (SDLC).	Balsamiq, *fishbone*, analisis efisiensi *throughput*.	Efisiensi *throughput* 56,47% menjadi 86,99%.
Rosalina *et al*. (2024)	*Fafira's Kitchen* (UMKM Katering)	Pencatatan pesanan buruk, ketergantungan 1 *supplier*, pengiriman tidak efisien.	*Website* order *online*, *diversifikasi supplier*, sistem *tracking real-time*.	Kualitatif, *Business Process Model and Notation* (BPMN), simulasi.	*Bizagi Modeler*	Waktu pemesanan turun 48,9%, pengiriman 36,6%, pengiriman 20,77%.
Maulana (2023)	Administrasi Akademik Universitas Dinamika	Belum ada model perencanaan proses bisnis sampai tahap implementasi dan *monitoring*.	Model 2 tahap: rencana formulasi perbaikan & rencana implementasi evaluasi.	BPM *Lifecycle*, *Elimination, Simplification, Integration, Automation* (ESIA).	*Value Chain*, *Risk Analysisis, Gap Analysis*.	Model panduan perencanaan, periode waktu dan ukuran kinerja (*cycle effectiveness*).

Tabel 2.7 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai perancangan proses bisnis (lanjutan)

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Saputri *et al*. (2024)	PDAM Kota Baturaja	SOP tidak berjalan penuh, duplikasi data, kurang staf, dan waktu proses lama.	Hapus duplikasi, menambah staf registrasi & distribusi, menyederhanakan distribusi.	BPI	*Bizagi Modeler*	Waktu min 15 menjadi 10 hari, dan utilisasi merata.
Oetomo & Ramdhani, (2021)	Departemen J20 PT Indorama Synthetics	Pengambilan keputusan sering terjadi bias disebabkan oleh penggunaan media kertas dengan alur birokrasi panjang.	Mengidentifikasi peluang untuk mengubah kinerja operasional.	BPR	BPMN, *fishbone, Balsamiq*	Waktu proses berkurnag dari 146 menjadi 51 menit (efisiensi 65,1%).

Tabel 2.8 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai *autonomous maintenance*

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Wardani *et al*. (2021)	Mesin paving molding di PT XYZ	Frekuensi *breakdown* tinggi, sistem *maintenance* masih *corrective*, efektivitas mesin rendah	Perancangan *Autonomous Maintenance*	*Overall Resource Effectiveness* (ORE) dan *Total Productive Maintenance* (TPM)	*Machine Cleaning Checkpoints, Autonomous maintenance sheet form*	Penelitian belum sampai tahap implementasi, tetapi menghasilkan sistem *Autonomous maintenance* yang siap diterapkan untuk meningkatkan efektivitas mesin yang sebelumnya rendah.
Mohamed *et al*. (2022)	Mesin kritis *bottle filler/crowner*	Mesin memiliki *Downtime* tertinggi dan *availability* mesin rendah	Implementasi *Autonomous maintenance*	TPM, 7 Langkah *Autonomous maintenance*	CILT *Checklist* (*Cleaning, Inspection, Lubrication, Tightening*), *Checklist cleaning & inspection*, *tagging system, tag reistry, One Point Lesson* (OPL)	MTBF meningkat dari 87,42 jam menjadi 113,27 jam. MTTR menurun dari 1,15 jam menjadi 0,87 jam dan *reliability* meningkat

Tabel 2.8 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai *autonomous maintenance* (lanjutan)

Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Supriatna *et al*. (2017)	Mesin *roll forming* di Plant II PT. Ingress Malindo Ventures	*Downtime* mesin tinggi, sistem *maintenance* masih konvensional, operator tidak terlibat dalam perawatan, nilai OEE rendah	Penerapan *Autonomous maintenance* dikombinasikan dengan *preventive maintenance*	TPM, 7 langkah *Autonomous maintenance*, FMECA	SOP *maintenance*, *abnormality tag*, *board step autonomous maintenance*, *registration form*, OPL	Peningkatan performa *maintenance*, operator mulai terlibat aktif dalam perawatan, nilai OEE meningkat menjadi 79,31%

Tabel 2.9 Ringkasan tinjauan pustaka mengenai sistem manajemen perawatan manual

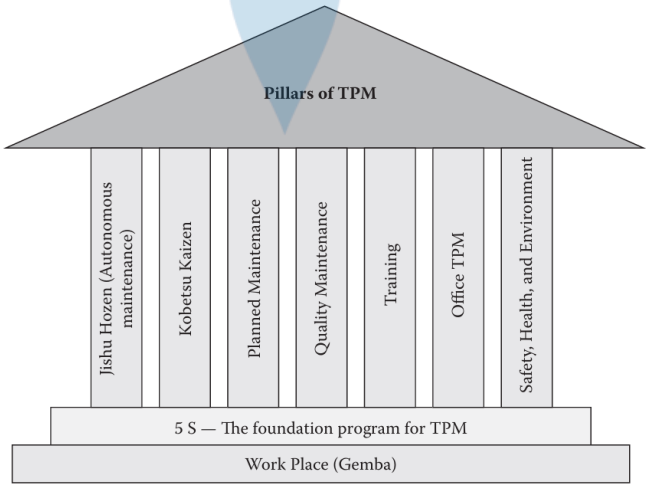
Pustaka	Objek penelitian	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil penelitian
Tarigan & Usman, (2025)	PT. Indah Kiat Pulp & Paper Serang	Sistem TPM masih manual, monitoring antar bagian tidak efektif	Merancang sistem informasi TPM berbasis *website*	SDLC Model *waterfall*	PHP dengan *framework* CodeIgniter 4.0, *Usecase Diagram, Activity Diagram, Sequence Diagram, Class Diagram*, *Black Box Testing*	Proses *maintenance* menjadi lebih cepat dan terkontrol, tidak ada keterlambatan informasi dan monitoring antar bagian meningkat
Sialahi & Rachman, (2025)	*The Tire Final Inspection Machine* PT XYZ	Sistem masih *paper-based* mengakibatkan data tidak lengkap, mudah hilang, dan susah diakses	Perancangan *Electronic TPM* (E-TPM) berbasis *website* + QR Code	TPM, pengembangan *website* (PHP, *CodeIgniter*), SMART (*Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Timebound*)	E-TPM, QR Code, *database* MySQL, XAMPP, VSC, PhpMyAdmin, *Framework CodeIgniter* 4.0	Data *maintenance* lebih akurat, mudah diakses, mengurangi kehilangan data dan proses *maintenance* lebih cepat
Arifin *et al*. (2025)	Gardu Distribusi PT PLN Medan Kota	Tingginya redudansi data dan keterlambatan arus informasi karena manajemen pemeliharaan masih manual berbasih *spreadsheet*	Pengembangan sistem informasi berbasi *web*	SDLC Model *waterfall*	*Black Box Testing*, Laravel	Sistem berhasil mengintegrasikan data, meningkatkan efisiensi, dan meningkatkan ketepatan jadwal *maintenance*

2.2 Dasar Teori

Landasan teori dalam tugas akhir ini bersumber dari berbagai kajian keilmuan Teknik Industri yang diperoleh selama perkuliahan. Mata kuliah yang secara langsung relevan dengan penelitian ini adalah Analisis Perancangan dan Sistem Kerja (STIN28402), Teori *Lean Manufacturing* (SMED, WED), *Autonomous Maintenance*, Proses Bisnis dan Sistem Informasi (SIN40502), Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja (STIN41502), *Maintenance System* (STIN65602), Pemodelan Sistem (STIN44602), dan Simulasi Industri (STIN52703), khususnya untuk teori mengenai Simulasi Monte Carlo. Analisis Biaya (STIN30402), konsep biaya hanya disinggung implisit dalam konteks efisiensi (*cost production*) dan perbandingan biaya *preventive* dengan kegagalan RCM. Pengendalian Kualitas (STIN48603), *Lean Six Sigma* dan DMAIC yang merupakan metodologi sentral dalam pengendalian kualitas. FMEA juga adalah alat standar untuk manajemen risiko kualitas. Teori-teori yang diterapkan sebagai pendukung dalam Tugas Akhir ini diuraikan sebagai berikut.

2.2.1 *Total Productive Maintenance*

Total Productive Maintenance (TPM) merupakan suatu strategi pemeliharaan yang bertujuan mencapai tiga tujuan utama, yaitu nol cacat, nol kecelakaan, dan nol kerusakan. Dalam pelaksanaannya, TPM mencakup beberapa jenis pemeliharaan, yaitu pemeliharaan kerusakan (*breakdown maintenance*), pemeliharaan *preventive* (*preventive maintenance*), dan pencegahan pemeliharaan (*maintenance prevention*). Dengan menerapkan TPM secara konsisten, organisasi dapat meningkatkan kinerja peralatan, mengurangi *downtime*, dan menciptakan standar prosedur yang efektif dan berkelanjutan.



Gambar 2.1 TPM pillars (Agustiady & Cudney, 2024)

Berikut adalah penjelasan mengenai masing-masing dari delapan pilar tersebut.

a. 5S

Landasan utama TPM adalah 5S yang bertujuan untuk menciptakan tempat kerja yang teratur, bersih, dan disiplin sehingga masalah dapat terlihat dengan jelas. Langkah-langkahnya meliputi:

i. *Seiri* (*Sort*), yaitu kegiatan memilah barang berdasarkan tingkat kebutuhan dengan memisahkan barang yang diperlukan dan yang tidak diperlukan di area kerja.
ii. *Seiton* (*Set in Order*), yaitu kegiatan menata barang secara teratur agar mudah ditemukan, digunakan, dan dikembalikan ke tempat semula.
iii. *Seiso* (*Shine*), yaitu aktivitas membersihkan lingkungan kerja secara rutin untuk menjaga kebersihan serta menciptakan kondisi kerja yang nyaman.
iv. *Seiketsu* (*Standardize*), yaitu upaya menetapkan dan mempertahankan standar kebersihan, kerapian, dan keteraturan di lingkungan kerja secara konsisten.
v. *Shitsuke* (*Sustain*), yaitu penerapan sikap disiplin dan pembiasaan kerja yang baik agar budaya kerja yang telah diterapkan dapat terus dipertahankan.

b. *Autonomous Maintenance* (*Jishu Hozen*)

Autonomous Maintenance (AM) atau *Jishu Hozen* dalam bahasa Jepang merupakan salah satu pilar utama dari TPM yang memberikan tanggung jawab kepada operator mesin untuk melakukan tugas-tugas perawatan dasar pada peralatan yang dioperasikan secara mandiri. Konsep ini pertama kali dikembangkan oleh Seiichi Nakajima pada tahun 1970-an sebagai bagian dari kerangka TPM yang bertujuan untuk memaksimalkan efektivitas peralatan melalui keterlibatan seluruh karyawan. Secara lebih spesifik, *autonomous maintenance* didefinisikan sebagai strategi perawatan yang berfokus pada pemberdayaan operator untuk melaksanakan kegiatan pembersihan, inspeksi, pelumasan, dan perbaikan kecil secara mandiri. Tujuan utama dari implementasi *autonomous maintenance* adalah untuk mencegah terjadinya kerusakan mendadak pada mesin melalui perawatan yang proaktif, sekaligus membangun rasa kepemilikan (*sense of ownership*) operator terhadap peralatan yang digunakan. Dalam praktiknya, *autonomous maintenance* mengikuti dua prinsip inti, yaitu mencegah kemunduran kualitas peralatan melalui pengoperasian yang tepat dan mengembalikan serta mempertahankan kondisi mesin agar tetap seperti baru.

Implementasi *autonomous maintenance* dilakukan secara bertahap melalui tujuh langkah yang sistematis. Berikut adalah ketujuh langkah *autonomous maintenance* yang dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 7 Langkah penerapan *autonomous maintenance* (Ung, 2023)

Berdasarkan buku *Introduction to Total Productive Maintenance* (TPM), Nakajima (1928) Mengembangkan pendekatan tujuh langkah (*seven-step method*) yang disusun secara bertahap untuk membangun kompetensi operator secara sistematis, dimulai dari kegiatan pembersihan dasar hingga kemandirian penuh dalam pemeliharaan. Berikut merupakan penjelasan 7 langkah *Autonomous Maintenance*:

Langkah 1: *Initial Cleaning* (Pembersihan Awal)

Pada langkah ini, operator melakukan pembersihan menyeluruh pada mesin sekaligus melakukan inspeksi. Kegiatan ini berfungsi sebagai proses pendidikan, di mana operator belajar mengenali komponen mesin, fungsi masing-masing bagian, serta mengidentifikasi anomali seperti kebocoran, getaran berlebih, atau kerusakan kecil. Selama pembersihan, operator juga melakukan pelumasan awal dan pengencangan baut. Prinsip utamanya adalah “pembersihan adalah inspeksi” (*cleaning is inspection*).

Langkah 2: *Countermeasure at the Source of Problems* (Penanggulangan Sumber Masalah)

Setelah langkah pertama, operator akan menyadari area yang sulit dibersihkan atau cepat kotor. Pada langkah ini, operator mencari solusi untuk mencegah akumulasi debu, kotoran, atau serpihan di sumbernya, misalnya dengan memasang penutup, pelindung,

atau memperbaiki tata letak. Tujuannya adalah mengurangi waktu yang diperlukan untuk pembersihan dan pelumasan, serta membuat perawatan menjadi lebih mudah dan efisien.

Langkah 3: *Cleaning and Lubrication Standards* (Standar Pembersihan dan Pelumasan)
Berdasarkan 2 langkah sebelumnya, operator bersama pengawas menetapkan standar waktu dan metode untuk pembersihan, pelumasan, dan pengencangan baut. Standar ini dibedakan menjadi tugas harian (misalnya 10 menit sebelum/sesudah operasi) dan tugas periodik (mingguan/bulanan). Standar ini bersifat praktis dan terukur, sehingga operator dapat melaksanakannya secara konsisten tanpa mengganggu jadwal produksi.

Langkah 4: *General Inspection* (Inspeksi Umum)
Pada langkah ini, operator dilatih untuk melakukan inspeksi berdasarkan panduan umum inspeksi (*general inspection manual*) yang disusun oleh supervisor dan staf teknis. Pelatihan dilakukan per kategori (misalnya sistem kelistrikan, pneumatik, hidrolik, transmisi) dengan metode: pelatihan, praktik, audit, dan perbaikan. Melalui langkah ini, operator belajar mendeteksi kelainan secara mandiri.

Langkah 5: *Autonomous Inspection* (Inspeksi Mandiri)
Pada tahap in, standar sementara dari langkah satu hingga 3 dibandingkan dan diselaraskan dengan standar pemeliharaan terjadwal yang telah disusun oleh departemen pemeliharaan. Tujuannya adalah menghilangkan duplikasi atau kesenjangan tanggung jawab. Operator menyusun dan menggunakan lembar periksa mandiri (*autonomous maintenance checksheet*), sehingga operator dapat memeriksa kondisi peralatan secara rutin tanpa harus selalu menunggu inspeksi.

Langkah 6: *Organization and Tidiness*
Langkah ini mengimplementasikan konsep *Seiri* (pemilahan) dan *Seiton* (penataan) dari 5S. Manajer dan supervisor bertanggung jawab untuk menyederhanakan objek/kondisi yang perlu dikelola, sedangkan operator memastikan kepatuhan terhadap standar yang telah ditetapkan. Nakajima merinci enam *substeps*, yang mencakup:

i. Penataan standar tanggung jawab operator (termasuk pencatatan data).
ii. Pengendalian visual untuk bahan dalam proses, produk cacat, dan limbah.
iii. Pengaturan peralatan, cetakan, alat ukur, dan perlengkapan agar mudah ditemukan.
iv. Pemeriksaan presisi peralatan yang mudah mempengaruhi kualitas.
v. Standarisasi prosedur penanganan kondisi abnormal.

Langkah 7: *Full Autonomous Maintenance*

Pada langkah terakhir, operator telah mencapai tingkat kemandirian, kompetensi teknis, dan motivasi yang tinggi. Operator tidak hanya membersihkan, melumasi, dan memeriksa, tetapi juga mampu:

i. Mengeliminasi enam kerugian besar (*six big losses*).
ii. Mencatat dan menganalisis hasil MTBF (*Mean Time Between Failures*).
iii. Merancang tindakan perbaikan secara mandiri.
iv. Berpartisipasi dalam peningkatan desain dan prosedur operasi.

c. *Kobetsu Kaizen*

Kobetsu Kaizen berarti perbaikan khusus atau terfokus. Istilah *Kaizen* berasal dari bahasa Jepang: *Kai* (perubahan) dan *Zen* (menjadi lebih baik). Pilar ini menekankan perbaikan berkelanjutan melalui peningkatan kecil yang dilakukan secara terus-menerus. Pendekatannya adalah membongkar proses secara objektif agar dapat diidentifikasi dan dihilangkan pemborosan (*waste*). Target dari pilar ini yaitu:

i. Mencapai nol kerugian akibat penghentian kecil, pengukuran, dan penyesuaian.
ii. Mencapai nol cacat dan waktu henti yang tidak terhindarkan.
iii. Mengurangi biaya manufaktur sebesar target tertentu.
iv. Meningkatkan efektivitas peralatan pabrik secara menyeluruh.

d. *Planned Maintenance*

Planned Maintenance bertujuan menciptakan mesin dan peralatan yang bebas masalah, dengan nol cacat dan kepuasan pelanggan 100%. Pendekatan ini bersifat proaktif (mencegah), bukan reaktif (memperbaiki setelah rusak). Target utama dari pilar ini yaitu:

i. Nol kegagalan peralatan dan kerusakan.
ii. Meningkatkan keandalan (*reliability*) dan kemampuan pemeliharaan (*maintainability*) sebesar 50%.
iii. Mengurangi biaya perawatan.
iv. Menjamin ketersediaan suku cadang setiap saat.

Komponen utama dari pilar ini yaitu *Time-based maintenance*: penggantian komponen berdasarkan interval waktu yang ditetapkan (ekonomis jika biaya komponen rendah dibandingkan dengan biaya kegagalan), *Condition-based maintenance* (*prediktif*): pengukuran dan analisis kerusakan secara periodik, penggantian saat nilai kerusakan mencapai batas tertentu, dan *Inspection and repair* (*overhaul*): pembongkaran dan inspeksi berkala, perbaikan dilakukan jika ditemukan kebutuhan selama *overhaul*.

e. *Quality Maintenance*

Quality Maintenance berfokus pada pencapaian kepuasan pelanggan melalui manufaktur bebas cacat. Tujuannya adalah mengeliminasi ketidaksesuaian secara sistematis. Tim TPM harus memahami komponen peralatan mana yang memengaruhi kualitas produk, kemudian menghilangkan masalah kualitas yang ada dan mencegah potensi masalah di masa depan. Target utama dari pilar ini yaitu nol keluhan pelanggan, mengurangi cacat dalam proses sebesar 50%, dan mengurangi biaya kualitas (*cost of quality*) sebesar 50%.

f. *Training*

Training atau pelatihan bertujuan untuk menghasilkan karyawan yang *multiskill*, bersemangat, bermoral tinggi, dan mampu melakukan semua fungsi yang dibutuhkan secara mandiri dan efektif. Berikut merupakan langkah-langkah dalam melaksanakan pelatihan:

i. Menetapkan kebijakan dan prioritas, serta memeriksa status pendidikan dan pelatihan saat ini.
ii. Membangun sistem pelatihan untuk keterampilan operasi dan perawatan.
iii. Melatih karyawan dalam keterampilan operasi dan perawatan.
iv. Menyiapkan kalender pelatihan.
v. Memulai pelatihan.
vi. Evaluasi kegiatan dan studi pendekatan ke depan.

g. *Office TPM*

Office TPM fokusnya adalah meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan aliran kerja di fungsi administratif sekaligus mengidentifikasi kerugian (*losses*). 12 kerugian utama yang ditangani yaitu:

i. Kehilangan pemrosesan (*processing loss*).
ii. Kehilangan biaya, termasuk di area pengadaan, akuntansi, pemasaran yang menyebabkan persediaan tinggi.
iii. Kehilangan komunikasi.
iv. Kehilangan waktu menganggur (*idle loss*).
v. Kehilangan waktu *set up*.
vi. Kehilangan akurasi.
vii. Kerusakan peralatan kantor.
viii. Putusnya saluran komunikasi.
ix. Waktu yang dihabiskan untuk mengambil informasi.
x. Ketidaktersediaan status stok online yang benar.
xi. Keluhan pelanggan karena logistik.
xii. Biaya pengiriman darurat/pembelian darurat.

h. *Safety, Health, and Environment* (SHE)

Safety, Health, and Environment bertujuan untuk menciptakan tempat kerja yang aman dan lingkungan sekitar yang tidak rusak oleh proses atau prosedur. Pilar ini berperan aktif di setiap pilar lain secara rutin. Prinsip utamanya adalah *Zero Mindset* yang meliputi nol kecelakaan, nol gangguan kesehatan, dan nol kebakaran. Salah satu alat untuk menganalisis potensi bahaya dalam setiap kegiatan operasional dan perawatan, serta menjadi landasan dalam pencegahan kecelakaan kerja yaitu *Job Safety Analysis* (JSA). JSA adalah suatu proses sistematis untuk mengidentifikasi potensi bahaya yang terkait dengan setiap langkah dalam suatu pekerjaan atau tugas spesifik, serta menentukan langkah-langkah pengendalian yang diperlukan untuk menghilangkan atau meminimalkan risiko bahaya tersebut.

2.2.2 *Business Process Improvement* (BPI)

Business Process Improvement (BPI) adalah suatu metodologi sistematis yang dikembangkan untuk membantu organisasi dalam membuat kemajuan signifikan pada cara proses bisnis beroperasi (Harrington, 1991). Metodologi ini berfokus pada penghapusan pemborosan (*waste*) dan birokrasi, serta menyediakan sistem untuk menyederhanakan dan merampingkan operasi guna memastikan bahwa pelanggan internal dan eksternal menerima *output* yang memuaskan. Menurut Harrington (1991), BPI memiliki tiga tujuan utama yaitu; membuat proses menjadi efektif, membuat proses menjadi efisien, dan membuat proses menjadi adaptif. Selain itu, tujuan utama BPI adalah untuk memastikan organisasi memiliki proses bisnis yang mampu menghilangkan kesalahan, meminimalkan keterlambatan, memaksimalkan penggunaan aset, mendorong pemahaman, mudah digunakan, ramah pelanggan, adaptif terhadap perubahan, memberikan keunggulan kompetitif, serta mengurangi jumlah karyawan yang berlebihan. Harrington (1991) menguraikan lima fase dalam penerapan BPI yang dapat dilihat pada Gambar 2.3.

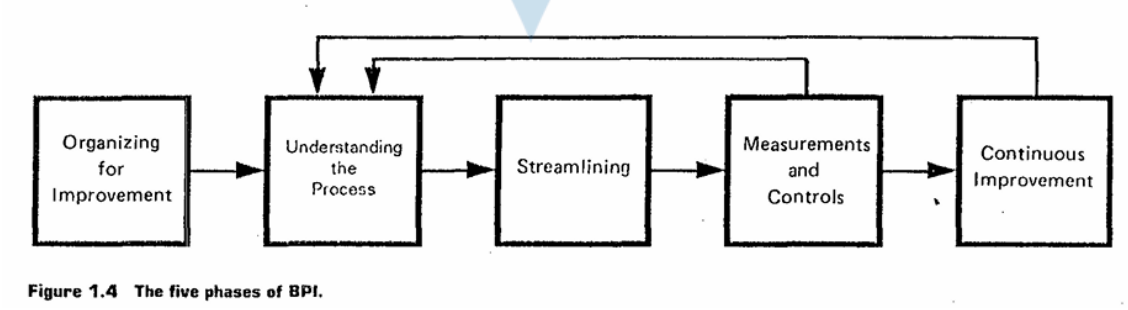


Figure 1.4 The five phases of BPI.

Gambar 2.3 Fase dalam BPI (Harrington, 1991)

Pada Gambar 2.3 merupakan 5 fase dalam BPI yang akan dijelaskan sebagai berikut.

a. Fase 1: *Organizing for Improvement*

   Tujuan pada fase ini yaitu memastikan keberhasilan dengan membangun kepemimpinan, pemahaman, dan komitmen. Fase ini merupakan tahap awal di mana komitmen dibangun, pemahaman tentang prinsip-prinsip *reengineering*, dan kepemimpinan proyek diidentifikasi.

b. Fase 2: *Understanding the Process*

   Tujuan pada fase ini yaitu memahami semua dimensi dari proses bisnis saat ini (*as-is model*). Fase ini berfokus pada pendokumentasian dan pemahaman mendalam tentang proses yang ada. Aktivitasnya meliputi pendefinisian ruang lingkup dan misi proses, pendefinisian pengukuran dan ekspektasi pelanggan, pembuatan diagram alir, pengumpulan data biaya, waktu, dan nilai, serta pelaksanaan *process walkthrough* untuk memverifikasi keakuratan dokumentasi.

c. Fase 3: *Streamlining*

   Tujuan fase ini yaitu meningkatkan efisiensi, efektivitas, dan adaptabilitas proses bisnis. Fase ini merupakan inti dari perbaikan proses, di mana berbagai teknik perampingan diterapkan menggunakan 12 *tools*. Aktivitasnya meliputi identifikasi peluang perbaikan, penghapusan birokrasi, penghapusan aktivitas yang tidak bernilai tambah (*non-value-added*), penyederhanaan proses, pengurangan waktu siklus, *error proofing*, peningkatan peralatan, standardisasi, otomatisasi, serta dokumentasi dan pelatihan proses baru.

d. Fase 4: *Measurement and Controls*

   Tujuan fase ini yaitu mengukur dan mengendalikan proses untuk memastikan perbaikan berkelanjutan. Fase ini berfokus pada implementasi kemampuan untuk memantau proses guna perbaikan berkelanjutan. Harrington (1991) menekankan bahwa pengendalian proses yang tepat sangat penting dalam mencapai kepuasan pelanggan.

e. Fase 5: *Continuous Improvement*

   Tujuan fase ini yaitu memastikan perbaikan terus terjadi secara berkelanjutan. Fase ini menekankan bahwa perbaikan adalah proses yang tidak pernah berakhir. Aktivitasnya meliputi penetapan target tantangan yang lebih ketat, pengembangan rencana perbaikan baru, implementasi, pengukuran dan pemberian penghargaan atas pencapaian, yang kemudian diikuti dengan penetapan target baru yang lebih tinggi.

2.2.3 Instruksi Kerja

Menurut Haug (2015), Instruksi kerja (*Work Instruction*) merupakan panduan operasional yang digunakan oleh karyawan untuk melaksanakan tugas-tugas spesifik dalam lingkungan produksi atau operasional. Kualitas instruksi kerja memiliki dampak langsung terhadap efisiensi dan kepuasan kerja karyawan. Instruksi kerja yang buruk dapat menurunkan produktivitas dan kinerja pekerja. Tujuan utama penyusunan instruksi kerja adalah untuk memberikan panduan yang jelas, akurat, dan tepat waktu agar pekerja dapat menyelesaikan tugasnya dengan benar, efisien, dan konsisten. Dalam kerangka kualitas informasi instruksi kerja yang dikemukakan Haug (2015), terdapat 15 dimensi masalah kualitas informasi yang dikelompokkan ke dalam lima kategori, yaitu: masalah intrinsik, masalah representasional, informasi yang meragukan, dan informasi yang tidak dapat diakses. Kelima kategori ini mencakup berbagai aspek kualitas yang harus diperhatikan dalam penyusunan instruksi kerja, mulai dari keakuratan isi, kejelasan penyajian, hingga kemudahan akses bagi pengguna.

2.2.4 *System Usability Scale*

System Usability Scale (SUS) adalah sebuah kuesioner sederhana yang terdiri dari sepuluh pernyataan untuk mengukur persepsi subjektif pengguna terhadap *usability* (kemudahan penggunaan) suatu sistem (Brooke, 2020). Tujuan utama pengembangan SUS ini adalah untuk menyediakan alat ukur sederhana, cepat, dan andal guna mengevaluasi persepsi subjektif pengguna terhadap aspek penggunaan sistem. Pengukuran usabilitas suatu sistem dapat dilakukan dengan SUS dengan menjawab 10 pernyataan yang harus dijawab dalam bentuk skala likert 1-5. Nilai 1 berarti sangat tidak setuju, nilai 2 berarti tidak setuju, nilai 3 berarti netral, nilai 4 berarti setuju, dan nilai 5 berarti sangat setuju. Tabel 2.10 merupakan tabel kuesioner SUS.

Tabel 2.10 Kuesioner SUS

No	Pertanyaan	Bobot	Skor
1	*I think that i would like to use this system frequently.*		
2	*I found the system unnecessarily complex.*		
3	*I thought the system was easy to use.*		
4	*I think that i would need the support of a technical person to be able to use this system.*		
5	*I found the various functions in the system were well integrated.*		
6	*I thought there was too much inconsistency in this system.*		
7	*I would imagine that most people would learn to use this system very quickly.*		
8	*I found the system very awkward to use.*		
9	*I felt very confident using the system.*		
10	*I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.*		

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pengisian kuesioner dan pembobotan, diantaranya:

a. Urutan pernyataan SUS disesuaikan Tabel 2.10.
b. Kolom bobot diisi sesuai hasil pengisian oleh operator.
c. Pengisian kolom skor menggunakan aturan berikut.
   i. Skor untuk pernyataan bernomor ganjil = Bobot -1 (2.1)
   ii. Skor untuk pernyataan bernomor genap = 5 – Bobot (2.2)
   iii. Total skor adalah penjumlahan skor semua pernyataan.
   iv. SUS *Score* = Total Skor x 2,5 (2.3)

Tabel 2.11 Skala interpretasi hasil skor SUS

SUS	*Grade*	*Adjective*	*Acceptable*
84,1 – 100	A+	*Best Imagineable*	*Acceptable*
80,8 – 84,0	A	Excellent	*Acceptable*
78,9 – 80,7	A-	Good	*Acceptable*
77,2 – 78,8	B+		*Acceptable*
74,1 – 77,1	B		*Acceptable*
72,6 – 74,0	B-		*Acceptable*
71,1 – 72,5	C+		*Acceptable*

Tabel 2.11 Skala interpretasi hasil skor SUS (lanjutan)

SUS	*Grade*	*Adjective*	*Acceptable*
65,0 – 71,0	C	OK	*Marginal*
62,7 – 64,9	C-		*Marginal*
51,7 – 62,6	D		*Marginal*

2.2.5 *Reliability-Centered Maintenance*

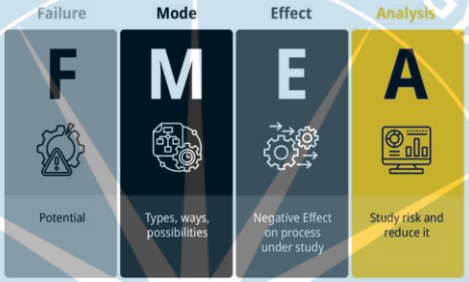
Reliability-Centered Maintenance (RCM) adalah sebuah pendekatan pemeliharaan yang secara sistematis tersusun untuk membantu dalam menentukan kebijakan perawatan yang paling efektif dalam menjamin keandalan fungssi suatu aset fiik dengan kondisi operasional yang ada. RCM sendiri fokus pada fungsi peralatan, potensi kegagalan, serta konsekuensi yang timbul akibat kegagalan yang ada, tidak hanya pada komponen ataupun mesin itu sendiri (Jones *et al*., 1991). Dalam RCM analisis kegagalan dilakukan melalui identifikasi fungsi *functional failure, failure mode, failure effect*, dan juga *failure consequence*. Dengan adanya pendekatan ini membantu memahami proses kegagalan dapat terjadi beserta dampaknya bagi sistem secara menyeluruh.

Konsekuensi kegagalan dalam RCM sendiri dikelompokkan menjadi beberapa kategori utama seperti konsekuensi operasional, non-operasional, keselamatan, lingkungan, dan *hidden failure.* Klasifikasi ini merupakan dasar suatu tindakan pemeliharaan perlu dilakukan secara proaktif atau tidak. *Secondary damage* merupakan kerusakan tambahan yang timbul akibat kegagalan utama yang tidak diantisipasi. Pada RCM, tugas pemeliharaan *preventive* hanya dianggap layak jika biaya pelaksanaannya lebih rendah dibandingkan biaya yang timbul akibat kegagalan beserta kerusakan sekundernya. *Protected function* merupakan fungsi sistem yang dilindungi oleh *protective device* dan hanya dianggap efektif apabila perangkat tersebut dapat dipastikan selalu berfungsi saat dibutuhkan (Jones *et al*., 1991).

Pada RCM strategi pemeliharaannya tidak selalu *preventive maintenance* sebagai solusi utama. Strategi pemeliharaan yang dapat dipilih yaitu *condition-based maintenance*, *predictive maintenance, scheduled maintenance*, *run to failure*, dan juga *redesign* sistem. Pemilihan ini dilakukan sesuai dengan kelayakan, ekonomi, dan juga risiko kegagalan yang ditimbulkan. RCM berperan dalam sistem industri modern karena mampu meningkatkan keandalan peralatan, mengurangi *downtime*, serta meminimalkan risiko keselamatan dan lingkungan. RCM melakukan pendekatan berbasis konsekuensi kegagalan yang ada, dengan adanya RCM dapat membantu penyusunan pemeliharaan secara lebih efisien dan berorientasi pada risiko yang ada.

a. F*ailure Mode and Effects Analysis* (FMEA)

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) merupakan metode analisis risiko yang berguna untuk mengidentifikasi potensi kegagalan atau *failure mode* pada suatu sistem, proses, atau produk serta menganalisis dampak dari kegagalan yang ada. FMEA sendiri bertujuan untuk memprioritaskan risiko, sehingga dapat ditentukan tindakan pencegahan maupun perbaikan yang paing efektif. Dalam FMEA terdapat beberapa elemen diantaranya adalah *failure mode, effect of failure, cause of failure, severity, occurence*, dan juga *detection.* Dalam pendekatan RCM, FMEA digunakan sebagai alat utama dalam mengidentifikasi fungsi sistem, potensi kegagalan fungsi, serta konsekuensi kegagalan. FMEA menjadi dasar dalam menentukan strategi perawatan yang paling tepat, seperti *preventive maintenance, condition based maintenance, predictive maintenance,* dan juga *run to failure* (Tarumingkeng, 2024).



Gambar 2.4 FMEA (Emaint Enterprise, 2026)

2.2.6 Analisis Kuantitatif Keandalan *(Reliability Engineering)*

Analisis kuantitatif keandalan merupakan metode untuk mengukur kemampuan suatu sistem dalam beroperasi tanpa kegagalan dalam suatu periode waktu tertentu. Analisis kuantitatif keandalan berguna untuk melakukan evaluasi tingkat keandalan suatu komponen atau sistem berdasarkan data historis kegagalan. Menurut (Elsayed, 2012a) analisis keandalan dilakukan melalui pengolahan data kegagalan, pemodelan distribusi probabilitas, estimasi parameter distribusi, dan juga perhitungan ukuran keandalan untuk mendukung evaluasi dan perencanaan pemeliharaan. Pendekatan ini juga menggunakan data historis serta metode statistik dalam melakukan pemodelan pola kegagalan. Dalam analisis keandalan menggunakan konsep fungsi keandalan dan laju kegagalan untuk menggambarkan karakteristik kerusakan sistem (Elsayed, 2012). Pendekatan yang sama juga dijelaskan oleh(O'Connor & Kleyner, 2003), yang di mana menyakan bahwa analisis keandalan diawali dengan analisis data kegagalan hingga interpretasi hasil sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan. Parameter seperti *Mean Time to Repair* (MTTR) dan *Mean Time To Failure* (MTTF) juga digunakan untuk mengukur rata-rata waktu kegagalan serta menentukan tingkat ketersediaan sistem. Analisis keandalan dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan interval

pemeliharaan yang optimal untuk meminimalkan *downtime* dan meningkatkan kinerja sistem. Berdasarkan konsep analisis keandalan yang dijelaskan oleh analisis dilakukan melalui prosedur pengumpulan data kegagalan, pemilihan distribusi probabilitas, estimasi parameter, perhitungan ukuran keandalan, dan juga interpretasi hasil untuk penentuan kebijakan pemeliharaan.

a. Pengumpulan data kegagalan (*failure data*)

   Melakukan pengumpulan data historis kegagalan yang akan digunakan sebagai dasa analisis keandalan. Data yang dikumpulkan meliputi waktu antar kerusakan, waktu hingga terjadi kegagalan, dan waktu perbaikan. Data yang digunakan harus memiliki tingkat akurasi yang baik karena akan mempengaruhi hasil analisis keandalan yang ada.

b. Analisis data kegagalan dan pemilihan distribusi probabilitas (*probability distribution*)

   Melakukan identifikasi karakteristik data kegagagalan dan menentukan model distribusi probabilitas yang paling sesuai. Data dapat dianalisis dengan menggunakan distribusi statistik seperti Weibull, Eksponensial, Triangular, atau Normal. Pemilihan distribusi berasal dari karakteristik data serta hasil uji kesesuaian distribusi (*goodness of fit*), sehingga model dapat merepresentasikan kegagalan komponen dengan akurat.

c. Estimasi parameter distribusi (*parameter estimation*)

   Melakukan perhitungan pada distribusi probabilitas yang dipilih. Misalnya, pada distribusi Weibull nantinya estimasi parameter bentuk dan skala yaitu ($\beta \; dan \; \alpha$), sedangkan pada distribusi Eksponensial nantinya estimasi parameter laju kegagalan(λ).Parameter nantinya digunakan sebagai dasar dalam menghitung karakteristik keandalan komponen yang ada.

d. Perhitungan ukuran keandalan (*reliability analysis*)

   Perhitungan ukuran keandalan meliburi perhitungan fungsi keandalan, fungsi distribusi kumulatif kegagalan, laju kegagalan, serta parameter seperti *Mean Time to Failure* (MTTF), *Mean Time Between Failure* (MTBF), dan juga *Mean Time to Repair* (MTTR).

e. Interpretasi hasil dan pengambilan keputusan pemeliharaan (*maintenance application*)

   Melakukan interpretasi hasil analisis keandalan sebagai dasar dalam menentukan kebijakan pemeliharaan yang tepat. Informasi yang ada nantinya dapat membantu menentukan nilai interval *preventive* yang optimal, merencanakan pergantian komponen, dan juga mengurangi risiko terjadinya *breakdown*, sehingga keandalan sistem dapat dipertahankan.

2.2.7 *Lean Manufacturing*

Konsep *Lean Manufacturing* merupakan sistem terintegrasi yang dapat digunakan untuk menghilangkan pemborosan (*waste*) serta variabilitas sepanjang aliran dari hulu ke hilir (pemasok ke pelanggan). *Lean* merupakan kumpulan praktik yang saling terintegrasi dan dapat diukur melalui komponen seperti *just-in-time, total quality*, manajemen pemasok, dan praktik sumber daya manusia agar dapat menekan *waste* secara sistemik. Penggunaan konsep ini dapat didukung dengan menggunakan salah satu metode, yaitu *Work Environment Design* (WED). WED merupakan proses analisis dan desain sistem kerja yang mengkaji antarmuka organisasi-teknologi-manusia secara terintegrasi, bukan sekadar pos atau stasiun kerja secara individual. Teknik atau metode ini memiliki tujuan, yaitu menurunkan kesalahan dalam produksi, *biaya* produksi, dan waktu tunggu pada suatu lini produksi. Hal ini pun memiliki hubungan dengan proses inovasi ataupun *improvement* pada suatu area. *Lean Manufacturing* memiliki beberapa metode yang dapat digunakan sesuai dengan permasalahan yang dihadapi. Berikut merupakan metode yang masuk dalam teori *lean manufacturing*.

SMED merupakan salah satu metode yang digunakan untuk pelaksanaan *improvement* dari konsep *lean manufacturing.* Tujuan metode ini yaitu mengurangi/ mempercepat waktu yang dibutuhkan untuk kegiatan *Setup* (Wibowo & Pramudika, 2023). Fokus dari metode ini yaitu memisahkan aktivitas setup menjadi dua kategori, yaitu *internal* dan *external setup*. Metode ini dilakukan dengan mengonversi waktu yang digunakan pada aktivitas *internal setup* menjadi *external setup*. Hal ini akan berdampak pada meningkatnya ketersediaan mesin dan efisiensi proses produksi.

2.2.8 *Quality Management and Training*

Quality Management and Training merupakan salah satu dasar yang sangat penting dalam proses pembuatan suatu sistem yang berorientasi pada keunggulan mutu dan keberlanjutan. Pendekatan ini juga merupakan salah satu konsep yang digunakan untuk dapat memastikan tiap proses dan output suatu sistem produksi dapat memenuhi standar yang ditetapkan. Salah satu metode atau model yang sering digunakan untuk memenuhi hal ini yaitu dengan menggunakan *Lean Six Sigma*.

Lean Six Sigma merupakan metode yang digunakan dalam proses meningkatkan kualitas serta efisiensi agar dapat mengeliminasi atau mengurangi pemborosan (*waste*). Dalam proses implementasinya, metode *Lean Six Sigma* ini memiliki kaitan erat dengan DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) yang sering digunakan sebagai kerangka utama perbaikan yang akan dilakukan. DMAIC sendiri merupakan langkah sistematis yang memiliki tujuan untuk dapat mengeliminasi sumber masalah,

mengidentifikasi pemborosan (*waste*), dan memastikan *improvement* yang telah dilakukan dapat bertahan. Berikut merupakan penjabaran pada poin-poin di bawah.

a. *Define*

   Tahapan *Define* merupakan langkah awal yang digunakan untuk proses klasifikasi dan identifikasi permasalahan apa saja yang ditemukan dan yang akan diperbaiki. Pada proses ini menentukan variabel apa saja yang diperlukan ditahapan berikutnya untuk mencapai tujuan.

b. *Measure*

   Pada tahapan ini, dilakukan pengumpulan serta pengukuran seluruh data yang akan dibutuhkan dan akan diolah untuk mencapai tujuan penyelesaian masalah. Pengukuran menggunakan data ini meliputi parameter kualitas, waktu proses, dan lainnya yang digunakan untuk dapat mengetahui performa dan kapabilias proses.

c. *Analyze*

   Tahapan ini berisikan penemuan akar permasalahan yang mendasari ketidaksesuaian pada hasil proses yang telah ditentukan. Analisis ini dapat dilakukan menggunakan berbagai tools seperti diagram sebab-akibat (*fishbone diagram*), FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), dan *tools* lainnya. Pada tahapan ini juga ditentukan target perbaikan yang akan tercapai agar strategi tercapai.

d. *Improve*

   Setelah ditemukannya akar permasalahan pada tahapan sebelumnya, dilakukan proses perbaikan terhadap akar masalah yang ditemukan pada tahapan *improve* ini. Pada tahapan ini, dilakukan perencanaan tindakan dan implementasi rancangan perbaikan yang telah dilakukan untuk dapat meningkatkan performa proses.

e. *Control*

   Tahapan *Control* adalah langkah terakhir dalam kerangka DMAIC. Proses ini dilakukan untuk dapat mempertahankan hasil perbaikan yang telah diimplementasikan. Pengendalian ini dilakukan dengan tujuan untuk dapat memastikan proses stabil, tetap memenuhi standar yang telah ditetapkan, dan mencegah terjadinya permasalahan yang sama.

2.2.9 Simulasi Monte Carlo

Pemodelan sistem adalah kegiatan untuk menggambarkan sistem nyata ke dalam bentuk model matematis atau logika agar analisis dapat dilakukan tanpa harus langsung menguji sistem tersebut (Law, 2015). Model yang dibuat dapat berupa model deterministik atau stokastik, tergantung pada karakteristik sistem yang diteliti. Pada sistem yang memiliki elemen ketidakpastian, seperti variasi waktu kerusakan, waktu pemrosesan, atau permintaan. Salah satu teknik yang umum digunakan dalam

pemodelan sistem stokastik adalah simulasi Monte Carlo, yaitu metode yang dilakukan dengan menjelankan simulasi secara berulang (iterasi) sehingga nantinya diperoleh estimasi karakteristik sistem yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan. Dalam penerapannya, setiap variabel *input* dimodelkan menggunakan distribusi probabilitas, seperti distribusi normal, eksponensial, weibull, dan dilakukan pengambilan sampel acak untuk menghasilkan nilai yang digunakan dalam simulasi.

Menurut (Berti, 2025) simulasi Monte Carlo merupakan salah satu metode numerik yang memanfaatkan bilangan acak untuk memperkirakan perilaku suatu sistem yang dipengaruhi oleh suatu variabel acak. Simulasi Monte Carlo bekerja dengan melakukan iterasi berulang dalam jumlah yang besar untuk memperoleh berbagai kemungkinan keluaran dari sistem yang dianalisis. Hasil dari simulasi ini tidak hanya berupa satu nilai, tetapi berupa distribusi *output* yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem, seperti nilai rata-rata, varians, serta tingkat risiko (Law, 2015). Dengan demikian, metode ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap berbagai skenario yang mungkin terjadi dalam kondisi nyata. Simulasi Monte Carlo sangat bermanfaat dalam menganalisis sistem yang kompleks dan sulit diselesaikan secara analitis. Hal ini dikarenakan metode ini tidak memerlukan penyederhanaan dalam bentuk persamaan matematis, melainkan dapat langsung menggunakan model berbasis logika dan data.

Oleh sebab itu, teknik ini banyak diterapkan dalam berbagai bidang, seperti manufaktur, keuangan, dan manajemen pemeliharaan, terutama dalam mengevaluasi kinerja sistem yang mengandung ketidakpastian. Dengan demikian, pemodelan sistem menggunakan simulasi Monte Carlo menjadi metode yang penting dalam analisis sistem modern, karena mampu memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap perilaku sistem serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dan berbasis data. Berdasarkan konsep simulasi Monte Carlo, pelaksanaan simulasi dapat dilakukan melalui beberapa tahapan yang meliputi analisis *input*, pembangkitan data simulasi, verifikasi dan validasi model, dan juga analisis *output.* Rincian untuk tahapan yang dilakukan dijelaskan pada poin-poin berikut ini.

a. Analisis *Input*

Pada analisis *input* yaitu melakukan identifikasi karakteristik data historis kerusakan yang akan digunakan sebagai input untuk simulasi yang ada. Data dianalisis menggunakan *Input Analyzer* untuk memperoleh distriusi probabilitas yang paling sesuai dan juga parameter distribusi yang ada. Distribusi yang didapatkan tersebut nantinya dijadikan dasar dalam proses Simulasi Monte Carlo.

b. Pembangkitan Data Simulasi

Pada tahap ini berfungsi untuk membangkitkan data waktu antar kerusakan berdasarkan distribusi probabilitas yang sebelumnya telah diperoleh dari hasil analisis *input.* Pembangkitan data ini dilakukan secara berulang dengan bilangan acak, sehingga nantinya terdapat beberapa skenario yang merepresentasikan kondisi sistem yang ada.

c. Verifikasi Model

Pada tahap ini memastikan bahwa model simulasi telah dibangun sesuai dengan logika yang dirancang dan mampu merepresentasikan kondisi sistem yang sebenarnya. Verifikasi dilakukan dengan memeriksa model simulasi untuk memastikan tidak terdapat kesalahan pada logika, rumus, dan juga proses simulasi yang ada, sedangkan validasi dilakukan dengan melakukan pembandingan hasil simulasi terhadap data historis untuk menilai tingkat kesesuaian model dengan kondisi nyata. Melalui proses verifikasi dan validasi model simulasi diharapkan dapat digunakan sebagai dasar penentuan keputusan jam optimal pemeliharaan secara lebih akurat.

d. Analisis *Output*

Analisis *output* dilakukan untuk mengevaluasi hasil simulasi yang diperoleh dalam mendukung pengambilan keputusan. Hasil simulasi berupa waktu antar kerusakan yang dianalisis dan dikombinasikan dengan MTTF, sehingga diperoleh interval jam optimal *maintenance.*

2.2.10 Metode Rasional

Metode rasional merupakan pendekatan sistematis dalam proses perancangan atau redesign produk yang dilakukan secara terstruktur dan berbasis analisis logis. Metode ini bertujuan untuk menghasilkan solusi desain yang optimal melalui tahapan yang jelas, mulai dari identifikasi masalah hingga evaluasi alternatif solusi terbaik. Dalam konteks rekayasa teknik, metode rasional sering digunakan karena mampu memberikan hasil yang objektif, terukur, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Secara umum, tahapan dalam metode rasional meliputi: (1) klarifikasi tujuan perancangan untuk memahami kebutuhan utama pengguna, (2) penentuan fungsi produk yang akan dikembangkan, (3) penetapan spesifikasi atau kebutuhan teknis yang harus dipenuhi, (4) penentuan karakteristik produk, (5) pengembangan beberapa alternatif desain, (6) evaluasi alternatif berdasarkan kriteria tertentu seperti biaya, efisiensi, dan kinerja, serta (7) penyempurnaan desain terpilih. Tahapan-tahapan ini memastikan bahwa proses desain dilakukan secara runtut dan mengurangi kemungkinan kesalahan dalam pengambilan keputusan.

Keunggulan utama metode rasional terletak pada pendekatannya yang terstruktur dan berbasis data, sehingga sangat cocok digunakan dalam perancangan teknik yang membutuhkan ketelitian tinggi. Namun, metode ini cenderung kurang fleksibel dalam menghasilkan inovasi yang bersifat eksploratif karena lebih berfokus pada analisis daripada kreativitas. Oleh karena itu, dalam beberapa kasus, metode rasional sering dikombinasikan dengan metode lain untuk menghasilkan desain yang lebih optimal, seperti metode kreatif.

2.2.11 Metode Kreatif

Metode kreatif merupakan pendekatan dalam perancangan atau redesign produk yang menekankan pada inovasi, ide baru, serta pemahaman terhadap kebutuhan dan preferensi pengguna. Metode ini tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga mempertimbangkan faktor pengalaman pengguna dalam menghasilkan desain. Pendekatan kreatif biasanya melibatkan eksplorasi ide secara luas melalui teknik brainstorming, analisis kebutuhan pengguna, serta penerapan metode inovatif seperti *Kansei Engineering dan Quality Function Deployment* (QFD). *Kansei Engineering* berfokus pada penerjemahan emosi dan persepsi pengguna ke dalam parameter desain, sehingga produk yang dihasilkan dapat memberikan pengalaman yang lebih nyaman dan menarik. Sementara itu, QFD digunakan untuk mengubah kebutuhan dan keinginan konsumen menjadi spesifikasi teknis yang terukur, sehingga desain yang dihasilkan lebih sesuai dengan harapan pasar.

Dalam proses *redesign*, metode kreatif memungkinkan perancang untuk menghasilkan berbagai alternatif solusi yang unik dan inovatif. Hal ini sangat penting terutama dalam kondisi persaingan industri yang ketat, di mana produk tidak hanya dituntut untuk berfungsi dengan baik, tetapi juga harus memiliki nilai estetika dan keunggulan kompetitif. Dengan pendekatan ini, desain yang dihasilkan cenderung lebih adaptif terhadap perubahan kebutuhan pengguna. Meskipun memiliki keunggulan dalam hal inovasi, metode kreatif juga memiliki keterbatasan, yaitu hasil yang dihasilkan terkadang bersifat subjektif dan sulit diukur secara kuantitatif. Oleh karena itu, dalam praktiknya metode kreatif sering dikombinasikan dengan metode rasional agar menghasilkan desain yang tidak hanya inovatif, tetapi juga layak secara teknis dan ekonomis.

2.3 Standar dan Kode Etik

Dalam perancangan ulang berdasarkan solusi yang ditetapkan, pendekatan yang komprehensif diambil dengan mengacu pada serangkaian standar internasional yang menjamin aspek keselamatan, keandalan, keamanan informasi dan keberlanjutan.

a. ISO 9001:2015 Mengenai Sistem Manajemen Mutu

Standar ini menekankan pendekatan berbasis risiko, perbaikan berkelanjutan, dan kepuasan pelanggan melalui proses yang terstandar. Penerapan dalam solusi ini dilakukan melalui tiga aksi utama. Pertama, instruksi kerja didokumentasikan secara jelas sesuai klausul 7.1.6 (Pengetahuan Organisasi) dan 7.5 (Informasi terdokumentasi) untuk memastikan konsistensi dan kejelasan prosedur bagi operator dan teknisi. Kedua, perancangan ulang *magazine* dilaksanakan melalui proses perubahan terkendali sebagaimana diatur dalam klausul 8.5.6 (Pengendalian Perubahan), sehingga modifikasi desain dilakukan secara terstruktur, terdokumentasi, dan teruji. Ketiga, perancangan sistem *maintenance* digerakkan dengan mendorong partisipasi dan pelatihan operator berdasarkan klausul, 7.1.3. (Prasarana) Mengenai penyediaan *tools* dan mesin harus dipelihara, dan 8.1. (Perencanaan dan Pengendalian Operasional) Pelaksanaan maintenance harus dikendalikan dan dimonitor sesuai jadwal, sehingga dengan adanya tools keterlibatan aktif seluruh karyawan dalam pemeliharaan *preventive* dapat terwujud secara berkelanjutan dengan menjalankan jadwal dan *reminder* otomatis setiap harinya. Keberlanjutan ini dapat terlaksana dengan komitmen dan persetujuan dengan pihak terkait.

b. ISO 45001:2018 Mengenai Sistem Manajemen Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3)

Instruksi kerja harus memuat prosedur keselamatan kerja (seperti *lockout* atau *tagout* dan APD) sesuai klausul 8.1.2 (Pengendalian Bahaya dan Risiko K3). *Redesign* mesin wajib memenuhi prinsip ergonomi dan keamanan operasional yang salah satunya yaitu memperhatikan perubahan alur kerja dan area kerja operator yang bersangkutan, sebagaimana diatur dalam klausul 8.1.4 (Pengadaan). Dengan demikian, setiap perbaikan tidak hanya meningkatkan kinerja, tetapi juga menjamin keselamatan kerja.

c. ISO 27001:2022 Mengenai Sistem Manajemen Keamanan Informasi

Data *preventive* pemeliharaan dan pengelolaan hak akses hanya diberikan kepada pihak yang berwenang pada klausul A.8.2 (Pengelolaan Aset Informasi). Sementara itu, dokumen instruksi kerja hanya boleh diakses oleh personel yang berwenang berdasarkan klausul A.8.1.3 (Kebijakan Penggunaan Aset) dan A.9 (Kontrol Akses). Dengan demikian, kerahasiaan dan integritas informasi teknis serta operasional tetap terjaga.

d. ISO 55001:2014 Mengenai Sistem Manajemen Aset

Pada perancangan sistem penjadwalan dan *reminder* otomatis *maintenance*, klausul 6.1 (Tindakan untuk Menangani Risiko dan Peluang) dilaksanakan dengan *reminder*

maintenance berupa notifikasi untuk mitigasi agar aset tidak mengalami kegagalan akibat *preventive* yang terlambat.

e. Standar Sistem Perawatan Mesin

Pada perancangan ulang sistem perawatan mesin di *line* produksi XWM 2, penerapan *autonomous maintenance* dilakukan dengan mengacu pada *manual book* masing-masing mesin produksi sebagai standar utama kondisi normal mesin dan standar parameter operasi mesin seperti suhu, tekanan, arus listrik, getaran, pelumasan, dan kondisi komponen. *Manual book* mesin digunakan sebagai acuan utama karena di dalamnya terdapat batas parameter normal operasi mesin, prosedur pengoperasian mesin, instruksi *inspection*, dan lain sebagainya. Dengan demikian, seluruh aktivitas *autonomous maintenance* yang dilakukan operator tetap mengikuti standar teknis.

f. Standar Sistem Penjadwalan Perawatan *Preventive*

Pada perancangan sistem penjadwalan perawatan *preventive* di *line* produksi XWM 2, pembuatan jadwal *preventive* dilakukan dengan mengacu pada jam istirahat yang ada. Dengan begitu, nantinya pengerjaan untuk perawatan *preventive* dapat dilakukan pada jam istirahat atau biasa disebut non shift. Hal ini untuk menyesuaikan dengan standar perusahaan yang ada, dengan begitu juga nantinya *preventive maintenance* tidak akan menghentikan *line* yang ada.

g. SNI 1729:2020 Mengenai Spesifikasi Struktur Baja untuk Sambungan dan Material Mesin

Material tambahan yang digunakan untuk rangka tambahan pada mesin dapat menggunakan baja karbon rendah sebagai standar minimal. Plat baja karbon rendah ini merupakan besi *hollow* yang umum digunakan pada fabrikasi mesin industri. Pemilihan material dilakukan karena memiliki kekuatan struktur yang baik, tahan terhadap getaran mesin, serta mudah dilakukan proses pengelasan. Sambungan rangka menggunakan las sudut (*fillet weld*) untuk memastikan kekakuan dan kestabilan struktur dalam menopang beban double magazine pada mesin strapping band. Dengan demikian, pemilihan material dan desain sambungan dilakukan secara terintegrasi agar hasil redesign memiliki kekuatan, keamanan, dan ketahanan yang baik selama proses operasional mesin.

h. SNI 7033:2004 Mengenai Tata Cara dan Persyaratan Pengelasan Baja

Sambungan pada rangka *redesign* mesin menggunakan sambungan sudut (*fillet joint*) karena jenis sambungan ini sesuai untuk penyatuan material baja struktural seperti besi *hollow* atau baja siku. Sambungan sudut dipilih karena mampu memberikan kekuatan yang baik terhadap beban dan getaran mesin serta

mempermudah proses fabrikasi dan pengelasan. Proses pengelasan dilakukan mengacu pada SNI 7033:2004 agar kualitas sambungan las tetap kuat, rapi, dan aman digunakan pada struktur rangka mesin.

i. *Work Instruction* (WI) mengenai langkah melakukan operasi

Pada proses perancangan *redesign double magazine*, salah satu standar yang dijadikan acuan adalah *Work Instruction* (WI) yang berlaku di perusahaan. Work Instruction merupakan prosedur operasional standar yang berisi urutan aktivitas operator dalam menjalankan mesin *strapping band*, mulai dari persiapan, pengoperasian, hingga penghentian mesin. Oleh karena itu, perancangan dilakukan dengan mempertahankan tahapan kerja yang telah ditetapkan pada WI sehingga implementasi desain tidak mengubah alur kerja operator maupun prosedur operasional yang telah diterapkan perusahaan.

Penerapan *double magazine* hanya mengubah aspek desain mekanis sebagai media penempatan rol tali, sedangkan langkah-langkah utama pengoperasian mesin tetap mengacu pada Work Instruction yang berlaku. Dengan demikian, operator tidak memerlukan penyesuaian terhadap prosedur kerja yang telah digunakan sebelumnya sehingga implementasi desain dapat dilakukan dengan lebih mudah serta meminimalkan potensi kesalahan operasi akibat perubahan prosedur kerja.

Dokumen standar ISO dan SNI yang digunakan sebagai acuan di perusahaan merupakan dokumen yang bersifat internal dan hanya dapat diakses oleh pihak yang berwenang. Oleh karena itu, dokumen standar tersebut tidak dapat dipublikasikan maupun ditampilkan. Penelitian hanya menjelaskan penerapan standar tersebut sebagai dasar dalam proses analisis dan perancangan.

Dalam merancang solusi *redesign* mesin *strapping band* beserta sistem perawatan di *line* produksi XWM, penerapan kode etik profesional menjadi landasan moral yang tidak terpisahkan dari penerapan standar teknis. Berikut adalah prinsip etika utama yang harus dipatuhi:

a. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2008

Dalam pelaksanaan perancangan solusi pada lini produksi XWM 2, penerapan kode etik mengacu pada UU RI Nomor 11 Tahun 2008 tentang Informasi dan Transaksi Elektronik (UU ITE), khususnya terkait penggunaan, pengelolaan, dan perlindungan data maupun informasi perusahaan yang selama proses perancangan. Data *downtime*, data produksi, dokumen *maintenance*, standar operasional, serta informasi perusahaan merupakan informasi yang bersifat terbatas dan hanya digunakan untuk kepentingan akademik serta pengembangan solusi perbaikan

sistem produksi. Oleh karena itu, seluruh data yang diperoleh selama observasi, wawancara, maupun dokumentasi wajib dijaga kerahasiaannya dan tidak diperbolehkan untuk disebarluaskan, dimodifikasi, ataupun digunakan di luar kepentingan tanpa izin perusahaan.

b. Kode Etik Spesifik untuk Solusi Perancangan

Dalam merancang sistem perawatan yang mengacu pada ISO 55001 dan filosofi *Total Productive Maintenance* (TPM), prinsip "Keberlanjutan Sistem" menjadi landasan utama. Rencana perawatan harus realistis dan dapat benar-benar dijalankan oleh tim *maintenance*, bukan sekadar formalitas. Jadwal *maintenance* perlu disesuaikan dengan kapasitas tim agar *feasible*, seperti kapasitas sumber daya manusia, ketersediaan alat, dan kelayakan waktu pelaksanaan agar tidak mengganggu operasional produksi, serta operator harus dilibatkan dalam penyusunan prosedur atau *work instruction* agar praktis dan aplikatif. Selain itu, sistem yang beretika harus mencakup mekanisme evaluasi pasca-perawatan yang transparan. Jika mesin tetap mengalami *breakdown* di luar jadwal perawatan yang telah ditetapkan, hal ini harus ditinjau ulang sebagai bahan dari perbaikan berkelanjutan. Hal ini sesuai dengan perancangan sistem *preventive maintenance* dan *maintenance reminder*. Evaluasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi apakah ada prosedur yang kurang efektif, interval perawatan tidak sesuai, atau akar masalah yang belum teratasi. Dengan demikian, rencana perawatan tidak bersifat statis, tetapi dinamis dan responsif terhadap kondisi aktual mesin, sehingga benar-benar berfungsi untuk meminimalkan *downtime* dan meningkatkan keandalan aset secara berkelanjutan.