

Bab 2

Landasan Teori

2.1. Definisi Pemeliharaan

Proses pemeliharaan memiliki pengaruh yang besar terhadap total biaya selama siklus hidup peralatan industri. Berbagai studi menggarisbawahi bahwa energi dan pemeliharaan biasanya menjadi pemicu biaya utama dalam siklus hidup produk industri. Oleh karena itu, merupakan tugas utama bagi perusahaan produksi untuk meminimalkan biaya pemeliharaan dan mengoptimalkan proses terkait seperti pasokan suku cadang. Di samping perspektif ekonomi ini, proses pemeliharaan juga berdampak pada variabel lingkungan selama siklus hidup produk atau peralatan. Hal ini sangat penting ketika proses logistik atau operasional juga termasuk di samping kegiatan pemeliharaan dasar [10].

Karena mesin adalah fasilitas yang sangat penting bagi perusahaan untuk berproduksi, pemeliharaan mesin merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi proses produksi. Mesin memungkinkan perusahaan untuk mengurangi tingkat kegagalan produk dan menyelesaikan produk dengan cepat sesuai permintaan pelanggan [11].

Menurut Daryus, 2007 [12] dalam suatu industri, perawatan atau pemeliharaan adalah komponen penting dari proses produksi. Oleh karena itu, proses produksi harus didukung oleh peralatan yang handal dan selalu beroperasi. Untuk mencapai hal ini, peralatan yang mendukung proses produksi harus mendapatkan perawatan yang teratur dan terencana.

Menurut Margono, 2006 [13] Sistem pemeliharaan dan perawatan yang tidak berencana digunakan dalam sistem pemeliharaan konvensional. Metode ini dapat menyebabkan kerusakan atau kegagalan daripada memperbaiki atau memperbaiki kerusakan alat atau mesin sebelum pemeliharaan dilakukan. Dalam hal ini, pekerjaan harus mengawasi dan mengorganisir dan mengelola pemeliharaan, dan

kerusakan atau kegagalan alat, peralatan, atau mesin menunjukkan bagaimana kita menjaga atau menjalankan sistem pemeliharaan. Karena hal-hal yang tidak diketahui sebelumnya jarang dievaluasi secara menyeluruh dan sukar untuk diprediksi, gangguan atau interupsi terhadap produksi.

Tujuan pemeliharaan adalah untuk menjaga peralatan, mesin, atau sistem yang bersangkutan dengan memastikan bahwa mereka tetap dalam kondisi prima sehingga dapat terus menjalankan fungsi yang dimaksudkan dengan cara yang efektif. Tujuan utama pemeliharaan adalah untuk secara proaktif mengurangi kegagalan yang berpotensi menyebabkan kerusakan, periode tidak aktif yang tak terduga, dan biaya yang besar untuk perbaikan. Penerapan pemeliharaan rutin dapat secara efektif memperpanjang masa pakai fungsional peralatan, sehingga mengurangi kebutuhan penggantian yang dipercepat. Praktik pemeliharaan yang efektif sangat penting untuk mempertahankan kinerja peralatan atau sistem pada puncaknya, sehingga menjamin peningkatan efisiensi operasional. Penggunaan tindakan pemeliharaan preventif memiliki potensi untuk mengurangi kemungkinan kegagalan peralatan yang signifikan, sehingga meminimalkan potensi biaya tak terduga yang terkait dengan perbaikan darurat. Penerapan prosedur pemeliharaan rutin dapat secara efektif mengurangi kemungkinan kecelakaan atau keadaan berbahaya yang diakibatkan oleh kerusakan peralatan.

Penerapan pemeliharaan yang efektif dalam bisnis manufaktur memainkan peran penting dalam mempertahankan kualitas barang yang diproduksi. Penggunaan praktik pemeliharaan preventif memiliki potensi untuk mengurangi waktu henti yang tidak terduga, sehingga meminimalkan dampak buruk pada operasi perusahaan. Optimalisasi energi, bahan baku, dan sumber daya lainnya dapat dicapai melalui pemeliharaan peralatan yang efektif. Meningkatkan produktivitas secara keseluruhan dapat dicapai melalui pengurangan waktu henti yang tidak terduga dan pemeliharaan peralatan untuk memastikan operasi yang optimal. Penjadwalan penggantian komponen diperlukan sebelum terjadi kerusakan agar mesin dapat bekerja dengan baik dan optimal, serta meminimalisir produk yang

tidak memenuhi standar perusahaan untuk mencapai kualitas dan kuantitas produksi [14].

2.2. Manajemen Perawatan

Manajemen merupakan suatu proses yang berbeda dan tidak dapat dipisahkan yang terdiri dari *planning*, *organizing*, *actuating*, dan *controlling* dengan menggunakan sumber tenaga manusia dan sumber daya lainnya [15]. Strategi perawatan dan perbaikan yang paling tua dan paling umum adalah "perbaiki saat rusak". Daya tarik dari pendekatan ini adalah tidak diperlukannya analisis atau perencanaan. Permasalahan dengan cara ini termasuk terjadinya waktu henti yang tidak terjadwal pada waktu-waktu yang mungkin tidak diinginkan, yang mungkin dapat menghambat pencapaian jadwal produksi yang telah ditetapkan. Downtime yang tidak terjadwal memiliki konsekuensi yang lebih serius dalam aplikasi seperti mesin pesawat terbang [16].

Permasalahan ini memberikan motivasi untuk melakukan pemeliharaan dan perbaikan sebelum munculnya masalah. Cara yang paling sederhana adalah dengan melakukan pemeliharaan dan perbaikan pada interval yang telah ditentukan sebelumnya, yang didefinisikan dalam bentuk waktu yang telah berlalu atau jam operasi. Cara ini dapat memberikan keandalan peralatan yang relatif tinggi, namun cenderung memakan biaya yang berlebihan (*downtime* yang dijadwalkan lebih tinggi). Permasalahan lebih lanjut dengan pendekatan berbasis waktu adalah kegagalan yang diasumsikan terjadi pada interval tertentu.

2.3. Down Time

Seperti yang dijelaskan oleh Gasper (1992) [17], *down time* adalah ketika suatu komponen sistem tidak dapat digunakan atau dalam kondisi yang tidak memadai, menyebabkan fungsi sistem tidak berjalan. Sangat penting untuk membuat keputusan penggantian komponen sistem berdasarkan *down time* minimum karena prinsip utama manajemen perawatan adalah untuk menekan periode kerusakan (*breakdown period*) sampai batas minimum. Pembahasan berikut akan berfokus

pada proses pembuatan keputusan penggantian komponen sistem yang meminimumkan *down time*, sehingga tujuan utama manajemen sistem perawatan adalah untuk memperpendek periode kerusakan sam Interval penggantian, atau interval penggantian, adalah dasar untuk menentukan tindakan preventif yang paling efektif untuk mengurangi downtime. Tujuan dari interval penggantian ini adalah untuk menentukan penggantian komponen yang paling efektif berdasarkan interval waktu. Di antara penggantian preventif, kriteria meminimumkan *down time* total per unit waktu akan digunakan.

Down time mesin dapat terjadi ketika mesin mengalami masalah seperti kerusakan yang dapat mengganggu performansi secara keseluruhan, termasuk kualitas produk yang dihasilkan atau kecepatan produksi, dan mesin harus berhenti bekerja selama waktu yang diperlukan untuk perbaikan dan siap untuk digunakan kembali.

Menurut pemaparan Ebeling (2004), *down time* terdiri dari beberapa unsur, yaitu:

- 1) *Supply delay* atau keterlambatan persediaan, adalah waktu yang dibutuhkan oleh pekerja perbaikan untuk mendapatkan komponen atau *sparepart* yang diperlukan untuk menyelesaikan proses perbaikan.
- 2) *Maintenance delay* atau waktu tunggu saat perbaikan, adalah waktu yang dibutuhkan untuk menunggu sumber daya perawatan tersedia untuk memulai proses perbaikan.
- 3) *Time of access*, atau waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan akses ke komponen yang rusak.
- 4) *Time diagnosis* atau waktu yang dibutuhkan untuk mendiagnosis, adalah waktu yang dibutuhkan untuk menentukan penyebab kerusakan dan prosedur perbaikan yang harus dilakukan untuk memperbaikinya.

- 5) *Time of repair*, atau waktu pemulihan, didefinisikan sebagai jumlah waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proses pemulihan setelah masalah ditemukan dan akses ke komponen yang rusak diperoleh.
- 6) *Verification and alignment time* atau Waktu verifikasi dan pengaturan, adalah waktu yang dibutuhkan untuk memastikan bahwa unit telah kembali ke kondisi operasi normal.

2.4. Definisi Preventive Maintenance

Preventive maintenance melibatkan pemantauan peralatan dan fasilitas, melakukan inspeksi rutin, memberikan perawatan, dan memastikan bahwa fasilitas berada dalam kondisi baik. Kegiatan ini bertujuan untuk membangun sistem yang akan mengurangi variabilitas, mengidentifikasi kemungkinan kegagalan, dan melakukan perbaikan atau perubahan untuk menjaga proses yang efisien. Sensor canggih saat ini memungkinkan pembangun sistem untuk mendeteksi getaran yang tidak biasa, perubahan kecil pada suhu atau tekanan, dan perubahan kecil pada viskositas oli atau komponen kimia. Pemeliharaan preventif membutuhkan sistem teknis dan manusia untuk memastikan proses produktif berjalan dengan toleransi. Ini memungkinkan sistem bekerja seperti yang dirancang [2].

Preventive maintenance menyertakan bahwa kami memiliki kemampuan untuk mengidentifikasi kapan sistem memerlukan layanan atau perbaikan. Oleh karena itu, untuk melakukan perawatan preventif, kita harus tahu kapan sistem membutuhkan layanan atau kapan kemungkinan akan gagal. Selama umur produk, kegagalan terjadi pada tingkat yang berbeda. Banyak produk mungkin mengalami tingkat kegagalan awal yang tinggi, atau kematian bayi. Banyak perusahaan elektronik "membakar" produk mereka sebelum dikirim. Dengan kata lain, mereka menguji produk mereka untuk masalah "pengaktifan" sebelum dikirim. Selain itu, perusahaan dapat menawarkan jaminan 90 hari. Kita harus mengingat bahwa kebanyakan kasus kematian bayi terjadi karena penggunaan yang tidak tepat daripada produk itu sendiri. Ini menunjukkan betapa pentingnya membangun

sistem layanan purna jual yang mencakup pelatihan dan pemasangan di banyak industri manajemen operasi [2]. Untuk itu, metode perawatan preventif harus dilakukan secara optimal, agar dapat memperpanjang umur mesin dan menghasilkan produksi yang optimal [18]. Seluruh *Management* pemeliharaan program *preventive* mengasumsikan bahwa mesin-mesin tertentu akan mengalami penurunan produktifitas sesuai dengan klasifikasi mereka. Program pencegahan dapat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu:

1. Program pemeliharaan terjadwal (*Time Driven*): program yang mengganti komponen berdasarkan waktu atau jarak pemakaian. Perusahaan yang menggunakan mesin dengan komponen murah sering menggunakan sistem ini.
2. *Predictive*: pengukuran yang dimaksudkan untuk mengidentifikasi degradasi sistem, atau penurunan fungsi. Ini berarti bahwa penyebab gangguan harus dihilangkan atau dikontrol sebelum segala sesuatu memiliki dampak yang signifikan pada penurunan fungsi komponen.
3. *Proactive/Proaktif*: Sistem ini banyak digunakan pada industri yang menggunakan mesin dengan komponen yang mahal dan didasarkan pada studi kelayakan mesin.

2.5. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Failure mode and effects analysis (FMEA) adalah pendekatan kualitatif yang diusulkan untuk mengurangi mode kegagalan peralatan dalam analisis peralatan atau produk pengembangan untuk mendukung keputusan ketika informasi dan data tidak mencukupi untuk melakukan analisis kuantitatif [19]. FMEA dilakukan pertama kali oleh US Army. Pada tahun 1950-an dan 1960-an FMEA industri otomotif seperti *Ford* dan *General Motor* mulai menggunakan metode ini untuk meningkatkan kualitas dan keandalan produk mereka. FMEA dikembangkan dan dalam beberapa dekade berikutnya industri kedirgantaraan dan lainnya mulai menerapkan FMEA dalam proses mereka untuk lebih memahami kegagalan

peralatan. Dengan demikian FMEA dapat diterapkan dalam fase pengembangan produk untuk mendukung keputusan dan mendapatkan informasi dari produsen dan operator berpengalaman yang mengoperasikan, memperbaiki, dan melakukan pemeliharaan peralatan tersebut. Pada tahap pengembangan produk, FMEA disebut DFMEA, yang berarti analisis efek mode kegagalan desain [19].

Menurut Filz dkk, 2021 [3] FMEA adalah alat penilaian risiko yang digunakan secara luas untuk aplikasi industri. Khususnya untuk barang investasi industri dengan nilai tinggi dan masa pakai yang lama, ini merupakan pendekatan manajemen preventif yang penting untuk mengidentifikasi kesalahan potensial yang sudah ada selama fase rekayasa dan perencanaan atau mencegahnya terjadi selama operasi untuk mengurangi biaya siklus hidup secara keseluruhan [3].

Stamatis menjelaskan Metode FMEA adalah teknik rekayasa yang digunakan untuk meningkatkan keandalan dan keamanan proses dengan mengidentifikasi potensi kegagalan proses atau mode kegagalan. FMEA adalah metode yang digunakan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengurangi risiko kegagalan, masalah, kesalahan, dan sejenisnya pada sistem, desain, proses, atau layanan sebelum sampai ke tangan konsumen. [20].

Metodologi FMEA adalah salah satu teknik analisis risiko yang direkomendasikan, standar internasional seperti *Society of Automotive Engineers*, *US Military of Defense*, dan *Automotive Industry Action Group* merekomendasikan metodologi FMEA sebagai salah satu teknik analisis risiko. FMEA diatur di sekitar mode kegagalan, yang menghubungkan sebab dan akibat kegagalan. FMEA mempertimbangkan tiga parameter yang biasanya dievaluasi melalui ekspresi linguistik yang mudah ditafsirkan, masing-masing berkorelasi dengan skor kemarahan (minimal 1 hingga maksimal 10): *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). *Severity* mengukur keseriusan dari efek dari mode kegagalan; Kejadian terkait dengan probabilitas mode kegagalan yang terjadi; *Deteksi/detection* menunjukkan visibilitas kegagalan yang merupakan sikap mode

kegagalan untuk diidentifikasi oleh kontrol dan inspeksi. Kemudian diperoleh *Risk Priority Number* (RPN) dari perkalian ketiga parameter tersebut untuk mengukur risiko dan tingkat keparahan suatu mode kegagalan [4].

Dengan mengingat bahwa definisi FMEA di atas lebih berfokus pada kualitas, dapat disimpulkan bahwa FMEA adalah suatu metode yang digunakan untuk menemukan dan mengevaluasi kegagalan dan akibatnya untuk menghindarinya. Dalam konteks *preventive maintenance* kegagalan yang dimaksudkan dalam definisi di atas merupakan kegagalan yang berkaitan dengan kualitas dari produk atau proses, atau kegagalan yang berhubungan dengan kemungkinan terjadinya kesalahan operasi dalam suatu proses. Dengan demikian, FMEA dapat digunakan untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas produk atau proses dengan menganalisis potensi masalah yang mungkin terjadi pada mesin, sehingga potensi terjadinya masalah dapat diminimalkan.

Menurut Remere dan Laseinde 2021 [21], pendekatan yang benar untuk mengoptimalkan keandalan sistem dan peralatan manufaktur dengan menerapkan pemeliharaan berbasis kondisi, yang berpotensi memprediksi kondisi penuaan infrastruktur manufaktur menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengurangi frekuensi kegagalan, keparahan kegagalan, dan meningkatkan keandalan sistem manufaktur untuk meningkatkan kinerja. Strategi pemeliharaan berbasis kondisi yang dioptimalkan dengan mempertimbangkan metode prediksi kesehatan peralatan menggunakan FMEA akan mengurangi pemadaman yang tidak direncanakan dan meningkatkan keandalan sistem manufaktur.

Tujuan utama penggunaan metode *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) dalam konteks pemeliharaan preventif adalah untuk secara sistematis mengidentifikasi dan menilai kemungkinan kegagalan atau kesalahan yang mungkin timbul pada peralatan atau sistem yang menjalani perawatan preventif. *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) adalah metode analisis yang digunakan

secara luas yang digunakan untuk menilai kemungkinan penyebab kegagalan, mengevaluasi konsekuensinya, dan menentukan tingkat keparahannya. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengembangkan tindakan pencegahan strategis yang bertujuan untuk mengurangi atau mencegah potensi kegagalan dan konsekuensi terkait.

2.6. Risk Priority Number (RPN)

Risk Priority Number (RPN) adalah suatu metode yang menggabungkan kriteria seperti kerentanan, deteksi, dan dampak dari suatu risiko, untuk mendapatkan nilai numerik yang menggambarkan prioritas risiko. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan risiko berdasarkan tingkat prioritasnya. Nilai RPN ini digunakan untuk membandingkan risiko yang berbeda dan menentukan tindakan yang harus diambil untuk mencegah atau mengurangi risiko.

RPN juga dapat digunakan untuk komponen dalam fase penggunaan produk. Misalnya, segera setelah RPN untuk mode dan area kegagalan tertentu melebihi ambang batas yang telah ditetapkan, aktivitas pemeliharaan berdasarkan kondisi berikutnya dapat dijadwalkan. Hal ini memungkinkan penghitungan sisa masa manfaat komponen serta memungkinkan pemeliharaan prediktif secara tepat pada kondisi komponen saat ini [3]. Metode RPN lalu memerlukan analisis dari tim untuk menggunakan pengalaman masa lalu dan keputusan teknisi untuk memberikan peringkat dalam setiap potensial masalah menurut rating skala berikut:

1. *Severity* (Kerusakan): Ini adalah tingkat keparahan masalah yang diidentifikasi, indikator ini mengukur besarnya konsekuensi negatif yang mungkin timbul dari kemungkinan kerusakan yang mempengaruhi sistem atau prosedur tertentu. Terdapat korelasi positif antara besarnya dampak dan peringkat Tingkat Keparahannya yang sesuai. Berikut merupakan tabel ranking untuk nilai kerusakan/*severity* dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Severity

Tabel Severity		
Ranking	Severity	Deskripsi
10	Risiko Tanpa Peringatan	Kegagalan sistem dapat menyebabkan dampak yang sangat berbahaya.
9	Risiko Dengan Peringatan	Kegagalan sistem yang menyebabkan dampak bahaya
8	Sangat Tinggi	Sistem tidak berfungsi
7	Tinggi	Meskipun sistem berfungsi, ia tidak dapat dijalankan secara penuh.
6	Sedang	Meskipun sistem berfungsi dengan baik dan aman, kinerjanya menurun, yang berdampak pada <i>output</i> .
5	Rendah	Kinerja menurun secara bertahap
4	Sangat rendah	efek kecil pada kinerja sistem
3	Kecil	Sedikit memengaruhi operasi/kinerja pada sistem
2	Sangat kecil	Akibat yang diabaikan terhadap kinerja sistem
1	Tidak ada efek	Tidak ada konsekuensi/efek

Sumber: Nugraha 2013 [22].

2. *Occurrence* (tingkat kemungkinan terjadinya kegagalan): Ini adalah tingkat kemungkinan masalah yang diidentifikasi terjadi, penilaian ini mengevaluasi frekuensi kemungkinan terjadinya kegagalan. Nilai Kejadian meningkat secara proporsional dengan probabilitas. Berikut untuk nilai *Occurrence*/tingkat kemungkinan terjadinya gejala kerusakan yang dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Occurrence

Tabel Occurrence		
Rangking	Occurrence	Deskripsi
10	Sangat tinggi	Sering Terjadi Kegagalan
9		
8	Tinggi	Kegagalan yang terjadi berulang kali
7		
6	Sedang	Kegagalan Jarang Terjadi
5		
4		
3	Rendah	Sangat sedikit kesalahan yang terjadi.
2		
1	Tidak ada efek	Kegagalan hampir tidak ada

Sumber: Nugraha 2013 [22].

3. *Detection* (Deteksi): Ini adalah tingkat kemampuan untuk mendeteksi masalah yang diidentifikasi, ini menilai kemampuan mendeteksi kemungkinan kegagalan sebelum eskalasi menjadi konsekuensi yang lebih parah. Terdapat korelasi positif antara nilai Deteksi dan tingkat kemampuan deteksi, sehingga ketika kemampuan deteksi menurun, nilai Deteksi meningkat. Berikut untuk nilai *Detection*/Deteksi kerusakan yang dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Detection

Tabel Detection		
Rangking	Detection	Deskripsi
10	Tidak Pasti	Perawatan pencegahan selalu tidak dapat menemukan penyebab, mekanisme, atau mode kegagalan.
9	Sangat Kecil	Perawatan pencegahan memiliki kemampuan " <i>very remote</i> " untuk menemukan penyebab dan mode kegagalan.
8	kecil	Perawatan pencegahan memiliki kemampuan " <i>remote</i> " untuk mengidentifikasi penyebab dan mode kegagalan yang mungkin.
7	Sangat Rendah	Perawatan pencegahan tidak dapat menemukan penyebab dan mode kegagalan yang mungkin terjadi.
6	Rendah	Perawatan pencegahan jarang menemukan penyebab atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan.
5	Sedang	Perawatan pencegahan memiliki kemungkinan " <i>moderate</i> " untuk menemukan penyebab dan mode kegagalan potensial.
4	Menengah keatas	Perawatan pencegahan memiliki kemungkinan " <i>moderately High</i> " untuk menemukan mekanisme dan penyebab potensial kegagalan.
3	Tinggi	Perawatan pencegahan mendeteksi penyebab, mekanisme, dan mode kegagalan.
2	Sangat tinggi	Perawatan pencegahan mendeteksi penyebab, mekanisme, dan mode kegagalan.
1	Hampir pasti	Perawatan preventif akan selalu menemukan penyebab dan mode kegagalan.

Sumber: Nugraha 2013 [22].

Setelah rating diberikan untuk setiap kriteria, maka hasilnya dikalikan untuk menghasilkan RPN. RPN inilah yang digunakan untuk menentukan prioritas masalah, dan kemudian dapat menjadi fokus untuk perbaikan. Urutan tindakan

perawatan yang diprioritaskan adalah berdasarkan nilai RPN yang tinggi [23]. Tujuan utama dari penentuan Nomor Prioritas Risiko (*Risk Priority Number/RPN*) dalam konteks *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) adalah untuk menetapkan urutan hirarkis dari kegagalan yang mungkin terjadi, dengan mempertimbangkan tingkat keparahan, probabilitas terjadinya, dan kemampuan untuk dideteksi.

2.7. RCM (Reliability Centered Maintenance)

Dalam perencanaan pemeliharaan, konsep pemeliharaan yang berpusat pada keandalan (RCM) digunakan untuk memastikan bahwa sistem terus memenuhi kebutuhan pengguna dalam operasi saat ini [24]. RCM akan meningkatkan biaya, keandalan, masa aktif mesin, dan pemahaman organisasi tentang risiko yang dikelola.

Pendekatan *Reliability Centered Maintenance* (RCM) merupakan berbagai macam teknik rekayasa pemeliharaan, seperti *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Reliability Block Diagram* (RBD), *Reliability Prediction* (RP), (*Fault Tree Analysis*) (FTA), *Event Tree Analysis* (ETA), *Weibull Analysis* (WA), dan merupakan salah satu cara yang paling efektif untuk menilai dan mengoptimalkan kebijakan pemeliharaan [5].

Moubray [24] menyatakan bahwa "*Reliability Centered Maintenance* (RCM) adalah pendekatan sistematis yang digunakan untuk memastikan tindakan yang diperlukan untuk mempertahankan fungsionalitas yang diinginkan dari setiap aset berwujud, dalam kerangka kerja kondisi operasional saat ini."

Gabbar [6] mengungkapkan bahwa RCM merupakan proses yang memakan waktu dan tenaga jika tidak diotomatisasi dan biasanya digunakan untuk menentukan strategi pemeliharaan dengan menggunakan data keandalan. Kegiatan ini harus dilakukan secara berkala, tetapi analisisnya umumnya tidak selaras dengan data waktu nyata yang disimpan secara progresif dalam CMMS. Dengan kata lain, hasil

RCM tidak selalu up to date sehubungan dengan riwayat pemeliharaan yang dikumpulkan dalam *database* CMMS.

Tujuan utama dari *Reliability Centered Maintenance* (RCM) adalah untuk merumuskan dan melaksanakan metode pemeliharaan yang sangat efektif dan efisien, dengan tujuan untuk mempertahankan keandalan dan fungsi optimal peralatan atau sistem. *Reliability Centered Maintenance* adalah strategi teknis yang digunakan untuk mendeteksi dan secara efektif mengelola risiko kegagalan dengan memprioritaskan prosedur pemeliharaan sesuai dengan potensi pengaruhnya terhadap efisiensi operasional, keselamatan, masalah lingkungan, dan pertimbangan keuangan.

2.8. Distribusi Kerusakan

Informasi dasar tentang umur pakai suatu peralatan dikenal sebagai distribusi kerusakan. Distribusi kerusakan peralatan yang dibentuk berbeda-beda. Distribusi kerusakan Weibull, Eksponensial, Normal, dan Lognormal adalah yang paling umum digunakan karena dapat memenuhi berbagai fase kerusakan. Jika ukuran sampelnya kecil, penafsiran parameter distribusi dilakukan menggunakan metode kuadrat terkecil, yang juga dikenal sebagai *Least Squares Curves Fitting* [7]. Rumus umum untuk metode ini adalah dalam *Least Squares Curves Fitting*.

$$f(t_i) = (i - 0,3) / (n + 0,4) \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

$f(t_i)$ = Probabtility/Plot Weibull

i = data ke i

n = jumlah data kerusakan

Untuk menentukan distribusi yang memiliki atau hampir memiliki penyebaran data, *Least Squares Curves Fitting* paling sedikit digunakan untuk menentukan waktu kegagalan dan perbaikan. Perhitungan dilakukan untuk menentukan nilai indeks

atau fit (r). Selain itu, analisis korelasi dilakukan untuk mengetahui bagaimana variabel bebas (x) dan variabel terikat (y) berhubungan satu sama lain.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{(n(\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2) - n(\sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2))}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

- r = distribusi *index of fit*
- n = jumlah data yang diuji
- x = variable bebas
- y = variable terkait

Rumus yang berlaku untuk setiap distribusi:

a) Distribusi Weibull

$$x_i = \ln(t_i) \dots\dots\dots (2.3)$$

$$y_i = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - (F t_i)} \right) \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

Parameter : $\beta = b$ dan $\theta = e^{-\left(\frac{a}{b}\right)} \dots\dots\dots (2.5)$

b) Distribusi Normal

$$z_i = \phi^{-1}[F(t_i)] \text{ didapat dari distribusi normal } \dots\dots\dots (2.6)$$

Parameter : $\sigma = 1/b$ dan $t_{med} = -\left(\frac{a}{b}\right) \dots\dots\dots (2.7)$

c) Distribusi Lognormal

$$z_i = \phi^{-1}[F(t_i)] \text{ didapat dari distribusi normal } \dots\dots\dots (2.6)$$

Parameter : $\sigma = 1/b$ dan $t_{med} = -\left(\frac{a}{b}\right) \dots\dots\dots (2.8)$

d) Distribusi Eksponensial

$$y_i = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1-(Ft_i)} \right) \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

2.8.1. Distribusi Weibull

Menurut Ebeling [7], untuk perhitungan keandalan dan tingkat kegagalan, distribusi Weibull adalah yang paling banyak digunakan. Perilaku kerusakan dapat lebih dimodelkan dengan parameter distribusi Weibull. Distribusi Weibull dapat digunakan baik untuk laju kerusakan naik maupun turun. Untuk rumus mencari nilai keandalan-nya dapat dilihat sebagai berikut.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \dots\dots\dots (2.9)$$

- R(t) : Nilai Keandalan Mesin
- T : Nilai *Mean Time to Failure* (MTTF)
- θ : Nilai Skala Parameter
- β : Bentuk Dari Parameter

2.8.2. Distribusi Normal

Dengan dua parameter bentuk, nilai tengah (μ) dan standar deviasi (σ), bentuk distribusi normal selalu memiliki nilai positif terhadap nilai rata-rata.

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \dots\dots\dots (2.10)$$

- R : Nilai Keandalan Mesin
- σ : Skala Parameter

2.8.3. Distribusi Lognormal

Distribusi lognormal, seperti distribusi Weibull, memiliki bentuk yang berbeda. Data yang didekati dengan distribusi Weibull biasanya juga dapat didekati dengan distribusi log normal [7]. Berikut rumus keandalanya.

$$R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}} \right) \dots\dots\dots (2.11)$$

- R(t) : Nilai Keandalan Mesin
- t : Nilai Mean Time to Failure
- t_{med} : Skala Parameter
- s : Bentuk Parameter

2.8.4. Distribusi Eksponensial

Jika laju kerusakan peralatan tetap dan konstan, maka penelitian ini merupakan distribusi eksponensial. Berikut rumus keandalannya.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (2.12)$$

- R(t) : Nilai Keandalan Mesin
- t : Nilai Mean Time to Failure
- λ : Skala Parameter

2.9. MTTF (Mean Time to Failure) dan MTTR (Mean Time to Repair)

Nilai rata-rata interval antar kerusakan dari sebuah distribusi kerusakan disebut *Mean Time to Failure*, sedangkan *Mean Time to Repair* adalah nilai rata-rata waktu perbaikan kerusakan yang terjadi. Cara perhitungannya berbeda tergantung pada 21 parameter yang telah ditetapkan oleh masing-masing distribusi. Rumus berikut digunakan:

$$MTTF/MTTR = r(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)td \dots\dots\dots (2.13)$$

MTTF/MTTR : *Mean Time to Failure / Mean Time to Repair*

- t : Data Waktu
- f(t) : Fungsi Kumulatif

a) Distribusi Weibull

$$MTTF = \theta r \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \dots\dots\dots (2.14)$$

b) Distribusi Normal

$$MTTF = \mu \dots\dots\dots (2.15)$$

c) Distribusi Lognormal

$$\text{MTTF} = t_{\text{med}} e^{s^2/2} \dots\dots\dots (2.16)$$

d) Distribusi Eksponensial

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots (2.17)$$

2.10. Age Replacement

Menurut Jardine [8], dalam model *Age Replacement*, penggantian pencegahan dilakukan berdasarkan usia komponen. Oleh karena itu, penggantian pencegahan dilakukan dengan menetapkan kembali waktu penggantian pencegahan berikutnya sesuai dengan waktu yang telah ditentukan jika komponen harus diganti karena kerusakan. Ada dua siklus penggantian dalam model penggantian usia. Yang pertama melibatkan komponen yang mencapai waktu penggantian (t_p) pada waktu yang telah direncanakan. Siklus kedua melibatkan komponen yang mengalami kerusakan sebelum waktu penggantian yang telah ditetapkan sebelumnya.

Kebijakan penggantian usia klasik, di mana sistem operasi diganti pada saat terjadi kegagalan atau pada usia T (penggantian yang direncanakan), mana saja yang lebih dulu, diusulkan oleh Barlow dan Proschan dalam jurnal yang ditulis oleh Yu-Hung Chen [25]. Sheu memperluas model penggantian berdasarkan usia yang bersifat klasik ini ke dalam kasus di mana sebuah unit operasi diganti secara menyeluruh ketika mencapai usia T (penggantian yang direncanakan); namun, jika unit mengalami kerusakan sebelum usia T , maka unit tersebut akan digantikan dengan unit baru (penggantian yang tidak direncanakan) atau unit tersebut akan mengalami perbaikan minimal. Pilihan dari dua kemungkinan tindakan ini (perbaikan minimal atau penggantian) tergantung pada usia unit tersebut. Studi sistematis mereka tentang kebijakan penggantian usia lebih lanjut dikembangkan dan diperluas dalam Berg [25].

Berdasarkan masa pakai komponen, penggantian preventif dilakukan pada jenis ini. Tujuan dari model ini adalah untuk memastikan usia yang paling menguntungkan untuk menerapkan penggantian preventif guna meminimalkan *downtime* secara keseluruhan. Pencegahan untuk penggantian diimplementasikan dengan menetapkan periode waktu berikutnya untuk penggantian, berdasarkan interval yang ditentukan, jika terjadi kerusakan yang memerlukan tindakan penggantian. Berikut rumus persamaan *Age Replacement* [8]:

$t_p = \text{jam}$

$$\text{a) } R(t_p) = 1 - \phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{med}\right) \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\text{b) } M(t_p) = \frac{MTTF}{1-R(t_p)} \dots\dots\dots (2.19)$$

2.11. Monte Carlo Simulation

Metode Monte Carlo adalah teknik simulasi yang menggunakan proses acak untuk memperkirakan solusi dari suatu masalah dalam ranah peluang. Metode Monte Carlo memerlukan pembentukan distribusi probabilitas melalui proses pengambilan sampel acak, yang kemudian digunakan untuk membuat data. Pendekatan simulasi Monte Carlo dapat digunakan ketika sebuah sistem memiliki bagian-bagian yang menunjukkan perilaku yang tidak pasti atau probabilistik. Prinsip dasar di balik pendekatan Monte Carlo adalah eksekusi eksperimen probabilistik melalui pengambilan sampel acak. Nama "Monte Carlo" telah dikenal luas sebagai representasi dari simulasi probabilitas. Metode Monte Carlo dapat secara khusus dicirikan sebagai metodologi untuk mengambil sampel angka secara acak dari distribusi probabilitas yang diberikan, yang kemudian digunakan dalam pengaturan eksperimental atau simulasi [26].

Menurut Heizer dkk [9], Simulasi Monte Carlo adalah metode untuk menghasilkan nilai dari variabel-variabel yang membentuk model yang diteliti. Dalam sistem dunia nyata, banyak variabel yang bersifat probabilistik. Contohnya: permintaan inventaris; waktu tunggu pesanan tiba; waktu antara kerusakan mesin; waktu antara

kedatangan pelanggan di fasilitas layanan; waktu layanan; waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan aktivitas proyek; dan jumlah karyawan yang absen dari pekerjaan setiap hari. Salah satu cara umum untuk menentukan distribusi probabilitas untuk variabel tertentu adalah dengan memeriksa hasil historis. Kita dapat menemukan probabilitas, atau frekuensi relatif, untuk setiap hasil yang mungkin dari sebuah variabel dengan membagi frekuensi pengamatan dengan jumlah total pengamatan.

Metode Monte Carlo adalah teknik yang berguna untuk memodelkan situasi yang melibatkan risiko, yang memungkinkan derivasi solusi perkiraan yang tidak dapat dicapai melalui investigasi empiris atau analisis matematis. Metode Monte Carlo melibatkan pembangkitan angka acak menurut distribusi probabilitas yang ditentukan untuk memperkirakan variabel acak dengan melakukan uji sampel pada distribusi ini. Metode Monte Carlo adalah teknik statistik yang bertujuan untuk menggeneralisasi fenomena yang diamati dengan mensimulasikannya menggunakan bilangan acak dan distribusi probabilitas kumulatif. Proses pembangkitan nilai bilangan acak dapat dilakukan dengan menggunakan generator bilangan acak, seperti *Linear Congruential Generator*, *Multiplicative Random Number Generator*, atau *Mixed Congruential Random Number Generator* [26].

Penentuan ketergantungan sistem alat berat merupakan pertimbangan penting bagi industri manufaktur, dengan durasi antara kerusakan alat berat yang diakui sebagai faktor penting dalam penilaian ini. Kebanyakan rumus matematika yang digunakan untuk menganalisis interval waktu antara kerusakan beroperasi dengan premis bahwa data bersifat deterministik, bukan variabel acak. Pada kenyataannya, perolehan data yang akurat menimbulkan tantangan dalam hal kepercayaan. Simulasi adalah metode yang digunakan untuk menganalisis interval waktu antara kejadian kegagalan sistem, di mana variabel permintaan dicirikan oleh keacakan, sehingga menimbulkan unsur ketidakpastian.

Masalah kerusakan sering kali didekati dengan menggunakan model probabilistik, karena model ini menawarkan wawasan yang berharga ke dalam analisis persediaan komponen jika dibandingkan dengan model deterministik. Memanfaatkan teknik simulasi dapat memfasilitasi penyelesaian masalah probabilistik dengan lebih mudah.

Jarak antara waktu jeda mengikuti distribusi probabilitas yang kontinu. Oleh karena itu, menghasilkan angka acak melibatkan pengalokasian probabilitas ke tingkat permintaan dalam distribusi frekuensi kumulatif. Namun demikian, sangat penting untuk mengetahui tantangan yang mungkin muncul dari fakta bahwa melakukan simulasi tunggal untuk setiap sistem dapat mengakibatkan perbedaan substansial dalam hasil. Untuk membangun kepercayaan terhadap ketepatan hasil, penting untuk melakukan banyak simulasi untuk setiap sistem dan kemudian menghitung temuan rata-rata.

Memvalidasi temuan simulasi terhadap hasil analitik dapat memberikan tantangan dalam menentukan kesesuaian model simulasi dengan kondisi yang telah ditentukan sebelumnya. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan analisis komparatif antara hasil simulasi dengan nilai yang diantisipasi, atau sebagai alternatif, dengan memverifikasi data historis yang telah diperoleh sebelumnya. Simulasi sering digunakan dalam situasi di mana analitik tidak dapat dilakukan, yang merupakan salah satu alasan utama mengapa simulasi biasanya berharga. Keadaan ini muncul ketika perbandingan analitik normal tidak tersedia, sehingga lebih menantang untuk menyajikan dan menginterpretasikan data yang diperoleh.