

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam melakukan penelitian diperlukan dasar-dasar teori yang berhubungan dengan konsep-konsep permasalahan penelitian yang akan digunakan dalam analisis. Dalam bab ini akan dijelaskan beberapa dasar teori yang digunakan dalam penelitian.

1.1 Penelitian Terdahulu

Sebelum penelitian ini dilakukan, telah terdapat beberapa penelitian terdahulu yang cukup relevan dengan penelitian ini. Berikut ini penjelasan mengenai penelitian terdahulu dengan topik yang relevan dengan penelitian ini.

1. Astuti (2006), meneliti tentang Perancangan Kegiatan Perawatan Yang Optimal dengan Menggunakan *Metode Reliability Centered Maintenance II (RCM II)* di PT. Semen Gresik (Persero) Tbk pada bagian *Kiln & Coal Mill* yang merupakan bagian penting dalam sistem produksi di PT. Semen Gresik (Persero) Tbk. Berdasarkan *workorder* yang diperoleh maka komponen yang dianggap kritis ada 6 komponen yaitu *air slight, roll crusher, clinker cooler, preheater, dan bucket elevator*. Dari *RCM Decision Worksheet* didapatkan bahwa ada 3 tipe *failure* yang terjadi yaitu *hidden, operational, dan non-operational*. Dari *RCM Decision Worksheet* didapatkan *proposed task* untuk masing-masing komponen yaitu *failure finding, on-condition task, redesign, scheduled restoration task, dan scheduled discard task*. Dan menghasilkan biaya perawatan lebih kecil setelah dilakukan perawatan. Hal ini berarti setiap komponen perlu dijadwalkan dengan perawatan terencana guna meminimumkan *failure* dan biaya perawatan.
2. Hendro Asisco (2012) dalam penelitiannya yang berjudul “Usulan Perencanaan Perawatan Mesin dengan Menggunakan Metode *Reliability Centered Maintenance (RCM)* di PT. Perkebunan Nusantara VII (Persero) Unit Usaha Sungai Niru Kab. Muara Enim”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengusulkan sistem perawatan mesin menggunakan metode *reliability centered maintenance*. Metode RCM diharapkan dapat menetapkan *schedule maintenance* dan dapat mengetahui secara pasti tindakan kegiatan perawatan (*maintenance task*) yang harus dilakukan untuk setiap komponen mesin.

3. Agustinus Romy Niasputra (2013) dalam penelitian yang berjudul “Penerapan Metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) Pada Perencanaan Perawatan *Water Cooling System* di PT. PJB (Pembangkit Jawa Bali) UP Brantas”. Penelitian ini bertujuan untuk melaksanakan kegiatan perawatan yang sesuai dengan fungsi dan sistem (komponen) melalui analisis terhadap dampak yang ditimbulkan oleh suatu kegagalan dengan menggunakan tabel FMEA dan RCM II *Decision Diagram*. Berdasarkan hasil yang diperoleh, prioritas kegiatan perawatan yang dapat dilakukan terhadap masing-masing komponen kritis dari Unit *Water Cooling System* adalah *Scheduled On-Condition Task* dan *Scheduled Discard Task*.
 4. Syahril Ashadi Pratama (2013) dalam penelitian yang berjudul “Penerapan Metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) II pada Mesin *Rotary Klin* terhadap Produktivitas Semen di PT. Semen Gresik (Persero) Tbk”. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh penerapan RCM II terhadap produktivitas semen mesin *Rotary Klin*. Metode yang digunakan adalah FMEA dan RCM II.
- Perbandingan beberapa penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1 dibawah ini.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

No.	Penulis	Metode	Objek Penelitian	Output Penelitian
1.	Astuti (2006)	<i>Reliability Centered Maintenance II</i>	PT. Semen Gresik (Persero) Tbk	Penentuan interval perawatan, meminimumkan <i>failure</i> dan biaya perawatan
2.	Hendro Asisco, et al (2012)	LTA, FMEA, <i>Reliability Centered Maintenance</i>	PT. Perkebunan Nusantara VII (Persero)	Menentukan tindakan perawatan (<i>maintenance task</i>) yang harus dilakukan pada setiap komponen
3.	Agustinus Romy Niasputra (2013)	FBD, FMEA, <i>Reliability Centered Maintenance II</i>	PT. PJB (Pembangkit Jawa Bali) UP Brantas	Prioritas kegiatan perawatan pada komponen kritis
4.	Syahril Ashadi Pratama (2013)	FMEA, <i>Reliability Centered Maintenance II</i>	PT. Semen Gresik (Persero) Tbk	Mengetahui pengaruh penerapan rcm ii terhadap produktivitas semen
5.	Penelitian Ini (2016)	<i>Reliability Centered Maintenance II</i> , FMEA, TMD	CV. Absolutech Distrindo	Menentukan interval waktu dan estimasi biaya perawatan mesin

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui interval waktu perawatan, estimasi biaya perawatan optimal, dan rekomendasi jenis perawatan yang efektif pada mesin *loom* SBY-850X6S di CV. Absolutech Distrindo. Metode yang digunakan dalam penelitian ini antara lain *Total Minimum Downtime* (TMD), *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA), dan *Reliability Centered Maintenance II* (RCM II). Dengan penerapan metode tersebut diharapkan mesin *loom* SBY-850X6S dapat bekerja dengan tingkat efektifitas dan efisiensi yang lebih baik serta dapat meminimalkan *downtime* mesin dan meningkatkan hasil produksi karung glangsing.

1.2 Perawatan

Menurut Assauri (2004) dalam buku yang berjudul Manajemen Produksi dan Operasi, mendefinisikan perawatan sebagai kegiatan untuk memelihara atau menjaga fasilitas peralatan pabrik dan mengadakan perbaikan atau penggantian yang memuaskan sesuai dengan apa yang direncanakan.

Menurut Corder (1996) dalam buku yang berjudul Teknik Manajemen Pemeliharaan, mendefinisikan perawatan sebagai suatu kombinasi dari berbagai tindakan yang dilakukan untuk menjaga suatu barang atau memperbaikinya sampai suatu kondisi yang bisa diterima.

Berdasarkan pada teori diatas maka perawatan adalah kegiatan untuk memelihara atau menjaga fasilitas, mesin dan peralatan pabrik, mengadakan perbaikan, penyesuaian atau penggantian yang diperlukan agar terdapat suatu keadaan operasi produksi yang memuaskan sesuai dengan apa yang diharapkan. Manajemen perawatan adalah pengorganisasian operasi perawatan untuk memberikan pandangan umum mengenai perawatan fasilitas industri.

Aktivitas perawatan merupakan faktor yang penting dalam menentukan kualitas suatu produk dan dapat digunakan sebagai strategi untuk meraih kesuksesan dalam berkompetensi. Untuk dapat memproduksi suatu produk dengan kualitas tinggi, peralatan produksi harus beroperasi sesuai spesifikasi yang telah ditetapkan dengan melakukan prosedur perawatan secara rutin (berkala).

Tujuan aktivitas perawatan menurut Corder (1996) adalah sebagai berikut:

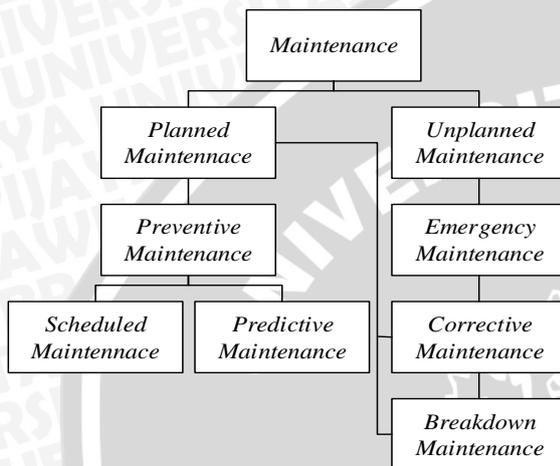
1. Untuk memperpanjang usia kegunaan aset.
2. Menjamin ketersediaan peralatan dan kesiapan operasional perlengkapan serta peralatan yang dipasang untuk kegiatan produksi.
3. Membantu mengurangi pemakaian atau penyimpangan diluar batas serta menjaga modal yang ditanamkan selama waktu yang ditentukan.
4. Menekan tingkat biaya pemeliharaan serendah mungkin dengan melaksanakan kegiatan pemeliharaan secara efektif dan efisien.
5. Memenuhi kebutuhan produk dan rencana produksi tepat waktu.
6. Meningkatkan keterampilan para supervisor dan operator melalui kegiatan pelatihan yang diadakan.
7. Meningkatkan keselamatan dan kesehatan kerja karyawan.

1.3 Jenis Perawatan

Menurut Corder (1996) jenis-jenis aktivitas perawatan ditinjau dari saat pelaksanaan pekerjaan pemeliharaan dikategorikan dalam dua cara yaitu:

1. Perawatan terencana (*planned maintenance*)
2. Perawatan tidak terencana (*unplanned maintenance*)

Menurut Sudradjat (2011) dalam bukunya Pedoman Praktis Manajemen Perawatan Mesin Industri, menyatakan bentuk-bentuk kebijakan perawatan yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Bentuk Kebijakan Perawatan
Sumber: Sudradjat (2011)

2.3.1 Planned Maintenance

Planned maintenance merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal (terncana) serta periodik. Dimana sejumlah tugas pemeliharaan seperti inspeksi, perbaikan, penggantian, pelumasan, dan penyesuaian dilaksanakan (Ebeling, 1997).

2.3.1.1 Predictive Maintenance

Predictive maintenance merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi komponen dengan mendeteksi indikasi terjadinya kegagalan dengan memonitor perubahan atau kelainan dalam kondisi fisik maupun fungsi dalam sistem atau peralatan dari waktu ke waktu (Ebeling, 1997). Berikut pendekatan yang digunakan dalam memonitoring kondisi komponen yaitu sebagai berikut.

1. Antisipasi kegagalan dari pengalaman sebelumnya (*past experience*) sering kali pengalaman sebelumnya dapat digunakan untuk menentukan interval terjadinya kegagalan untuk masa yang akan datang.

2. Statistik distribusi kegagalan (*failure distribution statistic*), penggunaan distribusi statistik untuk menentukan periode kegiatan, dimana distribusi dan probabilitas kegagalan harus diketahui untuk memperkirakan periode terjadinya kegagalan.
3. Pendekatan konservatif (*conservative approach*), memonitoring secara rutin (setiap minggu atau bulan).

2.3.1.2 Preventive Maintenance

Preventive maintenance merupakan strategi pemeliharaan yang waktu pelaksanaannya telah direncanakan (*planned maintenance*) untuk mencegah atau menghindari peralatan mengalami kerusakan. *Preventive maintenance* dilakukan tanpa mempertimbangkan kondisi komponen (Ebeling, 1997). Beberapa manfaat dari *preventive maintenance* menurut Patton (1995) yaitu:

- a. Memperkecil *overhaul* (turun mesin)
- b. Mengurangi kemungkinan reparasi berskala besar
- c. Mengurangi biaya kerusakan atau penggantian mesin
- d. Memperkecil kemungkinan produk-produk yang rusak
- e. Meminimalkan persediaan suku cadang
- f. Memperkecil munculnya gaji tambahan diakibatkan adanya kerusakan
- g. Menurunkan biaya satuan dari produk pabrik

Terdapat kategori kegiatan pemeliharaan pencegahan antara lain:

1. *Condition Directed* (CD)

Bertujuan mendeteksi adanya kegagalan atau karakteristik suatu kegagalan.

2. *Time Directed* (TD)

Kegiatan pencegahan yang dilakukan pada waktu yang telah ditentukan serta diarahkan secara langsung untuk mencegah kegagalan.

3. *Failure Finding* (FF)

Bertujuan menemukan kerusakan atau kegagalan tersembunyi sebelum proses operasi.

4. *Run To Failure* (RTF)

Diputuskan untuk dilakukan RTF jika tidak ada alternatif lain yang mungkin untuk dilakukan. Sehingga peralatan beroperasi sampai saat alat tersebut rusak dan tidak ada tindakan pencegahan yang dilakukan.

2.3.2 *Unplanned Maintenance*

Unplanned maintenance merupakan tindakan perawatan yang pelaksanaannya tidak direncanakan sebelumnya. Pemilihan tindakan perawatan tersebut didasarkan atas sifat dari kerusakan pada peralatan apakah dapat diprediksi atau tidak terprediksi. Selain itu, pemilihan juga didasari atas biaya yang ditanggung apabila menerapkan salah satu jenis kegiatan perawatan (Ebeling, 1997).

2.3.2.1 *Corrective Maintenance*

Corrective maintenance merupakan suatu tindakan perawatan yang dilakukan untuk memperbaiki dan meningkatkan kondisi mesin sehingga mencapai standar yang telah ditetapkan pada mesin tersebut. Pemeliharaan koreksi dapat berupa aktivitas reparasi atau penyetulan bagian-bagian mesin, atau penambahan beberapa komponen sehubungan dengan kegiatan inspeksi. Kegiatan pemeliharaan tersebut dilakukan pada saat mesin dalam kondisi tidak aktif (*shutdown maintenance*). Aktivitas *corrective maintenance* bukan merupakan kegiatan terjadwal karena dilakukan setelah komponen mengalami kerusakan dan bertujuan mengembalikan keandalan sebuah komponen atau sistem ke kondisi semula (Ebeling, 1997).

2.3.2.2 *Breakdown Maintenance*

Breakdown maintenance merupakan kegiatan perawatan yang pelaksanaannya menunggu sampai suatu komponen mengalami kerusakan dan selanjutnya dilakukan perbaikan. Kegiatan ini dilakukan apabila efek kegagalan tidak bersifat signifikan terhadap operasi. Perbaikan dilakukan ketika penurunan performa dari komponen atau peralatan sudah mengalami kerusakan yang terjadi akibat menurunnya kemampuan dari fasilitas karena semakin lamanya waktu operasi peralatan (Ebeling, 1997).

2.4 *Reliability Centered Maintenance II*

Reliability Centered Maintenance (RCM) merupakan salah satu metode perawatan yang digolongkan kedalam sistem perawatan terencana (*planned maintenance*). Konsep dasar metode RCM adalah proses yang digunakan untuk menentukan apa yang harus dilakukan untuk memastikan bahwa aset-aset fisik yang dimiliki dapat berfungsi sesuai yang diharapkan (Moubray, 1997). Keunggulan penerapan metode *Reliability Centered Maintenance II* adalah sebagai berikut:

1. Teknik manajemen perawatan yang mengkombinasikan dua jenis tindakan yaitu *preventive maintenance* dan *predictive maintenance*. *Preventive maintenance* merupakan suatu tindakan pemeriksaan secara periodik terhadap aset dan peralatan dengan tujuan untuk mengetahui kondisi yang menyebabkan kerusakan serta menjaga aset atau peralatan yang telah mengalami kerusakan dengan cara memperbaiki sebelum terjadi kerusakan. Sedangkan *predictive maintenance* merupakan pemeliharaan yang berdasar pada pengukuran kondisi suatu peralatan agar apabila peralatan tersebut gagal dimasa yang akan datang telah diambil suatu tindakan untuk menghindari kegagalan tersebut. Pengertian tersebut dapat juga diartikan berdasarkan penilaian atau analisis kondisi dari komponen-komponen mesin secara keseluruhan.
2. Menggabungkan analisis kualitatif dan kuantitatif dalam merencanakan aktivitas pemeliharaan.
3. RCM II merupakan hasil pengembangan metode RCM sebelumnya. Modifikasi dilakukan pada bagian *decision diagram* RCM yang mempertimbangkan *safety* dan *environment consequences*.

Dari konsep diatas dapat disimpulkan bahwa tujuan dari RCM adalah untuk mencapai keandalan pada semua komponen yang beroperasi di dalam sistem. Dalam menerapkan RCM, terdapat 7 pertanyaan sebagai berikut (Moubray, 1997).

1. Apakah fungsi dan hubungan performansi standar dari aset dalam konteks operasionalnya saat ini?
2. Bagaimana aset tersebut rusak atau gagal dalam menjalankan fungsinya?
3. Apakah penyebab masing-masing kegagalan fungsi tersebut?
4. Apakah yang terjadi pada saat terjadinya kerusakan?
5. Bagaimanakah masing-masing kerusakan tersebut terjadi?
6. Apakah yang dapat dilakukan untuk memprediksi atau mencegah masing-masing kerusakan tersebut?
7. Apakah yang harus dilakukan apabila kegiatan proaktif yang sesuai tidak berhasil ditemukan?

Reliability Centered Maintenance (RCM) lebih menitikberatkan pada penggunaan analisa kualitatif untuk komponen yang dapat menyebabkan kegagalan pada suatu sistem. *Tool* untuk melakukan analisis kualitatif adalah *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA) dan *Decision Diagram* (DD).

2.5 *Functional Block Diagram (FBD)*

Functional Block Diagram (FBD) merupakan level tertinggi untuk merepresentasikan fungsi-fungsi utama dari suatu sistem dimana setiap blok diberikan nama sesuai dengan fungsi subsistem dari sistem tersebut (Smith, 2004). FBD sendiri digunakan untuk mendeskripsikan sistem kerja dari suatu mesin. Selain itu, FBD merupakan representasi dari fungsi-fungsi utama yang berupa blok-blok yang berisi fungsi-fungsi dari setiap subsistem yang menyusun sistem tersebut. Pembuatan FBD diharapkan dapat memudahkan pada saat mengidentifikasi kegagalan yang terjadi. Informasi *input* dan *output* juga tersedia dalam FBD yang memudahkan pembaca untuk mengerti sistem yang diamati dalam penelitian. Keuntungan menggunakan FBD adalah sebagai berikut:

1. Sebagai dasar informasi dari sistem mengenai desain dan operasi yang diamati. Informasi tersebut nantinya digunakan sebagai acuan untuk melakukan tindakan perawatan. Dimana tindakan perawatan dilakukan sebagai upaya pencegahan dikemudian hari.
2. Memperoleh pengetahuan sistem secara menyeluruh.
3. Mengetahui proses identifikasi parameter-parameter operasi yang menyebabkan kegagalan sistem.

2.6 *System Function dan Functional Failure*

System function didefinisikan sebagai fungsi *item* yang diharapkan oleh *user* tetapi masih dalam level kemampuan dari *item* tersebut sejak dibuat. Sistem perawatan hanya mampu menjaga kondisi sistem tetap berada dibawah *initial capability* dari desain sistem. Sedangkan *function failure* merupakan kegagalan mesin menjalankan fungsi utama yang diharapkan oleh *user* (Besterfield, 2003).

System function bertujuan untuk membuat suatu informasi yang dapat menyediakan atau mendefinisikan fungsi sistem. Analisa yang dilakukan berdasarkan fungsi dan bukan mengenai peralatan yang ada pada sistem.

Functional failure (kegagalan fungsional) menjelaskan bagaimana sistem mengalami kegagalan dan apa saja usaha yang dilakukan untuk mencegah dan mengurangi serta mendeteksi terjadinya kegagalan.

2.7 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Failure Modes and Effect Analysis merupakan suatu metode yang bertujuan untuk mengevaluasi desain sistem dengan mempertimbangkan bermacam-macam jenis kegagalan dari sistem yang terdiri dari komponen-komponen, menganalisa pengaruh-pengaruh terhadap keandalan sistem dengan penelusuran pengaruh-pengaruh kegagalan komponen sesuai dengan level peralatan (*item-item*) khusus dari sistem yang kritis dapat dinilai dan tindakan yang diperlukan untuk memperbaiki desain dan mengeliminasi atau mereduksi probabilitas dari mode-mode kegagalan yang kritis. (Villemeur Alain, 1992). Secara umum penerapan FMEA dapat mengidentifikasi tiga hal yaitu:

1. Mengidentifikasi aktivitas yang dapat mengeliminasi atau mengurangi kesempatan kejadian potensial.
2. Mendokumentasikan sebuah proses.
3. Memahami dan mengevaluasi potensi kegagalan dari suatu alat dan akibatnya.

Kegiatan FMEA melibatkan banyak hal seperti *me-review* berbagai keagalannya, penyebab keagalannya serta dampak kegagalan yang ditimbulkan untuk masing-masing komponen untuk berbagai mode kegagalan berikut dampaknya pada sistem yang dituliskan pada *FMEA worksheet*. *FMEA worksheet* dapat lihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 *Failure Modes and Effect Analysis Worksheet*

<i>Function</i>	<i>Item</i>	<i>Potential Failure Mode</i>		<i>Potential Effect of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Potential Cause of Failure</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Current Design Control</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Sumber: Besterfield (2003)

Keterangan:

1. *Function*, berisi informasi tentang fungsional mesin.
2. *Item*, bagian dari suatu fungsional.
3. Nomer urut untuk *potential failure mode*.
4. *Potential failure mode* (jenis kegagalan potensial) yang terjadi.
5. Dampak kegagalan potensial meliputi dampak pada *customer*, dampak pada proses selanjutnya, maupun dampak pada proses lokal.
6. *Severity*, adalah nilai *range* 1-10 yang menunjukkan tingkat keseriusan dari kegagalan, semakin besar angka atau nilai semakin tinggi tingkat keseriusan.
7. Penyebab kegagalan potensial.
8. *Occurrence*, adalah nilai *range* 1-10 yang menunjukkan frekuensi kejadian yang terjadi.

9. Sistem yang digunakan untuk mendeteksi kegagalan.
10. *Detection*, kemampuan sistem untuk mendeteksi terjadinya kegagalan, nilai yang kecil menunjukkan bahwa sistem dapat mendeteksi kegagalan dengan cepat.
11. *Risk Priority Number* (RPN), nilai hasil perkalian dari *severity*, *occurrence*, dan *detection* yang merupakan nilai akhir dari data resiko aktual. Semakin besar nilai RPN maka semakin besar resiko aktualnya.

Penerapan teknik FMEA merupakan integrasi dari pelaksanaan analisis RCM. Ide utama RCM adalah untuk mengeliminasi atau mengurangi penyebab kegagalan. Analisis FMEA fokus pada penyebab kegagalan dan mekanisme terjadinya kegagalan. Ketika penyebab dan mekanisme kegagalan telah diidentifikasi untuk setiap *failure mode* selanjutnya akan membantu memberikan saran untuk waktu pelaksanaan *preventive maintenance* atau perencanaan tindakan monitoring untuk mencegah *failure mode*.

Untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan mode kegagalan yang penting sebagai fungsi *severity* (keparahan) maka dilakukan penilaian kekritisitas. Pada metode RPN parameter untuk menilai kekritisitas dari item suatu metode kegagalan adalah frekuensi kejadian, *severity* (keparahan) dari efek kegagalan, dan deteksi (Bowles & Bonnel, 1996).

2.8 Menentukan *Severity*, *Occurrence*, *Detection* dan RPN

Untuk menentukan prioritas dari suatu bentuk kegagalan maka dalam mengerjakan FMEA harus mendefinisikan terlebih dahulu tentang *severity*, *occurrence*, *detection*, dan juga hasil akhirnya yang berupa *Risk Priority Number* (Field, 1996).

1. *Severity*

Severity adalah dampak potensial yang diakibatkan oleh suatu kegagalan. Dampak ini ditentukan berdasarkan tingkat cedera yang dialami personel, tingkat kerusakan peralatan, akibat pada produksi dan lama *downtime* yang terjadi. Tingkat *severity* dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Tingkat *Severity*

Ranking	Akibat (<i>Effect</i>)	Kriteria Verbal	Akibat Pada Produksi
1	Tidak ada akibat	Efek kegagalan tidak mengakibatkan apa-apa (tidak ada akibat)	Proses berada dalam pengendalian
2	Akibat sangat	Mesin tetap beroperasi dan aman, hanya terjadi sangat sedikit gangguan peralatan	Proses berada dalam pengendalian, hanya membutuhkan sedikit penyesuaian
	Ringan	Akibat hanya dapat diketahui oleh operator yang berpengalaman	
3	Akibat ringan	Mesin tetap beroperasi dan aman, hanya sedikit terjadi gangguan. Akibat diketahui oleh rata-rata operator	Proses telah berada diluar pengendalian, membutuhkan beberapa penyesuaian

Sumber: Field (1996)

Tabel 2.3 Tingkat *Severity* (lanjutan)

Ranking	Akibat (<i>Effect</i>)	Kriteria Verbal	Akibat Pada Produksi
4	Akibat minor	Mesin tetap beroperasi dan aman, namun terdapat gangguan kecil. Akibat diketahui oleh semua operator	Kurang dari 30 menit <i>downtime</i> atau tidak ada kehilangan waktu produksi
5	Akibat moderat	Mesin tetap beroperasi dan aman, tetapi menimbulkan beberapa kegagalan produk. Operator tidak puas karena kinerja mesin kurang	30 – 60 menit <i>downtime</i>
6	Akibat signifikan	Mesin tetap beroperasi dan aman, tetapi menimbulkan kegagalan produk. Operator merasa sangat tidak puas karena kinerja mesin	1 – 2 jam <i>downtime</i>
7	Akibat major	Mesin tetap beroperasi dan aman, tetapi tidak dapat dijalankan secara penuh. Operator merasa sangat tidak puas	2 – 4 jam <i>downtime</i>
8	Akibat ekstrem	Mesin tidak dapat beroperasi, dan mesin telah kehilangan fungsi utamanya	4 – 8 jam <i>downtime</i>
9	Akibat serius	Mesin gagal beroperasi, serta tidak sesuai dengan peraturan keselamatan kerja	> 8 jam <i>downtime</i>
10	Akibat berbahaya	Mesin tidak layak dioperasikan, karena dapat menimbulkan kecelakaan secara tiba-tiba, bertentangan dengan peraturan keselamatan kerja	> 8 jam <i>downtime</i>

Sumber: Field (1996)

2. Occurrence

Occurrence adalah nilai frekuensi terjadinya suatu kegagalan. Nilai *occurrence* dapat dilihat dalam Tabel 2.4 berikut ini.

Tabel 2.4 Tingkat *Occurrence*

Ranking	Kejadian	Kriteria Verbal	Tingkat Kejadian Kerusakan
1	Hampir tidak pernah	Kerusakan hampir tidak pernah terjadi	Lebih besar dari pada 10.000 jam
2	<i>Remote</i>	Kerusakan mesin jarang terjadi	6.001 – 10.000 jam operasi
3	Sangat sedikit	Kerusakan mesin terjadi sangat sedikit	3.001 – 6.000 jam operasi
4	Sedikit	Kerusakan mesin terjadi sedikit	6.001 – 10.000 jam operasi
5	Rendah	Kerusakan mesin pada tingkat rendah	3.001 – 6.000 jam operasi
6	<i>Medium</i>	Kerusakan mesin pada tingkat <i>medium</i>	6.001 – 10.000 jam operasi
7	Agak tinggi	Kerusakan mesin terjadi agak tinggi	3.001 – 6.000 jam operasi
8	Tinggi	Kerusakan mesin terjadi tinggi	6.001 – 10.000 jam operasi
9	Sangat tinggi	Kerusakan mesin sangat tinggi terjadi	3.001 – 6.000 jam operasi
10	Hampir selalu	Kerusakan mesin selalu terjadi	Kurang dari 2 jam operasi

Sumber: Field (1996)

3. *Detection*

Detection adalah pengukuran terhadap kemampuan mengendalikan atau mengontrol kegagalan yang terjadi. Nilai *detection* dapat dilihat dalam Tabel 2.5 berikut ini.

Tabel 2.5 Tingkat *Detection*

Ranking	Akibat	Kriteria Verbal
1	Hampir Pasti	Perawatan preventif akan selalu mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan
2	Sangat Tinggi	Perawatan preventif memiliki kemungkinan sangat tinggi untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan
3	Tinggi	Perawatan preventif memiliki kemungkinan tinggi untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan
4	<i>Moderate Higly</i>	Perawatan preventif memiliki kemungkinan <i>moderate higly</i> untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan
5	<i>Moderate</i>	Perawatan preventif memiliki kemungkinan moderate untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan
6	Rendah	Perawatan preventif memiliki kemungkinan rendah untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan
7	Sangat Rendah	Perawatan preventif memiliki kemungkinan sangat rendah untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan
8	<i>Remote</i>	Perawatan preventif memiliki kemungkinan remote untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan
9	<i>Very Remote</i>	Perawatan preventif memiliki kemungkinan <i>very remote</i> untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan
10	Tidak Pasti	Perawatan preventif akan selalu tidak mampu untuk mendeteksi penyebab potensial atau mekanisme kegagalan dan mode kegagalan

Sumber: Field (1996)

4. *Risk Priority Number (RPN)*

Risk Priority Number (RPN) merupakan produk matematis dari keseriusan dampak (*severity*), kemungkinan terjadinya *cause* akan menimbulkan kegagalan yang berhubungan dengan dampak (*occurrence*), dan kemampuan mendeteksi kegagalan sebelum terjadi pada pelanggan (*detection*). RPN dapat ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$RPN = (severity) \times (occurrence) \times (detection) \quad (2-1)$$

Hasil dari RPN menunjukkan tingkat prioritas peralatan yang dianggap beresiko tinggi, sebagai penunjuk ke arah tindakan perbaikan.

2.9 *Failure Mode*

Setelah mengetahui kegagalan fungsi, langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi semua peristiwa atau kejadian yang memungkinkan dapat menjadi penyebab terjadinya tiap-tiap kondisi kegagalan (*failure state*). Hal ini dikenal dengan *failure mode*. Sering setiap daftar kegagalan disebabkan karena penurunan kemampuan akibat pemakaian. Meskipun demikian, setiap daftar kerusakan juga dapat mencantumkan kegagalan yang disebabkan karena *human error* (baik karena operator maupun *maintenance*) atau karena masalah *design* (Moubray, 1997).

2.10 Failure Effect

Langkah selanjutnya dalam proses pengerjaan RCM adalah membuat dampak dari kegagalan yang menjelaskan apa saja yang terjadi ketika *failure mode* telah berlangsung (Moubray, 1997). Pendeskripsian tersebut harus mencantumkan semua informasi yang dibutuhkan untuk mendukung evaluasi terhadap konsekuensi yang ditimbulkan oleh kegagalan yaitu sebagai berikut.

1. Bukti (jika ada) bahwa *failure* telah terjadi?
2. Dengan cara bagaimana *failure* tersebut mengancam keselamatan dan lingkungan?
3. Dengan cara bagaimana *failure* tersebut mengancam keselamatan dan operasional?
4. Kerusakan fisik seperti apa yang diakibatkan oleh *failure*?
5. Apa yang dapat dilakukan untuk memperbaiki *failure* tersebut?

2.11 Failure Consequences

Failure consequence merupakan konsekuensi yang ditimbulkan karena terjadinya kegagalan fungsi. Dalam proses RCM, konsekuensi dari kegagalan diklasifikasikan dalam 4 bagian (Moubray, 1997) yaitu sebagai berikut:

1. Hidden Failure Consequences

Salah satu kegagalan fungsi yang tidak akan dapat menjadi bukti bagi operator bahwa telah terjadi kegagalan meskipun dalam kondisi normal.

2. Safety and Environmental Consequences

Sebuah kegagalan dapat dikatakan mempunyai konsekuensi terhadap keselamatan, ketika dapat melukai atau membunuh seseorang. Sedangkan dikatakan memiliki konsekuensi terhadap lingkungan, jika dapat melanggar standar regulasi lingkungan, baik regional maupun nasional.

3. Operational Consequences

Suatu kegagalan dikatakan memiliki konsekuensi operasional ketika berakibat pada produksi atau operasional (*output*, kualitas produk, pelayanan terhadap konsumen, atau biaya operasional untuk perbaikan komponen).

4. Non-operational Consequences

Bukti kegagalan pada kategori ini adalah yang bukan tergolong dalam konsekuensi keselamatan ataupun produksi, jadi kegagalan ini hanya melibatkan biaya perbaikan komponen.

2.12 Proactive Maintenance Task

Tindakan proaktif dilakukan sebelum terjadi kerusakan atau kegagalan dalam rangka untuk menghindarkan peralatan dari kondisi yang dapat menyebabkan kegagalan (*failure state*). Kegiatan ini dibagi menjadi 3 kategori yaitu sebagai berikut:

a. Scheduled Restoration Task

Tindakan pemulihan kemampuan peralatan atau komponen pada saat atau sebelum batas umur yang ditetapkan, tanpa memperhatikan kondisinya saat itu.

Tindakan *Scheduled Restoration* secara teknik mungkin untuk dilakukan apabila:

- Dapat diidentifikasi umur dimana peralatan tersebut menunjukkan kemungkinan penambahan kecepatan terjadinya kegagalan.
- Mayoritas dari peralatan dapat bertahan pada umur tersebut (untuk semua peralatan jika kegagalan memiliki konsekuensi keselamatan dan lingkungan).
- Memperbarui dengan peralatan yang tahan terhadap kegagalan tersebut.

b. Scheduled Discard Task

Tindakan mengganti peralatan atau komponen pada saat atau sebelum batas umur yang ditetapkan, tanpa memperhatikan kondisi saat itu.

Tindakan *Scheduled Discard* secara teknik mungkin untuk dilakukan dalam kondisi berikut:

- Dapat diidentifikasi umur dimana peralatan tersebut menunjukkan kemungkinan penambahan kecepatan terjadinya kegagalan.
- Mayoritas dari peralatan-peralatan dapat bertahan pada umur tersebut (untuk semua peralatan jika kegagalan memiliki konsekuensi terhadap keselamatan dan lingkungan).

c. Scheduled On-condition Maintenance Task

Kegiatan pemeriksaan terhadap *potential failure* sehingga tindakan dapat diambil untuk mencegah terjadinya *functional failure* atau untuk menghindari konsekuensi dari *functional failure*.

Dimana *potential failure* dapat didefinisikan dengan sebuah kondisi yang dapat mengindikasikan sedang terjadi kegagalan atau proses kegagalan fungsi.

Dalam teknik *on-condition* terdapat 4 kategori utama, yaitu:

1. *Condition monitoring techniques*, yang melibatkan penggunaan peralatan khusus untuk melakukan *monitoring* terhadap kondisi peralatan lain.
2. Teknik berdasarkan pada variasi kualitas produk.

3. *Primary effects monitoring techniques*, yang melibatkan peralatan yang ada dan peralatan untuk proses *monitoring*.
4. Teknik inspeksi berdasarkan *human sense predictive* dan *preventive maintenance*, akan tetapi RCM membatasinya dengan *scheduled restoration*, *scheduled discard*, dan *on-condition maintenance*.

2.13 Proposed Task dan Initial Interval

Proposed task bertujuan mendeskripsikan tindakan pencegahan sebagai tindakan nyata untuk menerjemahkan hasil dari *proactive task* dan *default action*. Sedangkan *initial interval* merupakan jarak perawatan yang optimal terhadap *proposed task* yang ditentukan. *Can be done by* diisi tentang siapa yang diberikan tanggung jawab dalam melaksanakan *proposed task* tersebut. Meliputi pihak-pihak yang berkaitan langsung dengan proses dari peralatan tersebut (Moubray, 1997).

2.14 Default Action

Default action dilakukan ketika *predictive task* yang efektif tidak mungkin dapat dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan (Moubray, 1997). *Default action* meliputi:

1. *Scheduled Failure Finding*
Meliputi tindakan *checking* secara periodik atau interval waktu tertentu terhadap fungsi-fungsi yang tersembunyi untuk mengetahui apakah peralatan tersebut telah mengalami kerusakan.
2. *Redesign*
Membuat suatu perubahan untuk membangun kembali suatu sistem. Hal ini mencakup modifikasi terhadap perangkat keras dan juga perubahan prosedur.
3. *No Scheduled Maintenance*
Pada kegiatan ini tidak ada usaha untuk mengantisipasi (*preventive*) terhadap suatu *failure mode* yang terjadi, sehingga *failure* tersebut dibiarkan terjadi baru kemudian diperbaiki. Tindakan ini juga disebut sebagai *run-to-failure*.

2.15 RCM II Decision Worksheet

RCM II *decision worksheet* merupakan dokumen kerja penting yang dipergunakan dalam aplikasi RCM untuk mencatat jawaban terhadap pertanyaan dalam *Decision Diagram* RCM (Ebeling, 1997). Sehingga dapat mengetahui hal-hal berikut:

1. Apa saja kegiatan rutin *maintenance* (jika ada) yang harus dilakukan, berapa sering dilakukan dan siapa yang melakukan.
2. Kegagalan mana saja yang cukup serius hingga perlu dilakukan *redesign* (perubahan).
3. Keadaan atau kondisi dimana keputusan yang telah diambil diberikan untuk menghadapi kegagalan yang terjadi.

Pada *Decision worksheet* akan menganalisa konsekuensi adanya kegagalan yang berpengaruh terhadap keselamatan (S), lingkungan (E), atau berpengaruh pada kerugian operasional (O). RCM II *Decision Worksheet* dapat dilihat pada Tabel 2.6 dibawah ini.

Tabel 2.6 RCM II *Decision Worksheet*

RCM II <i>Decision Worksheet</i>		Sistem :										Date	Sheet :			
		Subsistem :											No :			
		Fungsi Subsistem :											Of :			
Information Reference					Consequence Evaluation				Default Action			Proposed Task	Initial Interval	Can be Done By		
No.	Equipment	F	FF	FM	H	S	E	O	H1	H2	H3					
									S1	S2	S3				H4	H5
									O1	O2	O3					
									N1	N2	N3					

Sumber: Ebeling (1997)

Keterangan:

F : *Function*

FF : *Functional Failure*

FM : *Failure Mode*

H : *Hidden Failure*

S : *Safety Effect*

E : *Environmental Effect*

O : *Operational Effect*

Berikut ini merupakan penjelasan setiap bagian yang ada dalam RCM II *Decision Worksheet* yaitu sebagai berikut:

a. *Information Reference*

Information reference merupakan informasi yang diperoleh dari FMEA atau RCM II *decision worksheet* yaitu dengan memasukan informasi mengenai *function, failure function, failure mode* dari peralatan atau komponen.

b. *Consequence Evaluation*

Consequence evaluation merupakan konsekuensi yang ditimbulkan karena kegagalan fungsi. Dalam RCM II *failure consequence* dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu *hidden failure, safety effect, environmental effect, operational effect* dan *non operational effect*. Kolom H, S, E, O, dan N digunakan untuk mencatat jawaban dari

pertanyaan konsekuensi dari tiap penyebab kegagalan. Kolom berikutnya, yaitu kolom H1, H2, H3 dan seterusnya mencatat tindakan proaktif apa yang akan dilakukan.

c. *Proactive Task dan Default Action*

Proactive task merupakan tindakan atau kondisi yang diambil dalam mencegah terjadinya *failure mode*. Dalam penentuan tindakan tersebut akan dibantu dengan *decision diagram*. Jika jawaban dari pertanyaan yang ada pada RCM II *decision diagram* memenuhi pernyataan maka kolom akan diisi dengan *Yes* (Y), jika tidak memenuhi pernyataan maka kolom akan diisi dengan *No* (N). Kolom H1/S1/O1/N1 digunakan untuk mencatat *on-condition task* yang dilakukan untuk mengantisipasi *failure mode*. Kolom H2/S2/O2/N2 digunakan untuk mencatat *scheduled restoration task* yang dilakukan. Kolom H3/S3/O3/N3 mencatat *scheduled discard task* yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kegagalan. Kolom H4/H5/S4 digunakan untuk mencatat *default action* yang akan dilakukan.

d. *Proposed Task*

Dari hasil keputusan yang didapatkan kemudian diaplikasikan dalam tindakan perawatan untuk mencegah *functional failure*. Dalam *proposed task* dijelaskan tindakan perencanaan yang dipilih sebagai kegiatan perawatan yang diusulkan.

e. *Initial Interval*

Initial interval digunakan untuk mencatat interval waktu perawatan yang optimal dari masing-masing *task* yang diberikan untuk *scheduling restoration* atau *discard task*.

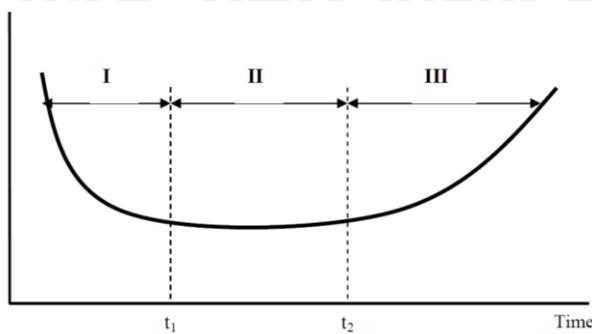
f. *Can Be Done By*

Digunakan untuk mencatat siapa yang akan melaksanakan kegiatan perawatan.

2.16 Keandalan (*Reliability*)

Keandalan (*reliability*) didefinisikan sebagai kemungkinan (probabilitas) bahwa suatu sistem akan berfungsi pada periode waktu tertentu (t) dalam suatu kondisi yang ditetapkan (Ebeling, 1997). Berdasarkan definisi tersebut maka dapat diketahui beberapa parameter penting yang berkaitan dengan keandalan yaitu probabilitas (peluang), kemampuan melaksanakan fungsi (tidak gagal), waktu dan kondisi operasi, parameter probabilitas membawa keandalan dalam konteks probabilitas, dimana kegagalan akan mengikuti bentuk distribusi probabilitas kegagalan tertentu (Lewis, 1996). Keandalan merupakan salah satu ukuran keberhasilan sistem pemeliharaan yang digunakan untuk menentukan penjadwalan pemeliharaan sendiri. Konsep keandalan digunakan juga pada berbagai industri, misalnya dalam penentuan interval penggantian komponen mesin.

Secara umum konsep keandalan dalam manajemen perawatan dapat digambarkan dalam *Bathtub Curve* pada Gambar 2.2 yang menjelaskan siklus hidup komponen.



Gambar 2.2 *Bathtub Curve*
Sumber: Ebeling (1997)

Menurut Ebeling (1997) kurva tersebut terdiri dari 3 fase yaitu:

1. Fase *Burn-in*

Fase ini terjadi pada periode 0 sampai dengan t_1 . Kurva menunjukkan laju kerusakan menurun selama bertambahnya waktu. Laju kerusakan seperti ini disebut juga dengan *Decreasing Failure Rate* (DFR). Kerusakan umumnya disebabkan oleh kesalahan manufaktur seperti desain peralatan yang kurang sempurna.

2. Fase *Useful-life*

Fase ini terjadi antara t_1 sampai dengan t_2 . Laju kerusakan yang terjadi cenderung konstan, sehingga fase ini juga disebut *Constant Failure Rate* (CFR). Kerusakan yang terjadi bersifat acak dipengaruhi kondisi lingkungan dan manusia.

3. Fase *Wear-out*

Fase ini terjadi setelah periode t_2 . Laju kerusakan menunjukkan selama bertambahnya waktu. Sehingga fase ini disebut juga *Increasing Failure Rate* (IFR). Kerusakan pada periode ini disebabkan oleh keausan peralatan, *fatigue*, dan korosi.

Waktu merupakan variabel terpenting yang berkaitan dengan keandalan suatu sistem. Dalam hal ini waktu dihubungkan dengan laju kerusakan (*failure rate*) biasanya faktor yang dipakai dalam menilai keandalan sistem dikaitkan dengan keadaan tertentu, misalnya waktu antar dua kerusakan (*mean time to failure*) dan waktu rata-rata antar dua perbaikan (*mean time between maintenance*).

Keandalan suatu komponen adalah peluang bahwa komponen tersebut akan berfungsi sebagaimana mestinya selama paling sedikit sampai jangka waktu t dalam kondisi lingkungan tertentu. Fungsi keandalan komponen dinotasikan sebagai $R(t)$.

Memahami penyebab terjadinya kegagalan dapat menurunkan keandalan. Beberapa hal yang menyebabkan kegagalan terjadi adalah:

1. *Item* tidak sesuai dengan tujuan dibuat atau digunakan.
2. Kegagalan disebabkan oleh *wear-out*.
3. Spesifikasi yang berbeda dapat menyebabkan kegagalan.
4. Informasi yang salah mengenai *item* dapat menyebabkan kegagalan.
5. *Item* dibuat untuk lingkungan operasi spesifik dan jika digunakan pada lingkungan yang tidak sesuai dapat menyebabkan kegagalan.

2.16.1 Fungsi Keandalan

Fungsi keandalan bertujuan mengetahui produktivitas suatu peralatan atau komponen akan berfungsi sebagaimana fungsinya selama selang waktu tertentu. Probabilitas ini diinterpretasikan dengan indeks keandalan yang merupakan fungsi waktu yang memiliki kisaran nilai 0 hingga 1. Indeks keandalan bernilai 0 berarti pada waktu yang ditentukan probabilitas kegagalan elemen adalah 100% (*absolute* gagal). Dan indeks keandalan bernilai 1 berarti probabilitas kegagalan sistem adalah 0% atau peluang suksesnya adalah 100% (*absolute* sukses) (Ebeling, 1997).

Menurut Ikhsan (2010), kerusakan dapat dinyatakan dengan variabel acak T dan memiliki hubungan dengan t rusak maka $x(t) = 1$ dan jika $T < t$ rusak maka $x(t) = 0$ sehingga diperoleh beberapa kemungkinan sebagai berikut.

1. Probabilitas peralatan beroperasi sampai dengan t , adalah sebagai berikut:

$$P[x(t) = 1] = P[T > t] \quad (2-2)$$

2. Probabilitas peralatan rusak sampai dengan t , dapat ditulis sebagai berikut.

$$P[x(t) = 0] = P[T < t] = F(t) \quad (2-3)$$

Karena keandalan merupakan ukuran probabilitas dari fungsi waktu, maka dapat dinotasikan sebagai $R(t)$, yang berarti keandalan sistem atau peralatan apabila dioperasikan selama selang tertentu (Ebeling, 1997).

$$\begin{aligned} R(t) &= P(\text{peralatan beroperasi}) \\ &= P\{x(t) = 1\} \\ &= P\{T > t\} \\ &= 1 - P\{T < t\} \\ &= 1 - F(t) \end{aligned} \quad (2-4)$$

$F(t)$ merupakan fungsi distribusi kumulatif dari umur sistem atau fungsi distribusi kerusakan. Jika fungsi kerapatan merupakan turunan dari $F(t)$, maka:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

$$f(t) = \frac{d[1-R(t)]}{dt}$$

$$f(t) = -\frac{dR}{dt} R(t)$$

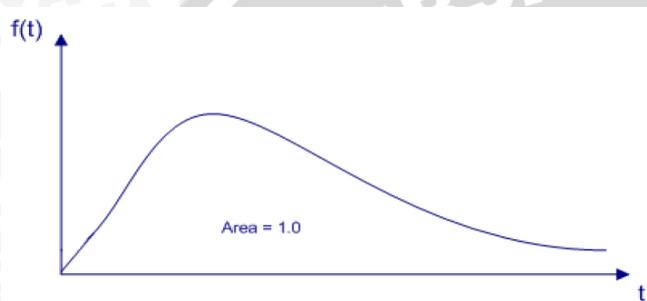
$$f(t) = 1 - \int_0^t F(t)dt \quad (2-5)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (2-6)$$

Dimana: $R(t)$ = keandalan

$f(t)$ = fungsi kepadatan probabilitas

Grafik PDF (*Probability Density Function*) dari $f(t)$ dapat dilihat pada Gambar 2.3 sesuai representasi visual dari distribusi kegagalan sebagai berikut:



Gambar 2.3 Grafik PDF (*Probability Density Function*)
Sumber: Ebeling (1997)

2.17 Laju Kegagalan

Laju kegagalan adalah banyaknya kejadian kegagalan setiap satuan waktu. Fungsi laju kegagalan dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara nilai fungsi pada peluang $f(t)$ dengan fungsi keandalan $R(t)$ (Ebeling, 1997). Laju kegagalan dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{f}{T} \quad (2-7)$$

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2-8)$$

Keterangan:

f = banyaknya kegagalan selama jangka waktu operasi

T = total waktu operasi

R = keandalan komponen

2.18 System Reliability Model

Menurut Ebeling (1997), ada 3 model sistem keandalan dari suatu mesin yaitu sistem keandalan rangkaian seri, sistem keandalan rangkaian paralel, dan kombinasi sistem keandalan seri-paralel. Berikut ini merupakan penjelasan dari sistem keandalan tersebut.

1. Sistem Keandalan Seri

Disebut jaringan keandalan sistem seri karena letak dan susunan komponen yang dianalisa keandalannya tersusun secara seri. Sehingga jika salah satu dari komponen tersebut mengalami kegagalan, maka sistem tersebut tidak akan berfungsi. Sistem keandalan seri dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sistem Keandalan Seri
Sumber: Ebeling (1997)

Karena reliabilitas berkaitan dengan probabilitas, maka reliabilitas suatu sistem dapat ditentukan dari reliabilitas komponen penyusunnya.

E_1 = kejadian bahwa komponen 1 tidak rusak

E_2 = kejadian bahwa komponen 2 tidak rusak

Sedangkan $P(E_1) = R_1$ dan $P(E_2) = R_2$

Dengan R_1 = reliabilitas komponen 1 dan R_2 = reliabilitas komponen 2

Oleh karena itu, $R_{\text{sistem}} = P(E_1 \cap E_2) = P(E_1) \cdot P(E_2) = R_1 \cdot R_2$ dengan asumsi bahwa dua komponen tersebut independen, dalam arti kegagalan komponen yang satu tidak mempengaruhi reliabilitas dari komponen yang lainnya.

Secara umum, reliabilitas sistem (R_s) untuk jaringan seri dengan n komponen independen dirumuskan dengan:

$$R_s(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_n(t) \leq \min \{R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t)\} \quad (2-9)$$

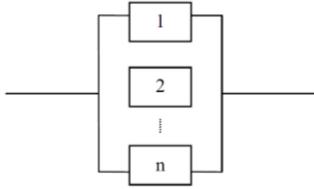
Dengan $0 < R_i(t) < 1$ dan $i = 1, 2, \dots, n$

$$R_s(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} \quad (2-10)$$

Dari rumusan tersebut, reliabilitas sistem tidak akan lebih besar dari reliabilitas komponen penyusunnya yang terkecil. Dari persamaan tersebut, agar sistem mempunyai reliabilitas yang besar, maka reliabilitas komponennya juga harus besar, terlebih lagi pada sistem yang tersusun dari banyak komponen.

2. Sistem Keandalan Paralel

Konfigurasi paralel, seluruh komponen harus rusak terlebih dahulu untuk menyebabkan keseluruhan sistem rusak. Jika satu atau lebih komponen beroperasi maka sistem masih beroperasi. Sistem keandalan seri dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Sistem Keandalan Paralel
Sumber: Ebeling (1997)

Reliabilitas sistem untuk n komponen yang terhubung secara paralel didapatkan dengan rumus 1 dikurangi probabilitas bahwa semua n komponen gagal.

Misalkan terdapat 2 komponen penyusun, maka reliabilitas sistemnya adalah:

$$\begin{aligned} R_S &= P(E_1 \cup E_2) = 1 - P(E_1 \cap E_2)^c = 1 - P(E_1^c \cap E_2^c) \\ &= 1 - P(E_1^c) \cdot P(E_2^c) \\ &= 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \end{aligned} \quad (2-11)$$

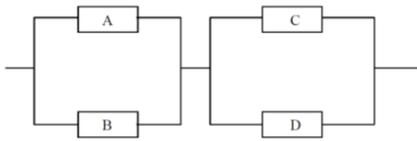
$$\text{Secara umum, } R_S = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (2-12)$$

Dengan $R_S(t) \geq \max \{R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t)\}$

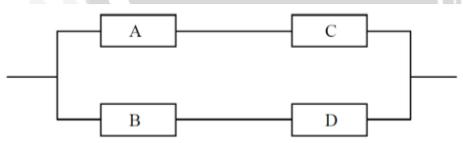
Karena $\prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)]$ harus lebih kecil dari probabilitas kegagalan komponen yang mempunyai reliabilitas rusak.

3. Kombinasi Sistem Keandalan Seri-Paralel

Selain itu juga terdapat sistem kombinasi seri-paralel dari jaringan keandalan suatu mesin. Sistem keandalan seri dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Sistem Kombinasi Seri-Paralel
Sumber: Ebeling (1997)



Gambar 2.7 Sistem Kombinasi Paralel-Seri
Sumber: Ebeling (1997)

Kombinasi dari sistem seri dan paralel dapat diselesaikan dengan menggabungkan masing-masing subsistem kedalam persamaan komponen seri maupun persamaan komponen paralel terlebih dahulu.

2.19 Parameter Distribusi

Parameter distribusi suatu probabilitas kerusakan pada suatu mesin dapat diketahui dengan menggunakan distribusi statistik. Dalam analisis keandalan, penggunaan distribusi statistik tergantung dari kerusakan statistik yang terjadi, terdapat 4 macam distribusi yang umum digunakan untuk mengidentifikasi pola data kerusakan, yaitu distribusi eksponensial, distribusi *weibull*, distribusi normal, dan distribusi lognormal (Ebeling, 1997).

2.19.1 Distribusi Normal

Menurut Ebeling (1997), distribusi normal mempunyai laju kerusakan yang naik sejak bertambahnya umur alat, yang berarti probabilitas kerusakan alat atau komponen naik sesuai dengan bertambahnya umur komponen tersebut. Distribusi normal ini cocok digunakan untuk memodelkan keausan atau kondisi *wearout* dari suatu sistem. Bentuk distribusi normal menyerupai lonceng (*bell shaped curve*) sehingga memiliki nilai simetris terhadap nilai rata-rata dengan 2 parameter pembentuk yaitu μ (nilai tengah) dan σ (standar deviasi). Adapun fungsi-fungsi distribusi normal dinyatakan sebagai berikut.

Fungsi kepadatan kerusakan / *Probability Density Function* (PDF).

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-13)$$

Fungsi distribusi kumulatif / *Cumulative Density Function* (CDF):

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (2-14)$$

Fungsi keandalan:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (2-15)$$

Fungsi laju kerusakan:

$$\lambda(t) = \left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-\mu)^2}{\sigma^2}\right)\right] \left[1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1} \quad (2-16)$$

2.19.2 Distribusi Eksponensial

Menurut Ebeling (1997), distribusi eksponensial mempunyai laju kerusakan yang konstan, tidak tergantung pada waktu. Dengan demikian probabilitas terjadinya kerusakan pada suatu komponen atau alat tidak tergantung pada umur alat tersebut. Kerusakan yang terjadi secara acak biasanya akan mengikuti distribusi ini dikenal luas dan banyak dipakai dalam perhitungan keandalan (*reliability*) dan digunakan untuk menghitung keandalan dari distribusi kerusakan yang memiliki laju kerusakan konstan.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2-17)$$

Fungsi kepadatan kerusakan / *Probability Density Function* (PDF):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2-18)$$

Fungsi laju kerusakan:

$$\lambda(t) = \lambda \quad (2-19)$$

Fungsi keandalannya yaitu:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2-20)$$

2.19.3 Distribusi Weibull

Menurut Ebeling (1997), distribusi ini merupakan distribusi yang paling sering digunakan untuk menganalisis data kerusakan, karena distribusi *weibull* dapat memenuhi beberapa periode kerusakan yang terjadi, yaitu periode awal (*early failure*), periode normal, dan periode pengausan (*wear-out*).

Fungsi-fungsi distribusinya adalah sebagai berikut.

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2-21)$$

Fungsi distribusi kumulatif (CDF):

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2-22)$$

Fungsi keandalan:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2-23)$$

Fungsi laju kerusakan:

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \quad (2-24)$$

Dalam distribusi *weibull* yang menentukan tingkat kerusakan dari pola data yang dibentuk adalah parameter α . Nilai-nilai parameter α yang menunjukkan laju kerusakan terdapat dalam Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Nilai Parameter α

Nilai	Laju Kerusakan
$0 < \alpha < 1$	Pengurangan laju kerusakan (DFR)
$\alpha = 1$	Distribusi Eksponensial
$1 < \alpha < 2$	Peningkatan laju kerusakan (IFR), Konkaf
$\alpha = 2$	Distribusi <i>Relleigh</i>
$2 \leq \alpha \leq 4$	Peningkatan laju kerusakan (IFR), Konveks
$\alpha > 5$	Peningkatan laju kerusakan (IFR), mendekati kurva normal

Sumber: Ebeling (1997)

2.19.4 Distribusi Lognormal

Menurut Ebeling (1997), distribusi lognormal menggunakan 2 parameter, yaitu σ yang merupakan standar deviasi dan μ yang merupakan nilai tengah dari suatu distribusi kerusakan. Distribusi ini dapat memiliki berbagai macam bentuk sehingga sering dijumpai bahwa data yang sesuai dengan distribusi *weibull* juga sesuai dengan distribusi lognormal.

Fungsi kepadatan kerusakan / *Probability Density Function* (PDF):

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\ln t - \mu)^2}{\sigma^2}\right] \quad (2-25)$$

Fungsi keandalan:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\ln t - \mu)^2}{\sigma^2}\right] dt \quad (2-26)$$

Fungsi laju kerusakan:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2-27)$$

2.20 Goodness of Fit Test

Uji ini dilakukan dengan membandingkan antara hipotesis nol (H_0) yang menyatakan bahwa data kerusakan mengikuti distribusi pilihan dengan hipotesis alternatif (H_1) yang menyatakan bahwa data kerusakan tidak mengikuti distribusi pilihan.

Pengujian yang dilakukan dalam *goodness of fit* ada tiga macam yaitu *Mann's Test* untuk distribusi *weibull*, *Barlett's Test* untuk distribusi eksponensial, dan *Kolmogorov-Smirnov* untuk distribusi normal dan distribusi lognormal.

2.20.1 Mann's Test

Menurut Ebeling (1997), hipotesis untuk melakukan uji ini adalah sebagai berikut:

H_0 : data kerusakan berdistribusi *weibull*

H_1 : data kerusakan tidak berdistribusi *weibull*

Uji statistiknya adalah sebagai berikut:

$$M = \frac{k_1 \sum_{i=k_1+1}^{r-1} \left(\frac{\ln t_{i+1} - t_i}{M_i}\right)}{k_2 \sum_{i=1}^{k_1} \left(\frac{\ln t_{i+1} - t_i}{M_i}\right)} \quad (2-28)$$

$$k_1 = \frac{r}{2}; k_2 = \frac{r-1}{2} \quad (2-29)$$

$$M_i = Z_{i+1} - Z_i \quad (2-30)$$

$$Z_i = \ln \left[-\ln\left(1 - \frac{i-0,5}{n+0,25}\right)\right] \quad (2-31)$$

Jika nilai $M < M_{\text{Cric}}$ maka H_0 diterima. Nilai M_{Cric} diperoleh dari tabel distribusi F dengan $V_1=2k_1$ dan $V_2=2k_2$

2.20.2 Barlett's Test

Menurut Ebeling (1997), hipotesis untuk melakukan uji ini adalah sebagai berikut:

H_0 : data kerusakan berdistribusi eksponensial

H_1 : data kerusakan tidak berdistribusi eksponensial

Uji statistiknya adalah sebagai berikut:

$$B = \frac{2r[\ln(\frac{1}{r}\sum_{i=1}^r t_1) - (\frac{1}{r}\sum_{i=1}^r t_1)]}{1 + \frac{r+1}{6r}} \quad (2-32)$$

t_i = data waktu kerusakan ke- i

r = jumlah kerusakan

B = uji statistik untuk uji *Barlett's Test*

H_0 diterima jika $X^2_{(1-\alpha/2r-1)} < B < X^2_{(\alpha/2r-1)}$

2.20.3 Kolmogorov Smirnov Test

Menurut Ebeling (1997), hipotesis untuk melakukan uji ini adalah sebagai berikut:

H_0 : data kerusakan berdistribusi normal dan lognormal

H_1 : data kerusakan tidak berdistribusi normal dan lognormal

Uji statistiknya adalah sebagai berikut:

$$D_{\text{hitung}} = \max \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_4\} \quad (2-33)$$

$$D_i = \frac{F_{\text{kumi}}}{n} - F(z < z_i) \quad (2-34)$$

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n}; S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(t_i - \bar{t})^2}{n-1} \quad (2-35)$$

$$z_i = \frac{t_i - \bar{t}}{s} \quad (2-36)$$

Untuk distribusi lognormal sebagai berikut:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(t_i)}{n}; S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\ln(t_i) - \bar{t})^2}{n-1} \quad (2-37)$$

\bar{t} = data waktu kerusakan ke- i

S = standar deviasi

Jika $D_{\text{hitung}} < D_{\text{cric}}$ maka H_0 diterima. Nilai D_{cric} diperoleh dari tabel *critical value for Kolmogorov-Smirnov Test* untuk distribusi normal.

2.21 Mean Time To Repair (MTTR)

Mean Time to Repair (MTTR) merupakan waktu rata-rata dari interval waktu untuk melakukan perbaikan yang dibutuhkan oleh suatu komponen atau sistem. Untuk dapat menentukan MTTR maka terlebih dahulu harus diketahui dulu jenis distribusi berdasarkan pola datanya. Menurut Ebeling (1997), MTTR diperoleh dengan rumus:

$$MTTR = \int_0^{\infty} t h(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - H(t)) dt \quad (2-38)$$

$h(t)$ = fungsi kepadatan peluang untuk data waktu perbaikan (TTR)

$H(t)$ = fungsi distribusi kumulatif untuk data waktu perbaikan (TTR)

Berikut ini merupakan perhitungan nilai MTTR untuk masing-masing distribusi.

1. Distribusi Normal

$$MTTR = e^{v + \frac{\lambda^2}{2}} \quad (2-39)$$

2. Distribusi Eksponensial

$$MTTR = \frac{1}{\tau} \quad (2-40)$$

3. Distribusi Weibull

$$MTTR = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2-41)$$

4. Distribusi Lognormal

$$MTTR = e^{v + \frac{\lambda^2}{2}} \quad (2-42)$$

2.22 Mean Time To Failure (MTTF)

Menurut Ebeling (1997), MTTF atau *Mean Time to Failure* adalah nilai rata-rata interval atau selang waktu kerusakan dari suatu distribusi kerusakan yang didefinisikan oleh *probability density function* $f(t)$ sebagai berikut:

$$E(T) = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt$$

$$E(T) = - \int_0^{\infty} t dR(t)$$

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2-43)$$

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (2-44)$$

Berikut ini merupakan perhitungan MTTF untuk masing-masing distribusi.

1. Distribusi Normal

$$MTTF = \mu \quad (2-45)$$

2. Distribusi Eksponensial

$$MTTF = \frac{1}{\tau} \quad (2-46)$$

3. Distribusi *Weibull*

$$MTTF = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2-47)$$

4. Distribusi Lognormal

$$MTTF = e^{v + \frac{\lambda^2}{2}} \quad (2-48)$$

2.23 Downtime

Downtime merupakan jumlah waktu dimana suatu peralatan tidak dapat beroperasi disebabkan adanya kerusakan (*failure*). *Downtime* terjadi apabila sistem mengalami kerusakan, dalam keadaan perbaikan, atau tindakan pemeliharaan lainnya. *Downtime* dapat berupa waktu pemeriksaan kerusakan (*inspection*), waktu menunggu perbaikan, waktu menunggu datangnya *sparepart*, dan waktu pemasangan *sparepart*.

Menurut Ebeling (1997), *downtime* terdiri dari beberapa macam yaitu sebagai berikut:

1. *Supply Delay*

Waktu yang dibutuhkan oleh *personal maintenance* untuk memperoleh komponen atau suku cadang yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proses perbaikan.

2. *Maintenance Delay*

Waktu yang dibutuhkan untuk menunggu ketersediaan sumber daya perawatan untuk melakukan proses perbaikan.

3. *Acces Time*

Waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan akses ke komponen yang mengalami kerusakan.

4. *Diagnosis Time*

Waktu untuk menentukan penyebab kerusakan langkah perbaikan apa yang harus ditempuh untuk memperbaiki kerusakan.

5. *Repair of Replacement Time*

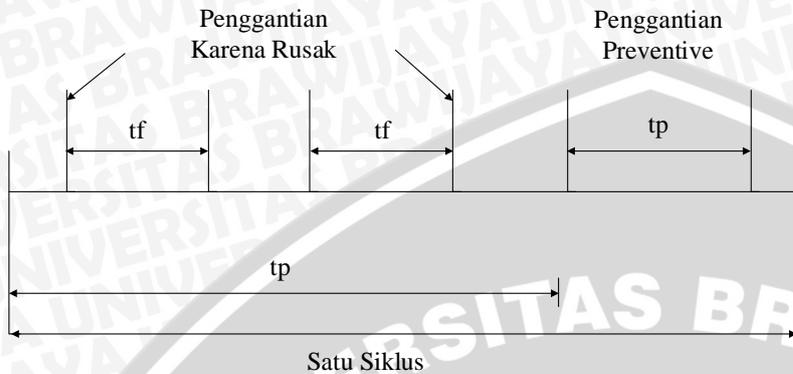
Waktu aktual yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proses pemulihan setelah permasalahan dapat diidentifikasi dan akses ke komponen yang rusak dapat dicapai.

6. *Verification and Alignment Time*

Waktu yang dibutuhkan untuk memastikan bahwa unit telah kembali pada kondisi operasi semula.

2.24 Total Minimum Downtime (TMD)

Tujuannya untuk menentukan penggantian yang optimal berdasarkan interval waktu (t_p) diantara penggantian *preventive* dengan menggunakan kriteria meminimumkan *downtime* per unit waktu dapat dijelaskan melalui Gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8 Penggantian Komponen Berdasarkan Interval Waktu
Sumber: Siswanto (2010)

Berdasarkan pada Gambar 2.8 dapat dilihat bahwa total *downtime* per unit waktu untuk tindakan penggantian preventif pada waktu t_p , dinotasikan sebagai $D(t_p)$ adalah:

$$D(t_p) = \frac{H(t_p)T_f + T_p}{t_p + T_p} \quad (2-49)$$

$H(t_p)$ = Banyaknya kerusakan (kegagalan) dalam interval waktu $(0, t_p)$, merupakan nilai harapan (*expected value*).

T_f = Waktu yang diperlukan untuk penggantian komponen karena kerusakan.

T_p = Waktu yang diperlukan untuk penggantian komponen karena tindakan preventif (komponen belum rusak).

$t_p + T_p$ = Panjang satu siklus.

Dengan meminimumkan total *downtime*, diperoleh tindakan penggantian komponen berdasarkan interval waktu t_p yang optimum. Untuk komponen yang memiliki distribusi kegagalan mengikuti distribusi peluang tertentu dengan fungsi peluang $f(t)$, maka nilai harapan (*expected value*) banyaknya kegagalan yang terjadi dalam interval waktu $(0, t_p)$ dapat dihitung sebagai berikut:

$$H(t_p) = \sum_{i=0}^{t_p-1} [1 + H(t_p - 1 - i)] \int_0^{t_p-i} f(t) dt \quad (2-50)$$

$H(0)$ ditetapkan sama dengan nol, sehingga untuk $t_p = 0$, maka $H(t_p) = H(0) = 0$.

2.25 Model Matematis Perawatan

Dalam menentukan perawatan yang optimal pada setiap komponen maka diperlukan parameter distribusi selang waktu kerusakan yang sesuai, biaya perawatan, dan perbaikan komponen (Ebeling, 1997). Jika data berdistribusi *weibull* maka rumus perhitungan biaya optimum (TC) adalah sebagai berikut:

$$TC = (P(TTF \leq TM)CF) + (P(TTF > TM)CM) \quad (2-51)$$

1. Perhitungan Probabilitas Rusak

$$\begin{aligned} P(TTF \leq TM) &= \int_0^{TM} f(t)dt \\ &= \int_0^{TM} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] dt \end{aligned} \quad (2-52)$$

2. Probabilitas Masih Baik

$$\begin{aligned} P(TTF > TM) &= \int_{TM}^{\infty} f(t)dt \\ &= \int_{TM}^{\infty} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] dt \\ &= 1 - P(TTF \leq TM) \end{aligned} \quad (2-53)$$

2.26 Perhitungan Biaya Perawatan

Biaya-biaya yang berkaitan dengan perawatan adalah biaya tenaga kerja, biaya perbaikan, biaya perawatan, biaya komponen pengganti, dan biaya konsekuensi yang timbul akibat kegagalan. Struktur biaya yang tercakup dalam perawatan diuraikan sebagai berikut:

1) Biaya perbaikan (C_F)

Biaya yang dikeluarkan untuk perbaikan atau penggantian komponen yang mencakup biaya tenaga kerja, biaya mekanik jika ada, biaya kerugian produksi, dan biaya perbaikan atau penggantian komponen.

$$\begin{aligned} C_F &= [(Biaya mekanik + Biaya kerugian produksi) \times MTTR] \\ &\quad + \text{Harga komponen} \end{aligned} \quad (2-54)$$

2) Biaya perawatan (C_M)

Biaya perawatan adalah biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan secara rutin untuk perawatan mesin.

$$\begin{aligned} C_M &= [(Biaya mekanik + Biaya kerugian produksi) \\ &\quad \times \text{waktu pelaksanaan } preventive] + \text{Biaya perawatan} \end{aligned} \quad (2-55)$$