

SISTEM PEMELIHARAAN PADA SISTEM MANUFAKTUR

KONSEP SISTEM PEMELIHARAAN

LPPM UPNVY PRESS

**Apriani Soepardi
Mochammad Chaeron**

SISTEM PEMELIHARAAN PADA SISTEM MANUFATUR
KONSEP SISTEM PEMELIHARAAN

SISTEM PEMELIHARAAN PADA SISTEM MANUFAKTUR

KONSEP SISTEM PEMELIHARAAN

LPPM UPNVY PRESS

**Apriani Soepardi
Mochammad Chaeron**

SISTEM PEMELIHARAAN PADA SISTEM MANUFAKTUR
KONSEP SISTEM PEMELIHARAAN
Oleh: Apriani Soepardi, Mochammad Chaeron

Diterbitkan oleh:



LPPM UPNVY PRESS

UPN "Veteran" Yogyakarta
LPPM Gd. Rektorat Lantai 4
Jl. Padjajaran 104 (Lingkar Utara)
Yogyakarta 55283
Telp. (0274) 486733 ext. 154

Edisi Pertama

Cetakan Pertama, 2019

ISBN: 978-623-7594-20-8

Ucapan terimakasih

Buku ini merupakan luaran hibah penelitian
yang dibiayai oleh Kemenristekdikti.
Terima kasih.

Daftar Isi

Halaman Judul		
Halaman Persembahan		
Ucapan Terimakasih		
Daftar Isi		
Daftar Gambar		
BAB I	PEMELIHARAAN DALAM SISTEM PRODUKSI	1
	1.1. Pengantar	1
	1.2. Konsep pemeliharaan	6
	1.3. Strategi pemeliharaan	8
	1.4. Proses produksi dan pemeliharaan	19
	RINGKASAN	22
	DAFTAR PUSTAKA	22
	PERTANYAAN	23
	TUGAS	23
BAB II	KONSEP KEANDALAN SISTEM	25
	2.1. Konsep keandalan system	25
	2.2. Formulasi dasar model kegagalan	27
	2.3. Distribusi kegagalan	31
	2.4. Pengaruh pemeliharaan terhadap keandalan system	38
	2.5. Strategi penggantian optimal	47
	RINGKASAN	49
	DAFTAR PUSTAKA	49
	PERTANYAAN	50
	TUGAS	51
BAB III	KETERSEDIAAN DAN KEMAMPU-RAWATAN	53
	3.1. Definisi	53
	3.2. Pengembangan model ketersediaan	55

3.3. Sistem dengan komponen tunggal	57
3.3.1. Sistem seri	61
3.3.2. Sistem paralel	66
RINGKASAN	69
DAFTAR PUSTAKA	69
PERTANYAAN	70
SOAL LATIHAN	70
BAB IV	Kemampu-rawatan
4.1. Konsep	71
4.2. Distribusi waktu perbaikan	72
4.3. Kegagalan yang tidak dapat diperbaiki	76
RINGKASAN	77
DAFTAR PUSTAKA	77
PERTANYAAN	77
GLOSARIUM	

Daftar Gambar

- Gambar 1.1. Harapan terhadap fungsi pemeliharaan
- Gambar 1.2. Perubahan pemahaman tentang kegagalan peralatan
- Gambar 1.3. Teknik-teknik pemeliharaan baru
- Gambar 1.4. Tiga jenis pompa baru yang identik
- Gambar 1.5. Tiga strategi pemeliharaan yang berbeda
- Gambar 1.6. Jenis Strategi Pemeliharaan (Corder, 1992)
- Gambar 1.7. Lima Langkah Pencegahan Kegagalan (Nakajima, 1988)
- Gambar 1.8. Daur hidup komponen di dalam sistem produksi
- Gambar 2.1 Kurva Laju Kegagalan Sistem
- Gambar 2.2. Keandalan sistem dengan dan tanpa pemeliharaan
- Gambar 3.1. Jenis-jenis ketersediaan
- Gambar 3.2. Diagram peralihan untuk keadaan sistem
- Gambar 3.3. Diagram peralihan Markov
- Gambar 3.4 Sebuah sistem seri
- Gambar 3.5 Sebuah sistem paralel
- Gambar 3.6 Fungsi kepadatan waktu perbaikan

Kata Pengantar

Buku teks ini berkaitan dengan proses manajemen pemeliharaan yang didefinisikan sebagai serangkaian tindakan dan suatu tahapan berturut-turut yang bertujuan mengatur kegiatan pemeliharaan dalam suatu sistem produksi secara keseluruhan. Buku ini diperuntukkan bagi mahasiswa Program Studi Teknik dan Manajemen Industri yang telah duduk di semester akhir sebagai salah satu konsentrasi dalam mata kuliah pilihan. Sebagai salah satu mata kuliah kekhususan, pembahasan materi dalam buku ini memerlukan beberapa pemahaman yang baik tentang konsep kalkulus dan probabilitas.

Kerangka besar buku ini tersusun atas dua bagian besar. Bagian pertama menjelaskan tentang pengertian dan karakteristik dari manajemen pemeliharaan dan bagian kedua menerangkan konsep dasar dalam sistem pemeliharaan. Isi buku ini agak lebih luas dari yang dapat diperoleh dalam 100 menit per minggu per semester karena pada beberapa bab disertakan studi kasus dalam industri sehingga diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih memadai. Dengan beberapa studi kasus yang disertakan, dimaksudkan agar dapat memberikan ilustrasi yang lebih baik dan jelas serta membantu mahasiswa dalam memahami konsep manajemen pemeliharaan.

Ilustrasi studi kasus ini kami ambil dari hasil laporan tugas akhir mahasiswa yang berada di bawah pembimbingan penulis dan dari hasil penelitian mahasiswa yang dilibatkan dalam penelitian penulis. Sedangkan pertanyaan dan contoh soal yang ditunjukkan pada setiap akhir pembahasan suatu tema atau pada akhir bab, ditujukan untuk mengukur pemahaman mahasiswa dan melatih mereka dalam menggunakan metode atau teknik-teknik yang telah dipelajari pada bab tersebut. Sebagian soal latihan kami ambil dengan mengacu pada beberapa buku sistem pemeliharaan yang terdapat pada daftar pustaka yang kami pakai.

Beragam-bagam buku teks telah digunakan dalam penyiapan buku ini, khususnya dalam materi pada bagian kedua, yaitu pembahasan tentang konsep keandalan, ketersediaan, dan kemampu-

rawatan. Dalam hal ini, secara khusus diakui bahwa beberapa bahasan diambilkan penulis dari buku *Reliability Based Design*, yang ditulis oleh Rao (1992).

Penulis juga mempergunakan kesempatan ini untuk mengungkapkan banyak terimakasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Dirjen Kemenristek Dikti yang telah memberikan dukungan dana penelitian pada berbagai skema riset sehingga buku ini dapat tersusun.

Apriani Soepardi
Mochammad Chaeron

BAB I

PEMELIHARAAN DALAM SISTEM PRODUKSI

“Pemeliharaan (*maintenance*) adalah kombinasi dari semua tindakan teknis, administratif dan manajerial terhadap suatu komponen, selama daur hidupnya, untuk mempertahankan atau mengembalikan kedudukannya pada posisi dimana komponen tersebut mampu melaksanakan fungsi-fungsi yang diperlukan” (EN 13306:2001 *Maintenance terminology*). Sesuai dengan uraian di atas maka bab ini akan menerangkan definisi-definisi dasar yang berkaitan dengan pemeliharaan dan mendiskusikan persoalan-persoalan pemeliharaan pada perusahaan manufaktur atau penyedia jasa perbaikan. Perhatian dititikberatkan pada pengintegrasian pemeliharaan dengan aktivitas-aktivitas lain yang ada dalam perusahaan (seperti: produksi, R&D, penjaminan kualitas, pembelian).

1.1 Pengantar

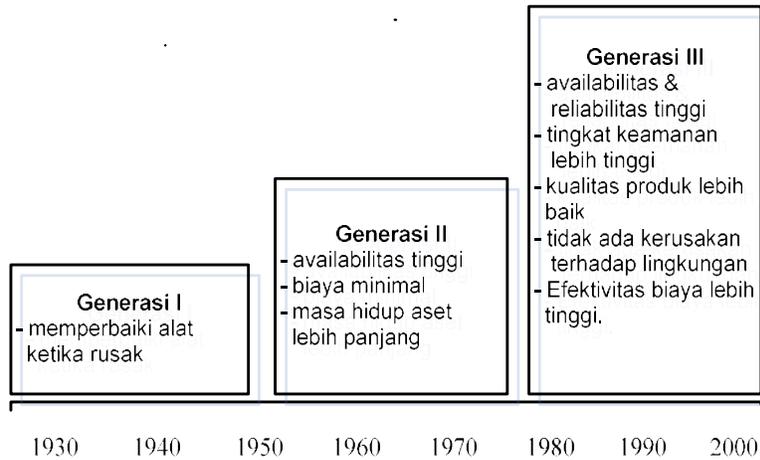
Bidang kajian Manajemen Pemeliharaan (*Maintenance Management*) sedang berubah dengan cepat seiring dengan perkembangan bidang manajemen yang lain. Menurut Moubray (1997), secara garis besar perubahan bidang manajemen pemeliharaan terjadi karena hal-hal sebagai berikut :

1. Peningkatan harapan (ekspektasi) dari fungsi pemeliharaan itu sendiri.
2. Pemahaman yang lebih baik mengenai kegagalan mesin atau peralatan.
3. Berkembangnya teknik-teknik manajemen pemeliharaan.

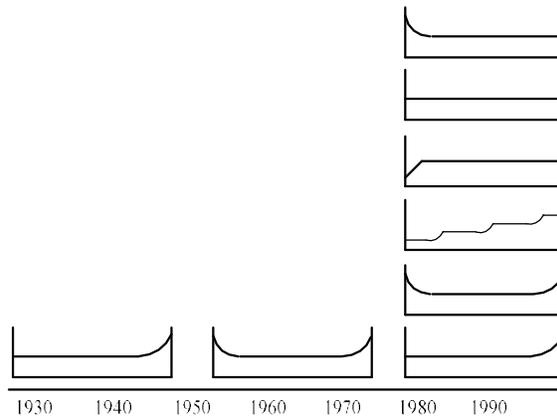
Pertimbangkan bahwa Manajemen Pemeliharaan telah melewati tiga generasi seperti ditunjukkan pada Gambar 1.1. Perbedaan mendasar antara Generasi Kedua dan Ketiga adalah:

- fokus pada faktor keandalan peralatan, di samping pada faktor ketersediaan,

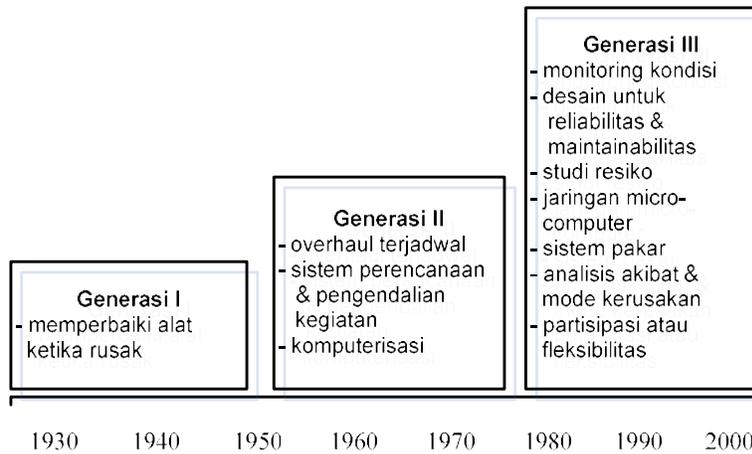
- dorongan menuju waktu kegagalan-nol (*zero-downtime*) pada kegiatan pemeliharaan, dan
- aplikasi metode seperti Pemeliharaan Berpusat pada keandalan (*Reliability Centred Maintenance - RCM*) dan Pemeliharaan Produktif Total (*Total Productive Maintenance - TPM*) untuk mencapai tujuan kegiatan pemeliharaan.



Gambar 1.1. Harapan terhadap fungsi pemeliharaan (Moubray, 1997)

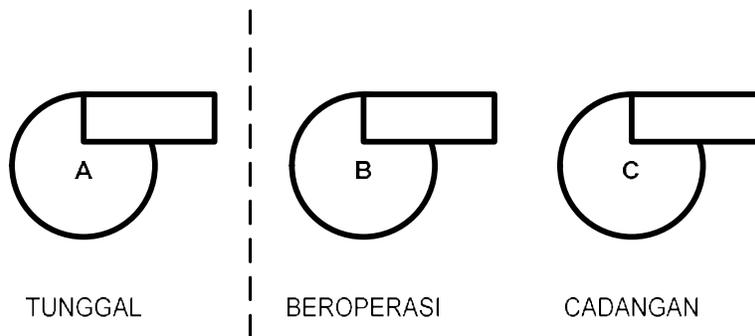


Gambar 1.2. Perubahan pemahaman tentang kegagalan peralatan (Moubray, 1997)



Gambar 1.3. Teknik-teknik pemeliharaan baru (Moubray, 1997)

Untuk contoh, pada suatu pabrik terdapat 3 buah pompa baru yang identik, dengan kemampuan mengalirkan cairan dalam jumlah dan besar kepala yang sama, serta kondisi penggunaan yang berbeda, seperti yang diilustrasikan dibawah ini.

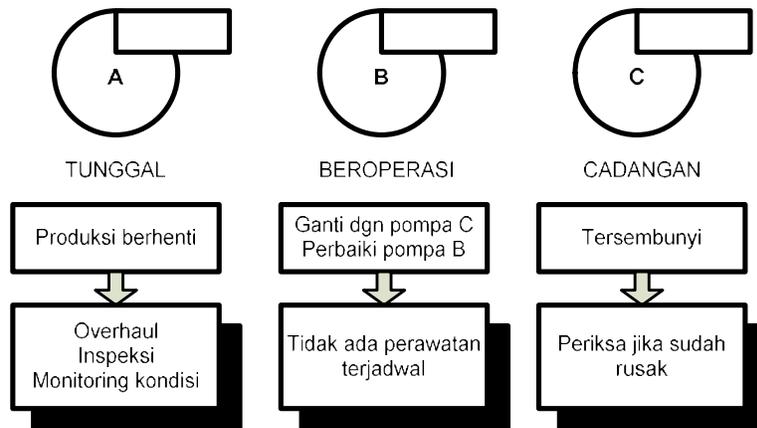


Gambar 1.4. Tiga jenis pompa baru yang identik (Moubray, 1997)

Katakanlah kita akan menyusun program pemeliharaan pencegahan (*preventive maintenance*) untuk ketiga jenis pompa tersebut di atas dengan tujuan untuk mencapai waktu kegagalan-nol. Misalkan kegiatan pemeliharaan yang dapat dilakukan pada pompa-pompa

tersebut adalah: analisis getaran (*vibration analysis*), pemeriksaan atau turun mesin (*overhaul*), dan inspeksi rutin.

Pada contoh di atas, jika kita mempertimbangkan konsekuensi yang terjadi karena adanya kegagalan (*failure*) pada setiap pompa, kita akan memiliki program pemeliharaan yang berbeda untuk masing-masing pompa, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.5. Terdapat dua poin penting yang muncul dari contoh tersebut, yaitu: *Pertama*, ketika membangun program pemeliharaan untuk pompa B, apakah tujuannya **menghilangkan** kegagalan pompa? Jelas tidak, karena keputusan yang diambil adalah mengoperasikan pompa sampai mengalami kegagalan. Hampir sama dengan hal itu, apakah program pemeliharaan yang dipilih untuk pompa C **mencegah** kegagalan? Sekali lagi jawabannya tidak. Keputusan terbaik yang kita ambil adalah melakukan tindakan **perbaikan** untuk pompa C manakala pompa ini sudah mengalami kegagalan.



Gambar 1.5. Tiga strategi pemeliharaan yang berbeda (Moubray, 1997)

Jadi, jika tujuan pemeliharaan pada setiap kasus di atas bukan untuk mencegah kegagalan peralatan, apakah tujuan kegiatan pemeliharaan? Tujuan kegiatan pemeliharaan pada semua kasus di atas adalah tidak menghindari dan menghilangkan kegagalan

peralatan tetapi menghindari konsekuensi dari kegagalan yang terjadi pada masing-masing kasus. Hal ini menggeser paradigma dasar dari konsep pemeliharaan tradisional kepada konsep pemeliharaan pada Generasi Ketiga, seperti yang diadopsi oleh prinsip RCM.

Pada prakteknya, konsekuensi kegagalan pada semua kasus dapat dikategorikan menjadi empat kategori, yaitu:

1. Tersembunyi (*hidden*)

Kegagalan jenis ini menimbulkan konsekuensi yang tidak tampak jelas dalam kondisi normal. Paling banyak untuk kegagalan peralatan dan sistem proteksi. Pompa C adalah contoh untuk hal ini.

2. Keamanan dan lingkungan (*safety and environmental*)

Jenis kegagalan ini membahayakan manusia atau menyebabkan pelanggaran regulasi, standar atau lisensi lingkungan. Misalkan konsekuensi kegagalan pada reaktor nuklir.

3. Operasional

Kegagalan ini menyebabkan berkurangnya kemampuan atau kapabilitas operasional. Misal pada kasus pompa A.

4. Non-operasional

Jenis kegagalan ini berdampak langsung pada timbulnya biaya pemeliharaan dan dimungkinkan timbulnya kegagalan sekunder pada peralatan lain. Pompa b sebagai contoh konsekuensi kategori ini.

Poin *kedua* dari contoh di atas adalah jika kita membangun program pemeliharaan untuk pompa B dan C dengan tujuan untuk menghilangkan kegagalan peralatan tersebut, maka kita akan melakukan kegiatan pemeliharaan yang 'berlebihan' terhadap peralatan tersebut. Jelasnya, kegiatan analisis getaran, overhaul rutin, dan inspeksi rutin yang dilakukan akan signifikan pada timbulnya biaya pemeliharaan yang lebih mahal daripada memperbaiki pompa tersebut hanya jika sudah mengalami kegagalan saja. Belum lagi pengeluaran tambahan yang harus dibayarkan tanpa adanya manfaat operasional.

Jadi kesimpulan dari apa yang kita bicarakan di atas adalah bahwa tujuan pemeliharaan **bukan untuk menghilangkan semua kegagalan tetapi untuk menghilangkan konsekuensi dari kegagalan tersebut.**

1.2 Konsep pemeliharaan

Para pakar menjelaskan pemeliharaan item dalam beberapa definisi. EN 13306:2001 mengartikan item sebagai sembarang bagian, komponen, alat, subsistem, unit fungsional, peralatan atau sistem yang dapat dipertimbangkan secara individual. Item ini dipandang sebagai subjek dari kegagalan. Corder (1992) menyatakan bahwa pemeliharaan adalah kegiatan yang dilakukan untuk mempertahankan kondisi siap operasi dimana termasuk didalamnya kegiatan inspeksi, reparasi, overhaul, perbaikan, modifikasi, dan penggantian suku cadang. Menurutnya, tujuan pemeliharaan adalah sebagai berikut:

- a. Memperpanjang usia kegunaan aset.
- b. Menjamin ketersediaan peralatan untuk produksi atau jasa untuk mendapatkan laba investasi yang maksimal.
- c. Menjamin ketersediaan operasional dari seluruh peralatan yang diperlukan dalam keadaan darurat setiap waktu, misalnya unit cadangan, unit pemadam kebakaran, penyelamat, dan sebagainya.
- d. Menjamin keselamatan orang yang menggunakan sarana tersebut.

Penetapan tujuan kegiatan pemeliharaan dapat memasukkan indikator-indikator performansi kunci seperti keandalan, ketersediaan, rata-rata waktu perbaikan dan biaya pemeliharaan. Sehingga tujuan-tujuan yang dapat dicontohkan adalah: memperbaiki ketersediaan, memelihara kesehatan sistem, keselamatan dan pemeliharaan lingkungan, dan mengurangi biaya pemeliharaan.

Terdapat empat kelas utama tujuan yang disebutkan di dalam literatur (Cheunusa et al. 2004):

1. Kehilangan produksi, sebagai biaya tidak langsung. Contohnya adalah: minimasi kegagalan, waktu kegagalan, proses operasi ulang, persediaan, suku cadang, lembur dan kecelakaan.
2. Biaya langsung pemeliharaan. Pengurangan biaya dengan memperpanjang usia pakai komponen.
3. *Volume*. Kelas ini sebagian besar berkaitan dengan tujuan-tujuan sebagai berikut:
 - Memperbaiki keandalan dan ketersediaan
 - Memperbaiki performansi pabrik
 - Mendukung adanya kesempatan pasar baru
4. Harga dengan peningkatan kualitas produk.
Dua kelas yang pertama adalah pengurangan biaya sementara dua berikutnya adalah peningkatan pendapatan. Semua kelas berkontribusi untuk memaksimalkan keuntungan.

Sedangkan fungsi pemeliharaan ini harus memenuhi beberapa tuntutan:

1. **Kelayakan** merupakan kemampuan memenuhi spesifikasi standar yang ditentukan untuk menjamin keselamatan.
2. **Kemampuan** merupakan operasional memenuhi tuntutan kerja/standar kemampuan yang diterapkan bagi sistem dalam melaksanakan misi.
3. **Kesiapan** adalah pemenuhan ketentuan jumlah sistem/kebutuhan pemeliharaan yang diterapkan bagi sistem untuk melaksanakan misi.
4. **Keandalan** didefinisikan sebagai pemenuhan kebutuhan standar kemampuan untuk melaksanakan misi dalam jangka waktu tertentu tanpa kegagalan.

Selain itu, pemeliharaan merupakan suatu kegiatan pemeliharaan atau penjagaan fasilitas/peralatan pabrik serta perbaikan, penyesuaian atau penggantian yang diperlukan agar terdapat suatu keadaan operasi produksi yang memuaskan sesuai dengan rencana

(Assauri, 1993). Menurut Ebeling (1997), pemeliharaan didefinisikan sebagai aktivitas agar komponen/sistem yang rusak dapat dikembalikan/diperbaiki ke kondisi tertentu pada periode tertentu sesuai dengan prosedur yang sudah ditetapkan. Pemeliharaan didefinisikan oleh Manzini et.al (2010) sebagai kombinasi dari semua kegiatan teknis, tindakan administratif, dan manajerial selama siklus hidup item, yang dimaksudkan untuk mempertahankannya atau mengembalikannya ke tingkat dimana item tersebut dapat berfungsi sesuai kebutuhan perusahaan.

Manajemen merupakan karakteristik proses yang menuntun dan mengarahkan suatu organisasi melalui pengendalian sumber daya, baik manusia, modal, mesin, dan material. Menurut EN 13306:2001 (2001), manajemen pemeliharaan adalah semua kegiatan manajemen yang menetapkan tujuan pemeliharaan atau prioritas, strategi, dan wewenang serta mengimplementasikan hal-hal tersebut mulai dari perencanaan, pengendalian dan pengawasan serta pemanfaatan metode-metode perbaikan dengan melibatkan aspek ekonomi dalam suatu organisasi.

Fungsi manajemen pemeliharaan mencakup semua aktivitas yang menetapkan tujuan, strategi dan tanggung jawab pemeliharaan lalu mengimplementasikannya dengan:

- perencanaan pemeliharaan
- pengendalian dan pengawasan pemeliharaan
- perbaikan metoda dalam organisasi

1.3 Strategi pemeliharaan

Strategi pemeliharaan adalah jenis tugas yang berbeda meliputi aksi, prosedur, sumber daya dan waktu. Kegiatan ini harus dilaksanakan sesuai dengan waktu yang telah ditetapkan untuk menjamin tercapainya target pemeliharaan.

Pembersihan (*cleaning*) merupakan pekerjaan pertama yang paling dalam pemeliharaan. Pekerjaan membersihkan ini umumnya sering diabaikan orang karena dianggap kurang penting, padahal ini

membiarkan peralatan cepat rusak atau peralatan tidak berfungsi dengan baik. Membersihkan bukan saja membuat peralatan terlihat bersih akan tetapi dimaksudkan juga untuk melihat atau meraba setiap suku cadang dari peralatan untuk mendeteksi cacat-cacat permukaan dan ketidaknormalan seperti vibrasi yang terlalu tinggi, panas ataupun suara-suara yang aneh. Dengan kata lain membersihkan adalah pemeriksaan. Ini berarti bila hanya membersihkan tidak dilaksanakan seperti dimaksudkan maka membersihkan akan kehilangan arti. Membersihkan merupakan metoda yang paling efektif untuk mendeteksi kerusakan atau kesalahan-kesalahan secara dini dan juga untuk mencegah terjadinya gangguan.

Kegiatan pemeliharaan yang dilakukan oleh operator (*autonomous maintenance-AM*) memberikan kontribusi yang sangat berarti dalam peningkatan pendayagunaan peralatan. Inti dari kegiatan ini adalah pencegahan dari memburuknya peralatan. Berdasarkan pengalaman perusahaan-perusahaan yang telah sukses melaksanakan AM, penerapan AM dilakukan dalam tujuh tahap aktivitas. Aktivitas-aktivitas yang dimaksud adalah sebagai berikut (Nakajima, 1988) :

1. Membersihkan. Pembersihan peralatan dengan menghilangkan debu kotoran lainnya dan selama pembersihan masing-masing komponen dapat tersentuh dan terpegang, sehingga pekerja dapat menemukan gangguan-gangguan seperti kelebihan panas, getaran atau hal-hal yang tidak normal lainnya. Dengan adanya aktivitas ini berarti mencegah laju kemerosotan alat serta meningkatkan kualitas inspeksi dan bisa menurunkan waktu reparasi. Hasil lain dari kegiatan ini adalah timbulnya ketertarikan serta tanggung jawab dari pekerja atas peralatannya karena sering kontakannya dengan peralatan serta menumbuhkan kemampuan melalui kegiatan kelompok kecil (*small group activity*).
2. Menangani serta menanggulangi penyebab dan akibat dari debu dan kotoran. Hal ini dilakukan dengan cara menghilangkan sumber-

sumber debu atau kotoran lainnya, menyediakan tempat khusus untuk kotoran dan tidak membuang sampah disembarang tempat. Dan diusahakan supaya semua areal bisa dijangkau dengan mudah untuk keperluan pembersihan, pengecekan dan pelumasan (*lubrication*). Dengan demikian dapat diharapkan berkurangnya waktu yang dibutuhkan untuk pembersihan realibilitas atau kehandalan dari peralatan dengan menghindarkannya dari debu serta kotoran lainnya, serta juga meningkatkan tingkat kemudahan pemeliharaan (*maintainability*) dengan peningkatan pembersihan dan pelumasan. Kegiatan ini memberikan dampak positif bagi anggota grup dengan mengetahui konsep serta teknik-teknik perbaikan dan peningkatan walaupun dalam skala kecil.

3. Menyusun standar pembersihan dan pelumasan. Menyusun standar yang jelas dan baku untuk pembersihan, pelumasan, dan pemeriksaan baut atau sambungan (*bolt tightening*) sehingga memudahkan pelaksanaannya. Demikian juga dengan jadwal serta frekuensinya disusun secara jelas. Target dari aktivitas ini adalah agar kondisi dasar dari peralatan dapat dipertahankan. Sedangkan manfaatnya bagi anggota grup adalah memberikan tambahan pengetahuan, menambah kepercayaan diri dan tanggung jawab, serta merasakan arti dari perlunya menjaga peralatan dengan menyusun serta menerapkan standar yang telah mereka rancang sendiri.

4. Pemeriksaan menyeluruh (*general inspection*). Dengan pemeriksaan secara visual sebagian besar peralatan akan menghambat laju kerusakan serta menaikkan keandalannya. Hal ini dimungkinkan dengan menyelenggarakan pelatihan untuk peningkatan keterampilan dalam mengecek, menemukan cacat melalui pemeriksaan serta memodifikasi peralatan untuk memudahkan pemeriksaan. Manfaat untuk anggota kelompok adalah dapat belajar mengenai seluk beluk peralatan, fungsi masing-masing part, jenis pemeriksaan dan keterampilan dalam memeriksa.

5. Pemeriksaan otomatis (*Autonomous Inspection*). Mengembangkan dan menerapkan AM sesuai dengan standar pemeriksaan, standar

pembersihan dan standar pelumasan untuk lebih memudahkan aktivitas tersebut.

6. Pengorganisasian dan keteraturan. Pengorganisasian berarti mengidentifikasi aspek lingkungan kerja yang akan dikelola serta dibuatnya standar untuk pelestarian lingkungan dan keselamatan kerja. Keteraturan berarti mentaati standar kerja yang sudah dibuat. Manfaat bagi anggota grup adalah menyadari betapa pentingnya untuk menyempurnakan standar an prosedur secara terus menerus berdasarkan pada analisa data aktual.

7. Penerapan secara menyeluruh AM. Aktivitas dalam tahap akhir adalah pelaksanaan terpadu dari semua program AM seperti mengembangkan target perusahaan, peningkatan berkelanjutan berdasarkan data yang didokumentasikan serta analisis-analisis dari kinerja pemeliharaan. Berdasarkan analisis data dapat diketahui kelemahan-kelemahan yang dimiliki oleh peralatan sehingga dapat diantisipasi melalui tindakan-tindakan terencana.

Pemeliharaan dapat dibagi menjadi beberapa macam berdasarkan (Mustofa, 1997): tingkat pemeliharaan, tempat pemeliharaan, periode pemeliharaan, dan dukungan dana pemeliharaan. Berdasarkan Tingkat Pemeliharaan. Penentuan tingkat pemeliharaan pada dasarnya berpedoman pada lingkup/bobot pekerjaan yang meliputi kerumitan, macam dukungan serta waktu yang diperlukan untuk pelaksanaannya. Tiga tingkatan dalam pemeliharaan sistem, yaitu :

a. Pemeliharaan tingkat ringan. Bersifat pencegahan yang dilaksanakan untuk mempertahankan sistem dalam keadaan siap operasi dengan cara sistematis dan periodik memberikan inspeksi, deteksi dan pencegahan awal. Menggunakan peralatan pendukung pemeliharaan secukupnya serta personil dengan kemampuan yang tidak memerlukan tingkat spesialisasi tinggi. Kegiatan antara lain menyiapkan sistem *servicing*, perbaikan ringan.

b. Pemeliharaan tingkat sedang. Bersifat koreksi atau perbaikan, dilaksanakan untuk mengembalikan dan memulihkan sistem dalam keadaan siap dengan memberikan perbaikan atas kerusakan yang telah menyebabkan merosotnya tingkat keandalan. Untuk melaksanakan pekerjaan tersebut didukung dengan peralatan serta fasilitas bengkel yang cukup lengkap. Kegiatannya meliputi:

- Pemeriksaan berkala/periodik bagi sistem.
- Inspeksi terbatas terhadap komponen sistem.
- Perbaikan terbatas pada komponen, perakitan, sub-perakitan dan komponen.
- Modifikasi material seperti ditentukan sesuai dengan kemampuan perbengkelan.
- Perbaikan dan pengetesan sistem.
- Pembuatan/produksi perlengkapan/komponen.
- Pengujian dan kalibrasi/pengukuran
- Pencegahan dan pengendalian korosi

c. Pemeliharaan tingkat berat. Bersifat pemulihan (*restoratif*) dilaksanakan pada sistem yang memerlukan turun mesin (*major overhaul*) atau suatu pembangunan lengkap yang meliputi perakitan, membuat suku cadang, modifikasi, pengujian serta reklamasi sesuai keperluannya. Pemeliharaan tingkat berat meliputi pekerjaan yang luas dan intensif atas suatu sistem. Pekerjaan tersebut mencakup pulih balik, perbaikan yang rumit yang memerlukan pembongkaran total, perbaikan, pemasangan kembali, pengujian serta pencegahan dukungan peralatan serta fasilitas kerja lengkap dan tingkat keahlian personil yang cukup tinggi serta waktu yang relatif lama. Pemeliharaan tingkat berat dikerjakan dibagian yang berat. Tujuan pemeliharaan berat adalah menjamin keutuhan fungsi struktur sistem dan sistemnya dengan menyelenggarakan pemeriksaan mendalam terhadap item atau sub-item dan bagian rangka sistem tertentu pada interval yang telah ditetapkan.

Berdasarkan periode pelaksanaannya, terdiri atas : pemeliharaan terjadwal (*Scheduled Maintenance*) dan pemeliharaan tidak terjadwal (*unschedule Maintenance*).

Berdasarkan tempat pelaksanaan pemeliharaan. Untuk melaksanakan kegiatan pemeliharaan diperlukan adanya suatu tempat pemeliharaan yang disesuaikan dengan macam/ beban kerja yang dihadapi yang dilengkapi dengan peralatan-peralatan yang memenuhi persyaratan tertentu, berharga mahal, sehingga pendaayagunaannya perlu dilakukan secara efektif dan efisien. Oleh karena itu untuk mencegah terjadinya duplikasi kemampuan, maka peralatan disentralisasikan penempatannya di unit-unit pemeliharaan sesuai tempat dan macam pemeliharaan yang dilakukan.

Berdasarkan dukungan dananya, terdiri atas terprogram dan tidak terprogram. Pemeliharaan terprogram atau terencana (*planned maintenance*) adalah pemeliharaan yang diorganisasi dan dilakukan dengan pemikiran ke masa depan, pengendalian dan pencatatan sesuai dengan rencana yang telah ditentukan sebelumnya. Keuntungan dilakukan pemeliharaan jenis ini antara lain:

1. Pengurangan pemeliharaan darurat.

Ini tidak diragukan lagi merupakan alasan utama untuk merencanakan pekerjaan pemeliharaan.

2. Pengurangan waktu nganggur.

Hal ini tidaklah sama dengan pengurangan waktu reparasi pemeliharaan darurat. Waktu yang digunakan untuk pembelian suku cadang, baik dibeli dari dari luar atau dibuat lokal, mengakibatkan waktu menganggur meskipun pekerjaan darurat tersebut misalnya hanya memasang bagian mesin yang tidak lama.

3. Menaikkan ketersediaan mesin untuk produksi.

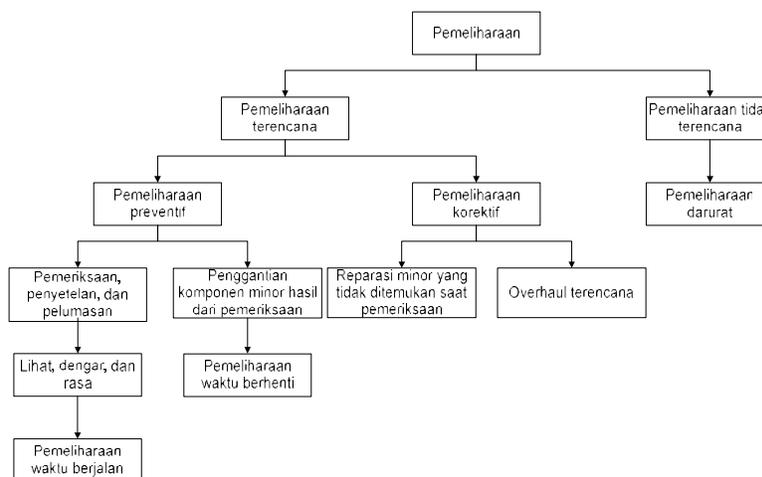
Hal ini erat hubungannya dengan pengurangan waktu nganggur pada mesin atau pelayanan.

4. Meningkatkan penggunaan tenaga kerja untuk pemeliharaan dan produksi.

5. Pengurangan penggantian suku cadang.
6. Meningkatkan efisiensi mesin/peralatan.

Pemeliharaan terencana terdiri dari 3 macam:

1. Pemeliharaan pencegahan (*preventive maintenance* - PM) adalah kegiatan pemeliharaan yang dilakukan pada selang waktu yang ditentukan sebelumnya, atau terhadap kriteria lain yang diuraikan, dan dimaksudkan untuk mengurangi kemungkinan bagian-bagian lain tidak memenuhi kondisi yang bisa diterima. Ruang lingkup pekerjaan pencegahan termasuk inspeksi, perbaikan kecil, pelumasan dan penyetelan, sehingga peralatan atau mesin-mesin selama beroperasi terhindar dari kegagalan. Secara umum tujuan dari pemeliharaan jenis ini adalah:
 - a. Meminimumkan waktu kegagalan (*downtime*) serta meningkatkan efektivitas mesin/peralatan dan menjaga agar mesin dapat berfungsi tanpa ada gangguan
 - b. Meningkatkan efisiensi dan umur ekonomis mesin/peralatan



Gambar 1.6. Jenis Strategi Pemeliharaan (Corder, 1992)

Kegiatan PM dapat digolongkan menjadi dua kategori yaitu:

(1) Pemeliharaan pencegahan rutin adalah semua aktivitas yang berkaitan dengan pembersihan dan aktivitas rutin yang dilakukan oleh operator mesin. Dengan adanya keterlibatan operator mesin terhadap kegiatan ini dapat mengurangi keterlibatan personel pemeliharaan dalam mengerjakan tugas harian ini.

(2) Pemeliharaan pencegahan mayor dilakukan sepenuhnya oleh personel pemeliharaan karena aktivitas yang dilakukan lebih membutuhkan banyak waktu, membutuhkan kemampuan membetulkan mesin dibandingkan dengan aktivitas rutin dan biasanya menyebabkan mesin dimatikan sesuai dengan jadwal pemeliharaan.

2. Pemeliharaan perbaikan (*corrective maintenance* – CM) adalah pemeliharaan yang dilakukan untuk memperbaiki suatu bagian termasuk penyetelan dan reparasi yang telah terhenti untuk memenuhi suatu kondisi yang bisa diterima. Dalam perbaikan dapat dilakukan peningkatan-peningkatan sedemikian rupa, seperti melakukan perubahan atau modifikasi rancangan agar peralatan menjadi lebih baik. Pemeliharaan ini bertujuan untuk mengubah mesin sehingga operator yang menggunakan mesin tersebut menjadi lebih mudah dan dapat memperkecil kegagalan mesin.

3. Pemeliharaan prediksi (*predictive maintenance*) adalah pemeliharaan pencegahan yang diarahkan untuk mencegah kegagalan suatu sarana dan dilaksanakan dengan memeriksa mesin-mesin tersebut pada selang waktu yang teratur dan ditentukan sebelumnya, pelaksanaan tingkat reparasi selanjutnya tergantung pada apa yang ditemukan selama pemeriksaan,

Bentuk pemeliharaan terencana yang paling maju ini merupakan teknik penggantian komponen pada waktu yang sudah ditentukan sebelum terjadi kegagalan, baik berupa kegagalan total ataupun titik dimana pengurangan mutu telah menyebabkan mesin bekerja di

bawah standar yang ditetapkan oleh pemakainya. Bagaimanapun baiknya suatu mesin dirancang, tidak bisa dihindari lagi pasti terjadi sejumlah keausan dan memburuknya kualitas mesin. Sesudah mengoptimalkan desain untuk mesin dengan metode perancangan pengurangan pemeliharaan, tetap saja kita masih mengetahui bahwa bagian-bagian mesin akan aus, berkurang kualitasnya dan akhirnya rusak dengan tingkat yang dapat diramalkan jika dipakai pada kondisi penggunaan normal konstan.

Pada pemeliharaan tidak terencana (*unplanned maintenance*) hanya ada satu jenis pemeliharaan yang dapat dilakukan yaitu pemeliharaan darurat (*emergency maintenance*). Pemeliharaan jenis ini adalah pemeliharaan yang dilakukan seketika ketika mesin mengalami kegagalan yang tidak terdeteksi sebelumnya. Pemeliharaan darurat dilakukan untuk mencegah akibat serius yang akan terjadi jika tidak dilakukan penanganan segera.

Tindakan-tindakan yang dapat diambil dalam kegiatan pemeliharaan berkaitan dengan strategi pemeliharaan di atas berupa:

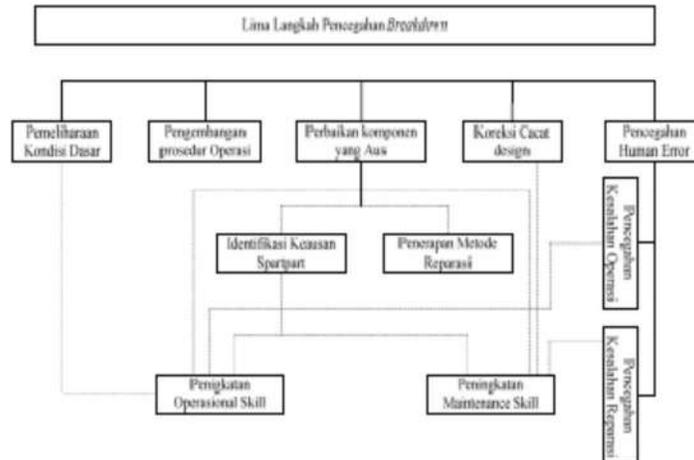
1. Pemeriksaan (*inspection*) yaitu kegiatan yang ditujukan pada sistem atau mesin untuk memeriksa atau mengetahui apakah sistem berada pada kondisi yang diharapkan.
2. Pergantian komponen (*replacement*) yaitu tindakan mengganti komponen yang rusak atau tidak sesuai kondisi yang diinginkan. Tindakan ini mungkin dilakukan secara mendadak atau dengan perencanaan pencegahan terlebih dahulu.
3. Pelayanan (*service*) yaitu tindakan yang bertujuan untuk menjaga suatu mesin atau sistem yang biasanya telah diatur dalam buku petunjuk pemakaian.
4. Perbaikan (*repair*) yaitu tindakan perbaikan minor yang dilakukan pada saat terjadi kegagalan kecil.
5. Turun mesin (*overhaul*) yaitu kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara keseluruhan dalam skala besar yang biasa dilakukan pada akhir periode tertentu.

Beberapa kriteria yang perlu diperhatikan dalam menentukan kebijakan pemeliharaan yaitu:

1. Meminimalkan biaya pemeliharaan, yaitu mengurangi biaya yang terjadi akibat kegagalan mesin.
2. Meminimalkan kerusakan (*breakdown*) yaitu mengurangi frekuensi atau jumlah mesin berhenti akibat terjadinya kegagalan mesin guna mengurangi biaya kehilangan produksi.
3. Meminimalkan waktu kerusakan (*downtime*), yaitu mengurangi tenggang waktu yang dibutuhkan dari mesin tidak dapat digunakan sampai mesin dapat digunakan kembali.
4. Memaksimalkan ketersediaan, dengan meminimalkan waktu kerusakan maka tingkat ketersediaan atau kesiapan mesin akan bertambah.

Pada Gambar 1.7 terlihat bahwa ada lima tindakan yang harus dilakukan untuk mengatasi dan menghindarkan terjadinya kegagalan karena kerusakan yang tidak kentara (terselubung) tersebut, antara lain : (Nakajima, 1988)

1. Memelihara kondisi dasar dari peralatan seperti kebersihan, pelumasan serta mengencangkan baut/sambungan (*plumbing*).
2. Memelihara atau mempertahankan kondisi operasi seperti menjalankan mesin pada kapasitasnya, menjaga temperatur mesin pada temperatur yang diijinkan sesuai dengan *Standard Operational Procedure* (SOP) yang telah dibuat berdasarkan spesifikasi serta kondisi alat.



Gambar 1.7. Lima Langkah Pencegahan Kegagalan
(Nakajima, 1988)

3. Memulihkan atau memperbaiki alat yang sudah buruk kondisinya. Dalam pemulihan dan perbaikan ini bukan hanya untuk bagian yang rusak saja, tetapi juga perlu mengadakan penggantian atau perbaikan sebelum bagian tersebut rusak yang dapat menyebabkan terhentinya alat. Hal ini akan bisa dilakukan bila kondisi peralatan selalu dicek secara rutin.

4. Mengoreksi kelemahan perancangan. Kadang-kadang pemeliharaan sudah dilakukan dengan baik dan benar, tetapi masih terjadi kerusakan yang sama pada peralatan. Hal ini sering terjadi mungkin karena adanya kesalahan atau kelemahan dalam perancangan baik dalam pemeliharaan materialnya, dimensinya maupun konstruksinya sendiri.

5. Tindakan yang terakhir merupakan tindakan yang paling penting dalam mencegah terjadinya kerusakan atau kegagalan alat adalah peningkatan kemampuan manusianya dalam hal ini pekerja atau operator yang menjalankan mesin tersebut. Hal ini sangat penting karena banyak kegagalan atau kerusakan yang disebabkan oleh kesalahan manusia karena kurangnya pengetahuan dan keahlian operator akan alat serta fungsi atau cara kerja alat tersebut.

Kelima tindakan diatas harus bisa dilakukan bersama-sama dan terpadu baik oleh orang pemelihara maupun orang operasi. Meninggalkan salah satu langkah diatas akan mengakibatkan selalu terjadinya gangguan atau kerusakan yang pada akhirnya menimbulkan kegagalan atau kerugian yang cukup besar. Dalam melaksanakan kelima tindakan tersebut kerjasama operasi dan pemeliharaan mutlak diperlukan. Selain itu kegiatan lain yang juga penting untuk bagian pemeliharaan adalah:

- a. Selalu mengembangkan teknologi pemeliharaan
- b. Menyusun standar pemeliharaan.
- c. Mengevaluasi hasil pekerjaan pemeliharaan.
- d. Bekerjasama dengan bagian teknik dan perancangan.

Adanya berbagai jenis kegiatan, strategi, dan kebijakan pemeliharaan di atas diharapkan dapat menjadi alternatif untuk melakukan pemeliharaan sesuai dengan kondisi yang dialami di perusahaan. Sebaiknya pemeliharaan yang baik adalah pemeliharaan yang tidak mengganggu jadwal produksi atau dijadwalkan sebelum kegagalan mesin terjadi sehingga tidak mengganggu produktivitas mesin.

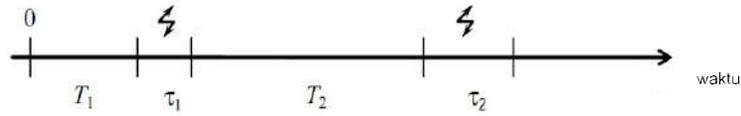
1.4 Proses produksi dan pemeliharaan

Fungsi pemeliharaan berhubungan erat dengan proses produksi, yaitu (Supandi, 1990) :

- a. Peralatan yang digunakan terus untuk berproduksi adalah hasil adanya pemeliharaan.
- b. Aktivitas pemeliharaan berhubungan erat dengan pemakaian peralatan, bahan pekerjaan, cara penanganan, dan lain-lain.
- c. Aktivitas pemeliharaan harus dikontrol berdasarkan pada kondisi terjaga.

Daur hidup suatu komponen di dalam sistem produksi ditentukan oleh: pertama, periode-periode *uptime* saat komponen tersebut

bekerja dengan benar dalam kondisi nominal, kedua oleh periode-periode waktu ketika komponen tersebut bekerja tapi tidak pada kondisi seperti yang diharapkan, dan ketiga oleh periode-periode ketika komponen itu berhenti bekerja karena kegagalan dan memerlukan perbaikan. Perilaku itu bisa dilihat pada Gambar 1.8.



T_i : waktu bekerja dalam kondisi nominal (*uptime*)

τ_i : waktu kegagalan atau waktu tidak bekerja dalam kondisi nominal atau waktu reparasi

Gambar 1.8. Periode waktu pada daur hidup komponen
(Manzini *et al.*, 2010)

Secara umum, komponen dianggap sebagai subyek yang akan mengalami kegagalan dan penurunan fungsi seiring berjalannya waktu namun dapat diperbaiki dengan kegiatan restorasi. Keduanya, waktu kegagalan dan waktu perbaikan, merupakan variabel acak. Yang perlu diingat, di sini akan terdapat jenis-jenis kegagalan, perbaikan dan komponen/sistem yang berbeda-beda.

Pemeliharaan adalah suatu fungsi yang mengawasi dan menjaga pabrik, peralatan dan fasilitas tetap bekerja. Karenanya pemeliharaan harus merancang, mengatur, membawa dan memeriksa kerja tersebut untuk menjamin komponen berfungsi nominal selama waktu kerja " T_i " (*uptimes*) dan untuk meminimasi interval-interval henti (*downtimes*) yang disebabkan kegagalan atau perbaikan.

Suatu mesin produksi dikatakan dalam kondisi baik apabila dapat menjalankan fungsinya secara tepat dan benar mesti digunakan secara berulang kali. Pemilihan program atau kebijakan pemeliharaan secara langsung mempengaruhi kelangsungan produktivitas mesin produksi. Karena itu, perlu dipertimbangkan secara cermat mengenai bentuk pemeliharaan yang akan digunakan terutama berkaitan dengan

kebutuhan produksi, waktu, biaya, keandalan tenaga pemeliharaan, dan kondisi peralatan yang dikerjakan.

Dalam menentukan strategi pemeliharaan, banyak ditemui kesulitan-kesulitan diantaranya tenaga kerja yang terampil, ahli teknik yang berpengalaman, instrumentasi yang cukup mendukung, dan kerja sama yang baik diantara bagian pemeliharaan. Selain itu, faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihan strategi pemeliharaan yakni umur peralatan/mesin produksi, tingkat kapasitas pemakaian mesin, kesiapan suku cadang, kemampuan bagian pemeliharaan untuk bekerja cepat, situasi pasar, dan kesiapan dana merupakan aspek-aspek lain yang mendukung keberhasilan kegiatan pemeliharaan.

Berdasarkan uraian-uraian mengenai pemeliharaan di atas maka dapat disimpulkan bahwa elemen kegiatan pemeliharaan terdiri dari :

- a. Obyek yang dipelihara (komponen, sistem, mesin, peralatan, dan sebagainya),
- b. Kuantitas dan kualitas tenaga kerja (teknisi),
- c. Ketersediaan suku cadang dan teknologi pemeliharaan (termasuk bengkel), dan
- d. Kebijakan atau strategi sistem pemeliharaan

Manajemen pemeliharaan adalah perencanaan, pengelolaan dan pengendalian dari keempat faktor tersebut. Dengan adanya manajemen pemeliharaan yang baik, maka tujuan utama dari pemeliharaan dapat tercapai. Kebijakan pemeliharaan adalah persyaratan yang harus dipenuhi, agar tujuan pemeliharaan tersebut dapat terpenuhi. Kebijakan pemeliharaan meliputi:

1. Unsur apa, menjelaskan proses pemeliharaan yang harus dilakukan terhadap proses tersebut.
2. Unsur bilamana, menjelaskan waktu dan *interval* waktu pemeliharaan.
3. Unsur dimana, menjelaskan tempat fasilitas yang digunakan untuk melaksanakan pemeliharaan.

4. Unsur bagaimana, menjelaskan standar *engineering* dan prosedur yang diberlakukan dalam melaksanakan pemeliharaan.
5. Unsur oleh siapa, menjelaskan siapa yang bertanggung jawab terhadap pelaksanaan pemeliharaan

RINGKASAN

1. Pemeliharaan didefinisikan sebagai kombinasi dari semua kegiatan teknis, tindakan administratif, dan manajerial selama siklus hidup item, yang dimaksudkan untuk mempertahankannya atau mengembalikannya ke tingkat dimana item tersebut dapat berfungsi sesuai kebutuhan perusahaan
2. Tujuan kegiatan pemeliharaan pada semua kasus adalah tidak menghindari dan menghilangkan kegagalan peralatan tetapi menghindari konsekuensi dari kegagalan yang terjadi pada masing-masing kasus.
3. Manajemen pemeliharaan adalah semua kegiatan manajemen yang menetapkan tujuan pemeliharaan atau prioritas, strategi, dan wewenang serta mengimplementasikan hal-hal tersebut mulai dari perencanaan, pengendalian dan pengawasan serta pemanfaatan metode-metode perbaikan dengan melibatkan aspek ekonomi dalam suatu organisasi.
4. Manajemen pemeliharaan yang terencana adalah pengaturan kegiatan pemeliharaan yang tidak mengganggu jadwal produksi dan dapat mendukung pencapaian target produksi perusahaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Assauri, S., 1993, *Manajemen Produksi dan Operasi*, Edisi Keempat, UII, Yogyakarta.
- CEN (European Committee for Standardization), 2001, EN 13306:2001 *Maintenance Terminology*, European Standard, Brussels.
- Chuenusa C., Ramnik B., Fiju A., 2004, The status of maintenance management in UK manufacturing organizations: result from a pilot survey, *Journal Quality Maintenance Engineering*, 10(1):5-15

- Corder, A. S., 1992, *Teknik Manajemen Pemeliharaan*, Penerbit Erlangga, Jakarta
- Ebeling, C.E., 1997, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, The McGraw-Hill Companies Inc, Singapore.
- Manzini, R., Regattieri, Pham, and Ferrari., 2010, *Maintenance for Industrial System*, Springer, New York.
- Moubray, J., 1997, *Reliability Centered Maintenance*, Industrial Press Inc. 2nd Edition., New York.
- Mustofa, Agus. 1997, *Diktat Kuliah Manajemen Perawatan*, Edisi Pertama, Yogyakarta.
- Nakajima, Seiichi, 1988, *Introduction to Total Productive Maintenance*, Productivity Press, Inc., Cambridge, Massachusetts.
- Supandi, 1990, *Manajemen Perawatan Industri*, Geneca Exact, Bandung.

PERTANYAAN

1. Jelaskan pengertian dan konsep dasar pemeliharaan?
2. Apa yang menjadi prinsip tujuan dari kegiatan pemeliharaan?
3. Bagaimana kita memilih strategi atau kebijakan kegiatan pemeliharaan? Jelaskan dengan rinci!
4. Apa fungsi kegiatan pemeliharaan dalam sistem produksi?

TUGAS

Pilihlah tiga macam peralatan yang berada disekitarmu. Tentukan jenis kegiatan pemeliharaan yang dapat dilakukan pada peralatan tersebut. Berikan alasan pemilihan strategi tersebut!

BAB II KONSEP KEANDALAN SISTEM

2.1 Konsep keandalan sistem

Menurut IEEE, keandalan adalah kemampuan sistem atau komponen untuk memenuhi fungsi yang dibutuhkan dalam kondisi tertentu selama rentang waktu yang spesifik. Suatu peralatan atau mesin dapat dikatakan andal apabila peralatan atau mesin tersebut dapat berfungsi secara optimal. Keandalan dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu produk untuk menjalankan tugasnya dengan fungsinya dalam kondisi tertentu dan dalam suatu periode waktu tertentu. Keandalan produk dipengaruhi oleh frekuensi kegagalan pada produk tersebut. Dengan demikian semakin sering frekuensi terjadi kegagalan pada suatu produk maka semakin rendah keandalan sistem tersebut. Berdasarkan definisi di atas, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, yaitu:

- a. **Probabilitas**, dimana nilai keandalan berada diantara 0 dan 1.
- b. **Kemampuan yang diharapkan** harus digambarkan secara terang atau jelas. Untuk setiap unit terdapat suatu standar untuk menentukan apa yang dimaksud dengan kemampuan yang diharapkan.
- c. **Tujuan yang diinginkan**, dimana kegunaan peralatan harus spesifik. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa tingkatan dalam memproduksi barang.
- d. **Waktu** merupakan parameter yang penting untuk melakukan penilaian kemungkinan suksesnya suatu sistem.
- e. **Kondisi Lingkungan** mempengaruhi umur dari sistem atau peralatan seperti suhu, kelembaban, dan kecepatan gerak. Hal ini menjelaskan bagaimana perlakuan yang diterima sistem dapat memberikan tingkat keandalan yang berbeda dalam kondisi operasionalnya.

Beberapa karakteristik sistem yang dapat digunakan untuk menjelaskan keandalan sistem adalah sebagai berikut:

1. Fungsi keandalan $R(t)$

Fungsi keandalan menunjukkan prosentase sistem dapat beroperasi lebih dari t waktu.

2. Laju kegagalan λ

Laju kegagalan menunjukkan banyaknya kegagalan yang terjadi dalam interval waktu yang ditetapkan. Laju kegagalan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\text{banyaknya kegagalan yang terjadi}}{\text{jumlah jam kerja}} \quad (2.1)$$

3. Rata-rata waktu antar kegagalan (*mean time between failure* - MTBF)

MTBF adalah rata-rata jarak antara waktu kegagalan yang satu dengan waktu kegagalan yang lain secara berurutan untuk sistem yang dapat diperbaiki (*repairable*). Sedangkan karakteristik ini untuk sistem yang bersifat tidak dapat diperbaiki diistilahkan dengan *mean time to failure* (MTTF). Rata-rata waktu tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{MTBF atau MTTF} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.2)$$

4. Rata-rata waktu perbaikan (*mean time to repair* - MTTR)

MTTR menunjukkan rata-rata interval waktu yang digunakan untuk mengembalikan komponen yang gagal kembali kedalam kondisi operasionalnya.

Kegagalan (*failure*) didefinisikan sebagai ketidakmampuan suatu item untuk menjalankan fungsinya. Dalam rancangan teknik, kegagalan dapat diklasifikasikan dalam empat jenis kegagalan yaitu:

1. Kegagalan perangkat keras (*hardware failure*), yaitu kegagalan suatu komponen untuk berfungsi sesuai dengan tujuan rancangan.

2. Kegagalan perangkat lunak (*software failure*), yaitu kegagalan sistem lunak pada peralatan sehingga item tidak berfungsi sesuai dengan rancangannya.
3. Kegagalan operator (*human failure*), yaitu kegagalan yang disebabkan oleh kesalahan operator karena tidak mengikuti instruksi atau gagal memberi respon terhadap kondisi darurat.
4. Kegagalan organisasional (*organizational failure*), yaitu kegagalan pada organisasi untuk mendukung sistem secara tepat.

Sebuah sistem dianggap gagal beroperasi apabila mengalami tiga hal sebagai berikut:

1. Ketika sistem tersebut menjadi tidak dapat dioperasikan sama sekali.
2. Ketika sistem tersebut masih dapat beroperasi tetapi tidak dapat berfungsi lagi sebagaimana mestinya.
3. Ketika kegagalan serius telah membuat benda tersebut menjadi tidak handal atau tidak aman untuk digunakan terus sehingga memerlukan perbaikan atau penggantian.

Jenis kegagalan (*mode failure*) dapat diartikan sebagai cara suatu item atau sistem dapat berpotensi gagal memenuhi fungsinya. Secara umum jenis kegagalan dapat disebabkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah :

1. Pabrikasi : dimensional.
2. Perakitan : komponen yang terlepas.
3. Penerimaan : membeli komponen yang rusak.
4. Pengujian : menerima komponen yang tidak memenuhi spesifikasi.

2.2. Formulasi Dasar Model Kegagalan

Misalkan T adalah variabel acak kontinu non-negatif yang menyatakan waktu kegagalan sistem dan $f(t)$ menyatakan fungsi kepadatan

(*density function*) densitas dari T , yang memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

$$f(t) \geq 0 \quad (2.3)$$

$$\int_0^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (2.4)$$

Maka kegagalan komponen tersebut dapat dijelaskan melalui beberapa cara. Model yang paling mendasar adalah fungsi distribusi kumulatif yang sering disingkat dengan fungsi distribusi $F(t)$. Fungsi ini didefinisikan sebagai peluang sistem akan hidup sampai waktu t , yang dinyatakan sebagai berikut:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t)dt \quad (2.5)$$

Seringkali model kegagalan juga dinyatakan dalam bentuk keandalan (*reliability*) $R(t)$ atau dalam bentuk fungsi bertahan (*survivor*) $S(t)$, yang merupakan peluang sistem akan hidup lebih dari t yang dinyatakan sebagai berikut:

$$R(t) = P(T > t) = \int_0^{\infty} f(t)dt \quad (2.6)$$

Konsep lain yang berhubungan dengan kegagalan suatu sistem adalah fungsi bahaya (*hazard*) $h(t)$, yang didefinisikan sebagai:

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (2.7)$$

Fungsi bahaya menyatakan laju kegagalan sesaat dari sistem pada waktu t dengan syarat bahwa sistem tersebut akan hidup sampai waktu t . Hubungan antara fungsi densitas, distribusi, keandalan dengan fungsi bahaya adalah sebagai berikut:

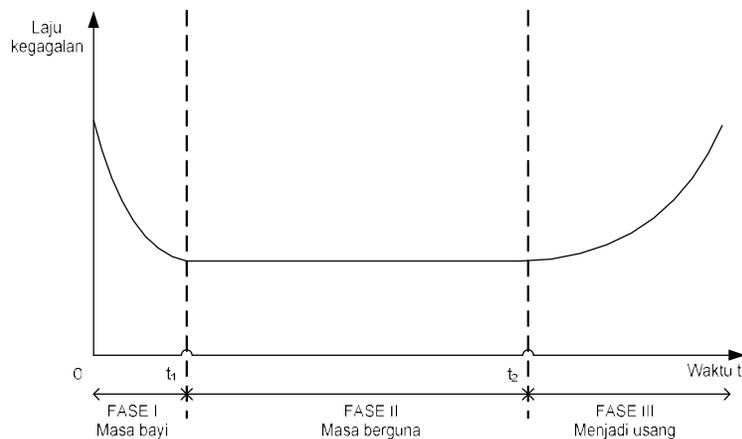
$$f(t) = h(t) \exp \left[- \int_0^t h(x)dx \right] \quad (2.8)$$

$$F(t) = 1 \exp \left[- \int_0^t h(x)dx \right] \quad (2.9)$$

$$S(t) = \exp\left[-\int_0^t h(x)dx\right] \quad (2.10)$$

Pada dasarnya laju kegagalan (*failure rate*) atau tingkat kegagalan didefinisikan sebagai kegagalan suatu sistem per satuan waktu tertentu. Laju kegagalan pada awalnya adalah lebih tinggi daripada yang diantisipasi, tetapi lambat laun menurun dan mendatar selama periode normal, dan mendekati usia tertentu laju kegagalan akan naik.

Pada dasarnya laju kegagalan akan berubah sepanjang umur dari populasi sistem atau komponen sehingga laju kegagalan akan tergantung pada perubahan waktu. Kurva laju kegagalan merupakan kurva yang menggambarkan laju kegagalan dari suatu keadaan peralatan berproduksi. Dari hasil percobaan dan pengalaman laju kegagalan suatu komponen akan mengikuti pola dasar seperti terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Kurva Laju Kegagalan Sistem (Rao, 1992)

Dari Gambar 2.1, tampak bahwa kurva laju kegagalan terdiri dari tiga daerah yang dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Periode bayi (*infant period*) berada dalam interval waktu 0 sampai t_1 ($0 < t < t_1$).

Periode ini menjelaskan bahwa alat-alat yang baru diproduksi oleh pabrik apabila digunakan pada mulanya untuk suatu masa tertentu memiliki tingkat kegagalan tertentu yang tidak nol. Terdapat beberapa alasan munculnya kegagalan operasi suatu komponen pada periode I ini, antara lain :

- a. Pengendalian kualitas komponen kurang baik.
- b. Metoda pemrosesan di pabrik yang kurang baik.
- c. Penggunaan material dibawah standar.
- d. Cara menghidupkan atau menyalakan dan instalasi yang salah.
- e. Kegagalan-kegagalan dalam perakitan.
- f. *Debugging* yang tidak tepat.
- g. Kesalahan manusia dan proses.
- h. Metoda penanganan bahan (*material handling*) yang kurang baik dan kesalahan dalam pengepakan.

Laju kegagalan dalam periode I bersifat menurun (*decreasing failure rate*- DFR) dan dapat didekati menggunakan distribusi hiper-eksponensial ataupun Weibull.

2. Periode penggunaan (*useful life period*) berada dalam interval waktu t_1 sampai dengan t_2 ($t_1 < t < t_2$).

Periode ini merupakan suatu periode masa penggunaan item dengan laju kegagalan komponen yang bersifat konstan atau stabil. Hal ini berarti laju kegagalan tidak akan naik walaupun umur item bertambah. Terdapat beberapa alasan munculnya kegagalan dalam periode II, antara lain :

- a. Kegagalan yang tidak dapat dijelaskan (tidak menentu).
- b. Kesalahan manusia, melampaui masa pakai kegagalan secara alamiah.
- c. Kegagalan yang tidak dapat dihindarkan, dalam hal ini pemeliharaan preventif menjadi tidak dapat bermanfaat.

- d. Cacat yang tidak dapat ditemukan.
- e. Faktor-faktor keamanan yang rendah.
- f. Tekanan-tekanan yang timbul secara acak melebihi dari pada yang diharapkan.

Distribusi kegagalan dalam periode ini dapat didekati menggunakan distribusi eksponensial negatif.

3. Periode kemerosotan (*wear-out period*)

Pada fase ini laju kegagalan cenderung meningkat (*increasing failure rate* – IFR). Hal ini berarti kegagalan bertambah sesuai pertambahan umur peralatan atau mesin. Beberapa alasan yang mendorong timbul kegagalan pada periode III antara lain :

- a. Pemeliharaan yang tidak tepat.
- b. Pemakaian yang salah karena gesekan.
- c. Pemakaian karena komponen telah disimpan lama atau penuaan komponen.
- d. Berkarat serta kegagalan yang timbul secara perlahan-lahan.
- e. Telah dirancang masa produk terpendek.

Distribusi kegagalan dalam periode ketiga dapat didekati menggunakan distribusi normal ataupun distribusi Weibul.

2.3. Distribusi Kegagalan

Secara garis besar komponen-komponen dalam suatu mesin dapat digolongkan menjadi dua golongan :

1. Komponen yang bersifat tidak rusak walaupun dipakai berulang kali. Komponen jenis ini disebut komponen yang permanen, misalnya *body frame* atau *chast* dari kendaraan.
2. Komponen yang sering rusak karena dipakai berulang kali. Komponen jenis ini disebut komponen yang rusak karena dipakai, misalnya gerigi atau rantai dari kendaraan.

Dalam melakukan kegiatan pemeliharaan, menghilangkan kegagalan pada mesin yang kompleks tidaklah mungkin. Oleh karena itu, yang dapat dilakukan hanyalah meminimumkan kemungkinan terjadinya kegagalan dengan mengetahui mesin yang kritis sehingga kegiatan pemeliharaan dapat diarahkan ke mesin tersebut karena hal ini dapat memberikan kontribusi yang besar terhadap pengurangan kegagalan.

1. Kriteria mesin kritis menurut *Brady* dan *Kier* (1971) adalah sebagai berikut:

- a. Kegagalan pada mesin dapat membahayakan kesehatan dan keselamatan operator mesin.
- b. Kegagalan mesin dapat mengakibatkan kualitas produk menurun.
- c. Kegagalan mesin akan dapat menghentikan produksi secara keseluruhan.
- d. Investasi yang dikeluarkan untuk mesin tersebut sangat tinggi.

Kriteria ini masih bersifat kualitatif, sehingga belum bisa membandingkan secara kuantitatif tingkat kekritisannya antara satu mesin dengan mesin lainnya.

2. *Haas* (1992) menyatakan ada tiga parameter yang dapat dipakai untuk menentukan nilai kritis mesin, yaitu:

- a. Konsekuensi yang timbul bila terjadi kegagalan mesin.
- b. Kemungkinan terjadinya kegagalan pada mesin.
- c. Bisa atau tidaknya terjadinya kegagalan diprediksi.

Untuk mengetahui konsekuensi kegagalan pada mesin maka perlu dipahami mengenai proses produksinya. Nilai ditentukan untuk setiap konsekuensi dan dibuat rangking untuk seluruh jenis akibat yang timbul oleh kegagalan mesin. Tujuan dari pengelompokan mesin kritis adalah untuk mengatasi beberapa kendala seperti kondisi lingkungan produksi, terbatasnya sumber daya, dan biaya produksi sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas kegiatan pemeliharaan.

3. Menurut *Takahashi* (1990) untuk maksimasi efisiensi dan efektivitas kegiatan pemeliharaan pencegahan perlu

mengelompokkan mesin atau peralatan dalam peralatan kritis. Hal ini dimaksudkan untuk mengatasi beberapa kendala seperti kondisi lingkungan produksi, terbatasnya sumber daya manusia, dan biaya produksi. Menurut tinjauan produksi, peralatan kritis didefinisikan sebagai berikut:

- a. Peralatan yang sering mengalami kegagalan.
- b. Peralatan yang tidak mempunyai cadangan ataupun kapasitas lebih.
- c. Bila peralatan rusak akan menurunkan total hasil secara signifikan.
- d. Bila peralatan rusak akan berakibat banyak produk yang terganggu penyelesaiannya.
- e. Bila peralatan rusak akan mengganggu waktu produksi.
- f. Bila peralatan rusak akan membuat seluruh produksi menjadi terlambat.

Secara kualitas peralatan kritis didefinisikan sebagai berikut:

- a. Bila peralatan rusak akan berpengaruh besar terhadap kualitas produk.
- b. Bila peralatan rusak akan berpengaruh terhadap variasi kualitas produk.

Menurut Ebeling (1997), terdapat dua pendekatan umum untuk menyesuaikan distribusi keandalan dengan data kegagalan. Metode pertama, yang juga biasa dipakai, adalah untuk menyesuaikan data yang dikumpulkan dengan distribusi teoritis misalnya distribusi eksponensial, Weibull, normal atau lognormal. Karena menurut Jardine (1973), pengetahuan mengenai statistik dan peluang sangat diperlukan karena banyak ketidakpastian terdapat pada area pemeliharaan, yaitu ketidakpastian mengenai kapan peralatan akan mengalami kegagalan. Metode kedua adalah mendapatkan fungsi keandalan dan fungsi laju kegagalan langsung dari data, atau berdasarkan pengalaman.

Untuk metode yang kedua, pengumpulan data kegagalan maupun perbaikan adalah dengan memisalkan waktu kegagalan maupun

waktu perbaikan yang berurutan dengan t_1, t_2, \dots, t_n . Dengan t_i menyatakan waktu kegagalan unit ke- i (atau jika untuk waktu perbaikan, t_i adalah waktu repair ke- i yang diobservasi). Sumber data untuk waktu antar kegagalan ada dua yaitu data operasional atau data lapangan yang menunjukkan penggunaan komponen atau sistem dan data kegagalan yang diobservasi dari pengujian keandalan. Terdapat dua tipe data yang dikumpulkan, yaitu:

1. Tipe Data I

Pengujian berhenti setelah beberapa lama (T yang telah ditentukan sebelumnya). Jika sudah mencapai T , maka pengujian selesai. Biasanya tipe data I digunakan jika langsung dilakukan pengujian, tidak menggunakan data historis.

2. Tipe Data II

Pengujian berhenti setelah terjadi sekian kegagalan. Waktu pengujian adalah waktu ketika kegagalan yang terakhir terjadi. Biasanya tipe data II digunakan untuk menganalisis data historis kegagalan.

Distribusi kegagalan merupakan bentuk matematis usia dan fase kegagalan mesin atau peralatan. Karakteristik kegagalan dari setiap peralatan akan mempengaruhi bentuk pendekatan yang digunakan dalam menguji kesesuaian dan menghitung parameter fungsi distribusi kegagalan. Karakteristik kegagalan dari setiap peralatan pada umumnya tidak sama terutama jika dioperasikan pada kondisi lingkungan yang berbeda. Suatu peralatan yang memiliki karakteristik dan dioperasikan dalam kondisi yang sama juga mungkin akan memberikan nilai selang waktu antar kegagalan yang berlainan.

Dalam menganalisa masalah pemeliharaan mesin, sering digunakan beberapa jenis distribusi kegagalan yang termasuk dalam daerah-daerah pada berbagai pola kegagalan mesin.

Distribusi Eksponensial

Distribusi eksponensial mempunyai laju kegagalan yang tetap terhadap waktu. Dengan kata lain, bahwa probabilitas terjadinya kegagalan tidak tergantung pada umur alat. Kegagalan yang terjadi secara acak biasanya akan mengikuti distribusi ini. Distribusi ini banyak digunakan dalam perhitungan keandalan dan sesuai untuk memperinci kegagalan peralatan yang disebabkan oleh komponennya. Parameter yang digunakan dalam distribusi ini adalah λ yaitu rata-rata kedatangan kegagalan yang terjadi.

- a. Fungsi kepadatan kegagalan

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad t > 0 \quad (2.11)$$

- b. Fungsi distribusi kegagalan

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.12)$$

- c. Fungsi keandalan

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.13)$$

- d. Laju kegagalan

$$\lambda(t) = \lambda \quad (2.14)$$

- e. Rataan dan variansi distribusi eksponensial

$$\mu = \frac{1}{\lambda} \quad \text{dan} \quad \sigma = \frac{1}{\lambda} \quad (2.15)$$

Distribusi Weibull

Distribusi ini merupakan distribusi yang sangat penting dan sering digunakan untuk memodelkan keandalan suatu peralatan. Hal ini disebabkan karena distribusi ini bersifat fleksibel, yakni dapat memenuhi beberapa periode kegagalan yang terjadi yaitu periode awal, periode normal operasi dan periode pengausan akhir. Selain itu distribusi Weibull juga mampu menggambarkan bentuk kegagalan yang menyangkut komponen non-elektronik. Dalam distribusi Weibull terdapat tiga parameter, yaitu :

- a. Parameter lokasi (t_0), merupakan nilai waktu kegagalan minimum dan biasanya bernilai nol(0).
- b. Parameter bentuk (β), merupakan parameter yang tidak memiliki dimensi dan nilai dari parameter ini sangat berpengaruh dalam bentuk distribusi, jika parameter bentuk berubah maka distribusi berubah.
- c. Parameter skala (η), merupakan skala dari ukuran nilai dalam rentang distribusi. Perubahan nilai η ini tidak mengubah bentuk distribusi hanya melebarkan dan mengempitkan rentang distribusinya saja.

Fungsi-fungsi yang terdapat dalam distribusi Weibull adalah :

- a. Fungsi kepadatan kegagalan

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2.16)$$

untuk $t \geq 0, \alpha$ dan $\eta > 0$

- b. Fungsi distribusi kegagalan

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2.17)$$

- c. Fungsi keandalan

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2.18)$$

- d. Laju kegagalan

$$\beta \frac{(t-t_0)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (2.19)$$

- e. Rata-rata waktu antar kegagalan

$$t_0 + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.20)$$

- f. Standar Deviasi

$$(\sigma) = \eta \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - r^2 \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

$\Gamma(x) = \int t^{x-1} e^{-t} dt$, dimana $x > 0$ merupakan fungsi gamma. Hubungan

nilai x dan integral adalah :

$$\Gamma(x) = (x-1)!$$

$$\Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$$

$$\Gamma(n+1) = n!, n = 0, 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\Gamma(n) = \Gamma\left(\frac{n+1}{n}\right) \text{ untuk } n > 0$$

g. Koefisiensi Variansi

$$Vc = \frac{\sigma}{MTBF - t_0} \quad (2.22)$$

Kasus-kasus khusus dalam distribusi Weibull

a. Jika $\beta = 1$, pada distribusi Weibull maka status distribusi Weibull adalah distribusi eksponensial dengan laju kegagalan konstan $\frac{1}{\eta}$.

$$\text{Fungsi } \lambda(t) = \frac{1}{\eta} \quad (2.23)$$

$$\text{Fungsi distribusi } f(t) = \left(\frac{1}{\eta}\right) \exp\left(\frac{-t}{\eta}\right) \quad (2.24)$$

$$MTBF = \eta \quad (2.25)$$

b. Jika $\beta = 2$, pada distribusi Weibull, maka status distribusinya sebagai *rayleigh*, dengan

$$k = \left(\frac{2}{\eta}\right)^2 \quad (2.26)$$

$$\text{Fungsi laju kegagalan : } \lambda(t) = \frac{1}{\eta^2} \quad (2.27)$$

$$\text{Fungsi distribusi } f(t) = \left(\frac{2}{\eta^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^2\right] \quad (2.28)$$

- c. Klasifikasi periode tersebut tergantung dari nilai parameter bentuk (β) fungsi distribusi Weibull, yaitu bila :
- d. $\beta < 1$, maka laju kegagalan menurun
- e. $\beta = 1$, maka laju kegagalan berdistribusi eksponensial
- f. $\beta > 1$, maka laju kegagalan naik

Distribusi Normal

Distribusi Normal ini merupakan salah satu fungsi yang telah dikenal dan paling banyak digunakan. Distribusi ini juga dikenal dengan distribusi *Gaussian* atau distribusi *Laplacian*. Menurut teorema limit tengah bahwasanya apabila jumlah sampel yang digunakan sangat besar, maka distribusi rata-rata sampel akan mendekati distribusi normal.

- a. Fungsi kepadatan kegagalan

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]; -\infty < t < \infty \quad (2.29)$$

- b. Fungsi distribusi kegagalan

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left\{-\frac{(\xi-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} d\xi \quad (2.30)$$

- c. Fungsi keandalan

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(\xi) d\xi \quad (2.31)$$

- d. Laju kegagalan

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.32)$$

2.4. Pengaruh pemeliharaan pencegahan terhadap keandalan (Rao, 1992)

Pemeliharaan tidak dapat dipisahkan terhadap keandalan (*reliability*). Fungsi pemeliharaan yang bersifat pencegahan pada prinsipnya

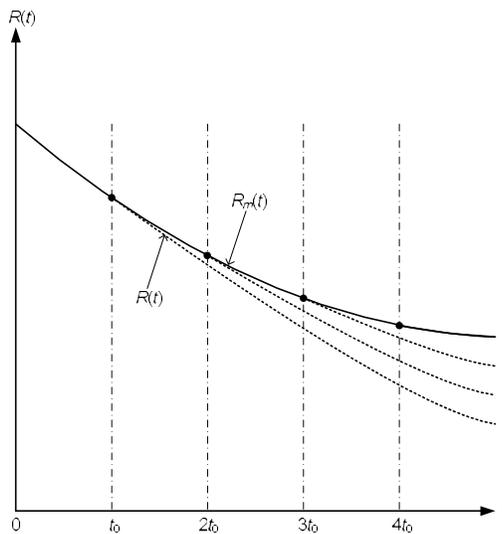
ditujukan untuk mempertahankan dan meningkatkan nilai keandalan sistem. Pertimbangkan keandalan sistem tanpa pemeliharaan adalah $R(t)$ kemudian pemeliharaan pencegahan dilakukan pada waktu-waktu $t_0, 2t_0, 3t_0, \dots$ (t disini menunjukkan waktu operasi aktual sistem tidak termasuk periode-periode waktu dimana sistem dimatikan untuk kegiatan pemeliharaan). Diasumsikan bahwa pada tiap-tiap waktu kegiatan pemeliharaan dilakukan, sistem dipulihkan ke kondisi 'bagus seperti baru' sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.1. Keandalan sistem dengan pemeliharaan, $R_m(t)$, selama $0 \leq t \leq t_0$ dapat dinyatakan sebagai:

$$R_m(t) = R(t); \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad (2.33)$$

karena keadaan tanpa pemeliharaan terjadi sampai $t = t_0$.

Pada sembarang waktu selama selang waktu berikutnya, $t_0 \leq t \leq 2t_0$, keandalan sistem dengan pemeliharaan diberikan oleh perkalian peluang sistem asli beroperasi pada saat $t = t_0$ dan peluang sistem, yang dipulihkan kondisinya seperti baru di t_0 , beroperasi pada saat $t = t - t_0$

$$R_m(t) = R(t_0)R(t - t_0); \quad t_0 \leq t \leq 2t_0 \quad (2.34)$$



Gambar 2.2. Keandalan sistem dengan dan tanpa pemeliharaan
(Rao, 1992)

Selanjutnya, keandalan sistem dengan pemeliharaan selama $2t_0 \leq t \leq 3t_0$ dapat diperoleh sebagai perkalian dari peluang sistem beroperasi pada $t = 2t_0$ dan peluang sistem, yang dipulihkan kondisinya seperti baru di $2t_0$, beroperasi pada saat $t = t - 2t_0$

$$\begin{aligned} R_m(t) &= R(t_0)R(t-t_0)|_{t=2t_0} R(t-2t_0) \\ &= R^2(t_0)R(t-2t_0); \quad 2t_0 \leq t \leq 3t_0 \end{aligned} \quad (2.35)$$

Secara sama, keandalan sistem dengan pemeliharaan selama rentang $it_0 \leq t \leq (i+1)t_0$ dapat dituliskan sebagai

$$R_m(t) = R^i(t_0)R(t-it_0); \quad it_0 \leq t \leq (i+1)t_0; \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (2.36)$$

Rata-rata waktu antar kegagalan sistem dengan pemeliharaan (MTTF_m) diberikan dengan

$$\begin{aligned} \text{MTTF}_m &= \int_0^\infty R_m(t)dt = \int_0^{t_0} R_m(t)dt + \int_{t_0}^{2t_0} R_m(t)dt + \dots + \int_{it_0}^{(i+1)t_0} R_m(t)dt + \dots \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \int_{it_0}^{(i+1)t_0} R_m(t)dt \end{aligned} \quad (2.37)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.36) ke dalam persamaan (2.37) dan dengan mengingat bahwa $R(t_0)$ tidak tergantung terhadap t , didapatkan

$$\text{MTTF}_m = \sum_{i=1}^{\infty} R^i(t_0) \int_{t=it_0}^{(i+1)t_0} R(t-it_0)dt \quad (2.38)$$

Definisikan $\tau = t - it_0$, maka persamaan (2.38) dapat dituliskan sebagai

$$\text{MTTF}_m = \sum_{i=1}^{\infty} R^i(t_0) \int_{\tau=0}^{t_0} R(\tau)d\tau \quad (2.39)$$

$$\text{Karena } \sum_{i=1}^{\infty} R^i(t_0) = \frac{1}{1-R(t_0)} \quad (2.40)$$

Maka persamaan (2.39) dapat ditulis kembali dengan

$$MTTF_m = \frac{1}{1-R(t_0)} \int_0^{t_0} R(\tau) d\tau \quad (2.41)$$

Contoh 2.1.

Tentukan keandalan sistem tanpa dan dengan pemeliharaan pencegahan yang dilaksanakan pada selang waktu tertentu t_0 ketika distribusi waktu kegagalan sistem asli diberikan dengan

i. $f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ (eksponensial)

ii. $f_T(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right\}$ (normal)

iii. $f_T(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\}$ (Weibull)

Penyelesaian:

Tanpa perbaikan. Keandalan sistem tanpa perbaikan dapat dituliskan sebagai berikut

i. $R(t) = e^{-\lambda t}$

ii. $R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$

iii. $R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\}$

Dengan perbaikan. Ketika pemeliharaan pencegahan dilakukan pada selang waktu t_0 , keandalan sistem diberikan dengan persamaan (2.36)

$$R_m(t) = R^i(t_0)R(t-it_0); \quad it_0 \leq t \leq (i+1)t_0; \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (P1)$$

i. Disini $R(t) = e^{-\lambda t}$ maka persamaan (P1) memberikan

$$R_m(t) = \left(e^{-\lambda t_0}\right)^i e^{-\lambda(t-it_0)} = e^{-i\lambda t_0} e^{-\lambda t} e^{i\lambda t_0} = e^{-\lambda t} \quad \text{untuk semua } t$$

$$R_m(t) = R(t) = e^{-\lambda t}; \quad t \geq 0$$

ii. Dalam kasus ini, $R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)$, sehingga

$$R_m(t) = R^i(t_0)R(t - it_0)$$

$$R_m(t) = \left[1 - \Phi\left(\frac{t_0 - \mu}{\sigma}\right)\right]^i \left[1 - \Phi\left(\frac{t - it_0 - \mu}{\sigma}\right)\right]; \quad it_0 \leq t \leq (i+1)t_0; \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

iii. Karena fungsi keandalan dari sistem tanpa pemeliharaan diberikan dengan

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\}$$

maka keandalan sistem dengan pemeliharaan akan menjadi

$$\begin{aligned} R_m(t) &= R^i(t_0)R(t - it_0) = \left(\exp\left\{-\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta\right\}\right)^i \exp\left\{-\left(\frac{t - it_0}{\eta}\right)^\beta\right\} \\ &= e^{-i\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta} e^{-\left(\frac{t - it_0}{\eta}\right)^\beta} \\ &= e^{-\left\{i\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta + \left(\frac{t - it_0}{\eta}\right)^\beta\right\}}; \quad it_0 \leq t \leq (i+1)t_0; \quad i = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Contoh 2.2.

Tentukan kondisi dimana pemeliharaan pencegahan memberi keuntungan kepada sistem untuk kasus-kasus berikut:

1. waktu kegagalan mempunyai distribusi eksponensial
2. waktu kegagalan mempunyai distribusi Weibull

Penyelesaian:

Rasio keandalan dari sistem dengan dan tanpa pemeliharaan pencegahan diberikan dengan

$$\frac{R_m(t)}{R(t)} = \frac{R^i(t_0)R(t - it_0)}{R(t)}; \quad it_0 \leq t \leq (i+1)t_0; \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (P1)$$

Secara khusus, diambil $t = it_0$ sehingga persamaan (P1) menjadi

$$\frac{R_m(it_0)}{R(it_0)} = \frac{R^i(t_0)R(0)}{R(it_0)} = \frac{(R(t_0))^i}{R(it_0)}; \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (P2)$$

Kasus 1:

Untuk distribusi waktu kegagalan eksponensial, fungsi keandalan diberikan dengan

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (P3)$$

sehingga persamaan (P2) tereduksi menjadi

$$\frac{R_m(it_0)}{R(it_0)} = \frac{(e^{-\lambda t_0})^i}{e^{-i\lambda t_0}} = 1 \quad (P4)$$

Hal ini menunjukkan bahwa pemeliharaan pencegahan **tidak menguntungkan** dalam kasus distribusi waktu kegagalan eksponensial, dimana memiliki laju kegagalan konstan.

Kasus 2:

Untuk distribusi waktu kegagalan Weibull, fungsi keandalan diberikan dengan

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\} \quad (P5)$$

sehingga persamaan (P2) dapat dituliskan kembali sebagai

$$\frac{R_m(it_0)}{R(it_0)} = \frac{\left[\exp\left\{-\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta\right\}\right]^i}{\exp\left\{-\left(\frac{it_0}{\eta}\right)^\beta\right\}} = \exp\left\{-i\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta + i^\beta\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta\right\} \quad (P6)$$

Ini mengindikasikan bahwa $R_m(it_0) > R(it_0)$ jika $-i + i^\beta > 1$, atau $i^{\beta-1} > 1$. Pertidaksamaan ini akan terpenuhi hanya ketika $\beta > 1$ (yaitu ketika laju kegagalannya meningkat). Hal tersebut menunjukkan

bahwa pemeliharaan pencegahan **berguna** untuk menghadapi keausan dan periode penuaan dimana β meningkat seiring waktu.

Contoh 2.3.

Sebuah sistem dijadwalkan untuk pemeliharaan pencegahan pada saat $t_0, 2t_0, 3t_0, \dots$. Cari rata-rata dan standar deviasi jumlah saat pelaksanaan pemeliharaan pencegahan sebelum munculnya kegagalan sistem.

Penyelesaian:

Probabilitas sistem mengalami tepat i pemeliharaan pencegahan, P_i , dapat diasumsikan sama dengan probabilitas sistem dengan pemeliharaan mengalami kegagalan pada saat $t = (i + 1)t_0$. Menggunakan persamaan (2.36) diperoleh:

$$P_i = [R(t_0)]^i [1 - R(t_0)]; \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Nilai ekspektasi dari i dapat ditemukan sebagai:

$$\begin{aligned} E[i] &= \sum_{i=1}^{\infty} iP_i = \sum_{i=1}^{\infty} i[R(t_0)]^i [1 - R(t_0)] = R(t_0)[1 - R(t_0)] \sum_{i=1}^{\infty} i[R(t_0)]^{i-1} \\ &= \frac{R(t_0)[1 - R(t_0)]}{[1 - R(t_0)]^2} = \frac{R(t_0)}{1 - R(t_0)} \end{aligned}$$

Standar deviasi dari i dapat dievaluasi sebagai

$$\sigma_i^2 = E[(i - E[i])^2] = E[i^2] - (E[i])^2 = \sum_{i=1}^{\infty} i^2 P_i - (E[i])^2 = \frac{R(t_0)}{[1 - R(t_0)]^2}$$

Telah diasumsikan di bagian sebelumnya bahwa pemeliharaan dilakukan dengan sempurna sehingga sistem dapat dianggap “bagus seperti baru” setelah mengalami pemeliharaan. Bagaimanapun, ada kemungkinan pelaksanaan pemeliharaan tidak sempurna (*imperfect maintenance*) karena adanya kesalahan manusia. Pada kasus yang sedemikian sistem akan segera mengalami kegagalan setelah pelaksanaan pemeliharaan pencegahan. Jika probabilitas terjadinya

pemeliharaan tidak sempurna dinyatakan sebagai p , keandalan sistem akan dikalikan dengan $(1 - p)$ setiap kali pemeliharaan pencegahan dilakukan. Dengan demikian keandalan sistem dengan pemeliharaan dapat dinyatakan, dengan memodifikasi persamaan (2.36), sebagai

$$R_m(t) = (1 - p)^i R^i(t_0) R(t - it_0); \quad it_0 \leq t \leq (i + 1)t_0; \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (2.42)$$

Dalam rangka untuk menemukan apakah penggantian bagian-bagian *wearing* selama pemeliharaan pencegahan lebih menguntungkan dibanding dengan berkurangnya keandalan jika terjadi proses pemeliharaan yang bermasalah, harus dipertimbangkan rasio $R_m(t)/R(t)$ pada $t = it_0$.

$$\frac{R_m(it_0)}{R(it_0)} = \frac{(1 - p)^i R^i(t_0) R(0)}{R(it_0)} = \frac{(1 - p)^i R^i(t_0)}{R(it_0)}; \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (2.43)$$

karena $R(0) = 1$.

Contoh 2.4.

Tentukan kondisi dimana pemeliharaan pencegahan yang bermasalah masih berguna ketika waktu kegagalan sistem asli (tanpa pemeliharaan) mengikuti: (1) distribusi Eksponensial dan (2) distribusi Weibull.

Penyelesaian:

1. Waktu kegagalan sistem asli (tanpa pemeliharaan) mengikuti distribusi eksponensial, maka

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (P1)$$

sehingga persamaan (3.43) memberikan

$$\frac{R_m(it_0)}{R(it_0)} = (1 - p)^i \frac{e^{-i\lambda t_0}}{e^{-i\lambda t_0}} = (1 - p)^i \quad (P2)$$

karena rasio yang diberikan oleh persamaan (P2) lebih kecil dari satu untuk semua nilai p , maka pemeliharaan pencegahan yang bermasalah tidaklah diinginkan.

2. Ketika waktu kegagalan sistem asli mengikuti distribusi Weibull, maka

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\}$$

(P3)

sehingga persamaan (3.43) memberikan

$$\begin{aligned} \frac{R_m(it_0)}{R(it_0)} &= \frac{(1-p)^i \left(\exp\left\{-\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta\right\} \right)^i}{\exp\left\{-\left(\frac{it_0}{\eta}\right)^\beta\right\}} \\ &= (1-p)^i \exp\left\{\left(\frac{it_0}{\eta}\right)^\beta - i\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta\right\}; \quad i = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

(P4)

Untuk p dengan nilai kecil, dapat digunakan pendekatan

$$(1-p)^i = e^{-ip} \quad (P5)$$

sehingga persamaan (P5) dapat dituliskan sebagai

$$\frac{R_m(it_0)}{R(it_0)} = \exp\left\{-ip - i\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta + \left(\frac{it_0}{\eta}\right)^\beta\right\}; \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (P6)$$

Pada Contoh 2.2 diperoleh bahwa pemeliharaan pencegahan ideal hanya akan menguntungkan ketika $\beta > 1$ (yaitu ketika laju kegagalan meningkat, seperti dalam kasus periode penuaan). Persamaan (P6) memperlihatkan bahwa pemeliharaan pencegahan yang bermasalah akan masih berguna, untuk $\beta > 1$, hanya ketika

$$-ip - i\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta + \left(\frac{it_0}{\eta}\right)^\beta > 0 \text{ atau } p < (i^{\beta-1} - 1)\left(\frac{t_0}{\eta}\right)^\beta \quad (P7)$$

2.5. Strategi Penggantian Optimal (Rao, 1992)

Seperti telah ditunjukkan pada bagian sebelumnya, pemeliharaan pencegahan memperbaiki keandalan sistem selama masa keausan. Dalam beberapa sistem, komponen secara otomatis diganti setelah waktu operasi mencapai t_0 . Strategi ini dikenal sebagai penggantian berdasar umur pakai (*age replacement*). Penggantian oli atau filter oli kendaraan bermotor setelah setiap t_0 bulan adalah satu contoh penggantian berdasarkan umur.

Dalam beberapa kasus, sekelompok komponen diganti secara berkala pada waktu $t_0, 2t_0, 3t_0, \dots$ dan kapanpun kegagalan terjadi. Strategi ini, dikenal sebagai penggantian kelompok (*batch replacement*), digunakan ketika sejumlah besar komponen tidak mahal terlibat seperti misalnya satu set bola lampu dalam suatu pabrik. Dalam semua kasus, biaya peningkatan keandalan melalui pemeliharaan pencegahan harus dibandingkan dengan biaya memulihkan sistem rusak melalui perbaikan.

Misalkan sebuah komponen diganti pada waktu-waktu tertentu $t_0, 2t_0, 3t_0, \dots$. Pertimbangkan biaya penggantian komponen melalui pemeliharaan pencegahan adalah c_m dan biaya penggantian komponen rusak melalui pemeliharaan perbaikan adalah c_r . Dalam banyak kasus, $c_r > c_m$, karena kegagalan sistem tidak hanya melibatkan biaya penggantian komponen rusak tapi juga biaya-biaya yang berhubungan dengan beberapa factor tambahan. Sebagai contoh jika transmisi mobil rusak selama perjalanan jarak jauh, beberapa biaya tambahan, seperti biaya derek dan penginapan ekstra, timbul di samping biaya penggantian transmisi.

Misalkan komponen diganti n_m kali melalui pemeliharaan pencegahan (komponen tidak rusak diganti) dan n_r kali melalui pemeliharaan perbaikan (komponen rusak diganti) selama waktu operasi yang cukup

lama t . Maka jumlah total berapa kali komponen diganti n diberikan oleh

$$n = n_m + n_r \quad (2.44)$$

dan total biaya penggantian c adalah

$$c = c_m n_m + c_r n_r \quad (2.45)$$

Karena total waktu operasi t sangat besar dibandingkan rata-rata waktu antar perbaikan, maka

$$n = \frac{t}{\text{MTBR}} \quad (2.46)$$

dimana MTBR diberikan dengan

$$\text{MTBR} = \int_0^{\infty} \tilde{R}(\tau) d\tau \quad (2.47)$$

dan $\tilde{R}(\tau)$ adalah keandalan komponen yang secara otomatis diganti setelah suatu waktu t_0

$$\tilde{R}(\tau) = \begin{cases} R(\tau) & \text{untuk } \tau \leq t_0 \\ 0 & \text{untuk } \tau > t_0 \end{cases} \quad (2.48)$$

dengan $R(\tau)$ menunjukkan keandalan awal (tanpa pemeliharaan) komponen.

Persamaan (2.47) dan (2.48) menghasilkan

$$\text{MTBR} = \int_0^{t_0} \tilde{R}(\tau) d\tau + \int_{t_0}^{\infty} \tilde{R}(\tau) d\tau = \int_0^{t_0} R(\tau) d\tau \quad (2.49)$$

Karena sedikit komponen yang bertahan sampai pemeliharaan pencegahan berikutnya diberikan oleh $R(t_0)$, jumlah komponen yang masih tahan, n_m , yang diganti melalui pemeliharaan pencegahan, diberikan oleh

$$n_m = R(t_0) n \quad (2.50)$$

dan dengan cara yang sama, jumlah komponen rusak n_r , yang diganti melalui pemeliharaan perbaikan, diberikan oleh

$$n_r = (1 - R(t_0)) n \quad (2.51)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.46), (2.49), (2.50), dan (2.51) ke dalam persamaan (2.45), didapatkan

$$c = \frac{c_m R(t_0)t}{\int_0^{t_0} R(\tau)d\tau} + \frac{c_r(1-R(t_0))t}{\int_0^{t_0} R(\tau)d\tau} \quad (2.52)$$

Untuk meminimasi total biaya pemeliharaan dengan memilih nilai selang pemeliharaan pencegahan t_0 yang tepat, ditetapkan

$$\frac{dc}{dt_0} = 0 \quad (2.53)$$

dimana c diberikan oleh persamaan (2.52). Di dalam banyak kasus persamaan (2.53) akan merupakan persamaan yang tidak linear.

RINGKASAN

1. Keandalan adalah kemampuan sistem atau komponen untuk memenuhi fungsi yang dibutuhkan dalam kondisi tertentu selama rentang waktu yang spesifik.
2. Kegagalan (*failure*) didefinisikan sebagai ketidakmampuan suatu item untuk menjalankan fungsinya.
3. Fungsi keandalan $R(t)$ merupakan peluang sistem akan hidup lebih dari t .
4. Pada dasarnya laju kegagalan atau tingkat kegagalan didefinisikan sebagai kegagalan suatu sistem per satuan waktu tertentu.
5. Kegiatan pemeliharaan diprioritaskan untuk sistem kritis karena hal ini dapat memberikan kontribusi yang besar terhadap pengurangan kegagalan.
6. Distribusi kegagalan merupakan bentuk matematis usia dan fase kegagalan mesin atau peralatan.
7. Karakteristik kegagalan dari setiap peralatan akan mempengaruhi bentuk pendekatan yang digunakan dalam menguji kesesuaian dan menghitung parameter fungsi distribusi kegagalan.
8. Fungsi pemeliharaan pencegahan ditujukan untuk mempertahankan dan meningkatkan nilai keandalan sistem.

DAFTAR PUSTAKA

Barringer, P.E, 1997, *Availability, Reliability, Maintainability, & Capability*, <http://www.barringer1.com/pdf/ARMandC.pdf>.

- Ebeling, C.E., 1997, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, The McGraw-Hill Companies Inc, Singapore.
- Jardine, A. K. S., 1973, *Maintenance, Replacement, and Reliability*, The Pitman Press, London
- Jardine, A. K. S., and A. H. C. Tsang., 2006, *Maintenance, Replacement, and Reliability*, Taylor and Francis Group, New York.
- Rao, S.S., 1992, *Reliability Based Design*, McGraw Hill Inc. New York
- Takahasi, Yoshikazu, Osada, Takashi, 1990, *Total Productive Maintenance*, Asian Productivity Organization.

SOAL LATIHAN

1. Pengumpulan data (20 data) waktu antar kerusakan (jam) suatu mesin jenis X seperti dibawah ini:

7.900 7.600 6.300 5.500 5.050 2.100 6.200 5.450 3.950 6.550
4.050 5.800 6.100 3.050 5.350 5.650 5.100 5.200 4.200 6.000

Jika pola data di atas dianggap berdistribusi normal, maka:

- Susunlah fungsi kepadatan kegagalan dari data tersebut di atas dan hitung peluang mesin mengalami kerusakan pada saat $t = 6.000$ jam!
- Susunlah fungsi distribusi kumulatif kegagalan dari data tersebut di atas dan hitung peluang mesin dapat beroperasi sampai $t = 6.000$ jam!
- Susunlah fungsi keandalan dari data tersebut di atas dan hitung peluang mesin dapat beroperasi lebih dari $t = 6.000$ jam!
- Jika dalam 1 tahun terdapat 250 hari kerja dengan 24 jam per hari, berilah penjelasan akan keandalan mesin tersebut!
- Susunlah fungsi laju kerusakan/kegagalan (*failure rate function/hazard function*) dari data tersebut diatas dan hitung laju kerusakan pada saat $t = 6.000$ jam!

2. Tentukan keandalan sistem setelah 1250 jam operasi jika dilakukan tindakan pemeliharaan pencegahan pada sistem tersebut setiap 500

jam operasi. Fungsi kepadatan waktu kerusakan sistem original sebagai berikut:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(50)} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-1000}{50}\right)^2\right\}, t \text{ dalam jam}$$

3. Jelaskan fungsi pemeliharaan pencegahan dihubungkan dengan keandalan sistem!

4. Untuk suatu proses penggantian kelompok diketahui 800 unit komponen yang identik memiliki waktu antar kerusakan pertama sbb.:

Interval waktu (x 100 jam)	Jumlah kerusakan
1	223
2	68
3	57
4	53
5	50
6	46
7	44
8	46
9	77
10	136

Bila biaya penggantian komponen yang rusak \$5 dan biaya penggantian komponen per kelompok \$4. Tentukan periode optimal yang dapat meminimumkan biaya penggantian komponen tersebut!

TUGAS

Jika pola data pada Soal Latihan no. 1 dianggap berdistribusi Weibull dengan tiga parameter, maka tentukan parameter t_0 , β dan η kemudian susunlah fungsi-fungsi kegagalan dari sistem tersebut!

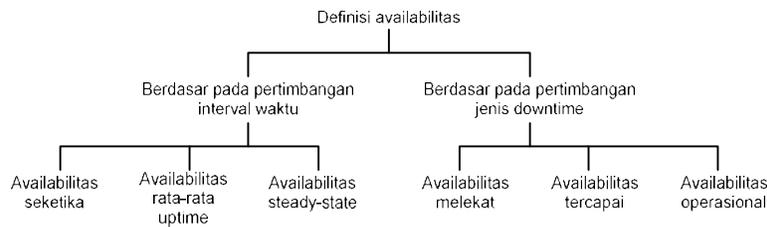
BAB III
KETERSEDIAAN

Bab ini berkaitan dengan sistem-sistem yang dapat dirawat dan dapat diperbaiki yang bisa dipulihkan kinerjanya pada interval-interval waktu yang telah ditetapkan atau setelah mengalami kegagalan. Secara umum, ketersediaan sistem menunjukkan ukuran kesiapan sistem untuk digunakan sewaktu-waktu.

Istilah ketersediaan digunakan untuk menunjukkan probabilitas sistem atau peralatan tersedia dalam keadaan siap beroperasi pada setiap waktu t , diberikan bahwa sistem atau peralatan tersebut berada pada kondisi siap beroperasi pada $t = 0$. Untuk dapat berada pada keadaan siap beroperasi pada waktu t , sistem tidak boleh rusak atau jika rusak pada perioda t , sistem tersebut harus telah diperbaiki. Jadi, di dalam ketersediaan terkandung kedua aspek, keandalan dan kemampuan perawatan.

3.1. Definisi

Ketersediaan dapat didefinisikan dalam beberapa cara sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar berikut (Rao, 1992).



Gambar 3.1. Jenis-jenis ketersediaan

1. *Ketersediaan Seketika, $A(t)$* : adalah probabilitas bahwa sistem siap beroperasi pada sembarang waktu t . Ketersediaan ini diberikan oleh ekspektasi waktu operasi (*up-time*) sistem

$$A(t) = E[z(t)] \tag{3.1}$$

dimana $z(t)$ adalah variabel indikator yang didefinisikan sebagai

$$z(t) = \begin{cases} 0; & \text{jika sistem dalam keadaan beroperasi pada waktu } t \\ 1; & \text{jika sistem dalam keadaan rusak pada waktu } t \end{cases} \quad (3.2)$$

Dengan melihat persamaan (3.1), persamaan (3.2) dapat ditulis kembali sebagai

$$A(t) = (1)P[z(t)=0] + (0)P[z(t)=1] = P[z(t)=0] \quad (3.3)$$

2. *Ketersediaan rata-rata waktu operasi, A(T)*: didefinisikan sebagai proporsi waktu yang selama itu sistem siap tersedia untuk digunakan dalam selang yang telah ditetapkan (0, T):

$$A(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (3.4)$$

3. *Ketersediaan Status tetap (steady-state), A(∞)*: didefinisikan sebagai probabilitas bahwa sistem siap beroperasi ketika selang waktu yang dipertimbangkan sangat besar

$$A(\infty) = \lim_{T \rightarrow \infty} A(T) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (3.5)$$

4. *Ketersediaan Melekat, A_i*: didefinisikan sebagai proporsi waktu yang selama itu sistem siap beroperasi, dengan mempertimbangkan hanya waktu henti untuk pemeliharaan perbaikan dan mengabaikan waktu persiapan, waktu henti untuk pemeliharaan pencegahan, waktu persediaan dan waktu henti untuk menunggu

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.6)$$

dimana MTBF = rata-rata waktu antar kegagalan (*mean time between failures*) dan MTTR = rata-rata waktu antar perbaikan (*mean time to repair*).

5. *Ketersediaan Tercapai, A_o*: didefinisikan sebagai proporsi waktu yang selama itu sistem siap beroperasi dengan mempertimbangkan keduanya baik waktu henti untuk pemeliharaan perbaikan maupun

waktu henti untuk pemeliharaan pencegahan dan mengabaikan waktu persiapan, waktu persediaan dan waktu henti untuk menunggu

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + M} \quad (3.7)$$

dimana MTBM = waktu rata-rata antara pemeliharaan (*mean time between maintenance*) dan M = rata-rata waktu henti untuk pemeliharaan.

6. *Ketersediaan Operasional, A_o*: didefinisikan sebagai proporsi waktu yang selama itu sistem siap beroperasi, dengan mempertimbangkan waktu persiapan, waktu persediaan dan waktu menunggu bersama-sama dengan waktu henti untuk pemeliharaan perbaikan dan waktu henti untuk pemeliharaan pencegahan.

$$A_o = \frac{MTBF + \text{waktu persiapan}}{MTBF + \text{waktu persiapan} + MDT} \quad (3.8)$$

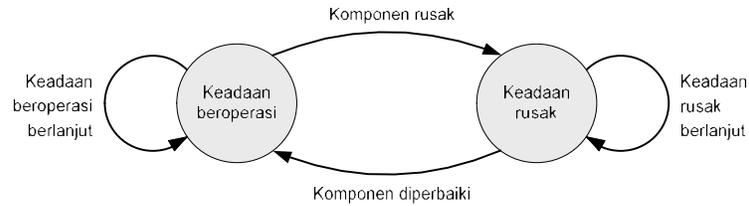
dimana waktu persiapan = (siklus operasional – MTBF – MDT), dan MDT = rata-rata waktu henti (*mean downtime*) = M + waktu tunda untuk persediaan dan faktor-faktor administrative pemeliharaan.

3.2. Pengembangan Model Ketersediaan

Asumsi-asumsi berikut dibuat dalam pengembangan model untuk analisis ketersediaan sistem:

1. Pada setiap waktu yang diberikan, sistem hanya bisa salah satu, dalam keadaan beroperasi atau rusak
2. Keadaan sistem berubah seiring pergerakan waktu
3. Peralihan sistem dari satu keadaan ke keadaan yang lain terjadi secara seketika
4. Laju kegagalan dan laju perbaikan adalah konstan

Peralihan sistem dari satu keadaan ke keadaan yang lain ditunjukkan dalam Gambar 3.2. Probabilitas kegagalan sistem dan probabilitas dikembalikan ke keadaan beroperasi mempunyai peran penting dalam analisis ketersediaan.



Gambar 3.2. Diagram peralihan untuk keadaan sistem (Rao, 1992)

Untuk sistem yang terdiri dari satu komponen, variabel indikator $z(t)$ dapat ditetapkan sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan (3.2). Jika sistem memiliki laju kegagalan konstan λ dan laju perbaikan konstan μ , probabilitas empat peristiwa yang mungkin, dapat dicari sebagai

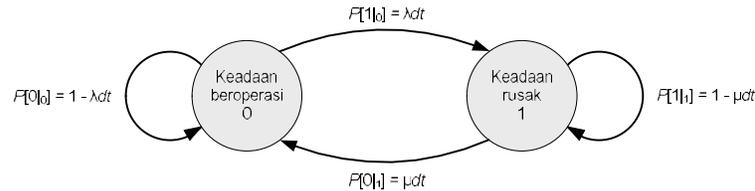
- 1) $P[z(t+dt)=0 | z(t)=1] =$ probabilitas sistem berada dalam keadaan beroperasi pada saat $t+dt$ diberikan bahwa sistem dalam keadaan rusak pada saat $t = \mu dt$
- 2) $P[z(t+dt)=0 | z(t)=0] =$ probabilitas sistem berada dalam keadaan beroperasi pada saat $t+dt$ diberikan bahwa sistem dalam keadaan beroperasi pada saat $t = 1 - \lambda dt$
- 3) $P[z(t+dt)=1 | z(t)=0] =$ probabilitas sistem berada dalam keadaan rusak pada saat $t+dt$ diberikan bahwa sistem dalam keadaan beroperasi pada saat $t = \lambda dt$
- 4) $P[z(t+dt)=1 | z(t)=1] =$ probabilitas sistem berada dalam keadaan rusak pada saat $t+dt$ diberikan bahwa sistem dalam keadaan rusak pada saat $t = 1 - \mu dt$

Keempat probabilitas peralihan di atas diperlihatkan dalam diagram Markov pada Gambar 3.3. Probabilitas peralihan juga diperlihatkan dalam bentuk matriks peralihan (atau stokastik) $[P]$ sebagai berikut:

0 1

$$[P] = \begin{matrix} 0 & \begin{bmatrix} (1-\lambda) & \lambda \\ \mu & (1-\mu) \end{bmatrix} \\ 1 & \end{matrix} \quad (3.9)$$

dimana masuk ke ij menunjukkan bahwa sistem akan berada dalam keadaan i pada saat $t + dt$ diberikan bahwa sistem dalam keadaan j saat t .



Gambar 3.3. Diagram peralihan Markov (Rao, 1992)

3.3. Sistem dengan Komponen Tunggal

Untuk sistem yang terdiri dari satu komponen, probabilitas sistem berada dalam keadaan beroperasi (keadaan 0) pada saat $t + dt$, $P_0(t + dt)$, dapat ditentukan dengan menambahkan probabilitas bahwa sistem dalam keadaan 0 pada saat t dan tidak rusak dalam $(t, t + dt)$ kepada probabilitas bahwa sistem berada dalam keadaan 1 pada saat t dan dibawa ke keadaan 0 dalam $(t, t + dt)$. Sehingga

$$P_0(t + dt) = P_0(t)(1 - \lambda dt) + P_1(t)\mu dt \quad (3.10)$$

Secara bersamaan, probabilitas sistem berada dalam keadaan 1 pada saat $t + dt$, $P_1(t + dt)$, diberikan dengan menjumlahkan probabilitas sistem berada dalam keadaan 0 pada saat t dan rusak dalam $(t, t + dt)$ dengan probabilitas bahwa sistem dalam keadaan 1 pada saat t dan perbaikan belum selesai dalam $(t, t + dt)$. Sehingga

$$P_1(t + dt) = P_0(t)\lambda dt + P_1(t)(1 - \mu dt) \quad (3.11)$$

Karena penurunan, $dP_i(t)/dt$, dapat didefinisikan sebagai

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P_i(t + dt) - P_i(t)}{dt} \quad (3.12)$$

persamaan (3.10) dan (3.11) dapat dituliskan kembali sebagai

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \quad (3.13)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = +\lambda P_0(t) - \mu P_1(t) \quad (3.14)$$

Jika sistem berada dalam keadaan beroperasi pada saat $t = 0$, kondisi awal diberikan dengan

$$P_0(0) = 1, \quad P_1(0) = 0 \quad (3.15)$$

Solusi dari persamaan diferensial simultan, persamaan (3.13) dan (3.14), dengan kondisi awal seperti pada (3.15) dapat diperoleh sebagai berikut (Rao, 1992):

$$P_0(t) = A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3.16)$$

$$P_1(t) = 1 - A(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3.17)$$

Pada sisi lain, ketika sistem berada dalam keadaan rusak pada saat $t = 0$, kondisi awalnya adalah

$$P_0(0) = 0, \quad P_1(0) = 1 \quad (3.18)$$

Solusi dari persamaan diferensial simultan, persamaan (3.16) dan (3.17), dengan kondisi awal seperti pada (3.18) dapat diperoleh sebagai:

$$P_0(t) = A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3.19)$$

$$P_1(t) = 1 - A(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3.20)$$

Dapat dilihat bahwa ketika t menjadi sangat besar, solusi persamaan (3.16) dan (3.19) akan bertemu pada

$$A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.21)$$

Secara sama, saat $t \rightarrow \infty$, solusi persamaan (3.17) dan (3.20) akan bertemu pada

$$1 - A(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.22)$$

Persamaan (3.20) dan (3.21) menunjukkan bahwa keadaan sistem, setelah waktu yang lama, menjadi tidak tergantung pada keadaan awalnya.

Solusi *status tetap* juga dapat ditemukan dengan menetapkan turunan dari P_i sama dengan nol karena turunan dari nilai *status tetap*, yang merupakan konstanta, adalah nol. Dengan menetapkan $dP_0/dt = 0$ dan $dP_1/dt = 0$ dalam persamaan (3.16) dan (3.17) diperoleh

$$-\lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \quad (3.23)$$

$$\lambda P_0 - \mu P_1 = 0 \quad (3.24)$$

Karena jumlah probabilitas dari peristiwa yang berdiri sendiri adalah satu, maka

$$P_0 + P_1 = 1 \quad (3.25)$$

Persamaan (3.23) dan (3.24) menghasilkan solusi *status tetap* sebagai berikut

$$P_0 = A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.26)$$

$$P_1 = 1 - A(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.27)$$

Dalam beberapa kasus, perlu untuk menemukan nilai rata-rata *uptime* sistem pada periode waktu T tertentu. Ini dapat diperoleh dengan

mengintegrasikan $A(t)$ pada interval waktu T dan membaginya dengan total waktu.

$$A(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (3.28)$$

Jika sistem dalam keadaan beroperasi pada $t = 0$, $A(t)$ diberikan oleh persamaan (3.16) dan (3.28) menghasilkan

$$A(T) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2 T} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2 T} e^{-(\lambda + \mu)T} \quad (3.29)$$

Secara sama, jika sistem dalam keadaan rusak pada $t = 0$, $A(t)$ diberikan oleh persamaan (3.19) dan (3.28) menghasilkan

$$A(T) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2 T} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2 T} e^{-(\lambda + \mu)T} \quad (3.30)$$

Ketersediaan *status tetap* sistem dapat ditentukan dengan meletakkan $T \rightarrow \infty$ dalam persamaan (3.29) dan (3.30). Hal ini akan memberikan

$$A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.31)$$

Persamaan (3.31) dapat juga dituliskan sebagai

$$A(\infty) = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} \quad (3.32)$$

dimana $\text{MTTF} = 1/\lambda =$ rata-rata waktu kegagalan (*mean time to failure*) dan $\text{MTTR} = 1/\mu =$ rata-rata waktu perbaikan (*mean time to repair*).

Contoh 3.1.

Sebuah sistem mempunyai rata-rata waktu antara kegagalan 150 jam dan rata-rata waktu perbaikan 20 jam. Berapa ketersediaan *status tetap* sistem?

Penyelesaian:

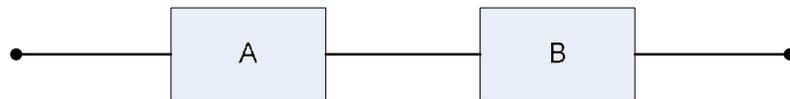
Ketersediaan *status tetap* sistem dapat diperoleh dari persamaan (3.32) sebagai berikut

$$A(\infty) = \frac{150}{150 + 20} = 0.8824$$

3.3.1. Sistem Seri

Pertimbangkan sebuah sistem dengan dua komponen *A* dan *B* seperti terlihat pada Gambar 3.5 (Rao, 1992). Ambil laju kegagalannya λ dan laju perbaikannya μ untuk masing-masing komponen. Sistem akan berada dalam sembarang dari tiga keadaan berikut yang mungkin pada sembarang waktu t :

1. Kedua komponen berada dalam kondisi beroperasi (keadaan 0)
2. Satu komponen berada dalam kondisi beroperasi dan yang lainnya dalam perbaikan (keadaan 1)
3. Kedua komponen dalam perbaikan (keadaan 2)



Gambar 3.4 Sebuah sistem seri

Karena kedua komponen harus dalam kondisi beroperasi agar sistem juga dalam kondisi beroperasi, ketersediaan sistem diberikan oleh probabilitas sistem berada dalam keadaan 0 pada saat t , yang adalah, $A(t) = P_0(t)$. Sistem akan berhenti dalam keadaan 1 dan 2.

Satu personil perbaikan. Analisis ketersediaan sistem multi-komponen tergantung pada jumlah personil perbaikan yang tersedia untuk memperbaiki komponen-komponen yang rusak. Pertama ditinjau kasus dengan satu personil perbaikan. Probabilitas-probabilitas peralihan yang dihasilkan dirangkum dalam Tabel 3.1. Dari tabel ini, matriks peralihan [P] dapat diidentifikasi sebagai :

$$[P] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (1-2\lambda) & 2\lambda & 0 \\ \mu & (1-\lambda-\mu) & \lambda \\ 0 & \mu & (1-\mu) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.33)$$

Jadi probabilitas sistem berada dalam keadaan 0 atau 1 atau 2 pada saat $t + dt$ dapat ditulis sebagai

$$P_0(t + dt) = P_0(t)(1 - 2\lambda dt) + P_1(t)\mu dt \quad (3.34)$$

$$P_1(t + dt) = P_0(t)2\lambda dt + P_1(t)(1 - \lambda dt - \mu dt) + P_2(t)\mu dt \quad (3.35)$$

$$P_2(t + dt) = P_1(t)\lambda dt + P_2(t)(1 - \mu dt) \quad (3.36)$$

Persamaan-persamaan di atas dapat dituliskan kembali, menggunakan definisi yang diberikan dalam persamaan (3.12) sebagai

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \quad (3.37)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_2(t) \quad (3.38)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda P_1(t) - \mu P_2(t) \quad (3.39)$$

Persamaan-persamaan ini dapat diselesaikan untuk sembarang kondisi awal yang ditetapkan untuk mendapatkan P_0 , P_1 dan P_2 sebagai fungsi dari waktu. Sebagai contoh, jika sistem dalam keadaan beroperasi pada saat $t = 0$, kondisi awal diberikan oleh

$$P_0(0) = 1, \quad P_1(0) = 0, \quad P_2(0) = 0 \quad (3.40)$$

Dalam kebanyakan kasus, solusi *status tetap* dari persamaan (3.37) sampai (3.39) akan dibutuhkan. Untuk itu, ditetapkan $dP_0/dt = 0$, $dP_1/dt = 0$ dan $dP_2/dt = 0$ dalam persamaan (3.37) sampai (3.39) dan menggunakan kondisi $P_0 + P_1 + P_2 = 1$:

$$-2\lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \quad (3.41)$$

$$2\lambda P_0 - (\lambda + \mu)P_1 + \mu P_2 = 0 \quad (3.42)$$

$$\lambda P_1 - \mu P_2 = 0 \quad (3.43)$$

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1 \quad (3.44)$$

Solusi persamaan (3.41) sampai (3.44) memberikan

$$P_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2} \quad (3.45)$$

$$P_1 = \frac{2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2} \quad (3.46)$$

$$P_2 = \frac{2\lambda^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2} \quad (3.47)$$

Sehingga ketersediaan *status tetap* sistem diberikan dengan

$$A(\infty) = P_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2}$$

Tabel 3.1 Probabilitas Peralihan Sistem Seri Dua Komponen dengan Satu Personil Perbaikan (Rao, 1992)

Nomor Urut	Keadaan sistem pada saat t	Keadaan sistem pada saat $t + dt$	Peralihan komponen	Probabilitas peralihan
1	0 (beroperasi)	0 (beroperasi)	Kedua komponen masih dalam kondisi beroperasi	$(1 - \lambda dt)^2 \approx 1 - 2\lambda dt$
2	0 (beroperasi)	1 (satu komponen rusak)	Salah satu komponen rusak dan satu lainnya masih dalam kondisi beroperasi	$2\lambda dt(1 - \lambda dt) \approx 2\lambda dt$
3	0 (beroperasi)	2 (dua komponen rusak)	Kedua komponen rusak	$(\lambda dt)^2 \approx 0$
4	1 (satu komponen rusak)	0 (beroperasi)	Satu komponen masih dalam kondisi beroperasi dan perbaikan untuk komponen lainnya yang rusak telah selesai	μdt
5	1 (satu komponen rusak)	1 (satu komponen rusak)	Satu komponen masih dalam kondisi beroperasi dan perbaikan untuk komponen lainnya yang rusak belum selesai	$(1 - \mu dt)(1 - \lambda dt) \approx 1 - (\lambda + \mu)dt$
6	1 (satu komponen rusak)	2 (dua komponen rusak)	Satu komponen rusak dan perbaikan untuk komponen lainnya belum selesai	$\lambda dt(1 - \mu dt) \approx \lambda dt$
7	2 (dua komponen rusak)	0 (beroperasi)	Perbaikan kedua komponen telah selesai	$(\mu dt)^2 \approx 0$
8	2 (dua komponen rusak)	1 (satu komponen rusak)	Hanya satu komponen yang telah selesai diperbaiki	μdt
9	2 (dua komponen rusak)	2 (dua komponen rusak)	Perbaikan kedua komponen belum selesai (hanya satu komponen yang sedang diperbaiki)	$1 - \mu dt$

Dua personil perbaikan. Dalam kasus ini, masing-masing personil perbaikan dapat bekerja pada komponen yang berbeda. Jika sistem dalam keadaan 2 pada saat t , sistem dapat kembali ke keadaan 1 pada saat $t + dt$ jika perbaikan salah satu komponen selesai, ketika yang lainnya belum selesai. Karena perbaikan salah satu dari dua komponen dapat diselesaikan dengan waktu $t + dt$, probabilitasnya adalah $2\mu dt(1 - \mu dt) \approx 2\mu dt$. Pada sisi lain, jika sistem dalam keadaan 2 pada saat t , sistem terus tetap dalam keadaan 2 jika perbaikan kedua komponen tidak terselesaikan. Probabilitas peristiwa ini sama dengan $(1 - \mu dt)^2 \approx 1 - 2\mu dt$. Sehingga matriks peralihan, $[P]$, dalam persamaan (3.33) akan dimodifikasi sebagai

$$[P] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (1 - 2\lambda) & 2\lambda & 0 \\ \mu & (1 - \lambda - \mu) & \lambda \\ 0 & 2\mu & (1 - 2\mu) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.49)$$

Matriks ini dapat digunakan untuk menurunkan persamaan-persamaan *status tetap* seperti

$$-2\lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \quad (3.50)$$

$$2\lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + 2\mu P_2 = 0 \quad (3.51)$$

$$\lambda P_1 - 2\mu P_2 = 0 \quad (3.52)$$

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1 \quad (3.53)$$

Solusi persamaan-persamaan (3.50) sampai (3.53) diberikan oleh

$$P_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2} \quad (3.54)$$

$$P_1 = \frac{2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2} \quad (3.55)$$

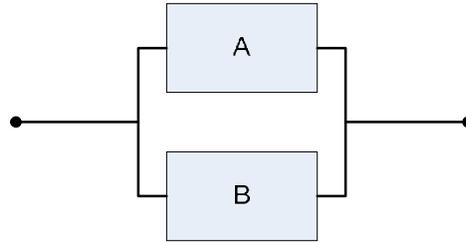
$$P_2 = \frac{\lambda^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2} \quad (3.56)$$

Sehingga ketersediaan *status tetap* sistem akan sama dengan

$$A(\infty) = P_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + \lambda^2} \quad (3.57)$$

3.3.2. Sistem Paralel

Pertimbangkan sebuah sistem paralel terdiri atas dua komponen A dan B seperti terlihat pada Gambar 3.5. Untuk sistem ini, terdapat tiga keadaan yang mungkin: keadaan 0 (kedua komponen beroperasi), keadaan 1 (satu komponen beroperasi dan lainnya dalam perbaikan), dan keadaan 2 (kedua komponen dalam perbaikan).



Gambar 3.5 Sebuah sistem paralel

Satu personil perbaikan. Jika hanya ada satu personil perbaikan untuk memperbaiki dua komponen, matriks peralihan dapat diturunkan sebagai:

$$[P] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (1-2\lambda) & 2\lambda & 0 \\ \mu & (1-\lambda-\mu) & \lambda \\ 0 & \mu & (1-\mu) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.56)$$

Ini memberikan persamaan-persamaan *status tetap* seperti

$$-2\lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \quad (3.57)$$

$$2\lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + \mu P_2 = 0 \quad (3.58)$$

$$\lambda P_1 - \mu P_2 = 0 \quad (3.59)$$

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1 \quad (3.60)$$

Solusi persamaan-persamaan ini diberikan oleh persamaan-persamaan (3.45) sampai (3.47). Karena keadaan 0 dan 1 menyatakan sistem beroperasi, ketersediaan *status tetap* sistem dapat diperoleh sebagai

$$A(\infty) = P_0 + P_1 = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2} \quad (3.61)$$

Dua personil perbaikan. Jika terdapat dua personil perbaikan, satu personil perbaikan dapat ditugaskan untuk masing-masing komponen dan matriks peralihan dapat diturunkan sebagai:

$$[P] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (1-2\lambda) & 2\lambda & 0 \\ \mu & (1-\lambda-\mu) & \lambda \\ 0 & 2\mu & (1-2\mu) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.62)$$

Dari matriks ini, persamaan-persamaan *status tetap* dapat diperoleh seperti

$$-2\lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \quad (3.63)$$

$$2\lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + 2\mu P_2 = 0 \quad (3.64)$$

$$\lambda P_1 - 2\mu P_2 = 0 \quad (3.65)$$

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1 \quad (3.66)$$

Solusi persamaan-persamaan di atas diberikan oleh persamaan-persamaan (3.54) sampai (3.56). Ketersediaan *status tetap* sistem dapat ditentukan sebagai

$$A(\infty) = P_0 + P_1 = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2} \quad (3.67)$$

RINGKASAN

1. Istilah ketersediaan digunakan untuk menunjukkan probabilitas sistem atau peralatan tersedia dalam keadaan siap beroperasi pada setiap waktu t , diberikan bahwa sistem atau peralatan tersebut berada pada kondisi siap beroperasi pada $t = 0$.
2. Jumlah kegagalan yang tidak diperbaiki, yaitu, jumlah kegagalan yang masing-masing mungkin tidak akan diperbaiki pada waktu tertentu T_0 yang akan menjadi perhatian pihak manajemen

DAFTAR PUSTAKA

Manzini, R., Regattieri, Pham, and Ferrari., 2010, *Maintenance for Industrial System*, Springer, New York.

Rao, S.S., 1992, *Reliability Based Design*, McGraw Hill Inc. New York.

Barringer, P.E, 1997, *Availability, Reliability, Maintainability, and Capability*, <http://www.barringer1.com/pdf/ARMandC.pdf>.

PERTANYAAN

1. Jelaskan pengertian keandalan!
2. Apa perbedaan tujuan pemeliharaan pencegahan dan pemeliharaan perbaikan?
3. Bagaimana analisis Markov menjelaskan tentang *availability*?

SOAL LATIHAN

1. Waktu antar kegagalan dan waktu perbaikan (*downtime*) suatu sistem multi-komponen selama periode operasi 1000 jam diberikan sebagai berikut:

Kegagalan ke-n	Waktu pada saat kegagalan terjadi (jam)	Waktu pada saat sistem selesai diperbaiki (jam)
1	74.2	77.5
2	102.1	104.2
3	193.4	194.1
4	245.5	247.8
5	381.0	381.9
6	415.3	418.2
7	464.6	467.1
8	499.8	502.9
9	580.2	583.4
10	633.1	635.1
11	678.9	680.3
12	711.7	714.2
13	788.5	791.6
14	891.0	893.3
15	982.4	985.8

Hitunglah: keandalan melekat (*inherent availability*) dan keandalan operasional sistem tersebut!

4.1. Konsep kemampu-rawatan

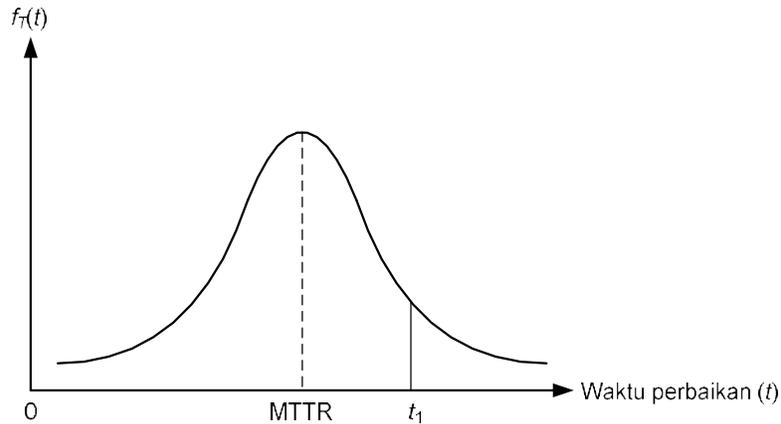
Tujuan pemeliharaan adalah untuk memulihkan sistem yang menurun fungsinya atau mengalami kegagalan agar kembali beroperasi normal. Kemampu-rawatan $M(t)$ didefinisikan sebagai probabilitas suatu komponen atau sistem rusak dapat diperbaiki dalam periode waktu tertentu. Pada dasarnya ada dua jenis pemeliharaan yang mungkin pemeliharaan pencegahan dan pemeliharaan perbaikan.

Dalam pemeliharaan pencegahan, sistem secara berkala diinspeksi, beberapa komponen diganti, pelumasan diperiksa, dan pengaturan-pengaturan dibuat sebelum kegagalan terjadi. Pemeliharaan pencegahan dimaksudkan untuk meniadakan biaya mahal perbaikan yang timbul selama tahap perbaikan ketika sistem mengalami kegagalan. Sebaliknya, pemeliharaan perbaikan dilakukan setelah sistem mengalami kegagalan. Ketika tujuan pemeliharaan pencegahan adalah untuk meningkatkan keandalan dan memperpanjang usia sistem dengan menanggulangi efek-efek yang mungkin timbul dari penuaan, kelelahan dan keausan, tujuan dari pemeliharaan perbaikan adalah untuk memulihkan sistem dari keadaan rusak ke keadaan beroperasi secepat mungkin guna meningkatkan ketersediaan sistem.

Pemeliharaan pencegahan, sesuai dengan istilahnya, dapat dijadwalkan dan dikendalikan untuk meminimasi biaya, sedangkan pemeliharaan perbaikan tak dapat dikendalikan. Jenis pemeliharaan yang digunakan akan tergantung pada jenis sistem, biaya yang dianggarkan dan resiko yang harus ditanggung jika terjadi kegagalan. Sebagai contoh, jenis pemeliharaan yang digunakan untuk mesin mobil jelas berbeda dengan yang untuk mesin pesawat.

4.2. Distribusi Waktu Perbaikan

Beberapa distribusi yang digunakan untuk waktu perbaikan adalah eksponensial, normal, lognormal dan Weibull. Distribusi waktu perbaikan yang khas diperlihatkan pada Gambar 4.1 Kemampuan sistem kemudian dapat dicari sebagai berikut.



Gambar 4.1. Fungsi kepadatan waktu perbaikan (Rao, 1992)

Ketika waktu untuk perbaikan mengikuti distribusi eksponensial.

Fungsi kepadatan waktu per baikan (T) diberikan dengan

$$f_T(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (4.1)$$

dimana $\mu = 1/\text{MTTR}$ adalah laju perbaikan dan MTTR = rata-rata waktu perbaikan (*mean time to repair*). Jika t_1, t_2, \dots, t_n menunjukkan waktu-waktu perbaikan yang diobservasi, MTTR dapat dihitung sebagai

$$\text{MTTR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.2)$$

Dalam kasus ini, fungsi kemampu-rawatan, $M(t)$, dapat ditentukan sebagai

$$M(t) = P[T \leq t] = \int_0^t f_T(\tau) \cdot d\tau = 1 - e^{-\mu t} \quad (4.3)$$

Ketika waktu untuk perbaikan mengikuti distribusi lognormal. Ambil waktu-waktu perbaikan yang diobservasi adalah t_1, t_2, \dots, t_n . Maka rata-rata sampel (\bar{X}) dan variansi s^2 dari $X = \ln t$ diberikan dengan

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i \quad (4.4)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln t_i - \bar{X})^2 \quad (4.5)$$

Jika T_0 menunjukkan waktu perbaikan yang dapat diizinkan, kemampuan rawatan akan sama dengan probabilitas waktu perbaikan kurang dari T_0 . Ini dapat didapatkan dari tabel normal standar dengan mencari nilai normal standar z_1 berkorespondensi dengan T_0 sebagai

$$z_1 = \frac{\ln T_0 - \bar{X}}{s} \quad (4.6)$$

Contoh 4.1.

Jumlah total kegagalan mesin NC milling selama setahun adalah 84. Jumlah total jam perbaikan yang diperlukan untuk memperbaiki semua kegagalan adalah 578. Hitung probabilitas memperbaiki kegagalan dalam (1) 1 jam, (2) 5 jam, (3) 20 jam. Asumsikan waktu perbaikan terdistribusi eksponensial.

Penyelesaian

Data memberikan $\mu = 84/578 = 0.1453$ aksi pemeliharaan per jam dan $MTTR = 1/\mu = 578/84 = 6.8810$ jam (rata-rata waktu untuk satu perbaikan). Sehingga kemampuan rawatan atau probabilitas perbaikan dapat ditentukan sebagai berikut:

1. $M(1) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-0.1453(1)} = 1 - 0.8648 = 0.1352$
2. $M(5) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-0.1453(5)} = 1 - 0.4836 = 0.5164$
3. $M(20) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-0.1453(20)} = 1 - 0.0547 = 0.9453$

Hasil-hasil di atas menunjukkan bahwa kegagalan hanya mempunyai 13.53 persen kesempatan diperbaiki dalam 1 jam tapi memiliki 94.53 persen kesempatan diperbaiki dalam 20 jam.

Contoh 4.2.

Waktu-waktu perbaikan t_i untuk suatu sistem komputer adalah 1.3, 1.5, 1.7, 1.8, 2.2, 2.6, 3.0, 3.1, 3.3, dan 3.9 jam. Dengan mengasumsikan distribusi waktu perbaikan adalah lognormal, tentukan hal-hal berikut:

1. Kemampu-rawatan sistem untuk waktu henti yang diizinkan 5 jam
2. Waktu henti yang diperlukan untuk mencapai maintaiabilitas 0.99.

Penyelesaian:

Karena waktu perbaikan T mengikuti distribusi lognormal, rata-rata $X = \ln t$ diberikan dengan

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \ln t_i = \frac{1}{10} (\ln 1.3 + \ln 1.5 + \dots + \ln 3.9) \\ &= \frac{1}{10} [0.2624 + 0.4055 + 0.5306 + 0.5878 + 0.7885 + 0.9555 + 1.0986 \\ &\quad + 1.1314 + 1.939 + 1.3610] = 0.83152\end{aligned}$$

Penyimpangan standar dari $\ln t$ dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}s^2 &= \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{10} (\ln t_i - \bar{X})^2 \\ &= \frac{1}{9} [(0.2624 - 0.83152)^2 + (0.4055 - 0.83152)^2 + (0.5306 - 0.83152)^2 \\ &\quad + (0.5878 - 0.83152)^2 + (0.7885 - 0.83152)^2 + (0.9555 - 0.83152)^2 \\ &\quad + (1.0986 - 0.83152)^2 + (1.1314 - 0.83152)^2 + (1.1939 - 0.83152)^2 \\ &\quad + (1.3610 - 0.83152)^2] = 0.1384\end{aligned}$$

Ini memberikan $s = 0.3720$.

1. Kemampu-rawatan sistem dikaitkan dengan waktu henti 5 jam diberikan dengan

$$\begin{aligned}M(5) &= \Phi\left(\frac{\ln 5 - \bar{X}}{s}\right) = \Phi\left(\frac{1.6094 - 0.83152}{0.3720}\right) = \Phi(2.0911) \\ &= 0.9817\end{aligned}$$

2. Untuk mencapai kemampu-rawatan 0.99, waktu henti t yang diperlukan dapat ditentukan dari hubungan

$$M(t) = 0.99 = \Phi\left(\frac{\ln t - \bar{X}}{s}\right) = \Phi\left(\frac{\ln t - 0.83152}{0.3720}\right)$$

Dari Tabel normal standar, didapatkan

$$\frac{\ln t - 0.83152}{0.3720} = 2.327$$

sehingga, $\ln t = 1.69176$ atau $t = 5.4584$ jam

Contoh 4.3.

Selesaikan Contoh 4.2 dengan asumsi waktu perbaikan mengikuti distribusi Weibull.

Penyelesaian:

Sepuluh sampel waktu perbaikan (t_i) dapat digunakan untuk mendapatkan parameter-parameter distribusi Weibull seperti $\eta = 2.75$ dan $\beta = 2.93$ sehingga kemampu-rawatan $M(t)$ diberikan dengan

$$M(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\}$$

1. Kemampu-rawatan sistem dikaitkan dengan waktu henti 5 jam diberikan dengan

$$\begin{aligned} M(5) &= 1 - \exp\left\{-\left(\frac{5}{\eta}\right)^\beta\right\} = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{5}{2.75}\right)^{2.93}\right\} \\ &= 1 - \exp(-5.764177) = 0.996862 \end{aligned}$$

2. Waktu henti yang diperlukan, t_0 , untuk mencapai kemampu-rawatan 0.99 diberikan oleh

$$t_0 = \eta[-\ln(1 - 0.99)]^{\frac{1}{\beta}} = 2.75[-\ln 0.01]^{\frac{1}{2.93}} = 4.631231 \text{ jam}$$

4.3. Kegagalan yang tidak diperbaiki (*unrepaired failure*)

Jumlah kegagalan yang tidak diperbaiki, yaitu, jumlah kegagalan yang masing-masing mungkin tidak akan diperbaiki pada waktu tertentu T_0 yang akan menjadi perhatian pihak manajemen. Jika λ menunjukkan laju kegagalan, jumlah kegagalan yang diperkirakan selama waktu T_0 akan sama dengan λT_0 . Jika waktu perbaikan mengikuti distribusi eksponensial dengan laju perbaikan μ , fungsi kemampuan-rawatan diberikan dengan

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (4.7)$$

Selanjutnya probabilitas dari 'tidak dapat memperbaiki satu kegagalan sistem' dalam waktu t_r diberikan dengan $e^{-\mu t_r}$. Sehingga jumlah kegagalan yang tidak diperbaiki dalam waktu T_0 , N_{ut} , akan sama dengan

$$N_{ut} = \lambda T_0 e^{-\mu t_r} \quad (4.8)$$

Contoh 4.4.

Unit pendingin udara yang digunakan pada instalasi komputer mempunyai rata-rata 0.1 kegagalan per bulan. Dalam 12 bulan hidup sistem, berapa banyak kegagalan yang mungkin tidak diperbaiki jika waktu perbaikan yang diizinkan untuk masing-masing perbaikan adalah 2 jam. Asumsikan jumlah perbaikan rata-rata per jam adalah 0.5.

Penyelesaian:

Jumlah kegagalan yang diperkirakan selama T_0 diberikan oleh $\lambda T_0 = 0.1(12) = 1.2$ kegagalan. Jumlah kegagalan yang mungkin tidak mendapatkan perbaikan diberikan dengan persamaan (4.8) yaitu:
$$N_{ut} = \lambda T_0 e^{-\mu t_r} = 1.2 e^{-0.5(2)} = 1.2(0.3679) = 0.4415$$

Jadi, terdapat rata-rata 0.4415 kegagalan setiap 12 bulan yang akan memerlukan waktu perbaikan lebih dari 2 jam.

RINGKASAN

3. Kemampu-rawatan didefinisikan sebagai probabilitas suatu komponen atau sistem rusak dapat diperbaiki dalam periode waktu tertentu.
4. Jumlah kegagalan yang tidak diperbaiki, yaitu, jumlah kegagalan yang masing-masing mungkin tidak akan diperbaiki pada waktu tertentu T_0 yang akan menjadi perhatian pihak manajemen

DAFTAR PUSTAKA

- Manzini, R., Regattieri, Pham, and Ferrari., 2010, *Maintenance for Industrial System*, Springer, New York.
- Rao, S.S., 1992, *Reliability Based Design*, McGraw Hill Inc. New York.
- Barringer, P.E, 1997, *Availability, Reliability, Maintainability, and Capability*, <http://www.barringer1.com/pdf/ARMandC.pdf>.

PERTANYAAN

1. Jelaskan pengertian kemampu-rawatan!
2. Apa perbedaan antara *availability* dengan *maintainability*?

SOAL LATIHAN

1. Waktu antar kegagalan dan waktu perbaikan (*downtime*) suatu sistem multi-komponen selama periode operasi 1000 jam diberikan sebagai berikut:

Kegagalan ke-n	Waktu pada saat kegagalan terjadi (jam)	Waktu pada saat sistem selesai diperbaiki (jam)
1	74.2	77.5
2	102.1	104.2
3	193.4	194.1
4	245.5	247.8
5	381.0	381.9
6	415.3	418.2
7	464.6	467.1
8	499.8	502.9
9	580.2	583.4
10	633.1	635.1
11	678.9	680.3
12	711.7	714.2
13	788.5	791.6
14	891.0	893.3
15	982.4	985.8

Jika waktu perbaikan dianggap berdistribusi lognormal, hitunglah estimasi waktu kegagalan yang diperlukan untuk mencapai kemampuan perawatan sistem sebesar 95%

GLOSARIUM

Pemeliharaan : kombinasi dari semua tindakan teknis, administratif dan manajerial terhadap suatu komponen, selama daur hidupnya, untuk mempertahankan atau mengembalikan kedudukannya pada posisi dimana komponen tersebut mampu melaksanakan fungsi-fungsi yang diperlukan.

Manajemen pemeliharaan : semua kegiatan manajemen yang menetapkan tujuan pemeliharaan atau prioritas, strategi, dan wewenang serta mengimplementasikan hal-hal tersebut mulai dari perencanaan, pengendalian dan pengawasan serta pemanfaatan metode-metode perbaikan dengan melibatkan aspek ekonomi dalam suatu organisasi.

Strategi pemeliharaan : jenis tugas yang berbeda meliputi aksi, prosedur, sumber daya dan waktu.

Pemeliharaan pencegahan : pemeliharaan yang dilakukan pada selang waktu yang ditentukan sebelumnya, atau terhadap kriteria lain yang diuraikan, dan dimaksudkan untuk mengurangi kemungkinan bagian-bagian lain tidak memenuhi kondisi yang bisa diterima.

Pemeliharaan perbaikan : pemeliharaan yang dilakukan untuk memperbaiki suatu bagian termasuk penyetelan dan reparasi yang telah terhenti untuk memenuhi suatu kondisi yang bisa diterima

Keandalan : kemampuan sistem atau komponen untuk memenuhi fungsi yang dibutuhkan dalam kondisi tertentu selama rentang waktu yang spesifik.

Fungsi keandalan : prosentase sistem dapat beroperasi lebih dari t waktu.

Laju kegagalan : banyaknya kegagalan yang terjadi dalam interval waktu yang ditetapkan.

Rata-rata waktu antar kegagalan : rata-rata jarak antara waktu kegagalan yang satu dengan waktu kegagalan yang lain secara.

Rata-rata waktu antar perbaikan : rata-rata interval waktu yang digunakan untuk mengembalikan komponen yang gagal kembali kedalam kondisi operasionalnya.

Kegagalan : didefinisikan sebagai ketidakmampuan suatu item untuk menjalankan fungsinya.

Ketersediaan : probabilitas sistem atau peralatan tersedia dalam keadaan siap beroperasi pada setiap waktu t , diberikan bahwa sistem atau peralatan tersebut berada pada kondisi siap beroperasi pada $t = 0$.

Kemampu-rawatan : probabilitas suatu komponen atau sistem rusak dapat diperbaiki dalam periode waktu tertentu.

SISTEM PEMELIHARAAN PADA SISTEM MANUFAKTUR

KONSEP SISTEM PEMELIHARAAN

“Pemeliharaan (*maintenance*) adalah kombinasi dari semua tindakan teknis, administratif dan manajerial terhadap suatu komponen, selama daur hidupnya, untuk mempertahankan atau mengembalikan kedudukannya pada posisi dimana komponen tersebut mampu melaksanakan fungsi-fungsi yang diperlukan” (EN 13306:2001 *Maintenance terminology*).

Pemeliharaan merupakan kegiatan yang dilakukan untuk mempertahankan kondisi siap operasi dimana termasuk didalamnya kegiatan inspeksi, reparasi, overhaul, perbaikan, modifikasi, dan penggantian suku cadang, yang bertujuan:

- a. Memperpanjang usia kegunaan aset.
- b. Menjamin ketersediaan peralatan untuk produksi atau jasa untuk mendapatkan laba investasi yang maksimal.
- c. Menjamin ketersediaan operasional dari seluruh peralatan yang diperlukan dalam keadaan darurat setiap waktu, misalnya unit cadangan, unit pemadam kebakaran, penyelamat, dan sebagainya.
- d. Menjamin keselamatan orang yang menggunakan sarana tersebut.

LPPM UPNVY PRESS

UPN “Veteran” Yogyakarta
LPPM Gd. Rektorat Lantai 4
Jl. Padjajaran 104 (Lingkar Utara)
Yogyakarta 55283
Telp. (0274) 486733 ext. 154

