

Konsep Dasar Manajemen Strategik Perawatan Mesin



Dr. Ir. Nasar Buntu L, M.M.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas kasih karuniaNya buku ini dapat diselesaikan dengan judul “*Konsep Dasar Manajemen Strategik Perawatan Mesin*”.

Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungannya baik moral, ilmu pengetahuan maupun materiil dalam proses penyusunan buku ini, antara lain:

1. Rektor dan civitas akademika Universitas Internasional Batam.
2. Rektor dan civitas akademika Universitas Kristen Indonesia Toraja
3. Direktur dan civitas akademika Politeknik Sinar Mas Berau Coal
4. Pimpinan dan karyawan PT. Berau Coal
5. Ayahanda Laurents Tambing dan ibunda Yohana Samperura, istri Elvin Leppe Satian, ananda Livina Jayne Tambing dan Lance Given Tambing, kakanda Median Karel, adinda (alm) Trianto Sosang dan Ferry Malino yang telah memberikan inspirasi maupun dukungan moril, materiil dan spiritual selama proses penulisan buku hingga selesai.

Akhir kata penulis menyadari bahwa buku ini masih jauh dari kesempurnaan dalam penyajian karena kelemahan penulis. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga buku ini dapat bermanfaat khususnya bagi pihak-pihak yang membutuhkan demi penulisan selanjutnya yang lebih sempurna dalam bidang ilmu manajemen strategik dan perawatan mesin.

Rantepao,

Penulis

PROFIL PENULIS



Dilahirkan di Rantepao 24 Desember 1973, penulis memiliki pengalaman sebagai praktisi di berbagai industri baik itu industri kertas, manufaktur elektronik, konstruksi lepas pantai dan pertambangan selama hampir 25 tahun di bidang operasional, manajemen perawatan, manajemen proyek, manajemen rantai pasok maupun manajemen strategik serta sebagai dosen profesional di beberapa universitas dan politeknik.

Penulis menyelesaikan studi S1 di Teknik Mesin dan Pendidikan Profesi Insinyur (PPI) di UK Petra Surabaya, S2 Manajemen Strategik di Universitas Internasional Batam dan S3 Manajemen Strategik di Universitas Trisakti Jakarta.

Semoga buku ini, yang merepresentasikan latar belakang keilmuan penulis dalam proses produksi di berbagai industri terkait permesinan dan manajemen strategik bisa memberikan manfaat bagi praktisi maupun akademisi terkhusus mahasiswa dalam mempelajari perawatan mesin dan memperdalam penerapan manajemen strategik.

Penulis

DAFTAR ISI

BAB 1	MAINTENANCE	1
	A. Definisi Maintenance.....	1
	B. Maintenance Management.....	1
	C. Efektifitas dan Efisiensi Maintenance Management	2
	D. Tujuan, Strategi dan Tanggung Jawab Maintenance	3
	1. Menentukan Tujuan Perawatan	3
	2. Perumusan Strategi.....	5
	3. Tanggung Jawab Perawatan.....	5
	E. Penerapan Strategi pada Kegiatan Maintenance	6
BAB 2	PREVENTIVE MAINTENANCE	8
	A. Definisi.....	8
	B. Bagian-bagian dalam Perawatan Preventif	8
	C. Langkah-langkah untuk Memulai Program PM	11
	D. Pengukuran PM	13
	1. Mean Preventive Maintenance Time (MPMT)	13
	2. Median Preventive Maintenance Time (MDPMT)	14
	3. Maximum Preventive Maintenance Time (MXPMT)	14
	E. Model PM	15
	1. Model Optimasi Inspeksi I	15
	2. Model Optimasi Inspeksi II	20
	3. Model Optimasi Inspeksi III	22
	4. Model PM Markov	24
	F. Keuntungan dan Kerugian PM	26
	G. Tugas	27
BAB 3	CORRECTIVE MAINTENANCE	28
	A. Definisi	28
	B. Jenis-jenis Perawatan Korektif	28
	C. Langkah-langkah dan Strategi Perawatan Korektif	29

D.	Pengukuran Perawatan Korektif	31
1.	Mean Corrective Maintenance Time	31
2.	Median Active Corrective Maintenance Time	32
3.	Maximum Active Corrective Maintenance Time	32
E.	Model Matematika Perawatan Korektif	32
1.	Model I	33
2.	Model II	36
3.	Model III	39
4.	Model IV	42
F.	Perkiraan Persamaan Tingkat Kegagalan Efektif untuk Sistem Redundan Dengan Perawatan Korektif	45
1.	Tingkat Kegagalan Efektif Untuk Sistem Tipe I	45
2.	Tingkat Kegagalan Efektif Pada Sistem Tipe II	46
G.	Latihan Soal	46
BAB 4	RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE	48
A.	Pendahuluan	48
B.	Tujuan dan Prinsip RCM	48
C.	Proses RCM dan Hal-hal Terkait	51
D.	Bagian-bagian RCM	51
1.	Perawatan Reaktif	52
2.	Perawatan Preventif (Pencegahan)	53
3.	Pengujian dan Inspeksi Prediktif	54
4.	Perawatan Proaktif	54
E.	Teknologi Pengujian dan Inspeksi Prediktif	58
F.	Indikator Pengukuran Efektifitas Program RCM	63
G.	Keunggulan RCM dan Alasan Atas Kegagalannya	66
H.	Latihan Soal	66
BAB 5	TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE.....	68
A.	Pendahuluan	68
B.	Tahapan Proses TPM	70
C.	Tujuan dan Manfaat TPM	73

1. Tahap pertama: Tahap persiapan	74
2. Tahap kedua: Tahap pengenalan	75
3. Tahap ketiga: Implementasi	75
4. Tahap keempat: Tahap pelebagaan	75
D. Pilar TPM	76
1. Pilar 1 : (5S)	77
2. Pilar 2 : Perawatan Otonom (Jishu Huzon (JH))	77
3. Pilar 3 : Perbaikan Secara Berkelanjutan	78
4. Pilar 4 : Perawatan Terencana	78
5. Pilar 5: Perawatan Mutu	79
6. Pilar 6 : Pelatihan	80
7. Pilar 7 : TPM Office	80
8. Pilar 8 : Keselamatan, Kesehatan, dan Lingkungan	81
E. TPM dan Lean	81
F. TPM dan Six Sigma	84
1. Project Charter	88
2. SIPOC	88
3. Kano Model	90
4. CTQ	91
5. Diagram Afinitas	91
6. Analisa Sistem Pengukuran	91
7. Kemampuan Proses	93
8. Analisis Grafis	97
9. Diagram Sebab-Akibat	97
10. Analisis Bentuk & Efek Kegagalan (Failure Mode & Effect Analysis, FMEA).....	97
11. Pengujian Hipotesis	100
12. ANOVA	101
13. Korelasi	102
14. Regresi Linear Berganda	102
15. Teori Kendala	102

G. Tantangan dan Masa Depan Penerapan TPM	104
1. Penerapan TPM di Bidang Jasa dan Kesehatan	104
2. Menerapkan Konsep TPM ke Siklus Hidup Desain dan Pengembangan	105
3. Faktor Keterlibatan dan Keberhasilan	107
DAFTAR PUSTAKA	110

BAB 1

MAINTENANCE

A. DEFINISI MAINTENANCE

Istilah *maintenance* (perawatan) didefinisikan sebagai kombinasi dari semua hal teknis, tindakan administratif dan manajerial selama siklus hidup (*life cycle*) suatu item yang bertujuan untuk menjaga atau mengembalikan keadaan fungsi atau kombinasi fungsi yang diperlukan (EN 13306:2001, 2001).

B. MAINTENANCE MANAGEMENT

Menurut *Webster's Dictionary*, manajemen mencirikan proses memimpin dan mengarahkan semua atau bagian dari organisasi (sering kali bisnis) melalui penyebaran dan pengaturan sumber daya (manusia, keuangan, bahan, intelektual atau sesuatu yang tidak berwujud). Seseorang juga dapat memikirkan manajemen secara fungsional sebagai tindakan mengukur kuantitas secara teratur dan menyesuaikan rencana awal dan tindakan yang diambil untuk mencapai tujuan yang dimaksudkan. Hal ini berlaku bahkan dalam situasi di mana perencanaan tidak sesuai yang diinginkan. Manajemen situasional mungkin mendahului dan mengarah pada tujuan manajemen tertentu.

Berdasarkan hal-hal tersebut di atas, maka *maintenance management* (manajemen perawatan) akan memberikan karakter pada proses dan mengarahkan perawatan dalam suatu organisasi yang didefinisikan oleh EN 13306:2001 (2001) sebagai:

“semua kegiatan manajemen yang menentukan tujuan atau prioritas perawatan sebagai target yang ditetapkan dan diterima oleh departemen manajemen dan perawatan, strategi manajemen dalam rangka mencapai tujuan perawatan dan menerapkannya dengan cara seperti perawatan, pengendalian dan pengawasan serta beberapa perbaikan termasuk aspek ekonomi dalam organisasi.”

Definisi *maintenance management* ini selaras erat dengan pengertian yang ditemukan dalam literatur perawatan modern seperti Campbell (1995), Campbell & Jardine (2001) maupun Shenoy & Bhadury (1998). Definisi lebih lanjut terkait *maintenance management* sebagai manajemen semua aset yang dimiliki oleh perusahaan untuk memaksimalkan keuntungan atas investasi dari aset dijelaskan oleh Wireman (1998). Duffuaa *et al.* (2000) juga menunjukkan bagaimana sebuah sistem perawatan dapat dilihat sebagai sistem *input-output* sederhana. *Input* adalah tenaga kerja, manajemen, peralatan, peralatan serta yang lainnya dan *output* adalah peralatan dikonfigurasi dengan baik dan bekerja secara andal untuk mencapai operasional pabrik yang direncanakan. Hal tersebut menunjukkan

bahwa sistem perawatan berfungsi sebagai perencanaan perawatan (filsafat, perkiraan, kapasitas, dan penjadwalan beban kerja perawatan), organisasi (desain kerja, standar, pengukuran kerja, dan administrasi proyek) dan pengendalian perawatan (terkait pekerjaan, bahan, inventori, biaya, dan manajemen berorientasi mutu). Hal-hal terkait perawatan dijelaskan dalam EN 13306:2001 (2001) yang meliputi:

1. penentuan tujuan dan prioritas perawatan;
2. penentuan strategi dan tanggung jawab;
3. penerapan perawatan dengan cara seperti perencanaan perawatan, kontrol perawatan dan pengawasannya;
4. meningkatkan metode termasuk aspek ekonomi dalam organisasi.

Dalam rangka mengelola pemeliharaan secara efektif dan efisien, empat poin di atas bisa diringkas dalam dua hal berikut menurut Marquez (2007):

1. proses manajemen perawatan, pelaksanaan tindakan dan serangkaian tahapan atau langkah yang mengikutinya dan;
2. kerangka manajemen perawatan yang mendukung struktur dan sistem dasar yang diperlukan untuk mengelola perawatan (perluanya mengatur perawatan).

C. EFEKTIVITAS DAN EFISIENSI MAINTENANCE MANAGEMENT

Proses *maintenance management* dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu definisi strategi dan penerapan strategi Marquez (2007). Terkait definisi strategi perawatan, hal ini perlu untuk mengetahui tujuan perawatan sebagai *input* yang akan diturunkan langsung dari rencana bisnis. Bagian awal dari manajemen perawatan ini kadang-kadang terlupakan padahal ini merupakan proses yang sangat mempengaruhi keberhasilan perawatan dalam suatu organisasi dan menentukan efektivitas penerapan selanjutnya dari rencana, jadwal, kontrol dan peningkatan perawatan. Kemampuan untuk mengatasi masalah ini melalui pencapaian suatu strategi perawatan yang efektif menunjukkan kemampuan untuk memperkirakan kebutuhan perawatan yang sebenarnya sepanjang waktu sesuai dengan kebutuhan produksi. Ini akan memungkinkan untuk mencapai hal di mana suatu organisasi akan dapat meminimalkan biaya tidak langsung dari perawatan, biaya-biaya yang terkait dengan kerugian produksi, dan akhirnya dengan ketidakpuasan pelanggan (Vagliasindi, 1989). Efektivitas yang jelas menekankan pada seberapa baik suatu departemen atau fungsi memenuhi tujuan atau kebutuhan perusahaan dan biasanya dilihat dalam hal mutu layanan yang disediakan yang dilihat dari sudut pandang pelanggan. Dalam hal perawatan, efektivitas menunjukkan kepuasan keseluruhan perusahaan dengan kapasitas dan kondisi aset yang dimiliki (Wireman, 1998) atau pengurangan keseluruhan biaya perusahaan diperoleh karena kapasitas produksi tersedia saat dibutuhkan (Palmer,

1999). Efektivitas mengarah pada proses yang sebenarnya dan proses memproduksi hasil yang diperlukan.

Bagian kedua dari proses yaitu penerapan strategi yang dipilih memiliki tingkat signifikansi yang berbeda. Kemampuan untuk menangani masalah implementasi manajemen perawatan (misalnya, kemampuan untuk memastikan dengan benar tingkat keterampilan, persiapan kerja yang tepat, alat yang sesuai dan pemenuhan jadwal) akan memungkinkan untuk meminimalkan biaya langsung perawatan (tenaga kerja dan sumber daya yang dibutuhkan perawatan lainnya). Di bagian proses ini, suatu organisasi berurusan dengan efisiensi manajemen yang seharusnya kurang penting. Efisiensi berarti menghasilkan limbah/bahan terbuang sedikit serta biaya atau upaya minimum yang tidak perlu. Efisiensi membandingkan kuantitas layanan yang diberikan dengan sumber daya yang dikeluarkan. Ini mengukur seberapa baik tugas itu dilakukan, bukan apakah tugas itu sendiri benar. Efisiensi kemudian dipahami sebagai memberikan hal yang sama atau lebih baik dengan perawatan menggunakan biaya yang sama.

Sebagian besar penelitian yang dilakukan terkait manajemen perawatan terutama ditujukan untuk meningkatkan penerapan berbagai bagian dari proses manajemen seperti perencanaan, penjadwalan, pengendalian dan peningkatan, sementara itu lebih sedikit upaya yang digunakan untuk mempelajari proses mencapai strategi perawatan yang efektif. Itu sebabnya sering ditemukan karyawan melakukan "kesalahan yang dipikir benar" di suatu organisasi terkait perawatan suatu sistem.

D. TUJUAN, STRATEGI DAN TANGGUNG JAWAB MAINTENANCE

1. Menentukan Tujuan Perawatan

Tujuan bisnis mempertimbangkan apa yang menjadi kebutuhan dan keinginan para pelanggan, pemegang saham, dan pemangku kepentingan lainnya (Campbell, 1995). Tujuan bisnis secara umum dapat dikelompokkan menjadi empat menurut (Boucly, 1998), yaitu: profitabilitas, pertumbuhan, risiko dan tujuan sosial. Hubungan keempat kelompok tersebut terhadap perawatan adalah:

- a. Profitabilitas, sebagai aturan umum merupakan prioritas. Ini adalah kondisi yang diperlukan yang memungkinkan suatu organisasi dalam jangka panjang mencapai tujuan lain. Oleh karena itu, perawatan harus secara jelas berkontribusi pada profitabilitas dan daya saing bisnis, atau keefektifan administrasi dan pelayanan publik;
- b. Pertumbuhan dapat menjadi penting pada berbagai momen siklus hidup produk, misalnya pasar dengan pertumbuhan tinggi akan mendapatkan keuntungan yang lebih mudah dan lebih bernilai, mengurangi tekanan pada harga, memastikan akses ke teknologi, menghalangi pendatang berikutnya di pasar, dan sebagainya.

- c. Orang, lingkungan dan keamanan aset adalah prioritas lain bisnis. Meskipun undang-undang dan peraturan menetapkan kerangka kerja tertentu demi keselamatan, risiko mungkin selalu muncul sebagai konsekuensi dari instalasi peralatan baru, saling ketergantungan antara peralatan baru dan yang sudah ada, dan sebagainya.
- d. Banyak perusahaan mengklaim bahwa mereka memiliki tujuan sosial yang harus dipenuhi. Mereka secara aktif ingin berkontribusi dalam hal terkait masalah yang relevan secara sosial dengan terlibat dalam dialog dengan kelompok masyarakat yang tertarik.

Untuk mencapai tujuan bisnis ini, maka dibutuhkan strategi bisnis. Kata strategi terkait dalam hubungannya dengan lingkungan aset saat ini, membantu organisasi menerjemahkan tujuan bisnis menjadi tujuan perawatan. Ketika melakukannya, maka suatu yang normal untuk menemukan berbagai macam tipe tujuan dalam manajemen perawatan di banyak organisasi (Boucly, 1998; Wireman, 1990), tujuan yang secara umum dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok:

- a. Tujuan teknis: Ini tergantung pada operasional suatu bisnis yang imperatif. Secara umum, keharusan operasional yang imperatif terkait dengan tingkat kepuasan akan ketersediaan peralatan dan keselamatan orang. Metode yang berlaku umum untuk mengukur pemenuhan tujuan ini adalah *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) seperti yang dijelaskan dalam metode TPM (*Total Productive Maintenance*) oleh Nakajima (1989);
- b. Tujuan hukum/peraturan wajib: Biasanya ini adalah tujuan perawatan untuk memenuhi semua peraturan yang ada untuk perangkat listrik, peralatan bertekanan, kendaraan, alat perlindungan, dan sebagainya.
- c. Tujuan keuangan: untuk memenuhi tujuan teknis dengan biaya yang minimal. Dari sudut pandang jangka panjang biaya siklus hidup peralatan secara global seharusnya menjadi ukuran yang sesuai untuk ini

Mencapai setiap tujuan mungkin akan memiliki tingkat hasil yang berbeda, oleh karena itu perlu untuk mengevaluasi tujuan perawatan yang berbeda dan untuk memastikan tujuan tersebut realistis serta sesuai dengan situasi aset saat ini, maka perlu untuk mulai merencanakan strategi dalam mencapai tujuan tersebut. Sangat penting untuk melihat apa yang "orang lain lakukan", untuk meninjau penerapan terbaik di suatu sektor. Ini akan membantu suatu organisasi menetapkan tujuan yang realistis atau untuk menguji suatu strategi yang potensial.

Suatu organisasi tidak dapat melupakan bahwa tujuan perawatan adalah target yang ditetapkan dan diterima oleh departemen manajemen dan perawatan. Proses dari menetapkan target sangat penting, biasanya berulang, dan seringkali memakan proses dan waktu yang lama.

2. Perumusan Strategi

Proses penetapan strategi dapat mengikuti standar metode perencanaan di suatu organisasi seperti ditunjukkan di gambar 1.1 (Marquez, 2007):

- Berasal dari sasaran suatu organisasi terkait kebijakan dan tujuan dalam hal perawatan. Tujuan ini mungkin termasuk: ketersediaan peralatan, keandalan, keamanan, risiko, anggaran perawatan, dan sebagainya yang harus dikomunikasikan kepada semua personel yang terlibat dalam perawatan termasuk orang luar yang terlibat;
- Penentuan kinerja perusahaan/fasilitas saat ini;
- Penentuan ukuran target kinerja (Indikator Kinerja Utama - KPI). Perbaikan akan dilakukan berdasarkan penerimaan bisnis, pengguna, dan indikator kinerja manajemen perawatan;
- Menetapkan prinsip-prinsip untuk memandu implementasi strategi melalui perencanaan, pelaksanaan, penilaian, analisis dan peningkatan perawatan.



Gambar 1.1 Model Strategi Perawatan

3. Tanggung Jawab Perawatan

Strategi perawatan yang diadopsi akan mengarah pada penentuan tanggung jawab manajemen perawatan yang berbeda pada tingkat aktivitas yang berbeda. Tanggung jawab ini akan dipegang oleh pelaku yang berbeda yang memainkan peran yang berbeda di setiap skenario. Pelaku perawatan diantaranya adalah produsen peralatan, vendor peralatan, pembeli dari peralatan (yang biasanya menggunakannya dan menjadi "pengguna" peralatan) dan pihak ketiga/eksternal yang menyediakan semua jenis layanan perawatan. Bentuk skenario dalam perawatan menurut (Marquez, 2007) adalah sebagai berikut:

- a. Bentuk pertama adalah skenario di mana pabrikan peralatan memberikan perawatan lengkap dan dukungan layanan perawatan sebagai bagian perjanjian dari pembelian produk.
- b. Bentuk kedua adalah skenario yang paling umum yaitu pabrik peralatan atau vendor hanya menyediakan dasar atau standar perencanaan pendukung perawatan, seperti rekomendasi untuk perawatan, buku pegangan perawatan, daftar suku cadang, dan dokumentasi umum lainnya. Pengguna kemudian melakukan perawatan yang diperlukan dan dukungan perawatan untuk kasus khusus menggunakan sumber daya internal. Ini terjadi ketika peralatan yang ada digabungkan ke dalam sistem yang kompleks oleh vendor atau organisasi lain dan kemudian dipasok ke pengguna akhir. Tanggung jawab untuk melakukan perawatan ditentukan antara vendor dan pengguna, dimana pada umumnya pengguna mengambil tanggung jawab untuk itu
- c. Bentuk ketiga dan umum diterapkan, yaitu layanan perawatan yang seluruhnya atau sebagian diserahkan kepada ke perusahaan lain yang tidak berhubungan dengan produsen peralatan. Pembagian manajemen perawatan dibagi antara penyedia layanan dan pengguna tetapi pengguna biasanya mengurangi aktivitasnya dengan hanya mengontrol kinerja dan menetapkan tujuan perawatan yang dilakukan.

Dalam berbagai kasus atau kemungkinan skenario, fungsi dan tanggung jawab dalam perawatan suatu organisasi harus diidentifikasi, ditugaskan dan dikomunikasikan kepada pengguna peralatan, bagian internal dan eksternal organisasi yang terkait.

Sebelum penugasan tanggung jawab perawatan diberikan, maka persyaratan kualifikasi personel (atau persyaratan kualifikasi pihak ketiga) dari masing-masing fungsi harus dipelajari dan ditentukan. Manajemen perawatan harus memastikan bahwa semua pihak terkait mengetahui persyaratan ini dan semua tanggung jawab untuk proses dan aktivitas dicantumkan dalam deskripsi pekerjaan untuk setiap posisi dan/atau dalam kontrak pihak ketiga terkait. Semuanya itu bertujuan untuk memastikan fungsi akan dijalankan dengan benar, efisien, dan dengan cara yang aman serta memperhatikan pengaruhnya terhadap aspek lingkungan.

E. PENERAPAN STRATEGI PADA KEGIATAN MAINTENANCE

Manajemen perawatan harus sejalan dengan tindakan di tiga tahapan kegiatan bisnis dalam organisasi yang meliputi strategik, teknis, dan operasional (Marquez, 2007).

Tindakan di tingkat strategik adalah mengubah prioritas bisnis menjadi prioritas terkait perawatan. Untuk mencapai prioritas ini, maka proses ini akan membantu menyusun strategi jangka menengah hingga panjang untuk mengatasi

kinerja perawatan yang dihadapi maupun potensi kesenjangan yang akan ditimbulkannya ke depan. Akibatnya, rencana perawatan secara umum dilakukan di tingkatan ini.

Perubahan dari prioritas bisnis menjadi prioritas perawatan dilakukan dengan menetapkan target yang paling penting berdasarkan operasional yang sedang dilakukan. Analisis secara detail dilakukan untuk mengukur berbagai masalah seperti kejadian kerusakan peralatan yang berdampak pada target operasional perusahaan (misalnya dengan menggunakan analisis kritis). Manajemen perawatan kemudian akan mengembangkan pelatihan tindakan strategis untuk mengatasi masalah spesifik untuk item kritis tersebut. Tindakan lainnya akan fokus pada penerapan keterampilan dan teknologi yang diperlukan (misalnya teknologi pemantauan kondisi mesin) untuk peningkatan perawatan dalam skala mikro terkait efektivitas dan efisiensi.

Tindakan di tingkat teknis akan menentukan penugasan yang benar dari semua sumber daya perawatan (keterampilan, bahan, peralatan uji, dan sebagainya) untuk memenuhi rencana perawatan sehingga akan menghasilkan program terperinci dalam bentuk semua tugas yang ditentukan dan sumber daya yang diberikan. Selama proses perencanaan dan penjadwalan akan kebutuhan perawatan secara terperinci, kegiatan di tingkat ini harus mengembangkan tingkat kompetensi untuk membedakan di antara berbagai pilihan sumber daya (dari nilai yang berbeda) yang mungkin ditugaskan untuk melakukan tugas perawatan pada pada suatu peralatan, lokasi dan waktu tertentu. Tindakan tersebut akan menjelaskan kebijakan perawatan taktis.

Tindakan di tingkat operasional akan memastikan bahwa tugas perawatan dilakukan oleh teknisi ahli, sesuai waktu yang dijadwalkan, mengikuti prosedur dengan benar, dan menggunakan alat yang tepat. Akibatnya, pekerjaan akan selesai dan data akan direkam dalam sistem informasi. Prosedur di tingkat operasional diperlukan untuk pekerjaan pencegahan, perbaikan peralatan, dan pemecahan masalah dengan tingkat perhatian yang tinggi. Hal ini disebabkan karena diagnosis alasan kegagalan suatu sistem telah menjadi hal yang sangat penting. Tugas ini sering melibatkan spesialis dan menggunakan sistem teknologi yang kompleks. Karena itu wajar untuk mengharapkan bahwa proses pemecahan masalah akan sangat bergantung pada sistem informasi perawatan yang bisa memberikan informasi tentang semua pekerjaan yang dilakukan pada setiap peralatan.

Dengan mengambil pengalaman dalam penerapan semua manajemen perawatan di tiga tingkat tersebut dan mengadaptasi penerapan terbaik dari dalam dan luar perawatan, maka organisasi akan sampai pada sistem manajemen perawatan untuk terus ditingkatkan dan secara otomatis menyesuaikan dengan target yang baru dan perubahan target organisasi.

BAB 2

PREVENTIVE MAINTENANCE

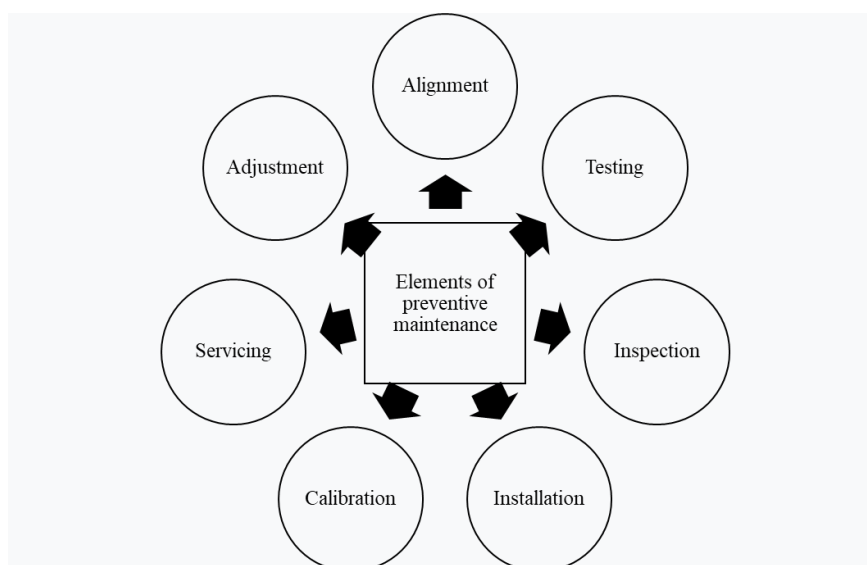
A. DEFINISI

Perawatan preventif atau pencegahan (PM) merupakan bagian penting dari suatu kegiatan perawatan. Suatu organisasi mengalokasikan biaya yang besar dalam usaha perawatan total. PM merupakan gambaran kepedulian dan penanganan oleh individu yang terlibat dengan perawatan untuk menjaga peralatan/fasilitas dalam keadaan operasional yang memuaskan dengan menyediakan inspeksi, deteksi, dan koreksi yang sistematis dari suatu kerusakan yang bisa terjadi atau kerusakan yang bertambah parah (AMCP 706-132, 1975). Beberapa tujuan utama PM adalah meningkatkan waktu penggunaan peralatan, mengurangi kerusakan peralatan sehingga tidak bisa digunakan, memungkinkan perencanaan yang lebih baik dan penjadwalan pekerjaan perawatan yang diperlukan, meminimalkan kerugian produksi karena kegagalan peralatan serta meningkatkan kesehatan dan keselamatan personel perawatan (Niebel, 1994).

PM harus hemat biaya karena program PM dalam organisasi sering berakhir dengan kegagalan disebabkan kehilangan dukungan manajemen karena biayanya tinggi atau mereka membutuhkan waktu yang lama untuk menunjukkan hasil. Prinsip terpenting untuk menjaga dukungan manajemen yang berkelanjutan adalah: "Jika itu tidak akan menghemat uang, maka jangan lakukan itu! "

B. BAGIAN-BAGIAN DALAM PERAWATAN PENCEGAHAN

Ada tujuh elemen perawatan pencegahan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 (Westerkamp, 1997).



Gambar 2.1 Elemen Perawatan Pencegahan (*Preventive Maintenance*)

Ketujuh elemen tersebut adalah:

1. *Inspection* (inspeksi): menginspeksi bahan/barang secara berkala untuk menentukan kemudahan servisnya dengan membandingkan karakteristik fisik, elektrik, mekanik dan lainnya dengan standar yang diharapkan.
2. *Service* (servis): pembersihan, pelumasan, pengisian daya, penanganan karena kondisi yang tidak standar dan lainnya dari barang/bahan secara berkala untuk mencegah terjadinya kegagalan yang baru.
3. *Calibration* (kalibrasi): menentukan nilai karakteristik suatu barang secara berkala dibandingkan dengan standar. Ini terdiri dari perbandingan dua instrumen, salah satunya adalah standar bersertifikat dengan akurasi yang diketahui untuk mendeteksi dan menyesuaikan setiap ketidaksesuaian dalam keakuratan material dimana parameter yang ada dibandingkan dengan nilai standar yang ditetapkan.
4. *Testing* (pengujian): menguji atau memeriksa secara berkala untuk menentukan kemudahan servis dan mendeteksi penurunan kinerja dalam hal elektrik/ mekanik.
5. *Alignment* (tepat sasaran): membuat perubahan pada suatu bagian tertentu dari komponen yang bertujuan untuk mencapai kinerja yang optimal.
6. *Adjustment* (pengaturan): secara berkala menyesuaikan bagian tertentu dari material yang bertujuan mencapai kinerja sistem yang optimal
7. *Installation* (instalasi): penggantian berkala komponen yang mempunyai masa pakai terbatas atau sudah aus untuk mempertahankan toleransi sistem yang telah ditentukan.

Beberapa ciri suatu mesin atau peralatan yang memerlukan program perawatan preventif yang baik adalah sebagai berikut (Levitt, 1997b):

1. Penggunaan peralatan yang rendah karena sering mengalami kerusakan
2. Skrap dan barang buangan dalam jumlah besar karena peralatan yang tidak dapat diandalkan
3. Kenaikan biaya perbaikan peralatan karena kelalaian perawatan seperti pelumasan yang teratur, inspeksi, dan penggantian suku cadang / komponen yang aus
4. Waktu tunggu operator yang tinggi karena kerusakan peralatan
5. Penurunan usia produktif peralatan sebagai modal perusahaan karena perawatan yang tidak memuaskan

Tabel 2.1 menunjukkan 17 pertanyaan untuk mengetahui terlaksananya program perawatan preventif dalam suatu organisasi (Niebel, 1994). Jawaban “ya” atau “tidak” untuk setiap pertanyaan diberi 5 atau 0 poin. Jawaban "mungkin" diberi skor dari 1 sampai 4. Skor total kurang dari 55 poin menunjukkan bahwa program perawatan preventif memerlukan perbaikan lebih lanjut.

Tabel 2.1 Pertanyaan Evaluasi Program Perawatan Pencegahan (PM)

No	Pertanyaan	Jawaban		
		Ya (Nilai 5)	Mungkin (Nilai 1 – 4)	Tidak (Nilai 0)
1	Apakah tren <i>downtime</i> dicatat dan dilaporkan secara teratur?			
2	Apakah ada program PM secara formal?			
3	Apakah inspektur melakukan pekerjaan inspeksinya full time?			
4	Apakah lembar periksa dikontrol untuk memastikan 100% kesesuaian?			
5	Apakah rute inspeksi dikembangkan/dijadwalkan atas dasar metode pengukuran kerja?			
6	Apakah laporan inspeksi diperiksa secara acak oleh supervisor untuk menentukan akurasi?			
7	Berapa persentase waktu henti (<i>downtime</i>) karena perawatan?			
8	Apakah tugas pelumasan dilakukan melalui penggunaan lembar cek yang dijadwalkan?			
9	Apakah manajemen perawatan menerima laporan <i>downtime</i> yang sesungguhnya?			
10	Apakah satu individu bertanggung jawab atas keseluruhan PM?			
11	Apakah cara pelumasan dikembangkan dan dijadwalkan berdasarkan studi waktu dan metode?			
12	Apakah pemrosesan data digunakan untuk menjadwalkan dan melaporkan inspeksi dan pelumasan PM?			
13	Apakah masalah yang dapat diperkirakan yang ditemukan melalui inspeksi PM dilaporkan dengan cepat?			
14	Apakah pekerjaan PM disorot dalam sistem pelaporan biaya untuk memungkinkan analisis rutin PM			

No	Pertanyaan	Jawaban		
		Ya (Nilai 5)	Mungkin (Nilai 1 – 4)	Tidak (Nilai 0)
	sebagai bagian pengeluaran yang berbeda?			
15	Apakah persyaratan pelumasan diperiksa secara teratur untuk meminimalkan kebutuhan akan jenis pelumas yang berbeda?			
16	Apakah analisis laporan kerusakan dilakukan untuk mendeteksi pola kegagalan yang dapat diperbaiki dengan menyesuaikan program PM?			
17	Apakah aset pabrik/bangunan diperiksa secara teratur sebagai bagian integral dari program inspeksi formal?			

Rumus berikut untuk digunakan ketika memutuskan keberlanjutan program PM (Levitt, 1997a; Levitt, 1997b):

$$(NB)(ACPBD)(\alpha) > CPMS \quad (2.1)$$

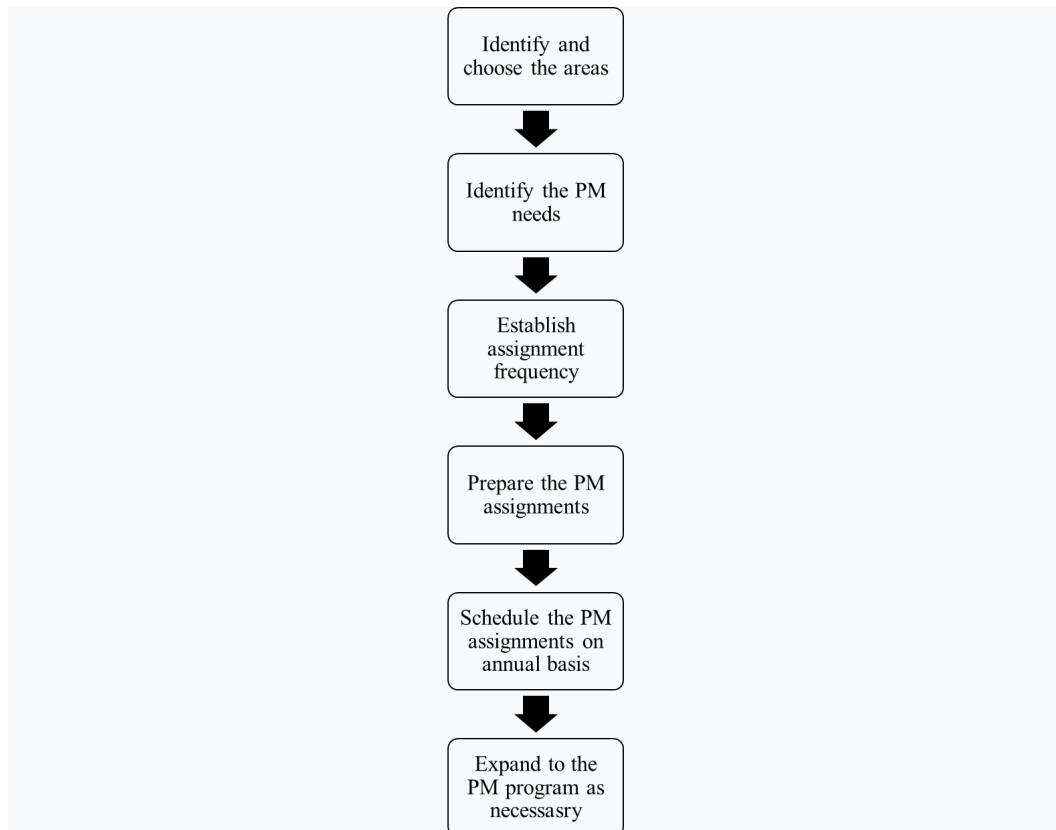
Dimana:

- CPMS = total biaya dari sistem perawatan preventif
- α = faktor yang nilainya diusulkan untuk diambil yaitu 70% atau lebih spesifik 70% dari total biaya kerusakan,
- NB = jumlah kerusakan,
- ACPBD = biaya rata-rata per kerusakan.

C. LANGKAH-LANGKAH UNTUK MEMULAI PROGRAM PM

Untuk mengembangkan program PM yang efektif, ketersediaan sejumlah item diperlukan. Beberapa dari item tersebut termasuk catatan sejarah perawatan yang akurat dari peralatan, rekomendasi pabrikan, personel yang terampil, data masa lalu dari peralatan yang serupa, buku manual servis, identifikasi khusus dari semua peralatan, uji instrumen dan perkakas yang sesuai, dukungan manajemen dan kerjasama pengguna, kegagalan informasi berdasarkan masalah/penyebab/tindakan, bahan habis pakai dan komponen/suku cadang yang dapat diganti, dan instruksi tertulis yang jelas dengan daftar pengecekan untuk ditandatangani (Patton, 1983).

Ada sejumlah langkah yang digunakan dalam mengembangkan program PM. Gambar 2.2 menyajikan enam langkah untuk melaksanakan program PM yang efektif dalam waktu singkat (Westerkamp, 1997).



Gambar 2.2 Langkah Pelaksanaan Program Perawatan Preventif (PM)

Penjelasan tiap proses dari gambar di atas sebagai berikut:

1. Identifikasi dan pemilihan area.

Pada proses ini dilakukan identifikasi dan pemilihan satu atau dua area untuk memusatkan upaya PM di awal. Area ini seharusnya merupakan area penting untuk keberhasilan operasional organisasi secara keseluruhan dan berdasarkan pengalaman membutuhkan tindakan perawatan yang besar. Tujuan utama dari proses ini adalah mendapatkan hasil yang cepat di area yang terlihat secara jelas dan di saat yang bersamaan mendapatkan dukungan dari manajemen.

2. Identifikasi kebutuhan PM.

Pada proses ini dilakukan penentuan persyaratan PM kemudian membuat suatu jadwal dengan dua tugas, yaitu inspeksi PM harian dan tugas PM secara berkala. Inspeksi PM harian dapat dilakukan oleh personel khusus perawatan atau produksi. Contoh pemeriksaan PM harian adalah memeriksa konsentrasi padatan yang mengendap dari air limbah. Penugasan PM berkala biasanya

dilakukan oleh personel perawatan dengan tugas mengganti filter yang sekali pakai, mengganti sabuk penggerak, dan membersihkan *steam traps* serta filter permanen.

3. Penetapan frekuensi penugasan.

Proses ini menetapkan frekuensi penugasan dengan melibatkan peninjauan kondisi dan catatan peralatan. Dasar untuk menetapkan frekuensi biasanya adalah pengalaman mereka yang akrab dengan peralatan dan rekomendasi dari vendor serta teknisi. Harus diingat bahwa rekomendasi dari vendor pada umumnya didasarkan pada pertimbangan penggunaan peralatan berdasarkan kondisi tertentu.

4. Mempersiapkan penugasan PM.

Pada proses ini dilakukan penugasan harian dan berkala diidentifikasi serta dijelaskan secara terperinci, kemudian diserahkan untuk mendapat persetujuan.

5. Jadwalkan penugasan PM setiap tahun.

Pada proses ini penugasan PM yang ditentukan akan dijadwalkan atas dasar periode dua belas bulan.

6. Perluasan program PM sesuai kebutuhan.

Setelah penerapan semuanya baik itu inspeksi harian PM dan penugasan secara berkala pada daerah yang dipilih di awal, maka PM bisa diperluas ke daerah lain. Pengalaman yang didapat dari proyek percontohan PM sangat penting untuk memperluas program.

D. PENGUKURAN PM

Ada tiga pengukuran penting dalam PM (Westerkamp, 1997), yaitu waktu perawatan pencegahan rata-rata (*mean preventive maintenance time*, MPMT), waktu perawatan pencegahan median (*median preventive maintenance time*, MDPMT), dan waktu perawatan pencegahan maksimum (*maximum preventive maintenance time*, MXPMT).

1. Mean Preventive Maintenance Time (MPMT)

MPMT adalah waktu berhenti rata-rata item/peralatan yang diperlukan untuk melakukan PM terjadwal. Waktu ini tidak termasuk waktu PM yang dihabiskan pada peralatan/barang selama operasi atau waktu henti karena masalah administrasi dan logistik.

Waktu rata-rata untuk PM dihitung dengan rumus:

$$\text{MPMT} = \frac{\sum_{i=1}^m f_i \cdot \text{MPMT}_i}{\sum_{i=1}^m f_i}$$

(2.2)

dimana:

- m = jumlah total titik yang dilakukan tindakan PM
 $MPMT_i$ = waktu rata-rata yang diperlukan untuk melakukan tindakan PM pada $i = 1, 2, 3, \dots, m$
 f_i = frekuensi dari tindakan PM ke- i tiap jam operasional setelah pengaturan siklus kerja peralatan

2. Median Preventive Maintenance Time (MDPMT)

Ini adalah waktu henti item/peralatan yang diperlukan untuk melaksanakan 50% dari semua tindakan PM yang dijadwalkan pada item/peralatan dalam kondisi yang diuraikan pada MDPMT. Untuk waktu PM terdistribusi lognormal, MDPMT diberikan oleh:

$$MDPMT = \text{antilog} \left(\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \log MPMT_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \right) \quad (2.3)$$

dimana:

- λ_i = tingkat kegagalan konstan elemen i dari item/peralatan yang daya rawatnya akan dievaluasi, disesuaikan dengan faktor-faktor seperti siklus kerja, kegagalan toleransi dan interaksi, dan kegagalan katastropik yang akan menyebabkan penurunan kinerja item/peralatan ke kondisi ketika perawatan dimulai
 i = 1, 2, 3, ..., m

3. Maximum Preventive Maintenance Time (MXPMT)

Ini adalah waktu henti item/peralatan maksimum yang diperlukan untuk mencapai persentase tertentu dari semua tindakan PM terjadwal pada item/peralatan yang sedang dipertimbangkan. Untuk waktu PM terdistribusi lognormal, MXPMT dirumuskan sebagai berikut:

$$MXPMT = \text{antilog}(\log MPMT_m + yS_{\log MPMT}) \quad (2.4)$$

dimana:

y = nilai dari tabel distribusi normal sesuai dengan nilai persentase yang diberikan di mana MXPMT ditentukan (mis., $y = 1,283$ untuk persentil ke-90 dan $y = 1,645$ untuk persentil ke-95).

$\log MPMT_m$ adalah rata-rata logaritma dari $MPMT_i$ yang dinyatakan dengan:

$$\log \text{MPMT}_m = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \log \text{MPMT}_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \right) \quad (2.5)$$

$$S_{\log \text{MPMT}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^m (\log \text{MPMT}_i)^2 - \frac{(\log \text{MPMT}_i)^2}{m}}{m - 1} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

E. MODEL PM

Selama bertahun-tahun banyak model matematika yang bermanfaat dalam pengembangan PM antara lain:

1. Model Optimasi Inspeksi I

Inspeksi sering kali mengganggu tetapi biasanya mengurangi waktu berhenti karena lebih sedikit jumlah kegagalan. Model ini dapat digunakan untuk mendapatkan jumlah optimal inspeksi setiap fasilitas per satuan waktu. Total waktu henti fasilitas ditentukan oleh perumusan Wild (1985) dan Dhillon (1988) sebagai berikut:

$$\text{TDT} = y \cdot T_i + \frac{c \cdot T_b}{y} \quad (2.7)$$

dimana:

- TDT = total waktu berhenti per satuan waktu suatu fasilitas
- c = suatu kontanta yang berhubungan dengan fasilitas tertentu
- T_b = waktu berhenti suatu fasilitas per kegagalan atau berhenti
- T_i = waktu berhenti suatu fasilitas setiap pengecekan
- y = jumlah inspeksi setiap fasilitas per satuan waktu

Dengan menurunkan persamaan di atas dengan y, maka diperoleh persamaan:

$$\frac{dTDT}{dy} = T_i - \frac{c \cdot T_b}{y^2} \quad (2.8)$$

Dengan membuat persamaan sama dengan nol, maka diperoleh:

$$y'' = \left(\frac{c \cdot T_b}{T_i} \right)^{1/2}$$

(2.9)

dimana:

y'' = jumlah inspeksi optimum setiap fasilitas per satuan waktu

Dengan mensubstitusi kedua persamaan di atas akan diperoleh persamaan berikut:

$$TDT'' = 2(c \cdot T_i \cdot T_b)^{1/2} \quad (2.10)$$

dimana:

TDT = total waktu berhenti optimal per satuan waktu dari suatu fasilitas

Contoh soal 2.1

Suatu fasilitas teknis diamati dalam suatu periode waktu tertentu dan diperoleh data sebagai berikut;

$$T_b = 0.1 \text{ bulan}$$

$$T_i = 0.05 \text{ bulan}$$

$$c = 3$$

Hitung jumlah inspeksi optimal per bulan.

Dengan menggunakan persamaan 2.9, diperoleh;

$$y'' = \left(\frac{c \cdot T_b}{T_i} \right)^{1/2}$$

$$y'' = \left(\frac{3 \cdot 0,1}{0,05} \right)^{1/2}$$

$$y'' = 2.45 \text{ inspeksi per bulan}$$

Reliabilitas dan Waktu Rata-rata untuk Model Penentuan Kegagalan dari Suatu Sistem dengan Perawatan Periodik

Model matematis ini dapat digunakan untuk menghitung reliabilitas dan waktu rata-rata pada kegagalan suatu sistem yang melaksanakan perawatan berkala (periodik). Model mengikuti asumsi berikut (Von Alven, 1964; Rosenheim, 1958):

- a. Bagian yang gagal diganti dengan yang baru dan secara statistik identik.
- b. Perawatan berkala dilakukan pada sistem setelah setiap y jam, dimulai dari waktu nol.

Untuk pemeliharaan berkala, interval waktu y jam ditulis sebagai:

$$y = iY + T, i = 0, 1, 2, \dots; 0 \leq T < Y \quad (2.11)$$

Untuk $i = 1$ dan $T = 0$, reliabilitas sistem yang berlebihan pada perawatan periodik setelah setiap jam Y dirumuskan dengan:

$$R_Y(y = Y) = R(Y) \quad (2.12)$$

Untuk $i = 2$ dan $T = 0$, maka:

$$R_Y(y = 2Y) = [R(Y)]^2 \quad (2.13)$$

Dalam hal ini suatu sistem harus beroperasi dalam Y jam pertama tanpa mengalami kegagalan, serta bebas mengalami kegagalan selama Y jam lainnya dalam suatu waktu tertentu setelah penggantian bagian yang gagal.

Untuk $0 < T < Y$, maka diperlukan T jam operasi bebas kegagalan dari suatu sistem. Perumusan menjadi:

$$R_Y(y = 2Y + T) = [R(Y)]^2 \cdot R(T) \quad (2.14)$$

Bentuk persamaan umumnya adalah:

$$R_Y(y = iY + T) = [R(Y)]^i \cdot R(T), \quad \text{untuk } i = 0, 1, 2, 3, \dots; 0 \leq T < Y \quad (2.15)$$

Waktu rata-rata sistem redundan mengalami kegagalan dengan kinerja perawatan berkala dirumuskan dengan:

$$MTTF_{pm} = \int_0^{\infty} R_Y(y) dy \quad (2.16)$$

Untuk mengevaluasi persamaan (2.16), integral pada rentang $0 < y < \infty$ dirumuskan dengan:

$$MTTF_{pm} = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{iY}^{(i+1)Y} R_Y(y) dy \quad (2.17)$$

Dalam persamaan (2.17), integral dari persamaan (2.16) dibagi menjadi interval waktu dengan panjang Y . Untuk $y = iY + T$, dengan memasukkan persamaan (2.15) ke persamaan (2.17) diperoleh:

$$MTTF_{pm} = \sum_{i=0}^{\infty} \int_0^Y [R(Y)]^i \cdot R(T) dT \quad (2.18)$$

Dalam persamaan (2.18) untuk $y = iY + T$, $dy = dT$ dan limitnya menjadi 0 dan Y . Dengan menata ulang persamaan (2.18) diperoleh:

$$MTTF_{pm} = \sum_{i=0}^{\infty} [R(Y)]^i \int_0^Y R(T) dT \quad (2.19)$$

Jadi:

$$\sum_{i=0}^{\infty} [R(Y)]^i = \frac{1}{1 - R(Y)}$$

(2.20)

Persamaan menjadi:

$$MTTF_{pm} = \frac{\int_0^Y R(T) dT}{1 - R(Y)}$$

(2.21)

Contoh soal 2.2

Asumsikan bahwa dua mesin independen dan identik membentuk sistem paralel. Setiap waktu mesin menuju kegagalan didistribusikan secara eksponensial dengan waktu rata-rata menuju kegagalan dari 200 jam perawatan pencegahan berkala (PM) dilakukan setelah setiap 100 jam.

Hitung waktu rata-rata sistem untuk kegagalan dengan dan tanpa kinerja PM berkala

Jawaban:

Keandalan dari dua unit sistem paralel dinyatakan dengan perumusan:

$$R(y) = 2e^{-\frac{y}{200}} - e^{-\frac{2y}{200}}$$

(2.22)

Dengan memasukkan persamaan (2.22) ke persamaan (2.21) diperoleh:

$$MTTF_{pm} = \frac{\int_0^{100} (2e^{-\frac{T}{200}} - e^{-\frac{2T}{200}}) dT}{1 - (2e^{-\frac{100}{200}} - e^{-\frac{2(100)}{200}})}$$

$$MTTF_{pm} = \frac{94.17}{0.1548}$$

$$MTTF_{pm} = 608.26 \text{ jam}$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (2.22) selama interval waktu $[0, \infty]$, maka diperoleh waktu rata-rata sistem untuk kegagalan tanpa kinerja perawatan berkala sebagai berikut:

$$MTTF_{pm} = \int_0^{100} \left(2e^{\frac{y}{200}} - e^{\frac{2y}{200}} \right) dy = 300 \text{ jam}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa PM periodik akan membantu meningkatkan waktu rata-rata sistem sampai mengalami kegagalan (MTTF) dari 300 jam menjadi 608.26 jam.

2. Model Optimasi Inspeksi II

Model ini mirip dengan Model Frekuensi Inspeksi I yang dapat digunakan untuk menentukan frekuensi optimal inspeksi untuk meminimalkan waktu berhenti peralatan/fasilitas per satuan waktu. Dalam model ini fasilitas/peralatan (waktu per unit) total waktu henti adalah fungsi frekuensi inspeksi. Perumusan matematika dirumuskan sebagai berikut (Jardine, 1973; Dhillon, 1983):

$$TDT(n) = DT_r + DT_i$$

$$TDT(n) = \frac{\lambda(n)}{\mu} + \frac{n}{\theta} \tag{2.23}$$

dimana:

$TDT(n)$ = total berhenti suatu fasilitas/peralatan per satuan waktu

DT_i = waktu berhenti fasilitas/peralatan karena waktu inspeksi setiap unit

DT_r = waktu berhenti peralatan/fasilitas karena waktu perbaikan tiap unit

n = frekuensi inspeksi

$\lambda(n)$ = tingkat kegagalan peralatan/fasilitas

μ = tingkat perbaikan peralatan/fasilitas

$1/\theta$ = rata-rata distribusi eksponensial waktu inspeksi

Dengan menurunkan persamaan (2.23) terhadap n , kita dapatkan:

$$\frac{dTDT(n)}{dn} = \frac{d\lambda(n)}{dn} \frac{1}{\mu} + \frac{1}{\theta} \tag{2.24}$$

Pengaturan persamaan (2.24) sama dengan nol untuk mendapatkan nilai optimal, sehingga diperoleh:

$$\frac{d\lambda(n)}{dn} = -\frac{\mu}{\theta} \quad (2.25)$$

Nilai n akan optimal ketika sisi kiri dan kanan persamaan (2.25) sama. Pada titik ini total waktu henti peralatan / fasilitas akan minimal.

Contoh soal 2.3

Asumsikan tingkat kegagalan suatu sistem ditentukan oleh persamaan:

$$\lambda(n) = f \cdot e^{-n} \quad (2.26)$$

di mana f adalah tingkat kegagalan sistem pada $n = 0$. Dapatkan ekspresi optimal nilai n dengan menggunakan persamaan (2.25). Dengan memasukkan persamaan (2.26) ke persamaan (4.25), diperoleh:

$$-f \cdot e^{-n} = -\frac{\mu}{\theta} \quad (2.27)$$

Mengatur ulang persamaan (2.27), diperoleh:

$$n^* = \ln \left[\frac{f \cdot \theta}{\mu} \right] \quad (2.28)$$

Dimana:

n^* = frekuensi inspeksi optimal

Contoh 2.4

Asumsikan bahwa dalam contoh 2.3 kita memiliki data berikut ini:

$$\frac{1}{\mu} = 0,02 \text{ bulan}, \quad \frac{1}{\theta} = 0,005 \text{ bulan}, \quad f = 1 \text{ kegagalan per bulan}$$

Hitung nilai optimal dari frekuensi pemeriksaan, n .

Dengan memasukkan nilai yang diberikan ke persamaan (2.28) diperoleh:

$$n^* = \ln \left[\frac{1.0,02}{0,005} \right] = 1.39 \text{ inspeksi per bulan}$$

Artinya, kurang lebih satu pemeriksaan (inspeksi) per bulan adalah yang optimal.

3. Model Optimasi Inspeksi III

Model ini merupakan model matematika yang berguna yang untuk menghitung frekuensi inspeksi yang optimal untuk memaksimalkan keuntungan. Model ini dikembangkan dengan alasan bahwa fasilitas/peralatan yang sedang diperbaiki menghasilkan *output* nol sehingga keuntungan lebih sedikit. Selanjutnya jika peralatan terlalu sering diperiksa, maka akan muncul kerugian dalam bentuk pengeluaran biaya yang lebih mahal karena faktor-faktor seperti kerugian produksi, biaya bahan, dan upah selama kerugian karena kerusakan peralatan.

Asumsi berikut dikaitkan dengan model ini (Jardine, 1973; Dhillon, 1983):

- Tingkat kegagalan peralatan adalah fungsi dari inspeksi
- Waktu inspeksi didistribusikan secara eksponensial
- Kegagalan peralatan dan tingkat perbaikan konstan

Simbol berikut digunakan untuk mengembangkan persamaan untuk model:

- n = jumlah inspeksi yang dilakukan per unit dalam suatu satuan waktu
 $1/\theta$ = waktu rata-rata inspeksi yang berdistribusi eksponensial
 p = keuntungan dari tidak adanya kehilangan waktu (*downtime*)
 C_i = rata-rata biaya inspeksi per satuan waktu dari suatu unit yang tidak mengalami gangguan
 C_r = rata-rata biaya perbaikan per satuan waktu dari suatu unit yang tidak mengalami gangguan
 λ = tingkat kegagalan peralatan
 μ = tingkat perbaikan peralatan

Keuntungan per unit waktu (PR) dinyatakan dengan:

$$PR = p - PL_i - PL_r - IC - RC$$

$$PR = p - \frac{pn}{\theta} - \frac{p\lambda(n)}{\mu} - \frac{nC_i}{\theta} - \frac{C_r\lambda(n)}{\mu}$$

(2.29)

Dimana:

PL_i = kehilangan nilai *output* produksi per satuan waktu karena inspeksi

PL_r = kehilangan nilai *output* produksi per satuan waktu karena perbaikan

IC = biaya inspeksi per satuan waktu

RC = biaya perbaikan per satuan waktu

Dengan menurunkan persamaan (2.29) terhadap n dan kemudian menyamakannya dengan nol, maka diperoleh:

$$\frac{dPR}{dn} = -\frac{p}{\theta} - \frac{p}{\mu} \frac{d\lambda(n)}{dn} - \frac{C_i}{\theta} - \frac{C_r}{\mu} \frac{d\lambda(n)}{dn} = 0 \quad (2.30)$$

Mengatur ulang persamaan (2.30), diperoleh:

$$\frac{d\lambda(n)}{dn} = -\frac{\left[\frac{1}{\theta}(p + C_i)\right]}{\frac{p}{\mu} + \frac{C_r}{\mu}} \quad (2.31)$$

Nilai n akan optimal bila sisi kiri dan kanan persamaan (2.31) sama. Di titik ini, keuntungan akan berada pada nilai maksimumnya.

Contoh soal 2.5

Asumsikan tingkat kegagalan sistem manufaktur ditentukan oleh persamaan (4.26) di contoh 2.3. Kembangkan ekspresi untuk nilai optimal n dengan menggunakan persamaan (2.31).

Menggunakan persamaan (2.26) di persamaan (2.31) diperoleh:

$$-f \cdot e^{-n} = -\frac{\left[\frac{1}{\theta}(p + C_i)\right]}{\frac{p}{\mu} + \frac{C_r}{\mu}} \quad (2.32)$$

Dengan mengatur ulang persamaan (2.32), diperoleh:

$$n^* = \ln \left[\frac{f\theta(p + C_r)}{\mu(p + C_i)} \right] \quad (2.33)$$

Dimana:

n^* = frekuensi inspeksi sistem manufaktur yang optimal.

Contoh soal 2.6

Misalkan dalam Contoh 2.5 kita memiliki data berikut:

$p = \$10,000$ per bulan

$f = 2$ kegagalan per bulan

$1/\mu = 0.04$ bulan

$1/\theta = 0.01$ bulan

$C_i = \$75$ per bulan

$C_r = \$400$ per bulan

Tentukan nilai optimal n dengan menggunakan persamaan (2.33).

Dengan memasukkan nilai data yang ditentukan ke persamaan (2.33), didapatkan:

$$n^* = \ln \left[\frac{2 \times 0,04(10.000 + 400)}{0,01(10.000 + 75)} \right]$$

$$= 2,11 \text{ inspeksi per bulan}$$

Untuk kinerja yang optimal, sebaiknya dilakukan sekitar dua inspeksi per bulan.

4. Model PM Markov

Model matematis ini mewakili sistem yang bisa gagal sepenuhnya atau mengalami kegagalan PM secara berkala. Sistem yang gagal diperbaiki dan diagram transisi sistem ditampilkan pada gambar 2.3. Model tersebut berguna untuk memprediksi ketersediaan sistem, probabilitas sistem down selama PM dan kemungkinan kegagalan sistem. Asumsi berikut dikaitkan dengan model:

- PM sistem, tingkat kegagalan, dan perbaikan adalah konstan.
- Setelah perbaikan atau PM, sistemnya seperti baru.

Simbol berikut digunakan untuk mengembangkan persamaan untuk model:

j = kondisi sistem ke- j , $j = 0$ (sistem beroperasi normal), $j = 1$ (sistem mengalami kegagalan), $j = p$ (sistem *down* selama PM)

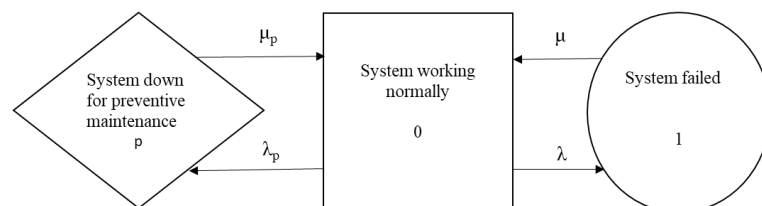
$P_j(t)$ = kemungkinan bahwa sistem pada kondisi j pada waktu t , for $j = 0, 1, p$

λ = tingkat kegagalan sistem

μ = tingkat perbaikan sistem

λ_p = tingkat sistem *down* selama PM

μ_p = tingkat kinerja PM sistem



Gambar 2.3 Diagram Transisi Sistem

Dengan menggunakan metode Markov, persamaan sistem di gambar 2.3 dirumuskan sebagai berikut (Dhillon, 1983a):

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda + \lambda_p) = \mu P_1(t) + \mu_p P_p(t) \quad (2.34)$$

$$\frac{dP_p(t)}{dt} + \mu_p P_p(t) = \lambda_p P_0(t) \quad (2.35)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + \mu P_1(t) = \lambda P_0(t) \quad (2.36)$$

Pada waktu $t = 0$, $P_0(0) = 1$ and $P_p(0) = P_1(0) = 0$, maka persamaan (2.34) - (2.36) menjadi:

$$P_0(t) = \frac{\mu_p \mu}{m_1 m_2} + \left[\frac{(m_1 + \mu_p) + (m_1 + \mu)}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1 t} - \left[\frac{(m_2 + \mu_p)(m_2 + \mu)}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2 t} \quad (2.37)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda \mu_p}{m_1 m_2} + \left[\frac{\lambda m_1 + \lambda \mu_p}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1 t} - \left[\frac{(\mu_p + m_2)\lambda}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2 t} \quad (2.38)$$

$$P_p(t) = \frac{\lambda_p \mu}{m_1 m_2} + \left[\frac{\lambda_p m_1 + \lambda_p \mu}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1 t} - \left[\frac{(\mu + m_2)\lambda_p}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2 t} \quad (2.39)$$

dimana:

$$m_1, m_2 = \frac{-B \pm [B^2 - 4(\mu_p \mu + \lambda \mu_p + \lambda_p \mu)]^{1/2}}{2} \quad (2.40)$$

$$B \equiv (\mu + \mu_p + \lambda + \lambda_p) \quad (2.41)$$

$$m_1 + m_2 = -B \quad (2.42)$$

$$m_1 m_2 = \mu_p \mu + \lambda_p \mu + \lambda \mu_p \quad (2.43)$$

Probabilitas kegagalan sistem ditunjukkan oleh persamaan (2.38), kemungkinan sistem *down* selama PM pada persamaan (2.39), dan ketersediaan sistem oleh persamaan (2.37). Pada waktu t besar, maka diperoleh ketersediaan sistem pada kondisi stabil:

$$AV_{ss} = \frac{\mu \mu_p}{\mu_p \mu + \lambda_p \mu + \lambda \mu_p} \quad (2.44)$$

Contoh soal 2.7

Asumsikan bahwa dalam persamaan (2.44) memiliki $\lambda = 0.005$ kegagalan per jam, $\lambda_p = 0.008$ per jam, $\mu = 0,009$ perbaikan per jam, dan $\mu_p = 0,009$ per jam. Hitung ketersediaan sistem pada kondisi stabil.

Jawaban:

Mengganti nilai yang diberikan pada persamaan (2.44), diperoleh hasil:

$$AV_{ss} = \frac{0,009 \times 0,009}{(0,009 \times 0,009) + (0,008 \times 0,009) + (0,005 \times 0,009)}$$

$$AV_{ss} = 0,4091$$

Ini menunjukkan bahwa ada sekitar 41% kemungkinan sistem akan tersedia untuk beroperasi. Secara khusus, ketersediaan sistem pada kondisi stabil adalah 41%.

F. KEUNTUNGAN DAN KERUGIAN PM

Hasil kinerja PM memiliki banyak keuntungan diantaranya peningkatan ketersediaan peralatan, operasional yang lancar, beban kerja seimbang, pengurangan lembur, peningkatan pendapatan produksi, konsistensi mutu yang

dihasilkan, pengurangan kebutuhan akan peralatan yang *standby*, stimulasi dalam bentuk preaksi daripada reaksi, pengurangan persediaan suku cadang, peningkatan keselamatan, adanya prosedur standar, peningkatan waktu kerja, penghematan biaya perawatan dalam jangka panjang, sumber daya yang terjadwal sesuai ketentuan, dan berguna dalam mempromosikan optimalisasi manfaat/biaya (Levitt, 1997b; Patton, 1983).

Beberapa kelemahan PM adalah memungkinkan peralatan mengalami kerusakan, menggunakan jumlah suku cadang yang lebih banyak, kenaikan biaya di awal, kegagalan pada suku cadang/komponen baru, dan kenaikan frekuensi permintaan pada suatu peralatan/barang (Patton, 1983).

G. TUGAS

1. Jelaskan setidaknya lima elemen penting dari PM.
2. Apa saja gejala suatu *plant* yang membutuhkan program PM yang baik?
3. Apa pertanyaan penting yang bisa digunakan untuk mengetahui terlaksananya program PM?
4. Beri komentar tentang prinsip atau formula yang digunakan untuk memutuskan apakah akan melaksanakan program PM.
5. Sebutkan setidaknya sepuluh hal penting yang harus tersedia untuk mengembangkan program PM yang efektif.
6. Jelaskan langkah-langkah penting untuk mengembangkan program PM.
7. Jelaskan hal-hal berikut ini:
 - a. Waktu PM rata-rata
 - b. Waktu PM maksimum
 - c. Waktu PM median
8. Tiga mesin independen dan identik dalam bentuk sistem paralel. Setiap waktu mesin sampai mengalami *failure* didistribusikan secara eksponensial dengan waktu kegagalan rata-rata 150 jam. PM periodik dilakukan setelah setiap 75 jam. Tentukan waktu rata-rata sistem sampai mengalami *failure* dengan dan tanpa melakukan PM secara berkala.
9. Apa keuntungan dan kerugian dari melakukan PM?

BAB 3

CORRECTIVE MAINTENANCE

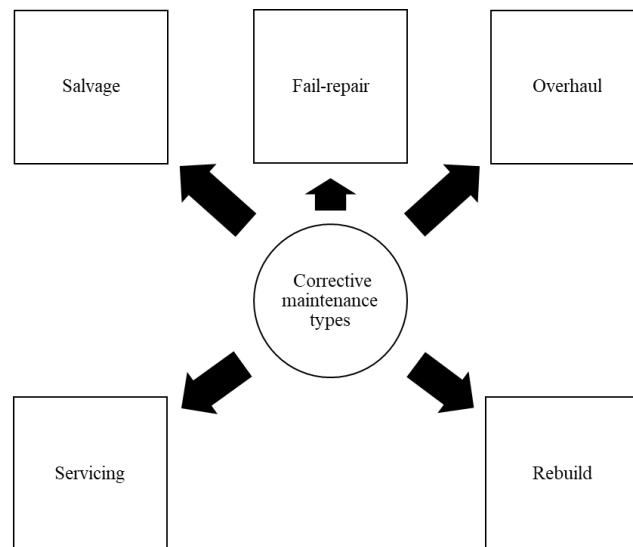
A. DEFINISI

Banyak kegiatan perawatan yang gagal meskipun berbagai upaya sudah dilakukan untuk membuat sistem teknis (*engineering*) seandal mungkin melalui desain, perawatan pencegahan (*preventive*), dan sebagainya. Ini menunjukkan bahwa semua kegiatan yang dilakukan harus diperbaiki ke status operasionalnya. Jadi, perawatan perbaikan atau korektif (*corrective maintenance*) merupakan bagian penting dari aktivitas perawatan. Perawatan korektif dapat didefinisikan sebagai tindakan perbaikan yang dilakukan karena kegagalan atau kekurangan yang ditemukan selama perawatan pencegahan untuk memperbaiki peralatan/barang ke status operasional yang standar (AMCP 706-132, 1975; Omdahl, 1988; McKenna & Oliverson, 1997).

Perawatan korektif pada dasarnya adalah tindakan perawatan tidak terjadwal atau kebutuhan perawatan yang tidak dapat diprediksi serta belum direncanakan sebelumnya atau diprogram berdasarkan kejadian pada waktu tertentu. Tindakan itu membutuhkan segera perhatian yang harus dilakukan, diintegrasikan atau diganti dengan jadwal sebelumnya dari suatu item pekerjaan. Ini menggabungkan kepatuhan dengan tindakan cepat terkait perubahan suatu hal, perbaikan kekurangan yang ditemukan selama operasi peralatan/barang, dan kinerja dari tindakan perbaikan karena adanya insiden atau kecelakaan. Sebagian besar dari upaya perawatan secara keseluruhan dikhususkan untuk perawatan korektif dan selama bertahun-tahun banyak orang telah berkontribusi di bidang perawatan korektif di suatu organisasi.

B. JENIS-JENIS PERAWATAN PERBAIKAN

Perawatan korektif dapat diklasifikasikan ke dalam lima kategori utama (AMCP 706-132, 1975; MICOM 750-8, 1972) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1



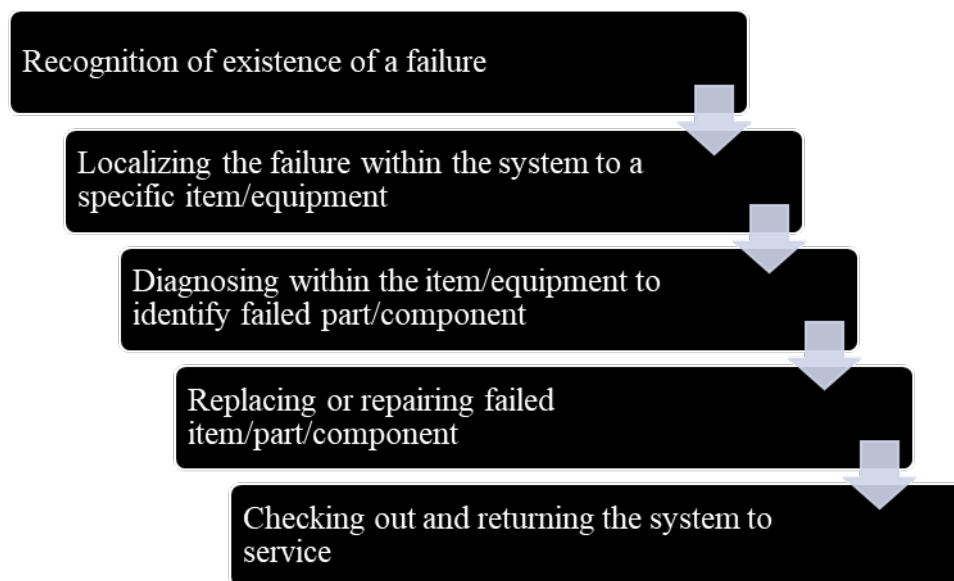
Gambar 3.1 Jenis Perawatan Korektif

Jenis perawatan korektif yaitu: perbaikan kerusakan (*fail-repair*), penyelamatan (*salvage*), *re-build*, *overhaul*, dan servis (*service*). Kategori tersebut dijelaskan di bawah ini.

1. Perbaikan kerusakan: Item yang gagal dikembalikan ke status operasionalnya.
2. Penyelamatan: Elemen perawatan perbaikan ini berkaitan dengan pembuangan bahan yang tidak dapat diperbaiki dan penggunaan bahan sisa dari peralatan/item yang tidak dapat diperbaiki dalam program perbaikan, *overhaul*, atau *re-build*.
3. *Re-build*: Ini berkaitan dengan mengembalikan item ke standar sedekat mungkin ke keadaan semula dalam hal kinerja, harapan hidup, dan penampilan. Ini dapat dicapai melalui pembongkaran total, pemeriksaan semua komponen, perbaikan dan penggantian suku cadang yang aus/tidak dapat diservis sesuai spesifikasi asli dan toleransi pabrikan, dan perakitan kembali serta pengujian ke pedoman produksi yang asli.
4. *Overhaul*: Mengembalikan suatu item ke kondisi yang dapat diservis sesuai pemeliharaan standar dengan menggunakan pendekatan periksa dan perbaiki yang sesuai.
5. *Service*: Servis diperlukan sebagai akibat dari tindakan perawatan perbaikan. Tindakan yang dilakukan misalnya perbaikan mesin yang menyebabkan kebocoran, pengelasan pada bagian tertentu, dan sebagainya.

C. LANGKAH-LANGKAH DAN STRATEGI PERAWATAN PERBAIKAN

Pada umumnya pemeliharaan korektif terdiri dari lima langkah-langkah berurutan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2 (AMCP 706-132, 1975).



Gambar 3.2 Urutan Langkah-langkah Perawatan Korektif

Langkah-langkah tersebut adalah: pengenalan kesalahan, lokalisasi, diagnosis, perbaikan, dan pemeriksaan.

Komponen waktu henti perawatan korektif pada umumnya adalah waktu perbaikan aktif, waktu administrasi dan logistik, dan waktu tunda (AMCP 706-132, 1975; McKenna & Oliverson, 1997). Waktu perbaikan aktif meliputi:

1. Waktu persiapan
2. Waktu kesalahan menentukan lokasi
3. Waktu memperoleh item cadangan
4. Waktu koreksi kesalahan
5. Penyesuaian dan waktu kalibrasi
6. Waktu *check out*

Pengurangan waktu perawatan korektif berguna untuk meningkatkan efektivitas perawatan suatu sistem. Menurut (Blanchard et al., 1995), beberapa strategi untuk mengurangi waktu perawatan korektif dalam berbagai tingkatan suatu sistem adalah sebagai berikut:

1. Efisiensi dalam pengenalan kesalahan, lokasi, dan isolasi.

Pengalaman masa lalu menunjukkan bahwa dalam peralatan elektronik, menentukan dan mengetahui tempat kesalahan menghabiskan sebagian besar waktu dalam aktivitas perawatan korektif. Dalam kasus item mekanis, seringkali penyumbang terbesar adalah waktu perbaikan. Faktor-faktor seperti indikator kesalahan yang dirancang dengan baik, prosedur perawatan yang baik, personel perawatan yang terlatih, dan kemampuan isolasi kesalahan yang jelas sangat membantu dalam menurunkan waktu perawatan korektif.

2. Penukaran yang efektif.

Penukaran fisik dan fungsional yang baik berguna dalam melepas dan mengganti bagian/item, mengurangi perawatan downtime, dan menciptakan dampak positif pada suku cadang dan kebutuhan inventaris.

3. Redundansi.

Ini berkaitan dengan perancangan komponen terbuang yang bisa diganti dengan cepat sehingga peralatan/sistem tetap berjalan untuk beroperasi saat bagian yang rusak sedang diperbaiki. Dalam hal ini keseluruhan beban kerja perawatan tidak boleh dikurangi, tetapi peralatan/sistem waktu henti dapat terpengaruh secara signifikan.

4. Aksesibilitas yang efektif.

Seringkali sejumlah besar waktu dihabiskan untuk mengakses bagian yang mengalami gangguan. Perhatian yang tepat untuk aksesibilitas selama desain dapat membantu mengurangi waktu aksesibilitas suku cadang dan pada gilirannya waktu perawatan korektif.

5. Pertimbangan faktor manusia.

Perhatian diberikan pada faktor manusia selama desain di berbagai bidang seperti kejelasan instruksi, ukuran, bentuk, dan berat komponen, pemilihan dan penempatan dial dan indikator, ukuran dan penempatan akses, gerbang, dan keterbacaan, dan alat bantu pemrosesan informasi dapat membantu mengurangi waktu perawatan korektif secara signifikan.

D. PENGUKURAN PERAWATAN KOREKTIF

Ada berbagai pengukuran yang terkait dengan perawatan korektif (AMCP 706-132, 1975; Blanchard et al., 1995; AMCP-766-133, 1976; Dhillon, 1999), yaitu:

1. Mean Corrective Maintenance Time

Mean Corrective Maintenance Time (Waktu Perawatan Korektif Rata-rata) didefinisikan sebagai:

$$T_{mcm} = \frac{\sum \lambda_j T_{cmj}}{\sum \lambda_j} \quad (3.1)$$

dimana:

T_{mcm} = waktu perawatan korektif rata-rata

T_{cmj} = waktu perawatan korektif suatu elemen peralatan/sistem ke-j

λ_j = tingkat kegagalan dari elemen peralatan/sistek ke-j

Pengalaman masa lalu menunjukkan bahwa distribusi probabilitas waktu perawatan korektif mengikuti persamaan eksponensial, normal, dan lognormal. Misalnya, dalam hal peralatan elektronik dengan kemampuan uji built-in yang baik dengan pelepasan dan penggantian yang memiliki konsep perawatan yang cepat sering diasumsikan berdistribusi eksponensial. Dalam kasus perangkat keras mekanis atau elektro-mekanis, biasanya dengan konsep perawatan lepas dan ganti, distribusi normal sering diterapkan. Biasanya, distribusi lognormal dapat diterapkan pada peralatan elektronik yang tidak memiliki kemampuan uji *built-in* (pengembangan).

2. Median Active Corrective Maintenance Time

Median Active Corrective Maintenance Time (Waktu Perawatan Korektif Nilai Tengah) biasanya memberikan lokasi rata-rata terbaik dari data sampel dan merupakan yang ke-50 persentil dari semua nilai waktu perbaikan. Dapat dikatakan bahwa waktu perawatan korektif median adalah ukuran waktu di mana 50% dari semua perawatan korektif bisa dicapai. Perhitungan ukuran ini tergantung pada distribusinya yang mewakili waktu perawatan korektif. Akibatnya, median waktu perawatan korektif terdistribusi lognormal dirumuskan dengan:

$$T_{\text{med}} = \text{antilog} \left(\frac{\sum (\lambda_j \cdot \log T_{\text{cm}j})}{\sum \lambda_j} \right) \quad (3.2)$$

Dimana:

T_{med} = waktu perawatan korektif aktif nilai tengah

3. Maximum Active Corrective Maintenance Time

Ini mengukur waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan semua tindakan perawatan korektif potensial hingga persentase tertentu, sering kali persentil ke-90 atau ke-95. Sebagai contoh, dalam kasus persentil ke-90, waktu perawatan korektif maksimum adalah waktu di mana 90% dari semua tindakan perawatan dapat diselesaikan. Distribusi waktu perawatan korektif menentukan perhitungan waktu perawatan korektif maksimum. Dalam kasus waktu perawatan korektif yang didistribusikan secara lognormal, waktu perawatan korektif aktif maksimum dinyatakan dengan (Blanchard *et al.*, 1995):

$$T_{\text{cmax}} = \text{antilog}(T_{\text{mn}} + z\sigma_{\text{cm}}) \quad (3.3)$$

dimana:

T_{cmax} = waktu perawatan korektif aktif maksimum

T_{mn} = rata-rata dari logaritma T_{cmj}

σ_{cm} = standar deviasi dari logaritma sampel waktu perawatan korektif

z = perbandingan nilai standar deviasi terhadap seperseribu nilai T_{cmax}

Nilai σ_{cm} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_{\text{cm}} = \left[\frac{\sum_{j=1}^m (\log T_{\text{cmj}})^2 - \frac{\left(\sum_{j=1}^m \log T_{\text{cmj}}\right)^2}{M}}{M-1} \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

dimana:

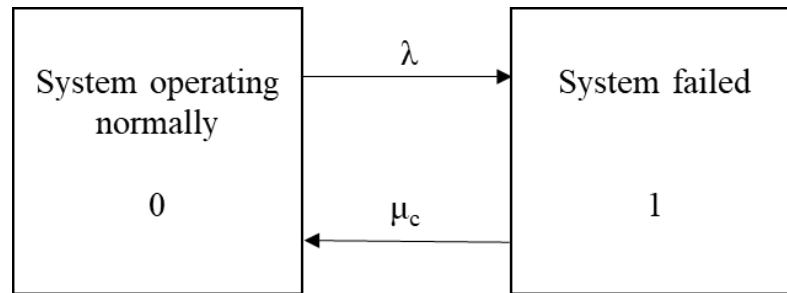
M = banyaknya waktu perawatan korektif.

E. MODEL MATEMATIKA PERAWATAN KOREKTIF

Selama bertahun-tahun sejumlah literatur telah dipublikasikan secara langsung atau tidak langsung menyangkut perawatan korektif. Berikut sejumlah matematika model yang diambil dari literatur yang diterbitkan. Model ini mempertimbangkan kegagalan item dan tingkat perawatan korektif yang dapat digunakan untuk memprediksi probabilitas item/sistem yang berada dalam keadaan gagal (yaitu, menjalani perbaikan), ketersediaan, waktu rata-rata gagal, dan sebagainya (Dhillon, 2002).

1. Model I

Model matematis ini merepresentasikan sebuah sistem yang bisa dioperasikan atau gagal (Dhillon, 1999). Perawatan korektif dilakukan pada sistem yang gagal untuk kembali ke kondisi operasi normal. Diagram ruang kondisi sistem ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram Transisi Sistem

Persamaan untuk model mengikuti asumsi berikut:

- Tingkat kegagalan dan perawatan korektif konstan
- Sistem yang diperbaiki sama bagusnya dengan baru
- Kegagalan sistem bersifat independen secara statistik

Simbol berikut digunakan untuk mengembangkan persamaan model:

i = kondisi sistem ke- i , $i = 0$ (sistem beroperasi normal), $i = 1$ (sistem gagal)

$P_i(t)$ = probabilitas bahwa sistem pada kondisi i pada waktu t

λ = tingkat kegagalan sistem

μ_c = tingkat perawatan korektif sistem

Menggunakan pendekatan Markov yang disajikan sebelumnya, maka dua persamaan berikut untuk diagram gambar 3.3:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + \lambda P_0(t) = \mu_c P_1(t) \quad (3.5)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + \mu_c P_1(t) = \lambda P_0(t) \quad (3.6)$$

Pada waktu $t = 0$, $P_0(0) = 1$, dan $P_1(t) = 0$ akan diperoleh:

$$P_0(t) = \frac{\mu_c}{\lambda + \mu_c} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu_c} e^{-(\lambda + \mu_c)t} \quad (3.7)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu_c} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu_c} e^{-(\lambda + \mu_c)t} \quad (3.8)$$

Ketersediaan sistem dinyatakan dengan:

$$A_s(t) = P_0(t) = \frac{\mu_c}{\lambda + \mu_c} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu_c} e^{-(\lambda + \mu_c)t} \quad (3.9)$$

Dimana:

$A_s(t)$ = ketersediaan sistem pada waktu t

Ketika t sangat besar, persamaan menjadi:

$$A_s = \frac{\mu_c}{\lambda + \mu_c} \quad (3.10)$$

Dimana:

A_s = ketersediaan sistem pada kondisi stabil (*steady state*)

$\lambda = 1/\text{MTTF}$

$\mu_c = 1/T_{\text{mem}}$

Sehingga:

$$A_s = \frac{\text{MTTF}}{T_{\text{mcm}} + \text{MTTF}} \quad (3.11)$$

MTTF = rata-rata waktu untuk mengalami kegagalan

Contoh soal 3.1

Asumsikan MTTF peralatan adalah 3000 jam dan waktu perawatan korektif rata-rata adalah 5 jam. Hitung ketersediaan peralatan dalam kondisi stabil, jika kegagalan peralatan dan waktu perawatan perbaikan didistribusikan secara eksponensial.

Jawaban:

Dengan menggunakan persamaan 3.11 diperoleh,

$$A_s = 3000/(5+3000) = 0.9983$$

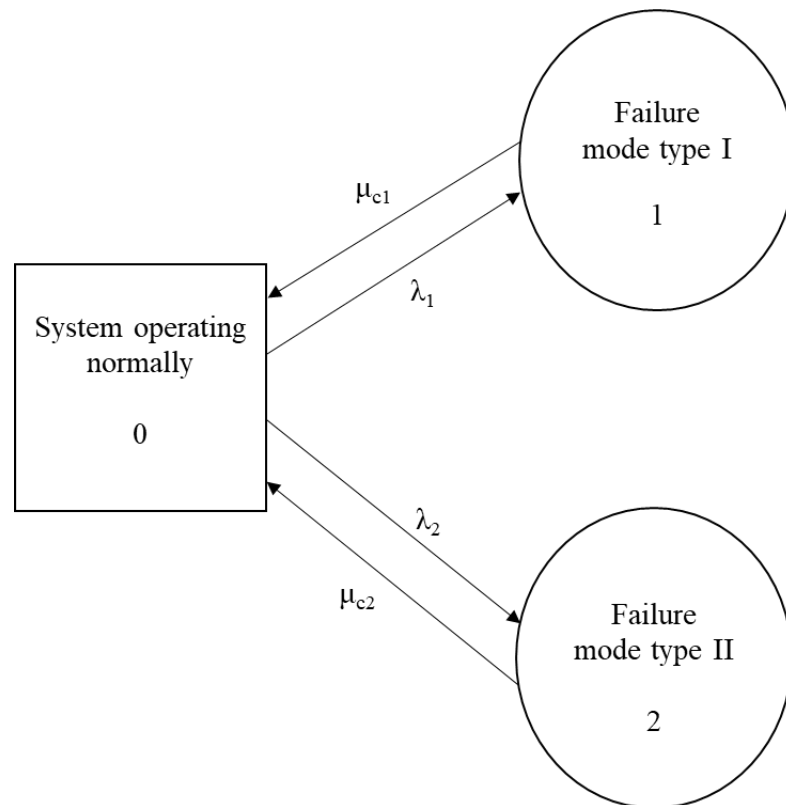
Ini menunjukkan ada peluang 99.83% bahwa peralatan akan mengalami perbaikan.

2. Model II

Model matematika ini mewakili sistem yang dapat beroperasi secara normal atau gagal dalam dua bentuk kegagalan yang saling eksklusif (yaitu bentuk kegagalan I dan II). Contoh tipikal dari jenis sistem atau perangkat ini adalah katup aliran fluida (yaitu bentuk kegagalan buka dan tutup). Perawatan korektif dilakukan dari salah satu bentuk kegagalan sistem untuk mengembalikannya ke kondisi operasionalnya (Dhillon & Singh, 1981; Dhillon, 1983a).

Diagram transisi sistem ditunjukkan pada gambar 3.4. Asumsi berikut dikaitkan dengan model ini:

- Sistem dapat gagal dalam dua bentuk kegagalan yang saling eksklusif.
- Sistem yang diperbaiki sama bagusnya dengan baru.
- Semua kegagalan sistem secara statistik independen.
- Tingkat kegagalan dan perawatan korektif konstan



Gambar 3.4 Diagram Transisi Sistem

Simbol-simbol yang berhubungan dengan gambar di atas:

- i = kondisi sistem ke- i , $i = 0$ (operasi sistem kondisi normal), $i = 1$ (sistem mengalami kegagalan pada bentuk kegagalan tipe I), $i = 2$ (sistem mengalami kegagalan pada bentuk kegagalan tipe II)

$P_i(t)$ = kemungkinan bahwa sistem berada pada kondisi i pada waktu t , dengan $i = 0, 1, 2$

λ_i = tingkat kegagalan sistem dari kondisi 0 ke kondisi i , dengan $i = 1, 2$

μ_{ci} = tingkat perawatan korektif sistem dari kondisi i ke kondisi 0, dengan $i = 1, 2$

Untuk model I, persamaan untuk gambar adalah:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) = \mu_{c1}P_1(t) + \mu_{c2}P_2(t) \quad (3.12)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + \mu_{c1}P_1(t) = \lambda_1P_0(t) \quad (3.13)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + \mu_{c2}P_2(t) = \lambda_2P_0(t) \quad (3.14)$$

Pada waktu $t = 0$, $P_0(0) = 1$ dan $P_1(0) = P_2(0) = 0$

Dengan menggunakan persamaan 3.12 sampai 3.14 diperoleh:

$$P_0(t) = \frac{\mu_{c1}\mu_{c2}}{m_1m_2} + \left[\frac{(m_1 + \mu_{c1}) + (m_1 + \mu_{c2})}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1t} - \left[\frac{(m_2 + \mu_{c1})(m_2 + \mu_{c2})}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2t} \quad (3.15)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda_1\mu_{c2}}{m_1m_2} + \left[\frac{\lambda_1m_1 + \lambda_1\mu_{c2}}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1t} - \left[\frac{(m_2 + \mu_{c1})\lambda_1}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2t} \quad (3.16)$$

$$P_2(t) = \frac{\lambda_2\mu_{c1}}{m_1m_2} + \left[\frac{\lambda_2m_1 + \lambda_2\mu_{c1}}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1t} - \left[\frac{(m_2 + \mu_{c1})\lambda_2}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2t} \quad (3.17)$$

dimana:

$$m_1, m_2 = \frac{-A \pm [A^2 - 4B]^{1/2}}{2} \quad (3.18)$$

$$A = \mu_{c1} + \mu_{c2} + \lambda_1 + \lambda_2 \quad (3.19)$$

$$B = \mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_1\mu_{c2} + \lambda_2\mu_{c1} \quad (3.20)$$

$$m_1 m_2 = \mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_1\mu_{c2} + \lambda_2\mu_{c1} \quad (3.21)$$

$$m_1 + m_2 = -(\mu_{c1} + \mu_{c2} + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (3.22)$$

Ketersediaan sistem $A_s(t)$ dinyatakan dengan:

$$A_s(t) = P_0(t) \quad (3.23)$$

Pada waktu t sangat besar, ketersediaan sistem pada kondisi normal dapat dirumuskan dari persamaan 3.15 sampai 3.23 menjadi:

$$A_s = \frac{\mu_{c1}\mu_{c2}}{m_1 m_2} = \frac{\mu_{c1}\mu_{c2}}{\mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_1\mu_{c2} + \lambda_2\mu_{c1}} \quad (3.24)$$

Contoh 3.2

Sistem rekayasa dapat gagal dalam dua bentuk kegagalan yang terpisah satu dengan yang lain. Tingkat kegagalan konstan bentuk kegagalan I dan II adalah $\lambda_1 = 0,002$ kegagalan per jam dan $\lambda_2 = 0,005$ kegagalan per jam. Tingkat perawatan korektif yang konstan dari mode kegagalan I dan II adalah $\mu_{c1} = 0,006$ perbaikan per jam dan $\mu_{c2} = 0,009$ perbaikan per jam. Hitung ketersediaan sistem pada kondisi normal.

Jawaban:

Dengan memasukkan nilai-nilai yang diketahui ke persamaan 3.24 diperoleh:

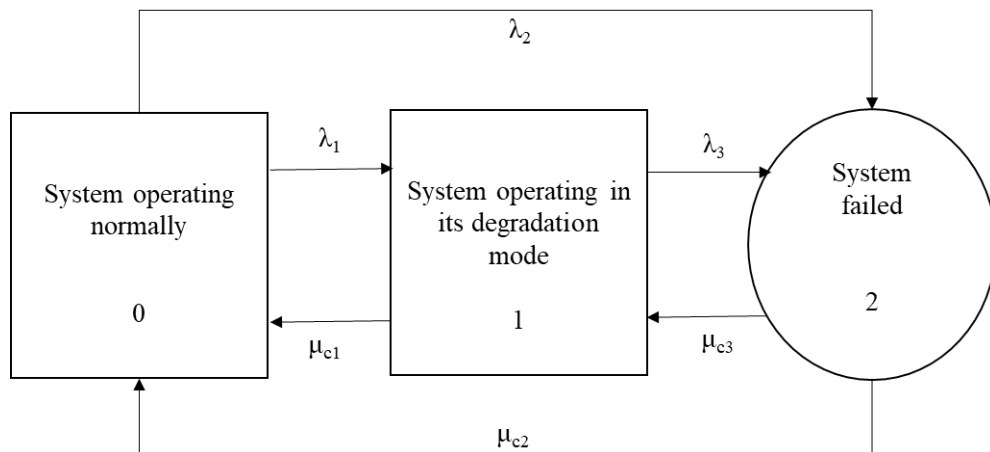
$$A_s = \frac{0,006 \times 0,009}{(0,006 \times 0,009) + (0,002 \times 0,009) + (0,005 \times 0,006)}$$

$$A_s = 0,5294$$

Jadi, ketersediaan sistem pada kondisi normal adalah 0,5294. Ada sekitar 53% kemungkinan bahwa sistem akan bisa digunakan saat diperlukan.

3. Model III

Model matematika ini mewakili sistem yang dapat beroperasi secara normal, beroperasi dalam bentuk degradasi atau gagal sepenuhnya. Contoh dari jenis sistem ini dapat berupa pembangkit listrik, yaitu menghasilkan listrik dengan kapasitas penuh, penurunan kapasitas atau tidak sama sekali. Perawatan korektif dimulai dari degradasi dan bentuk sistem yang gagal total untuk memperbaiki bagian yang rusak (Dhillon, 1983a). Diagram ruang status sistem ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram Transisi Sistem

Model tersebut di atas mengikuti asumsi berikut:

- Kegagalan total sistem, kegagalan parsial, dan tingkat perawatan korektif konstan.
- Sistem operasi bisa gagal seluruhnya atau sebagian. Sistem operasi sebagian dapat berhenti beroperasi sama sekali.
- Semua kegagalan sistem secara statistik independen.
- Sistem yang diperbaiki sama bagusnya dengan baru.

Simbol berikut dikaitkan dengan model:

i = status sistem ke i , $i = 0$ (sistem beroperasi secara normal), $i = 1$ (sistem beroperasi dalam bentuk degradasi), $i = 2$ (sistem gagal)

$P_i(t)$ = probabilitas sistem dalam keadaan i pada waktu t , untuk $i = 0, 1, 2, \dots$
 λ_i = tingkat kegagalan sistem, $i = 1$ (dari keadaan 0 ke keadaan 1), $i = 2$ (dari keadaan 0 ke keadaan 2), $i = 3$ (dari keadaan 1 ke keadaan 2)
 μ_{ci} = tingkat pemeliharaan korektif sistem, $i = 1$ (dari keadaan 1 ke keadaan 0), $i = 2$ (dari keadaan 2 ke keadaan 0), $i = 3$ (dari keadaan 2 ke keadaan 1).
 Untuk model I dan II, diagram 3.5 dijelaskan dengan persamaan:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} + (\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) = \mu_{c1}P_1(t) + \mu_{c2}P_2(t) \quad (3.25)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + (\mu_{c1} + \lambda_3)P_1(t) = \mu_{c3}P_2(t) + \lambda_1P_0(t) \quad (3.26)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} + (\mu_{c2} + \mu_{c3})P_2(t) = \lambda_3P_1(t) + \lambda_2P_0(t) \quad (3.27)$$

Pada waktu $t = 0$, $P_0(0) = 1$ dan $P_1(0) = P_2(0) = 0$, sehingga dengan menggunakan persamaan 3.25-3.27 diperoleh:

$$\begin{aligned}
 P_0(t) = & \frac{(\mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_3\mu_{c2} + \mu_{c1}\mu_{c3})}{K_1K_2} \\
 & + \left[\frac{\mu_{c1}K_1 + \mu_{c2}K_2 + \mu_{c3}K_1 + K_1\lambda_3 + K_2^2 + \mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_3\mu_{c2} + \mu_{c1}\mu_{c3}}{Y} \right] e^{K_1t} \\
 & + \left\{ 1 - \left(\frac{\mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_3\mu_{c2} + \mu_{c1}\mu_{c3}}{K_1K_2} \right) \right. \\
 & \left. - \left[\frac{\mu_{c1}K_1 + \mu_{c2}K_2 + \mu_{c3}K_1 + K_1\lambda_3 + K_2^2 + \mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_3\mu_{c2} + \mu_{c1}\mu_{c3}}{Y} \right] \right\} e^{K_2t}
 \end{aligned} \quad (3.28)$$

dimana:

$$Y = K_1(K_1 - K_2)$$

$$\begin{aligned}
 P_1(t) = & \frac{(\lambda_1\mu_{c2} + \lambda_1\mu_{c3} + \lambda_2\mu_{c3})}{K_1K_2} + \left[\frac{K_1\lambda_1 + \lambda_1\mu_{c2} + \lambda_1\mu_{c3} + \lambda_2\mu_{c3}}{Y} \right] e^{K_1t} \\
 & - \left[\frac{\lambda_1\mu_{c2} + \lambda_1\mu_{c3} + \lambda_2\mu_{c3}}{K_1K_2} + \frac{K_1\lambda_1 + \lambda_1\mu_{c2} + \lambda_1\mu_{c3} + \lambda_2\mu_{c3}}{Y} \right] e^{K_2t}
 \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$P_2(t) = \frac{(\lambda_1\lambda_3 + \mu_{c1}\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3)}{K_1K_2} + \left[\frac{K_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \mu_{c1}\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3}{Y} \right] e^{K_1t} - \left[\frac{\lambda_1\lambda_3 + \mu_{c1}\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3}{K_1K_2} + \frac{K_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \mu_{c1}\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3}{Y} \right] e^{K_2t} \quad (3.30)$$

dimana:

$$K_1, K_2 = \frac{-D \pm [D^2 - 4F]^{1/2}}{2} \quad (3.31)$$

$$D = \mu_{c1} + \mu_{c2} + \mu_{c3} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (3.32)$$

$$F = K_1K_2 = \mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_3\mu_{c2} + \mu_{c1}\mu_{c3} + \mu_{c2}\lambda_1 + \lambda_1\mu_{c3} + \lambda_1\lambda_3 + \mu_{c1}\lambda_2 + \lambda_2\mu_{c3} + \lambda_2\lambda_3 \quad (3.33)$$

Ketersediaan sistem penuh/parsial dinyatakan dengan:

$$A_{sf/p} = P_0(t) + P_1(t) \quad (3.34)$$

Pada waktu t besar, persamaan (3.34) menjadi:

$$A_{sf/p} = \frac{\mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_3\mu_{c2} + \mu_{c1}\mu_{c3} + \lambda_1\mu_{c2} + \lambda_1\mu_{c3} + \lambda_2\mu_{c3}}{K_1K_2} \quad (3.35)$$

dimana:

$A_{sf/p}$ = ketersediaan kondisi ideal penuh/parsial suatu sistem (*system full/partial steady-state availability*)

Demikian pula dengan ketersediaan sistem penuh pada kondisi ideal dinyatakan juga dengan:

$$A_{sf/p} = P_0 = \frac{\mu_{c1}\mu_{c2} + \lambda_3\mu_{c2} + \mu_{c1}\mu_{c3}}{K_1K_2} \quad (3.36)$$

Contoh 5.3

Asumsikan bahwa dalam persamaan (3.36), kita memiliki $\lambda_1 = 0,002$ kegagalan per jam, $\lambda_2 = 0,003$ kegagalan per jam, $\lambda_3 = 0,001$ kegagalan per jam, $\mu_{c1} = 0,006$

perbaikan per jam, $\mu_{C2} = 0,004$ perbaikan per jam, dan $\mu_{C3} = 0,008$ perbaikan per jam. Hitung nilai ketersediaan penuh sistem pada kondisi normal.

Jawaban:

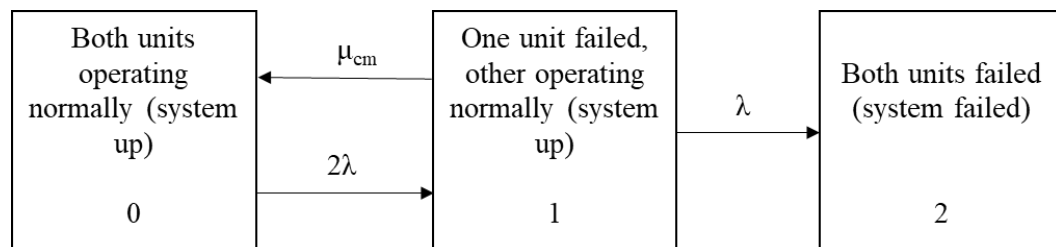
Dengan menggunakan persamaan 3.33:

$$\begin{aligned} K_1 K_2 &= (0.006 \times 0.004) + (0.001 \times 0.004) + (0.006 \times 0.008) \\ &\quad + (0.004 \times 0.002) + (0.002 \times 0.008) + (0.002 \times 0.001) \\ &\quad + (0.006 \times 0.003) + (0.003 \times 0.008) + (0.003 \times 0.001) \\ &\approx 0.0001 \end{aligned}$$

Menggunakan nilai yang dihitung di atas dan data yang diberikan dalam persamaan (3.36) kita mendapatkan $A_{Sf} = 0.5170$, jadi ada sekitar 52% kemungkinan bahwa sistem akan tersedia untuk layanan penuh.

4. Model IV

Model matematis ini merepresentasikan dua sistem unit identik yang saling bebas (paralel). Setidaknya satu unit harus beroperasi secara normal untuk keberhasilan sistem. Perawatan korektif untuk mengembalikannya ke status operasinya dimulai segera setelah salah satu unit gagal (Shooman, 1968). Diagram ruang keadaan sistem ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Diagram Transisi Sistem Dua Unit Identik yang Saling Bebas

Asumsi berikut dikaitkan dengan model:

- Sistem terdiri dari dua unit yang independen dan identik.
- Unit yang diperbaiki bagus seperti baru.
- Tidak ada perawatan korektif yang dilakukan pada sistem yang gagal (yaitu, saat kedua unit rusak).
- Kegagalan unit dan tingkat perawatan korektif konstan.

Untuk Model I, II, dan III, persamaan untuk diagram transisi gambar 3.6 dirumuskan sebagai berikut:

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

$$\frac{dP_1(t)}{dt} + (\mu_{cm} + \lambda)P_1(t) = 2\lambda P_0(t) \quad (3.38)$$

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

Pada waktu $t = 0$, maka $P_0(0) = 1$ dan $P_1(0) = P_2(0) = 0$. Dengan menggunakan persamaan 3.37-3.39 diperoleh:

$$P_0(t) = \left[\frac{\lambda + \mu + C_1}{C_1 - C_2} \right] e^{C_1 t} - \left[\frac{\lambda + \mu + C_1}{C_1 - C_2} \right] e^{C_2 t} \quad (3.40)$$

$$P_1(t) = \left[\frac{2\lambda}{C_1 - C_2} \right] e^{C_1 t} - \left[\frac{2\lambda}{C_1 - C_2} \right] e^{C_2 t} \quad (3.41)$$

$$P_2(t) = 1 + \left[\frac{C_2}{C_1 - C_2} \right] e^{C_1 t} - \left[\frac{C_1}{C_1 - C_2} \right] e^{C_2 t} \quad (3.42)$$

dimana:

$$C_1, C_2 = \frac{[-(3\lambda + \mu) \pm (3\lambda + \mu)^2 - 8\lambda^2]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (3.43)$$

$$C_1 C_2 = 2\lambda^2 \quad (3.44)$$

$$C_1 + C_2 = -(3\lambda + \mu) \quad (3.45)$$

Reliabilitas atau keandalan sistem dinyatakan dengan:

$$R_s(t) = P_0(t) + P_1(t) \quad (3.46)$$

dimana:

$R_s(t)$ = keandalan sistem yang berlebihan pada waktu t

Waktu rata-rata sistem mengalami kegagalan ($MTTF_s$) dinyatakan dengan:

$$MTTF_s = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \frac{3\lambda + \mu_{cm}}{2\lambda^2} \quad (3.47)$$

dengan $\lambda = 1/MTTF_u$ dan $\mu_{cm} = 1/MCMT$, maka persamaan menjadi:

$$MTTF_s = \frac{MTTF_u}{2MCMT} (3MCMT + MTTF_u) \quad (3.48)$$

Dimana:

$MTTF_u$ = *unit mean time to failure* (waktu rata-rata unit untuk mengalami kegagalan operasi)

$MCMT$ = *unit mean corrective maintenance time* (waktu rata-rata perawatan korektif unit)

Contoh 3.4

Suatu sistem terdiri dari dua unit independen dan identik terpasang secara paralel. Unit yang gagal segera diperbaiki tetapi sistem yang gagal tidak pernah diperbaiki. Waktu unit hingga mengalami kegagalan dan waktu perawatan korektif didistribusikan secara eksponensial. Satuan waktu rata-rata untuk mengalami kegagalan dan waktu perawatan korektif rata-rata adalah masing-masing 150 jam dan 5 jam. Hitung waktu rata-rata sistem untuk mengalami kegagalan dengan dan tanpa kinerja perawatan korektif.

Jawaban:

Dengan menggunakan persamaan 3.48 diperoleh:

$$MTTF_s = \frac{150}{2 \times 5} (3 \times 5 + 150) = 2475 \text{ jam}$$

Untuk $\mu_{cm} = 0$, dengan menggunakan persamaan 3.47 diperoleh:

$$MTTF_s = \frac{3}{2\lambda} = 225 \text{ jam}$$

Ini berarti penerapan perawatan korektif membantu meningkatkan waktu rata-rata sistem menuju kegagalan/kerusakan dari 225 jam menjadi 2475 jam.

F. PERKIRAAN PERSAMAAN TINGKAT KEGAGALAN EFEKTIF UNTUK SISTEM REDUNDAN DENGAN PERAWATAN KOREKTIF

Bagian ini menyajikan perkiraan persamaan tingkat kegagalan efektif untuk dua jenis sistem redundan (sistem yang mengalami kegagalan operasi). Tingkat kegagalan efektif adalah kebalikan dari waktu rata-rata item/sistem untuk gagal.

1. Tingkat Kegagalan Efektif untuk Sistem Tipe I

Tipe sistem I diasumsikan berisi m sejumlah unit aktif independen dan identik secara paralel, di mana sejumlah K unit dibiarkan gagal tanpa menyebabkan kegagalan sistem. Perawatan korektif dimulai segera setelah unit rusak. Sistem yang gagal tidak pernah diperbaiki. Kegagalan unit dan tingkat perawatan korektif konstan. Jadi, perkiraan tingkat kegagalan efektif ($m - K$) dari suatu sistem m dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (RADC, 1988):

$$\lambda_{(m-K)/m} = \frac{m! \lambda^{K+1}}{(m - K - 1)! \mu^K} \quad (3.49)$$

dimana:

$\lambda_{(m-K)/m}$ = perkiraan tingkat kegagalan efektif sistem. Dalam sistem ini setidaknya ($m - K$) unit harus bekerja normal agar sistem berfungsi

λ = tingkat kegagalan unit

μ = tingkat perawatan korektif unit

Contoh 3.5

Sebuah sistem terdiri dari tiga unit independen dan identik secara paralel dan setidaknya dua unit harus beroperasi secara normal untuk keberhasilan sistem. Tingkat kegagalan unit adalah 0,0001 kegagalan per jam. Diperlukan rata-rata 2 jam untuk memperbaiki (distribusi eksponensial) unit yang gagal ke status aktif. Hitung perkiraan tingkat kegagalan efektif sistem jika sistem yang gagal tidak pernah diperbaiki.

Jawaban:

$$\begin{aligned} \lambda_{(3-1)/3} &= \frac{3! \lambda^2}{1! \mu} = \frac{6\lambda^2}{\mu} \\ &= 6(0,0001)^2/0,5 \end{aligned}$$

= $1,2 \times 10^{-7}$ kegagalan per jam

Tingkat kegagalan efektif sistem adalah $1,2 \times 10^{-7}$ kegagalan per jam.

2. Tingkat Kegagalan Efektif pada Sistem Tipe II

Sistem tipe II terdiri dari dua unit independen dan non-identik yang dipasang secara paralel. Perawatan korektif dimulai segera setelah salah satu unit rusak. Sistem yang gagal tidak pernah diperbaiki. Kegagalan unit dan tingkat perawatan korektif konstan. Rumus perkiraan untuk mendapatkan tingkat kegagalan efektif sistem adalah sebagai berikut (RADC, 1988):

$$\lambda_{se} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 [(\mu_1 + \mu_2) + (\lambda_1 + \lambda_2)]}{\mu_1 \mu_2 + [(\mu_1 + \mu_2)(\lambda_1 + \lambda_2)]} \quad (3.50)$$

Dimana:

λ_{se} = tingkat kegagalan efektif sistem paralel dua unit

λ_i = tingkat kegagalan i unit, dengan $i = 1, 2$

μ_i = tingkat perawatan korektif i unit, dengan $i = 1, 2$

Contoh 5.6

Suatu sistem terdiri dari dua unit independen dan nonidentik secara paralel. Kegagalan unit 1 dan tingkat pemeliharaan korektif masing-masing adalah 0,004 kegagalan per jam dan 0,005 perbaikan per jam. Demikian pula, kegagalan unit 2 dan tingkat pemeliharaan korektif masing-masing adalah 0,002 kegagalan per jam dan 0,003 perbaikan per jam. Sistem yang gagal tidak pernah diperbaiki. Hitung perkiraan sistem tingkat kegagalan efektif.

Jawaban:

Dengan menggunakan persamaan 3.50, diperoleh:

$$\lambda_{se} = \frac{(0,004 \times 0,002)[(0,005 + 0,003) + (0,004 + 0,002)]}{(0,005 \times 0,003) + [(0,005 + 0,003)(0,004 + 0,002)]}$$

= 0,0018 kegagalan per jam

Tingkat kegagalan efektif sistem adalah 0,0018 kegagalan per jam.

G. LATIHAN SOAL

1. Jelaskan mengenai perawatan korektif.
2. Jelaskan jenis perawatan korektif berikut:
 - a. *Overhaul*

b. *Rebuild*

c. *Servicing*

3. Diskusikan langkah-langkah berurutan yang terkait dengan perawatan korektif.
4. Tentukan komponen utama waktu perawatan aktif.
5. Diskusikan setidaknya empat strategi untuk mengurangi waktu perawatan korektif suatu sistem.
6. Jelaskan waktu perawatan korektif median.
7. Asumsikan bahwa waktu rata-rata eksponensial untuk kegagalan dan waktu perawatan korektif rata-rata dari suatu sistem adalah masing-masing 2500 jam dan 4 jam. Hitung ketersediaan sistem pada kondisi normal.
8. Sebuah sistem dapat gagal dalam dua bentuk kegagalan yang saling eksklusif. Bentuk kegagalan I adalah kegagalan konstan dan tingkat perawatan korektif masing-masing adalah 0,005 kegagalan per jam dan 0,02 perbaikan per jam. Demikian pula, kegagalan konstan pada bentuk kegagalan II dan tingkat perawatan korektif masing-masing adalah 0,001 kegagalan per jam dan 0,03 perbaikan per jam. Hitung ketersediaan sistem pada kondisi normal/ideal.
9. Sebuah sistem terdiri dari dua unit independen dan identik dipasang secara paralel. Meskipun unit yang rusak segera diperbaiki, sistem yang gagal tidak pernah diperbaiki. Waktu unit hingga mengalami kegagalan dan waktu perawatan korektif didistribusikan secara eksponensial. Jadi, waktu unit untuk mengalami kegagalan dan waktu perawatan korektif rata-rata adalah masing-masing 200 jam dan 2 jam. Hitung waktu rata-rata sistem sampai mengalami kegagalan.
10. Asumsikan bahwa sistem terdiri dari dua unit independen dan identik yang dipasang secara paralel dan setidaknya satu unit harus beroperasi secara normal untuk keberhasilan operasi sistem. Tingkat kegagalan dan perbaikan unit masing-masing adalah 0,002 kegagalan per jam dan 0,01 perbaikan per jam. Sistem yang gagal tidak pernah diperbaiki. Hitung nilai perkiraan tingkat kegagalan efektif sistem.

BAB 4

RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE

A. PENDAHULUAN

Reliability Centered Maintenance (RCM) atau perawatan yang berpusat pada reliabilitas (keandalan) adalah proses sistematis yang digunakan untuk menentukan apa yang harus dikerjakan untuk memastikan bahwa setiap fasilitas yang ada dapat terus memenuhi fungsi yang dirancang dalam konteks operasional (McKenna & Oliverson, 1997). RCM mengarah ke program perawatan yang memfokuskan perawatan preventif (PM) pada bentuk kegagalan tertentu yang kemungkinan besar akan terjadi. Organisasi mana pun bisa mendapatkan keuntungan dari RCM jika kerusakannya mencapai lebih dari 20% hingga 25% dari total beban kerja perawatan (Picknell & Steel, 1997).

Istilah “perawatan yang berpusat pada keandalan” muncul untuk pertama kalinya sebagai judul laporan proses yang digunakan oleh industri penerbangan sipil untuk menyiapkan program perawatan pesawat. Laporan tersebut disiapkan oleh United Airlines dan diminta oleh Departemen Pertahanan USA pada tahun 1974 (Dhillon, 2002).

B. TUJUAN DAN PRINSIP RCM

Beberapa tujuan penting RCM adalah sebagai berikut (AMC Pamphlet No. 750-2, 1985):

1. Untuk mengembangkan prioritas terkait desain yang dapat memfasilitasi PM.
2. Untuk mengumpulkan informasi yang berguna untuk meningkatkan desain item yang terbukti tidak memuaskan dimana keandalan adalah hal yang melekat.
3. Untuk mengembangkan tugas terkait PM yang dapat mengembalikan keandalan dan keamanan ke tingkat yang melekat pada saat terjadi kerusakan peralatan atau sistem.
4. Untuk mencapai tujuan di atas ketika total biaya minimal.

Berbagai prinsip RCM sebagai berikut (Nowlan & Heap, 1978):

1. RCM berfokus pada sistem/peralatan.
RCM lebih mementingkan perawatan fungsi sistem daripada memelihara fungsi komponen secara individu.
2. RCM mendorong faktor keselamatan dan ekonomi.

Keselamatan adalah yang terpenting karena itu harus dipastikan dengan biaya berapa pun dan kemudian efektivitas biaya menjadi kriteria selanjutnya.

3. RCM berorientasi pada fungsi.
RCM memainkan peran penting dalam memelihara fungsi sistem/peralatan, bukan hanya pengoperasiannya semata.
4. Keterbatasan desain diketahui dengan RCM.
Tujuan RCM adalah untuk menjaga keandalan yang melekat pada desain suatu peralatan/sistem dan pada saat yang sama mengakui bahwa perubahan keandalan yang melekat hanya dapat dilakukan melalui desain daripada melakukan perawatan. Perawatan pada waktu terbaik hanya dapat mencapai dan mempertahankan tingkat keandalan suatu disain.
5. RCM berpusat pada keandalan.
RCM tidak terlalu mementingkan tingkat kegagalan yang sederhana, tetapi menekankan pada hubungan antara masa operasi dan kegagalan yang dialami. RCM menangani statistik kegagalan di dalam suatu kondisi aktual.
6. Kondisi yang tidak memuaskan didefinisikan sebagai kegagalan RCM.
Kegagalan bisa berupa hilangnya mutu yang dapat diterima atau hilangnya fungsi.
7. RCM adalah sistem kehidupan.
RCM mengumpulkan informasi dari hasil yang dicapai dan memberikannya kembali untuk meningkatkan desain dan perawatan di masa mendatang.
8. Tiga jenis tugas perawatan yang sejalan dengan operasi sampai mengalami kegagalan diketahui oleh RCM.
Tugas-tugas ini dijelaskan dengan pencarian kegagalan, berdasarkan waktu dan berdasarkan kondisi. Tujuan dari tugas pencarian kegagalan adalah untuk menemukan fungsi tersembunyi yang telah gagal tanpa memberikan indikasi kegagalan yang tertunda. Tugas yang berdasarkan waktu dijadwalkan sesuai kebutuhan. Tugas-tugas yang berdasarkan pada kondisi dilaksanakan sesuai dengan kebutuhan. Operasional sampai mengalami kegagalan dikontrol oleh RCM.
9. Tugas RCM harus efektif.
Tugas-tugas tersebut harus hemat biaya dan secara teknis masuk akal.
10. RCM menggunakan pohon logika untuk menyaring tugas pemeliharaan.
Ini memberikan konsistensi dalam perawatan semua jenis peralatan.
11. Tugas RCM harus dapat diterapkan.
Tugas harus mengurangi terjadinya kegagalan atau memperbaiki kerusakan lain akibat kegagalan.

C. PROSES RCM DAN HAL-HAL TERKAIT

Proses RCM diterapkan untuk menentukan tugas perawatan tertentu yang akan dilakukan, serta untuk mempengaruhi keandalan dan kemampuan perawatan item selama desain. Proses RCM diterapkan awalnya selama fase desain maupun fase pengembangan dan kemudian diterapkan kembali selama fase operasional jika sesuai untuk mempertahankan program perawatan yang efektif berdasarkan pengalaman di lapangan. Setiap proses RCM harus memastikan bahwa semua pertanyaan berikut dijawab secara efektif sesuai urutannya (Netherton, 1999):

1. Apa fungsi dan tingkat yang diharapkan terkait kinerja fasilitas dalam konteks operasi sekarang?
2. Bagaimana suatu sistem gagal memenuhi fungsi yang ditetapkan?
3. Apa alasan untuk setiap kegagalan fungsional atau bentuk kegagalan?
4. Apa pengaruh dari setiap kegagalan?
5. Bagaimana setiap kegagalan terjadi?
6. Tindakan perbaikan apa yang harus diambil untuk mencegah atau memprediksi setiap kegagalan?
7. Bentuk pengukuran apa yang harus diambil jika tidak menemukan tugas proaktif yang sesuai?

Proses RCM pada dasarnya terdiri dari langkah-langkah berikut (Brauer & Brauer, 1987):

1. Mengidentifikasi komponen-komponen penting terkait dengan perawatan.
Biasanya, item penting perawatan diidentifikasi menggunakan teknik seperti kegagalan, mode, efek, dan analisis kekritisan (FMECA) dan analisis pohon kesalahan (FTA).
2. Mendapatkan data kegagalan yang betul.
Dalam menentukan probabilitas kejadian dan menilai kekritisan, maka ketersediaan data tentang tingkat kegagalan komponen, probabilitas kesalahan operator dan efisiensi inspeksi menjadi sangat penting. Jenis data ini berasal dari pengalaman lapangan, bank data kegagalan umum, dan sebagainya.
3. Mengembangkan kesalahan dengan data analisis pohon.

Probabilitas terjadinya peristiwa kesalahan (peristiwa dasar, menengah, dan teratas) dihitung sesuai dengan properti kombinatorial dari elemen logika di pohon kesalahan.

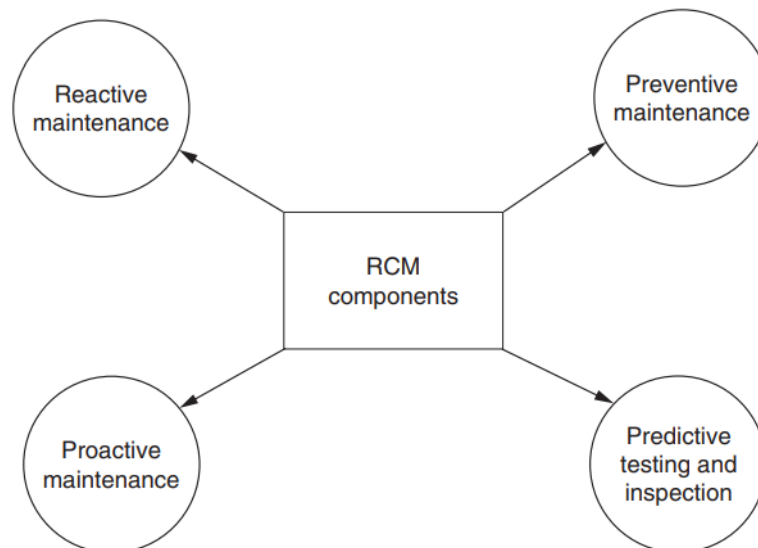
4. Menerapkan logika keputusan pada bentuk kegagalan kritis.
Logika keputusan dirancang menjadi acuan dengan mengajukan pertanyaan penilaian standar terhadap kombinasi tugas perawatan preventif yang paling

diinginkan. Logika yang sama diterapkan pada setiap bentuk kegagalan dari setiap item penting terkait perawatan.

5. Klasifikasikan kebutuhan perawatan.
Kebutuhan perawatan dikategorikan ke dalam tiga klasifikasi: kebutuhan perawatan pada kondisi akan beroperasi (*on-condition*), kebutuhan perawatan dalam pemantauan kondisi (*condition-monitoring*), dan persyaratan perawatan kondisi operasi tidak normal (*hard-time*).
6. Menerapkan keputusan RCM.
Frekuensi dan interval tugas ditetapkan/diberlakukan sebagai bagian dari strategi atau rencana perawatan secara keseluruhan.
7. Menerapkan teknik berkelanjutan atas dasar pengalaman lapangan.
Setelah sistem / peralatan mulai beroperasi, data kehidupan nyata mulai terkumpul. Pada saat itu, salah satu langkah yang paling mendesak adalah mengevaluasi ulang semua keputusan default terkait RCM.

D. BAGIAN-BAGIAN RCM

Ada empat komponen utama RCM seperti ditunjukkan di gambar 4.1 di bawah, yaitu perawatan reaktif, perawatan preventif, pengujian dan inspeksi prediktif, dan perawatan proaktif (NASA, 1996; NAVAIR 00-25-403, 1996).



Gambar 4.1 Komponen-komponen RCM

1. Perawatan Reaktif

Jenis perawatan ini juga dikenal sebagai perawatan *breakdown* (berhenti operasi), *fix-when-fail* (pembetulan ketika mengalami gagal operasi), *run-to-failure* (gagal beroperasi), dan *repair* (perbaikan). Saat menggunakan pendekatan perawatan ini, maka perbaikan, perawatan, atau penggantian peralatan hanya

dilakukan jika kondisinya memburuk dari suatu item/peralatan menghasilkan kegagalan fungsional. Dalam jenis perawatan ini, diasumsikan ada kemungkinan yang sama untuk terjadinya kegagalan di bagian, komponen, atau sistem mana pun. Jika hanya perawatan reaktif dilakukan, maka menyebabkan penggantian suku cadang yang tinggi, buruknya upaya perawatan, dan tingginya persentase tipe aktivitas perawatan yang tidak terencana. Selain itu, program perawatan yang sepenuhnya reaktif akan mengabaikan peluang untuk mempengaruhi kemampuan bertahan peralatan/item.

Perawatan reaktif dapat dilakukan secara efektif hanya jika dilakukan sebagai keputusan sadar, berdasarkan kesimpulan dari analisis RCM yang membandingkan risiko dan biaya kegagalan dengan biaya perawatan yang diperlukan untuk mengurangi risiko dan biaya kegagalan tersebut. Kriteria untuk menentukan prioritas penggantian atau perbaikan item/peralatan yang gagal dalam program perawatan reaktif disajikan pada tabel 4.1 (NASA, 1996).

Tabel 4.1 Klasifikasi Prioritas Perawatan Reaktif

Deskripsi Prioritas	Tingkatan Prioritas	Kriteria Berdasarkan Sistem / Peralatan Konsekuensi Kegagalan
Darurat (<i>emergency</i>)	I	<ul style="list-style-type: none"> • Serius dan berdampak langsung pada <i>output</i> • Keamanan hidup/ properti terancam
Penting (<i>urgent</i>)	II	<ul style="list-style-type: none"> • Serius dan berdampak pada <i>output</i> • Kelangsungan operasi fasilitas terancam
Prioritas (<i>priority</i>)	III	<ul style="list-style-type: none"> • Efek signifikan dan merugikan pada proyek akan segera terjadi • Penurunan kualitas terkait produk
Rutin (<i>routine</i>)	IV	<ul style="list-style-type: none"> • Dampak yang tidak signifikan pada <i>output</i> • Adanya redundansi
Diskresi (<i>discretionary</i>)	V	<ul style="list-style-type: none"> • Sumber daya tersedia • Dampak pada produk dapat diabaikan
Bisa ditangguhkan (<i>deferred</i>)	VI	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak tersedianya sumber daya • Dampak yang dapat diabaikan pada <i>output</i>

2. Perawatan Preventif (Pencegahan)

Perawatan preventif (PM) disebut juga perawatan berbasis waktu atau berbasis interval, dilakukan tanpa memperhatikan kondisi peralatan. Ini terdiri dari pemeriksaan terjadwal secara berkala, penggantian suku cadang, perbaikan komponen/barang, penyesuaian, kalibrasi, pelumasan, dan pembersihan. PM menjadwalkan inspeksi dan perawatan rutin pada interval yang ditetapkan untuk mengurangi kegagalan peralatan yang rentan. Penting untuk diperhatikan bahwa bergantung pada interval yang telah ditentukan dalam penerapan PM dapat menyebabkan signifikansi peningkatan inspeksi dan perawatan rutin. Di sisi lain, ini dapat membantu mengurangi frekuensi dan tingkat keparahan kegagalan yang tidak direncanakan. Perawatan preventif dapat menjadi mahal dan tidak efektif jika ini adalah satu-satunya jenis perawatan yang dilakukan.

a. Penentuan Periodisitas Tugas dan Pengawasan PM

Meskipun ada banyak cara untuk menentukan periodisitas yang benar dari tugas-tugas PM, namun tidak ada yang pasti sampai karakteristik keandalan selama usia masa operasi dari item yang dipengaruhi oleh tugas-tugas yang diinginkan diketahui. Biasanya informasi jenis ini tidak tersedia, tetapi harus didapatkan untuk item/equipment baru. Pengalaman masa lalu menunjukkan bahwa teknik pengujian dan inspeksi prediktif (PTI) berguna dalam menentukan kondisi barang/peralatan selama usia operasi.

Parameter waktu rata-rata selama kegagalan (*mean time between failure*, MTBF) seringkali digunakan sebagai dasar untuk menentukan interval PM. Pendekatan ini dianggap tidak tepat karena tidak memberikan informasi tentang pengaruh bertambahnya usia terhadap reliabilitas item. Lebih khusus lagi, pendekatan tersebut memberikan usia rata-rata di mana kegagalan terjadi, tetapi bukan usia yang paling mungkin untuk operasi item yang diharapkan. Jika informasi tidak memadai tentang pengaruh usia terhadap keandalan, pendekatan yang paling tepat adalah memantau kondisi item (NASA, 1996).

b. Pemantauan Item/Peralatan

Tujuan utama dalam memonitor kondisi peralatan adalah untuk menentukan kondisi peralatan dan membuat trend untuk meramalkan kondisi peralatan di masa mendatang. Pendekatan berikut berguna untuk menetapkan periodisitas awal:

- a. Antisipasi kegagalan dari pengalaman masa lalu: Dalam beberapa kasus, riwayat kegagalan peralatan dan pengalaman pribadi dapat memberikan pada tingkat tertentu terkait perasaan intuitif kapan suatu kegagalan terjadi.
- b. Statistik distribusi kegagalan: distribusi kegagalan dan probabilitas kegagalan bisa diketahui ketika statistik digunakan untuk menentukan dasar pemilihan periodisitas.
- c. Pendekatan konservatif: penerapan umum di sektor industri adalah memantau peralatan setiap bulan/minggu ketika metode pemantauan yang baik dan informasi yang memadai tidak tersedia. Seringkali, ini mengarah pada pemantauan yang berlebihan. Dalam situasi ketika kegagalan yang akan datang menjadi jelas melalui penggunaan tren atau teknik analisis prediktif lainnya, maka interval pemantauan dapat dipersingkat.

3. Pengujian dan Inspeksi Prediktif

Pengujian dan inspeksi prediktif (*predictive testing & inspection*, PTI) terkadang disebut pemantauan kondisi atau perawatan prediktif. Untuk menilai kondisi barang/peralatan digunakan data kinerja, teknik pengujian non-intrusif, dan inspeksi visual. PTI menggantikan tugas perawatan yang diatur waktunya secara sembarangan dengan perawatan yang dilakukan sebagai jaminan bagi kondisi barang/peralatan. Analisis data pemantauan kondisi barang/peralatan secara kontinu berguna untuk perencanaan dan penjadwalan perawatan/perbaikan sebelum terjadi masalah besar atau kegagalan fungsional.

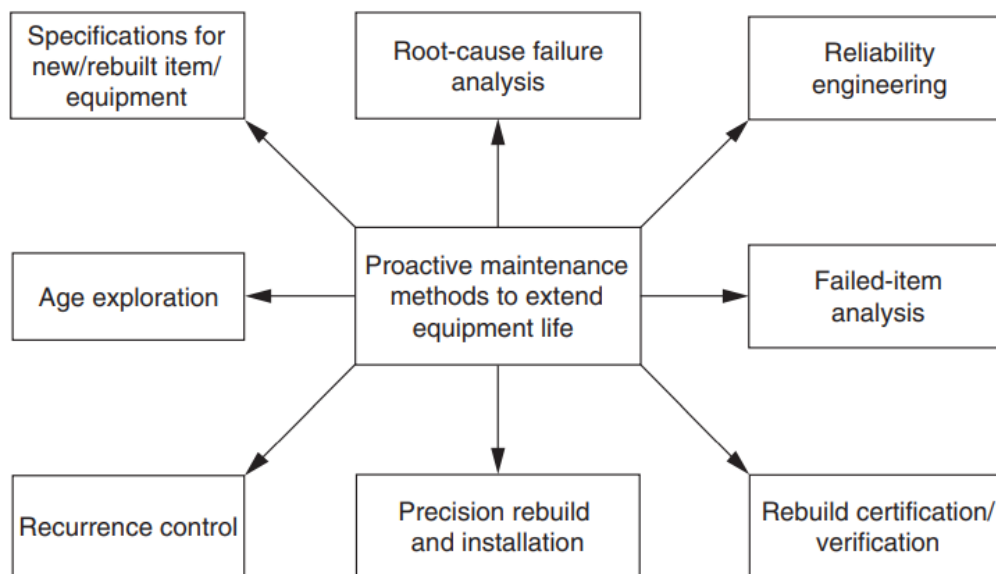
Data PTI yang dikumpulkan digunakan untuk menentukan kondisi peralatan dan untuk menyoroti penyebab kegagalan operasi dalam berbagai bentuk termasuk pengenalan pola, analisis tren, korelasi beberapa teknologi, perbandingan data, analisis proses statistik, dan pengujian terhadap batas dan rentang. PTI tidak boleh menjadi satu-satunya jenis perawatan yang diterapkan karena PTI tidak cocok untuk semua jenis item/peralatan atau kemungkinan bentuk kegagalan.

4. Perawatan Proaktif

Jenis perawatan ini membantu meningkatkan perawatan melalui tindakan seperti desain, pengerjaan, pemasangan, penjadwalan, dan prosedur perawatan yang lebih baik. Karakteristik perawatan proaktif termasuk mempraktikkan proses perbaikan berkelanjutan, menggunakan umpan balik dan komunikasi untuk memastikan bahwa perubahan dalam desain/prosedur tersedia secara efisien untuk perancang/manajemen barang, memastikan bahwa tidak ada yang mempengaruhi pemeliharaan terjadi dalam isolasi total, dengan tujuan akhir mengoreksi peralatan terkait selamanya, mengoptimalkan dan menyesuaikan metode dan teknologi

perawatan untuk setiap aplikasi. Perawatan ini melakukan analisis akar penyebab kegagalan dan analisis prediktif untuk meningkatkan efektivitas perawatan, melakukan evaluasi berkala terhadap konten teknis dan kinerja tugas perawatan dalam beberapa jenjang, menghubungkan berbagai fungsi dengan dukungan perawatan dalam bentuk perencanaan program perawatan serta menggunakan tampilan siklus hidup perawatan dan fungsi pendukung.

Gambar 4.2 menyajikan delapan metode dasar yang digunakan oleh perawatan proaktif untuk memperpanjang umur barang/peralatan (NASA, 1996).



Gambar 4.2 Teknik Dasar Perawatan Proaktif

a. Teknik Keandalan (*Reliability Engineering*)

Teknik keandalan dalam hubungannya dengan pendekatan perawatan proaktif lainnya, melibatkan perancangan ulang, modifikasi, atau peningkatan barang/suku cadang atau penggantinya dengan item/bagian yang lebih baik. Dalam beberapa kasus, desain ulang item/suku cadang mungkin diperlukan. Ada banyak teknik yang digunakan dalam rekayasa keandalan untuk melakukan analisis keandalan teknis suatu item/sistem. Ada dua cara yang paling banyak digunakan di sektor industri, yaitu *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA).

b. Analisis Item Gagal (Failed-Item Analysis)

Teknik ini melibatkan pemeriksaan visual item gagal setelah penggantian untuk menentukan alasan kegagalan. Saat diperlukan, analisis teknis yang lebih rinci dilakukan untuk menemukan penyebab sebenarnya dari kegagalan. Misalnya dalam kasus bantalan (*bearing*), akar penyebab kegagalannya mungkin terkait dengan faktor-faktor seperti penerapab

pelumasan yang buruk, keseimbangan dan toleransi kelurusan yang berlebihan, pemasangan yang tidak tepat, atau metode penyimpanan dan penanganan yang buruk. Pengalaman masa lalu menunjukkan bahwa lebih dari 50% dari semua masalah *bearing* disebabkan oleh pemasangan atau kontaminasi yang tidak tepat. Biasanya, indikator masalah pemasangan yang tidak tepat terlihat pada permukaan internal dan eksternal *bearing* dan indikator kontaminasi muncul pada permukaan internal *bearing*.

- c. Analisis Akar Penyebab Kegagalan (Root Cause Fail Analysis)
Root Cause Fail Analysis (RCFA) berkaitan dengan mencari penyebab dasar kegagalan fasilitas/peralatan secara proaktif. Tujuan utama RCFA adalah untuk menentukan penyebab masalah secara efisien dan ekonomis, memperbaiki penyebab masalah bukan efeknya saja, menanamkan mentalitas “perbaiki selamanya” dan memberikan data yang bisa berguna untuk mengatasi masalah.
- d. Spesifikasi untuk Barang/Peralatan Baru/Dirakit Ulang
 Di teknik ini, perhatian dasarnya adalah menuliskan spesifikasi yang efektif, mendokumentasikan masalah, dan menguji peralatan dari vendor yang berbeda. Spesifikasi harus minimal mencakup hal-hal terkait getaran, kriteria keseimbangan, dan kesejajaran. Dasar dari pendekatan proaktif ini adalah untuk mendokumentasikan data historis sehingga para profesional yang terlibat dapat secara efektif menulis spesifikasi pembelian dan pemasangan yang dapat diverifikasi untuk peralatan baru atau yang dirakit kembali.
- e. Eksplorasi Masa Pakai (Age Exploration)
 Eksplorasi masa pakai (AE) merupakan faktor penting dalam melaksanakan program RCM. Teknik ini menyediakan mekanisme untuk memvariasikan aspek kunci program perawatan untuk mengoptimalkan proses. Pendekatan AE menguji penerapan semua tugas perawatan terkait tiga faktor berikut:
 - 1) Isi teknis: Isi teknis tugas diperiksa untuk memastikan bahwa semua bentuk kegagalan yang teridentifikasi ditangani dengan benar, serta memastikan bahwa tugas perawatan yang ada mengarah pada tingkat keandalan yang diharapkan
 - 2) Interval kinerja: Penyesuaian dibuat terus-menerus pada interval kinerja tugas sampai tingkat penurunan resistensi terhadap kegagalan secara efektif dirasakan atau ditentukan.
 - 3) Pengelompokan tugas: Tugas dengan periode serupa dikelompokkan yang bertujuan untuk meningkatkan waktu yang dihabiskan di lokasi kerja dan mengurangi kurang maksimalnya masa pakai.

f. Sertifikasi dan Verifikasi Hasil Perbaikan Kembali (*Rebuild*)

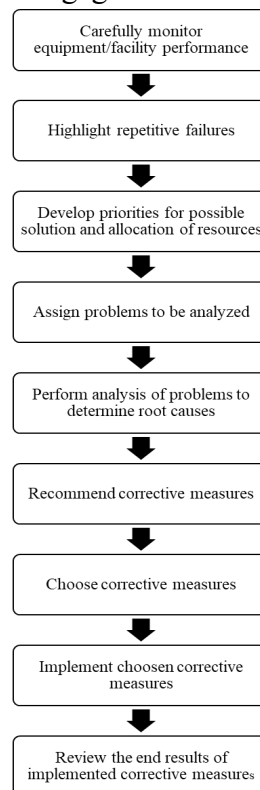
Pada pemasangan komponen atau peralatan yang masih baru maupun yang habis diperbaiki (*rebuild*), penting untuk memastikan bahwa itu berfungsi secara efektif. Pengalaman menunjukkan bahwa merupakan praktik yang baik untuk menguji item/peralatan dengan standar sertifikasi dan verifikasi resmi untuk menghindari kinerja operasi yang tidak memuaskan atau kegagalan di awal.

g. Pengendalian Secara Berulang (*Recurrence Control*)

Pengendalian pengulangan menyangkut kontrol kegagalan berulang. Kegagalan berulang didefinisikan sebagai ketidakmampuan berulang suatu item untuk menjalankan fungsi yang diperlukan. Situasi berikut termasuk dalam kategori kegagalan berulang:

- 1) kegagalan berulang dari sebuah peralatan
- 2) kegagalan berulang dari item yang termasuk dalam bagian suatu sistem atau subsistem
- 3) kegagalan komponen yang sama/serupa di berbagai peralatan atau sistem yang berbeda

Proses untuk melakukan analisis kegagalan berulang disajikan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Proses untuk melakukan analisis kegagalan berulang

h. Pemasangan dan Rekondisi Presisi

Untuk mengontrol biaya siklus hidup dan memaksimalkan keandalan, maka peralatan yang digunakan memerlukan pemasangan yang benar. Seringkali personel perawatan dan operator dihadapkan pada masalah yang disebabkan oleh instalasi peralatan yang buruk. Biasanya dua bagian pengerjaan ulang yang serupa seperti keseimbangan dan kesejajaran rotor karena dilakukan dengan tidak memuaskan atau diabaikan selama fase pemasangan awal. Pemasangan dengan standar presisi yang efektif seharusnya bisa memberikan lebih dari dua kali lipat masa pakai peralatan. Pengalaman masa lalu menunjukkan bahwa beban parasit yang disebabkan oleh ketidakseimbangan dan ketidaksejajaran adalah salah satu penyebab utama kegagalan bantalan elemen gelinding di awal. Salah satu metode penting dan hemat biaya untuk meningkatkan masa pakai bearing dan keandalan peralatan yang dihasilkan adalah keseimbangan presisi rotor motor, kipas, dan impeller pompa.

Karena ketidaksejajaran, gaya getaran menyebabkan kerusakan bertahap pada seal, belitan penggerak, kopling, dan elemen berputar lainnya dengan toleransi yang ketat. Beberapa survei industri menunjukkan bahwa pemasangan kesejajaran yang presisi mengakibatkan umur bantalan rata-rata meningkat 8 kali lipat, pengurangan biaya perawatan sebesar 7%, dan peningkatan ketersediaan mesin sebesar 12% (Dhillon, 2002).

E. TEKNOLOGI PENGUJIAN DAN INSPEKSI PREDIKTIF

Pengujian dan inspeksi prediktif (*predictive testing and inspection*, PTI) merupakan komponen penting dari RCM. Teknologi ini dapat digambarkan sebagai berbagai pendekatan yang digunakan untuk menentukan kondisi barang/peralatan untuk tujuan memperkirakan waktu yang paling efektif untuk menjadwalkan perawatan. Teknologi ini mencakup pendekatan intrusif dan non intrusif selain menggunakan parameter proses untuk menilai kondisi peralatan secara keseluruhan.

Enam teknologi/pendekatan PTI sebagai berikut (NASA, 1996; NAVAIR 00-25-403, 1996):

1. Pemantauan dan analisis getaran: Salah satu pendekatan PTI yang paling banyak digunakan karena berguna dalam menilai kondisi peralatan berputar dan stabilitas struktur dalam suatu sistem. Teknik pemantauan dan analisis getaran meliputi analisis spektrum, getaran torsional, analisis bentuk gelombang, analisis shock pulse, dan analisis getaran *multi channel*. Efektivitas pemantauan getaran bergantung pada faktor-faktor seperti kemampuan analisis, kompleksitas peralatan, pemasangan sensor, resolusi, dan metode pengumpulan data. Pendekatan pemantauan dan analisis getaran dapat diterapkan pada item

seperti mesin, poros, motor, pompa, kotak roda gigi, bantalan, turbin, dan kompresor.

2. Pemantauan kondisi kelistrikan: Ini mencakup berbagai teknologi dan pendekatan yang memberikan evaluasi sistem yang komprehensif. Dengan memantau parameter kelistrikan yang penting, ini memberikan data yang berguna untuk mendeteksi dan memperbaiki kesalahan terkait kelistrikan seperti ketidakseimbangan fasa, kerusakan isolasi, dan koneksi resistansi tinggi. Gangguan listrik sangat mahal dan menimbulkan masalah keselamatan karena dalam sistem jarang terlihat. Tabel 4.2 mencantumkan beberapa metode pemantauan kondisi kelistrikan. Metode ini dapat memantau peralatan seperti motor listrik, kabel distribusi listrik, generator, trafo distribusi listrik, sakelar dan pengontrol distribusi listrik, dan sistem distribusi. Metode pemantauan kondisi kelistrikan khusus untuk enam jenis peralatan ini dijelaskan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Metode Pengawasan Kondisi Kelistrikan

Nama Metode
Surge testing
Motor circuit analysis
Radio frequency monitoring
Infrared thermography
Motor current spectrum analysis
Airborne ultrasonics
Megohmmeter testing
Turns ratio
Transformer oil analysis
High potential testing
Time domain reflectometry
Starting current & time
Motor current readings
Power factor and harmonic distortion
Conductor complex impedance

Tabel 4.3 Teknik Pemantauan Kondisi Listrik untuk Peralatan Tertentu

Peralatan	Teknik Pemantauan yang Berlaku
Generators	Radio frequency monitoring and megohmmeter testing
Electrical distribution transformers	Turns ratio, transformer oil analysis, power factor, and harmonic distortion
Electrical distribution switchgear and controllers	Airborne ultrasonics and visual inspection
Electrical motors	Motor current spectrum analysis, starting current, motor circuit analysis, megohmmeter testing, conductor complex impedance, surge

Peralatan	Teknik Pemantauan yang Berlaku
	testing, and high potential testing
Distribution system	Airborne ultrasonics, power factor, harmonic distortion, and high potential testing
Electrical distribution cabling	Airborne ultrasonics, high potential testing, megohmmeter testing, and time domain reflectometry

3. *Thermography: Infrared thermography* (IRT) dapat diartikan sebagai aplikasi dari alat deteksi infra merah untuk mengidentifikasi gambar perbedaan suhu (*thermogram*). Instrumen uji yang digunakan meliputi sistem non-kontak, pengukuran termal, garis pandang, dan pencitraan. Sifat teknis sistem IRT yang tidak kontak membuatnya sangat menarik untuk mengidentifikasi titik panas/dingin pada peralatan listrik berenergi, area permukaan yang luas seperti boiler dan dinding bangunan, dan sebagainya. Sehubungan dengan peralatan listrik tertentu, pendekatan IRT dapat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi penurunan pada item seperti switchgear, pusat kendali motor, transformator, dan gardu induk. Demikian pula, terkait dengan peralatan mekanis tertentu, teknik IRT dapat membantu mengidentifikasi kondisi aliran yang tersumbat pada item seperti kondensor, pipa, penukar panas, dan radiator pendingin transformator. Salah satu keterbatasan termografi adalah terbatas pada garis pandang dan kesalahan dapat terjadi karena geometri material, warna material, dan faktor lingkungan seperti efek angin, pemanasan matahari, dan sebagainya.
4. Analisis partikel pelumas dan keausan: Tiga alasan untuk melakukan analisis jenis ini adalah untuk menilai kondisi keausan peralatan, untuk menilai kondisi pelumas, dan untuk menilai apakah pelumas terkontaminasi. Pengujian yang digunakan untuk tujuan di atas akan bergantung pada faktor-faktor seperti biaya, sensitivitas dan akurasi hasil pengujian, serta konstruksi dan aplikasi peralatan. Daftar uji analitis standar disajikan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Tes Analitik Standar Terkait Analisis Cairan dan Oli Pelumas

Nama Pengujian
Particle counting
Direct-reading ferrography
Emission spectroscopy
Infrared spectroscopy
Visual and odor
Percent solids/water
Viscosity measurement
Analytical ferrography
Total acid number (TAN)

Nama Pengujian
Total base number (TBN)

5. Ultrasonik pasif (*airborne*): Perangkat ultrasonik udara (*airborne ultrasonic devices*, AVD) berfungsi dalam spektrum frekuensi 20 hingga 100 kHz dan menghimpun sinyal frekuensi tinggi ke tingkat yang dapat didengar sehingga operator dapat mendengar perubahan kebisingan yang terkait dengan kebocoran, pembuangan energi, dll. Beberapa contoh aplikasi peralatan ini adalah pada *heat exchanger*, *boiler*, dan *bearing*. Salah satu keterbatasan utama teknik *airborne ultrasonics* (AU) adalah bahwa AU bersifat subjektif dan bergantung pada perbedaan suara yang dirasakan.
6. Pengujian tidak merusak (NDT): Teknik ini dapat menentukan sifat material dan mutu pembuatan untuk bagian/rakitan bernilai tinggi tanpa merusak produk atau fungsinya. Biasanya, pengujian nondestruktif (NDT) dilakukan ketika pendekatan seperti pengujian destruktif mahal atau tidak efektif. NDT dikaitkan dengan pengelasan bagian tegangan tinggi yang besar seperti bejana tekan dan penyangga struktural. Selain itu, kilang minyak dan pabrik kimia menggunakan metode NDT untuk memastikan integritas batas tekanan untuk pemrosesan sistem zat yang mudah menguap. Teknik NDT meliputi pengujian ultrasonik, pengujian partikel magnetik, inspeksi penetran pewarna, pengujian hidrostatis, pengujian arus eddy, dan radiografi. Sebelum pelaksanaan program NDT, direkomendasikan agar rencana formal dikembangkan dengan memasukkan faktor-faktor seperti teknik yang akan digunakan, jumlah dan orientasi sampel, frekuensi, lokasi, bentuk kegagalan yang harus ditangani setiap sampel dan informasi yang akan diperoleh dari setiap sampel. Interval antara inspeksi dan lokasi titik pengambilan sampel adalah dua variabel yang lebih sulit untuk ditangani. Dalam kasus interval waktu antara inspeksi serta dalam menetapkan interval atau frekuensi sampel, faktor-faktor yang harus diperiksa meliputi siklus operasi sistem, jenis zat yang terkandung, mekanisme korosi utama, tingkat kegagalan historis, laju korosi yang diharapkan, kedekatan material yang ada hingga minimum, ketebalan dinding, mekanisme erosi, dan perkiraan laju erosi. Demikian pula dalam kasus lokasi titik pengambilan sampel, beberapa pedoman untuk menemukan titik pengambilan sampel NDT adalah sebagai berikut:
 - a. Pengelasan, pengencang tegangan tinggi, dan area bertekanan
 - b. Area yang rentan kavitas
 - c. Persimpangan logam yang berbeda
 - d. Area dengan mekanisme korosi/erosi yang teridentifikasi dipercepat
 - e. Perubahan mendadak dalam arah aliran (siku) dan perubahan diameter pipa

f. Batas pengukuran

Tabel 4.5 menyajikan area aplikasi untuk teknik NDT tertentu. Batasan yang terkait dengan setiap teknik NDT diberikan pada tabel 4.6.

Tabel 4.5 Area Aplikasi untuk Teknik NDT Khusus

Teknik NDT	Area Aplikasi
Ultrasonic testing (imaging)	Metal components including weld deposits and sp
Dye penetrant inspections	Nonporous materials (those chemically compatible with the dye and developer)
Hydrostatic testing	Components and completely assembled systems containing pressurized fluids or gases
Radiography	Metal components including weld deposits and, possibly, specialized applications for plastics or composite materials
Magnetic particle testing	Materials that conduct electric current and magnetic lines of flux
Eddy current testing	Detect defects such as seams, cracks, holes, or lamination separation on both flat sheets and more complex cross-sections. Also, monitor the thickness of metallic sheets, plates, and tube walls

Tabel 4.6 Keterbatasan Teknik NDT

Teknik NDT	Keterbatasan
Ultrasonic testing (imaging)	Satu dimensi, sehingga cacat yang paralel dengan sumbu pengujian tidak akan terlihat
Dye penetrant inspections	Diskontinuitas permukaan menipis seperti tanda pemesinan menjadi jelas
Hydrostatic testing	Tekanan berlebih dapat menyebabkan kerusakan yang tidak diinginkan pada sistem; kebersihan dan kontrol kimia cairan harus sesuai dengan standar operasi sistem
Radiography	Aplikasi yang efektif membutuhkan peralatan yang mahal, teknisi yang terlatih dengan baik untuk menafsirkan gambar, dan tindakan pencegahan keamanan yang ekstensif
Magnetic particle testing	Hanya berlaku untuk bahan yang menghantarkan arus listrik dan mempengaruhi garis fluks magnet. Juga, area kecil di antaranya kedua elektroda hanya dapat diperiksa secara efektif
Eddy current testing	Terbatas pada kerusakan bawah permukaan dan permukaan yang dangkal. Selain itu, karena kecenderungan arus eddy mengalir sejajar dengan permukaan tempat medan magnet diterapkan, beberapa orientasi diskontinuitas laminar yang sejajar dengan permukaan ini cenderung tetap tidak terdeteksi.

F. INDIKATOR PENGUKURAN EFEKTIVITAS PROGRAM RCM

Selama bertahun-tahun banyak indikator manajemen telah dikembangkan untuk mengukur efektivitas program RCM (NASA, 1996). Indikator atau pengukur numerik dianggap paling berguna karena obyektif, tepat, kuantitatif, dan kecenderungan lebih mudah daripada kata-kata, serta terdiri dari deskriptor dan patokan. Deskriptor dapat didefinisikan sebagai kata atau sekelompok kata yang merinci unit, fungsi, dan proses yang sedang dipertimbangkan untuk pengukuran. Tolok ukurnya adalah ekspresi numerik dari tujuan yang ditetapkan. Beberapa perumusan untuk mengukur efektivitas program RCM disajikan di bawah ini bersama dengan tolok ukur yang disarankan (NASA, 1996).

Ketersediaan Peralatan

Ini dinyatakan dengan:

$$EA = \frac{H_{ea}}{TH_{rp}} \quad (4.1)$$

Dimana:

EA = ketersediaan peralatan

H_{ea} = jumlah jam setiap unit peralatan tersedia untuk dijalankan pada kapasitasnya

TH_{rp} = jumlah total jam selama periode pelaporan.

Angka tolok ukur untuk pengukuran ini adalah 96%

Indeks Persentase Darurat

Indeks ini dijelaskan dengan perumusan:

$$EP = \frac{H_{ej}}{TH_w} \quad (4.2)$$

Dimana:

EP = persentase darurat

H_{ej} = jumlah total jam kerja pada pekerjaan darurat

TH_w = jumlah total jam kerja

Angka tolok ukur untuk indikator ini adalah 10% atau kurang.

Indeks Peralatan Yang Dilakukan PTI

Indeks ini digunakan untuk menghitung persentase calon peralatan yang dilakukan PTI dan dinyatakan dengan:

$$P_{\text{epti}} = \frac{E_i}{TE_c} \quad (4.3)$$

Dimana:

P_{epti} = persentase peralatan kandidat yang dilakukan PTI

E_i = jumlah total item peralatan dalam program PTI

TE_c = jumlah total calon peralatan yang dilakukan PTI

Angka tolok ukur untuk metrik ini adalah 100%

Kesalahan Yang Ditemukan Dalam Indeks Survei Termografi

Ini dinyatakan dengan:

$$P_{\text{fft}} = \frac{TFN}{DS} \quad (4.4)$$

Dimana:

P_{fft} = persentase kesalahan yang ditemukan dalam survei termografi

TFN = jumlah total kesalahan yang ditemukan

DS = jumlah total perangkat yang disurvei

Angka patokan untuk indeks ini adalah 3% atau kurang

Indeks Persentase Kelebihan Waktu Perawatan

Ini dinyatakan dengan:

$$P_{\text{mo}} = \frac{TMOH}{TRMH} \quad (4.5)$$

Dimana:

P_{mo} = persentase lembur perawatan

$TMOH$ = jumlah total jam lembur perawatan selama periode

$TRMH$ = jumlah total jam perawatan rutin selama periode

Angka tolok ukur untuk metrik ini adalah 5% atau kurang

Kesalahan Yang Ditemukan Dalam Indeks Survei Steam Traps

Ini dinyatakan dengan:

$$P_{\text{ffs}} = \frac{\text{DST}}{\text{STS}} \quad (4.6)$$

Dimana:

P_{ffs} = persentase kesalahan yang ditemukan dalam survei steam trap

DST = jumlah total steam traps yang rusak ditemukan

STS = jumlah total steam traps yang disurvei

Angka patokan untuk indeks ini adalah 10% atau kurang

Indeks Perawatan Reaktif PM / PTI

Indeks ini dibagi menjadi dua area: PM/PTI dan perawatan reaktif. Indeks terkait PM/PTI dinyatakan dengan:

$$P_{\text{pp}} = \frac{\text{MHPP}}{\text{MHR} + \text{MHPP}} \quad (4.7)$$

P_{pp} = Persentase kerja PM/PTI

MHPP = total jam kerja PM/PTI

MHR = total jam kerja perawatan reaktif

Angka tolok ukur untuk metrik ini adalah 70%

Indeks terkait perawatan reaktif ditentukan dengan:

$$P_{\text{rm}} = \frac{\text{MHR}}{\text{MHR} + \text{MHPP}} \quad (4.8)$$

Dimana:

P_{rm} = persentase pekerjaan perawatan reaktif

Angka patokan untuk indeks ini adalah 30%. Jumlah persamaan (4.7) dan (4.8) sama dengan satu atau 100%.

Indeks Kerja Darurat PM/PTI

Ini dinyatakan dengan:

$$P_{\text{epp}} = \frac{\text{TEH}}{\text{TPPMH}} \quad (4.9)$$

Dimana:

P_{epp} = persentase pekerjaan darurat untuk pekerjaan PTI dan PM

TEH = jumlah total jam kerja darurat

TPPMH = jumlah jam kerja PTI dan PM

Angka tolok ukur untuk metrik ini adalah 20% atau kurang

G. KEUNGGULAN RCM DAN ALASAN ATAS KEGAGALANNYA

Penerapan RCM memiliki banyak manfaat, antara lain peningkatan keselamatan dan perlindungan lingkungan, peningkatan kualitas produk, peningkatan masa manfaat barang mahal, database pemeliharaan, peningkatan kerja tim, peningkatan efektivitas biaya perawatan, motivasi individu yang lebih besar, serta ketersediaan dan keandalan *plant* yang lebih tinggi (Moubray, 1997; Brauer & Brauer, 1987).

Penerapan RCM terkadang mengalami kegagalan karena beberapa alasan, seperti: analisis dilakukan pada tingkatan yang terlalu rendah, terlalu banyak penekanan pada data kegagalan, aplikasi berlebihan atau terburu-buru, komputer digunakan untuk menjalankan proses, hanya satu individu yang ditugaskan untuk menerapkan RCM, hanya departemen perawatan yang menggunakan RCM untuk diterapkan sendiri, dan produsen/vendor peralatan diminta sendiri untuk menerapkan RCM.

H. LATIHAN SOAL

1. Apa tujuan utama RCM?
2. Diskusikan setidaknya sepuluh prinsip dasar RCM.
3. Jelaskan proses RCM.
4. Apa empat komponen utama RCM?
5. Diskusikan secara rinci, item berikut:
 - a. Perawatan reaktif
 - b. Perawatan proaktif
6. Sebutkan delapan teknik dasar yang digunakan oleh perawatan proaktif untuk memperpanjang umur peralatan.
7. Jelaskan teknik berikut yang digunakan oleh perawatan proaktif untuk memperpanjang umur peralatan:
 - a. Eksplorasi zaman
 - b. Analisis akar penyebab

- c. Kontrol perulangan
8. Jelaskan teknologi/pendekatan PTI berikut:
 - a. Pemantauan kondisi kelistrikan
 - b. Termografi
 - c. Pemantauan dan analisis getaran
 9. Apakah pengujian nondestruktif itu? Diskusikan setidaknya lima teknik yang terkait dengan pengujian nondestruktif.
 10. Tentukan indeks berikut yang terkait dengan RCM:
 - a. Indeks persentase darurat
 - b. Indeks persentase pemeliharaan lembur
 - c. Ketersediaan peralatan
 11. Apa kelebihan RCM?
 12. Sebutkan alasan kegagalan aplikasi RCM.

BAB 5

TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE

A. PENDAHULUAN

Total Productive Maintenance (TPM) adalah konsep yang awalnya diperkenalkan di Jepang untuk perawatan sejak tahun 1971. TPM dapat didefinisikan sebagai perawatan produktif yang melibatkan partisipasi total dari semua karyawan (Nakajima, 1988). TPM memastikan peningkatan dengan mengoptimalkan keandalan mesin dan manajemen keseluruhan aset perusahaan (Robinson & Ginder, 1995). TPM bertujuan untuk menghilangkan akar penyebab masalah serta melibatkan anggota mulai dari level operator hingga manajemen. Peningkatan efisiensi dengan biaya rendah dan pencapaian cacat yang minimum dimungkinkan dengan penerapan TPM yang merupakan tanggung jawab semua karyawan di seluruh organisasi dengan target *zero defect* dan *zero breakdown* dalam operasi harian. TPM menekankan pada tiga konsep, yaitu efektivitas peralatan yang optimal, kegiatan kelompok kecil (*small group activity*) dan perawatan operator otonom (Eti et al., 2004). TPM terkait erat dengan TQM (*Total Quality Management*) karena keduanya diarahkan untuk membuat perusahaan lebih kompetitif dengan TPM lebih ke arah operasi lapangan dan TQM lebih tentang elemen strategis seperti inovasi produk, mutu dan pelaporan data, penelitian dan pengembangan (R&D) dan pemanfaatan teknologi (Modgil & Sharma, 2016). Dengan kata lain, tujuan utama TPM pada suatu perusahaan adalah bagaimana suatu perusahaan dapat mengelola asetnya yang paling penting yaitu mesin dan peralatan. TPM menjadikan perawatan sebagai bagian penting dari bisnis karena tujuan utamanya adalah meningkatkan daya saing organisasi dengan pendekatan terstruktur yang kuat untuk mengubah pola pikir karyawan sehingga membuat perubahan nyata dalam budaya kerja organisasi (Ahuja & Khamba, 2008). Disamping itu, TPM berupaya melibatkan semua tingkatan dan fungsi dalam suatu organisasi untuk memaksimalkan efektivitas semua peralatan

produksi. Metode ini selanjutnya menyempurnakan proses dan peralatan yang ada dengan mengurangi kesalahan dan kecelakaan.

TPM adalah pendekatan inovatif untuk perawatan peralatan yang melibatkan personel perawatan dan operator yang bekerja dalam tim yang berfokus pada pencegahan kerusakan peralatan dan cacat terkait peralatan. Ini adalah pendekatan sistematis untuk meningkatkan produksi dan sistem mutu dengan memasukkan semua karyawan melalui investasi yang moderat dalam perawatan (Cudney *et al.*, 2013). Dukungan penuh dari semua karyawan dan manajemen puncak diperlukan agar TPM berhasil. TPM juga merupakan aspek kunci dalam sistem manajemen mutu. TPM berupaya untuk meningkatkan produktivitas dengan berinvestasi pada perawatan yang tepat untuk mengurangi kerugian. Ada enam kerugian yang dapat dicegah:

1. Kerusakan sistem (*breakdown*)
2. Penyiapan (*setup*) dan penyesuaian (*adjustment*)
3. Sering berhenti (*idling*)
4. Penghentian kecil
5. Kualitas
6. Pengerjaan ulang

Dua kerugian pertama, kerusakan dan penyiapan akan mempengaruhi ketersediaan peralatan. Kerugian dari *idling* dan penghentian kecil akan mempengaruhi efisiensi peralatan. Dua kerugian terakhir, kualitas dan pengerjaan ulang akan mengakibatkan kualitas keluaran yang berkurang.

Ada tiga tujuan utama penerapan TPM, yaitu:

1. Mengurangi waktu henti peralatan yang tidak direncanakan
2. Menghilangkan hambatan antar departemen
3. Mengurangi kerusakan terkait peralatan

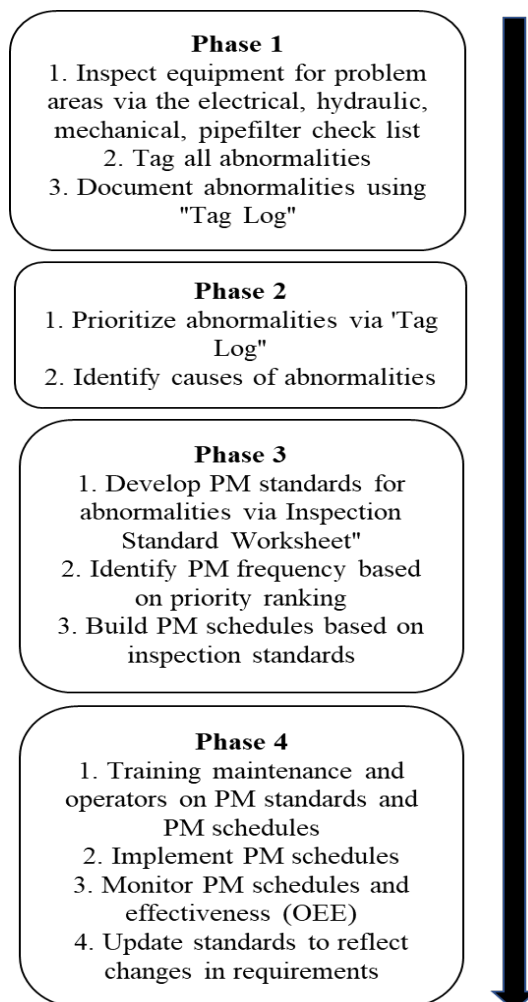
Selain itu, ada tiga target utama penerapan TPM, yaitu:

1. Terlibatnya semua karyawan dalam berbagai tingkatan
2. Pendekatan langsung
3. Peningkatan daya saing organisasi

Sama seperti teknik *lean* lainnya, menerapkan TPM tidaklah mudah. Penting untuk memiliki strategi yang jelas dengan alat ukur yang dikomunikasikan dan mudah dipahami.

B. TAHAPAN PROSES TPM

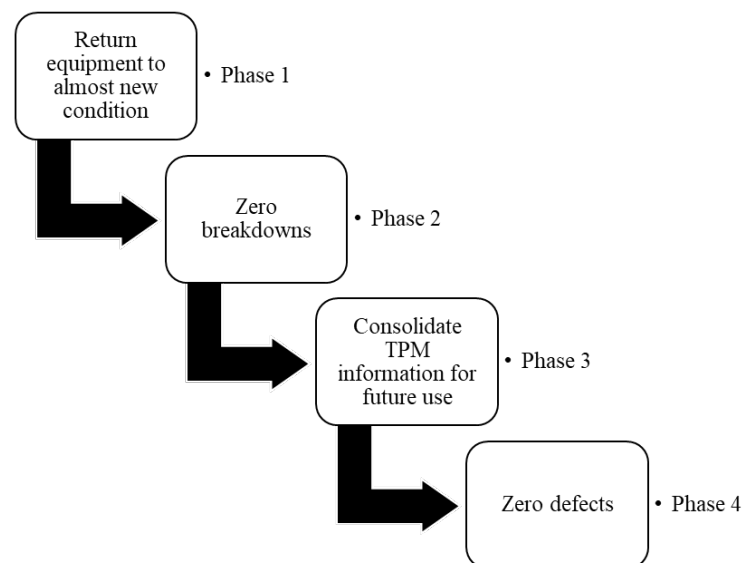
Fokus awal TPM adalah mengembalikan peralatan ke kondisi seperti baru dan mencegah kerusakan lebih lanjut. Menerapkan jadwal perawatan preventif (PM) adalah langkah pertama untuk menghilangkan kerusakan. Ada empat tahapan pendekatan untuk jadwal PM seperti disajikan pada gambar 5.1 (Agustiady & Cudney, 2016).



Gambar 5.1 Tahapan Perawatan Preventif

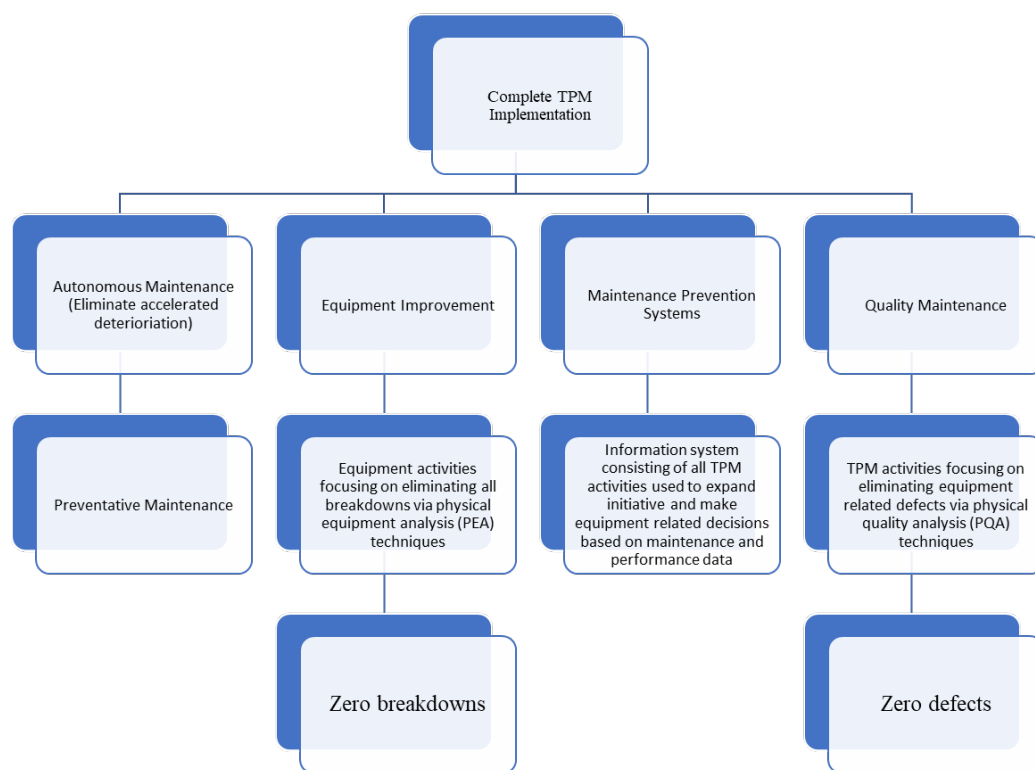
Dalam empat tahapan pengembangan jadwal PM, fase pertama terdiri dari pemeriksaan peralatan yang menjadi target perawatan, memanfaatkan daftar periksa yang disesuaikan, serta menandai dan mendokumentasikan masalah. Fase kedua yaitu memprioritaskan masalah yang teridentifikasi dan mengidentifikasi penyebab masalah dengan prioritas tertinggi. Alat yang umum digunakan dalam fase ini termasuk *brainstorming* (tukar pendapat), pengumpulan data, dan pengalaman perawatan/operator. Pada fase ketiga, fokusnya adalah mengembangkan standar inspeksi dan menyusun jadwal PM. Standar inspeksi harus standar tertulis. Ini penting untuk mengembangkan jadwal PM yang akurat. Tim harus mengkomunikasikan prosedur yang diperlukan untuk melaksanakan PM yang efektif. Terakhir, fase keempat adalah menyampaikan pelatihan, mengimplementasikan jadwal PM, dan memantau serta menyesuaikan. Pelatihan yang efektif harus dikembangkan dan diberikan kepada operator yang ditargetkan dan personel perawatan. Ini diperlukan untuk implementasi PM yang efektif. Selain itu, penerapan pengukuran pengawasan menjadi perangkat untuk menyesuaikan dan mengubah kinerja peralatan. Efektivitas peralatan secara keseluruhan adalah alat pemantauan yang efektif karena alasan ini.

Metodologi TPM terdiri dari empat fase utama, seperti diuraikan pada gambar 5.2(Agustiady & Cudney, 2016).



Gambar 5.2 Tahapan TPM

Metodologi dimulai dengan mengembalikan peralatan ke kondisi yang hampir baru. Selanjutnya, fokusnya adalah pada nol kerusakan melalui perawatan yang tepat. Fase ketiga berfokus pada penggabungan informasi untuk penggunaan di masa mendatang. Fase terakhir TPM adalah tanpa cacat. Implementasi TPM secara lengkap berpusat pada perawatan otonom, peningkatan peralatan, sistem pencegahan perawatan, dan perawatan kualitas, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.3.



Gambar 5.3 Penerapan TPM

Perawatan otonom melibatkan pengembangan praktik perawatan preventif. Untuk peningkatan peralatan, aktivitas peralatan harus fokus pada menghilangkan semua kerusakan melalui teknik analisis peralatan fisik (*physical equipment analysis*, PEA) untuk menargetkan kerusakan nol. Untuk sistem pencegahan perawatan, organisasi harus mengembangkan sistem informasi yang terdiri dari semua aktivitas TPM. Keputusan terkait peralatan kemudian didasarkan pada data perawatan dan kinerja. Terakhir, perawatan kualitas berfokus pada penghapusan

cacat terkait peralatan melalui analisis kualitas fisik (*physical quality analysis*, PQA). Tujuannya adalah nol cacat.

Perawatan preventif adalah metode perawatan peralatan berdasarkan waktu atau penggunaan. Sama seperti perawatan penggantian oli di mobil, aktivitas perawatan dilakukan pada peralatan berdasarkan waktu yang ditentukan atau interval penggunaan untuk mencegah terjadinya kerusakan peralatan. Contoh perawatan preventif adalah jadwal PM dan aktivitas tim.

Perawatan prediktif adalah metode perawatan peralatan berbasis situasi. Kegiatan perawatan dilakukan pada peralatan berdasarkan sinyal yang terlihat atau teknik diagnostik untuk mencegah terjadinya kerusakan peralatan. Contoh perawatan prediktif meliputi analisis getaran, ultrasound, termografi, pengukuran laser, analisis generator, dan analisis oli.

C. TUJUAN DAN MANFAAT TPM

Tujuan perawatan produktif adalah untuk memaksimalkan efektivitas perusahaan dan peralatannya agar menghasilkan siklus hidup peralatan produksi yang optimal (Agustiady & Cudney, 2016). Penerapan TPM di suatu organisasi diharapkan mencapai target sebagai berikut:

1. *Produksi*

- a. Mencapai minimum 80 % *overall production effectiveness* (OPE)

OPE = efektifitas orang atau proses yang dipakai untuk mencapai target faktor yang memiliki nilai tambah dan bukan

- b. Mencapai minimum 90% *overall equipment effectiveness* (OEE)

$$OEE = \text{Availability} \times \text{Performance} \times \text{Quality} \quad (5.1)$$

dimana:

Availability (Ketersediaan) = Waktu operasi/waktu produksi yang direncanakan

Performance (Kinerja) = Waktu siklus ideal/(waktu operasi/total *output*)
= (Total *output*/waktu operasi)/tingkat operasi ideal

Quality (mutu) = jumlah *output* yang baik/total *output*

2. *Mutu*

Tidak ada komplain dari konsumen

3. *Biaya*

Pengurangan 30% biaya produksi

4. *Pengantaran*

Tidak ada pengantaran yang gagal ke konsumen

5. *Keamanan*

Tidak ada kecelakaan dan lingkungan yang rusak

6. *Keahlian Tenaga Kerja*

Peningkatan keahlian dan fleksibilitas karyawan

Untuk mencapai tujuan yang diharapkan, maka dilakukan tahapan berikut dalam pelaksanaan TPM di suatu organisasi:

1. Tahap pertama: Tahap persiapan

Langkah 1: Pengumuman oleh manajemen kepada semua karyawan tentang pengenalan TPM di organisasi. Diperlukan pemahaman yang tepat, komitmen, dan keterlibatan aktif dari manajemen puncak diperlukan dalam langkah ini. Manajemen senior harus memiliki kepedulian akan program setelah itu pengumuman dibuat untuk semua. Publisitas program harus diselesaikan dalam tahap ini.

Langkah 2: Pelatihan awal dan propaganda TPM. Pelatihan dilakukan berdasarkan kebutuhan. Beberapa membutuhkan pelatihan intensif dalam konsep utama selain pelatihan kesadaran akan pentingnya TPM. Hasil implementasi yang berhasil akan terjadi jika kematangan telah berjalan di tempat dimana TPM akan dilaksanakan.

Langkah 3: Menyiapkan TPM dan komite departemen. TPM mencakup perbaikan, perawatan otonom, perawatan kualitas dan lainnya sebagai bagian dari struktur inti dasarnya.

Langkah 4: Menetapkan sistem dan target kerja TPM. Setiap area memiliki tolok ukur dan menyiapkan target indikator kinerja utama (KPI) untuk memantau pencapaian.

Langkah 5: Rencana induk untuk pelebagaan. Implementasi yang mengarah pada pelebagaan di mana TPM menjadi budaya organisasi yang diinginkan.

2. Tahap kedua: Tahap pengenalan

Ini adalah upacara perayaan dimana banyak yang harus diundang. Pemasok harus diundang untuk mendapatkan kesadaran mereka dan memastikan mereka memahami perlunya dukungan mutu dari mereka. Perusahaan terkait dan perusahaan afiliasi yang dapat menjadi mitra atau konsumen juga harus diundang. Pembelajaran akan berlangsung dan konsumen akan menghargai upaya komunikasi yang dilakukan.

3. Tahap ketiga: Implementasi

Pada tahap ini dilakukan delapan kegiatan, yang disebut pilar kegiatan TPM. Ada empat kegiatan yang dilakukan untuk membangun sistem dalam tahap ini, yaitu:

- a. Efisiensi produksi
- b. Sistem kontrol dari awal untuk produk dan peralatan baru
- c. Peningkatan efisiensi
- d. Kontrol keamanan

4. Tahap keempat: Tahap pelebagaan

Pada saat ini, kematangan sistem harus ada. Tingkat pencapaian yang menantang harus dicari pada saat ini.

Dengan melakukan berbagai tahapan TPM, diharapkan akan memberikan manfaat pada hal-hal berikut:

- a. Pengurangan kerusakan
- b. Masalah kualitas yang berkurang

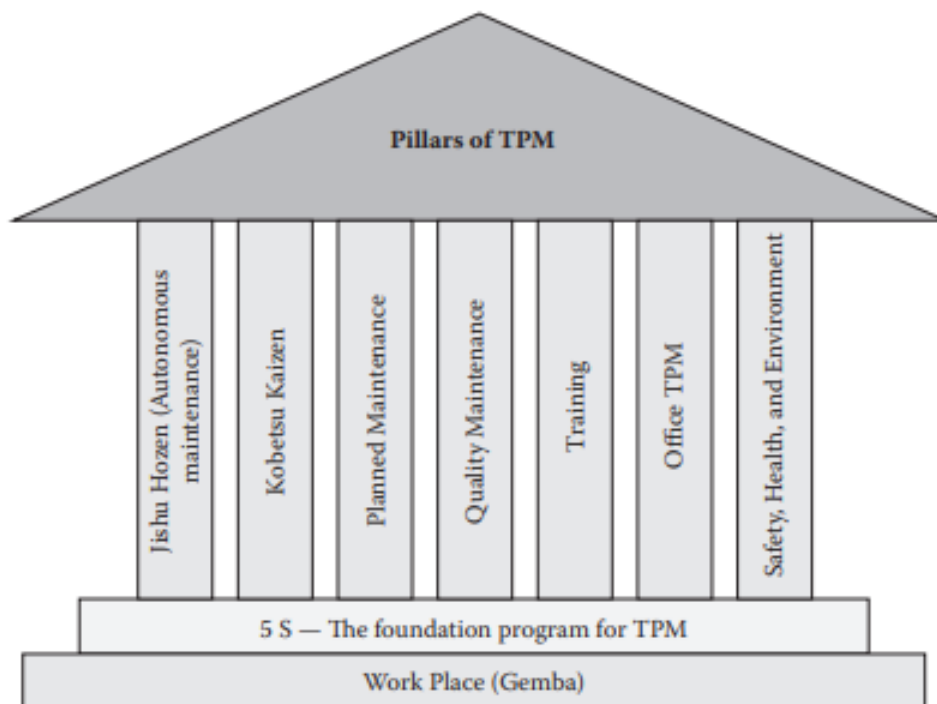
- c. Mengurangi insiden keselamatan/lingkungan
- d. Mengurangi biaya
- e. Peningkatan throughout
- f. Keunggulan daya saing
- g. Meminimalkan perawatan darurat dan tidak terencana

Ada empat tujuan utama TPM (Cudney, 2009):

- a. Menghindari pemborosan di lingkungan yang berubah dengan cepat
- b. Mengurangi biaya produksi
- c. Menghasilkan jumlah batch yang rendah pada waktu secepat mungkin
- d. Barang yang dikirim ke pelanggan harus tidak ada yang cacat

D. PILAR TPM

TPM memiliki delapan pilar seperti ditunjukkan pada gambar 5.4 yang mendukung penerapannya .



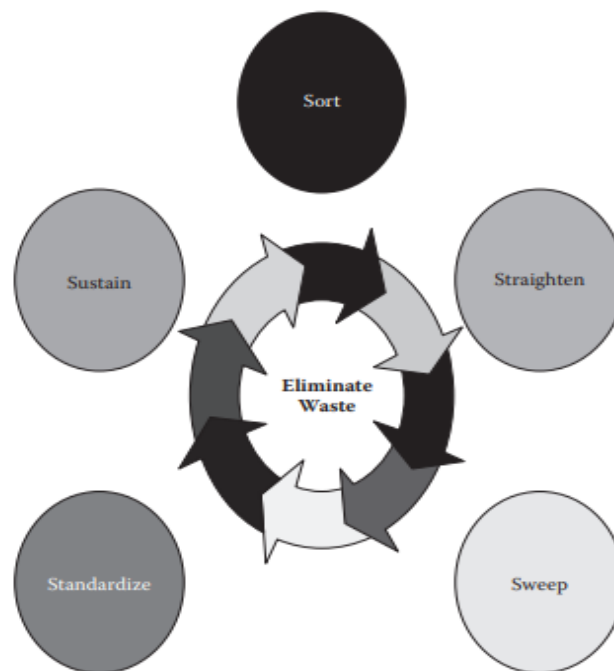
Gambar 5.4 Pilar TPM

Kedelapan pilar dalam TPMP adalah:

1. Pilar 1: 5S

- a. TPM dimulai dengan 5S (ringkas, rapi, resik, rawat, rajin) karena masalah tidak dapat dilihat dengan jelas di tempat yang tidak terorganisir.
- b. Pembersihan dan pengorganisasian akan mengungkapkan masalah.
- c. Membuat masalah terlihat adalah langkah pertama perbaikan.

Ringkasan 5S dapat dilihat pada gambar 5.5.



Gambar 5.5 5S

2. Pilar 2: Perawatan Otonom (Jishu Hozen (JH))

Dalam perawatan otonom, hal-hal yang perlu dilakukan adalah:

- a. Memberdayakan dan mengembangkan operator untuk dapat menangani tugas-tugas pemeliharaan kecil.
- b. Bebaskan staf pemeliharaan yang terampil untuk menghabiskan waktu pada aktivitas yang lebih bernilai tambah dan perbaikan teknis.
- c. Operator bertanggung jawab atas perawatan peralatan mereka untuk mencegah kerusakan.

Target dalam perawatan otonom:

- a. Mengurangi waktu proses sebesar x%.

- b. Meningkatkan aktivitas perawatan otonom (*autonomous maintenance*, AM).
- c. Pengoperasian peralatan tidak terganggu. Operator fleksibel dan memelihara peralatan lainnya.
- d. Cacat dihilangkan di sumbernya melalui partisipasi karyawan.

Langkah-langkah mencapai target TPM:

- a. Mempersiapkan karyawan
- b. Pembersihan awal mesin
- c. Mengambil tindakan pencegahan
- d. Memperbaiki standar AE tentatif
- e. Pemeriksaan umum
- f. Inspeksi otonom
- g. Standardisasi
- h. Manajemen otonom

3. Pilar 3: Perbaikan Secara Berkelanjutan (Kaizen)

Konsep Kaizen:

- a. Peningkatan kecil secara bertahap.
- b. Peningkatan bertambah seiring waktu.

Target Kaizen:

- a. Nol kerugian yang diderita dengan penghentian kecil, pengukuran, dan penyesuaian.
- b. Nol cacat dan waktu henti yang tidak dapat dihindari.
- c. Mengurangi biaya produksi sebesar x%.

Langkah-langkah melakukan Kaizen:

- a. Berlatih konsep kerugian nol di setiap bidang aktivitas.
- b. Mengejar tanpa henti untuk mencapai target pengurangan biaya di semua sumber.
- c. Mengejar tanpa henti untuk meningkatkan efektivitas peralatan pabrik secara keseluruhan.
- d. Penggunaan analisis perawatan preventif (PM) secara ekstensif sebagai alat untuk menghilangkan kerugian.
- e. Fokus pada kemudahan penanganan operator.

4. Pilar 4: Perawatan terencana

- a. Ditujukan untuk memiliki mesin dan peralatan yang bebas masalah dengan nol cacat untuk kepuasan pelanggan 100%.

- b. Menjadi proaktif daripada reaktif dengan memanfaatkan staf perawatan terlatih untuk membantu melatih operator agar lebih baik dalam merawat peralatan mereka.

Target perawatan terencana:

- a. Tidak ada kerusakan dan kerusakan peralatan.
- b. Meningkatkan keandalan dan pemeliharaan hingga 50%.
- c. Mengurangi biaya perawatan hingga 20%.
- d. Memastikan ketersediaan suku cadang setiap saat.

Langkah-langkah melakukan perawatan terencana:

- a. Mengevaluasi status peralatan dan data terkini.
- b. Mengembalikan kerusakan dan memperbaiki kelemahan.
- c. Membangun sistem manajemen informasi.
- d. Menyiapkan sistem informasi berbasis waktu, memilih peralatan, suku cadang, anggota, dan memetakan rencana.
- e. Menyiapkan sistem perawatan prediktif dengan memperkenalkan teknik diagnostik peralatan.
- f. Mengevaluasi perawatan yang direncanakan.

5. Pilar 5: Perawatan mutu

Perawatan mutu bertujuan untuk kepuasan pelanggan melalui kualitas tertinggi melalui manufaktur bebas cacat. Fokusnya adalah menghilangkan ketidaksesuaian secara sistematis sehingga diperoleh pemahaman tentang bagian peralatan apa yang memengaruhi kualitas produk dan mulai menghilangkan masalah kualitas saat ini, dan kemudian beralih ke masalah kualitas potensial. Dalam perawatan mutu, dilakukan perawatan transisi dari reaktif menjadi proaktif.

Target perawatan mutu:

- a. Tidak ada keluhan pelanggan.
- b. Mengurangi kerusakan dalam proses hingga 50%.
- c. Mengurangi biaya kualitas hingga 50%.

Cacat mutu diklasifikasikan sebagai cacat akhir pelanggan dan cacat internal.

Untuk data akhir pelanggan, maka harus didapatkan data tentang:

- a. Reject di konsumen paling akhir.
- b. Pengaduan di lapangan.

Data in-house (internal) meliputi data yang terkait dengan produk dan data yang terkait dengan proses.

6. Pilar 6: Pelatihan

Pelatihan bertujuan untuk memiliki karyawan yang memiliki keahlian dan banyak energi dengan semangat kerja yang tinggi dan ingin bekerja untuk menjalankan semua fungsi yang diperlukan secara mandiri dan efektif. Pendidikan diberikan kepada operator untuk meningkatkan keterampilan mereka serta karyawan harus dilatih untuk mencapai bentuk fase sebagai berikut:

Tahap 1: Tidak tahu.

Tahap 2: Mengetahui teori tetapi tidak bisa melakukannya.

Tahap 3: Bisa melakukan tetapi tidak bisa mengajar.

Tahap 4: Dapat melakukan dan juga mengajar.

Target pelatihan:

- a. Mencapai dan mempertahankan waktu henti nol pada alat berat yang kritis.
- b. Mencapai dan mempertahankan kerugian nol karena kurangnya pengetahuan / keterampilan / teknik.
- c. Bertujuan untuk 100% partisipasi dalam skema saran.

Langkah-langkah melakukan pelatihan:

- a. Menetapkan kebijakan dan prioritas serta memeriksa status pendidikan dan pelatihan saat ini.
- b. Pembentukan sistem pelatihan untuk keterampilan operasi dan pemeliharaan.
- c. Melatih karyawan untuk keterampilan pengoperasian dan pemeliharaan.
- d. Penyusunan kalender pelatihan.
- e. Mulailah pelatihan.
- f. Evaluasi kegiatan dan studi pendekatan masa depan.

7. Pilar 7: TPM Office

- a. TPM Office harus dimulai setelah diaktifkannya pilar TPM lainnya
- b. TPM Office harus meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan aliran dalam fungsi administratif sambil mengidentifikasi kerugian.
- c. Analisis proses dan prosedur menuju otomatisasi kantor dicari setelahnya.

Dua belas kerugian besar yang bisa diatasi:

- a. Pemrosesan kerugian
- b. Kerugian biaya, termasuk di bidang-bidang seperti pengadaan dan pemasaran akun yang menyebabkan persediaan tinggi
- c. Kehilangan komunikasi

- d. Kehilangan waktu menganggur
- e. Setup loss
- f. Kehilangan akurasi
- g. Kerusakan peralatan kantor
- h. Kerusakan saluran komunikasi
- i. Waktu yang dihabiskan untuk mengambil informasi
- j. Tidak tersedianya status stok online yang benar
- k. Keluhan pelanggan karena logistik
- l. Biaya pengiriman / pembelian darurat

8. Pilar 8: Keselamatan, kesehatan, dan lingkungan

- a. Fokus untuk menciptakan tempat kerja yang aman dan area sekitarnya yang tidak rusak oleh proses atau prosedur.
- b. Pilar ini akan berperan aktif di masing-masing pilar lainnya secara rutin.

Mentalitas pola pikir nol harus ditekankan yang meliputi:

- a. Tidak ada kecelakaan
- b. Tidak ada kerusakan kesehatan
- c. Nol kebakaran

E. TPM DAN LEAN

Lean adalah terminologi yang dikenal dan didefinisikan sebagai penghapusan pemborosan dalam operasi melalui prinsip-prinsip manajerial. Banyak prinsip yang tercakup dalam konsep *Lean*, tetapi pemikiran utama yang perlu diingat adalah pemanfaatan sumber daya dan waktu yang efektif untuk mencapai produk berkualitas lebih tinggi dan memastikan kepuasan pelanggan (Cudney *et al.*, 2013). Cacat dianggap sebagai sesuatu yang tidak disukai pelanggan dan merupakan istilah yang digunakan dalam Six Sigma. Six Sigma mengidentifikasi dan menghilangkan cacat ini sehingga pelanggan pada gilirannya merasa puas. Tujuan Six Sigma adalah untuk mengurangi variasi, yang pada gilirannya menyebabkan cacat. Pelanggan adalah fokus nomor satu, dan jika pelanggan tidak senang, mereka tidak akan memiliki masalah untuk pergi ke tempat lain, yang kemungkinan besar adalah persaingan untuk bisnis. Penggabungan Lean dan Six Sigma akan mengurangi pemborosan dan mengurangi cacat. Konsep paling dasar ketika membahas pengurangan material terbuang dimulai dengan kaizen. Kaizen adalah konsep Jepang yang didefinisikan sebagai "membongkar dan membuat lebih baik" (T. Agustiady & Badiru, 2012a). Konsep ini membutuhkan banyak sekali teknik manajemen proyek untuk memfasilitasi proses ke depan. Proses 5S adalah yang paling dominan dan umumnya dikenal sebagai kegiatan kaizen (perbaikan yang berkelanjutan). Prinsip

5S ditentukan dengan menemukan tempat yang tepat dan segala sesuatu berada pada tempatnya. Tingkatan 5S/5R adalah sebagai berikut (Cudney, 2009):

Ringkas (*Short/Seiri*): Mengidentifikasi dan menghilangkan barang-barang yang tidak perlu serta membuang bahan-bahan yang tidak dibutuhkan yang tidak termasuk dalam suatu area. Ini mengurangi limbah, menciptakan area kerja yang lebih aman, membuka ruang, dan membantu memvisualisasikan proses. Penting untuk memilah-milah seluruh area. Penghapusan item harus didiskusikan dengan semua personel yang terlibat. Item yang tidak dapat segera dihapus harus diberi tag untuk penghapusan selanjutnya.

Rapi (*Sweep/Seiton*): Membersihkan area sehingga tampak seperti baru dan membersihkannya terus menerus. Menyapu mencegah area menjadi kotor sejak awal dan menghilangkan pembersihan lebih lanjut. Tempat kerja yang bersih menunjukkan standar kualitas yang tinggi dan kontrol proses yang baik. Menyapu harus menghilangkan kotoran, membangun kebanggaan pada area kerja, dan membangun nilai peralatan.

Resik (*Straighten/Seiso*): Memiliki tempat untuk segala sesuatu dan semuanya berada pada tempatnya. Mengatur semua barang yang diperlukan adalah langkah pertama. Ini menunjukkan barang apa yang dibutuhkan dan barang apa yang tidak ada. Proses ini meningkatkan efisiensi karena barang dapat ditemukan lebih cepat dan karyawan melakukan pergerakan yang lebih pendek jaraknya. Barang-barang yang digunakan bersama harus disimpan bersama. Label, marka lantai, tanda, selotip, dan lainnya dapat digunakan untuk mengidentifikasi bahan. Item bersama dapat disimpan di lokasi terpusat untuk menghindari pembelian lebih dari yang dibutuhkan.

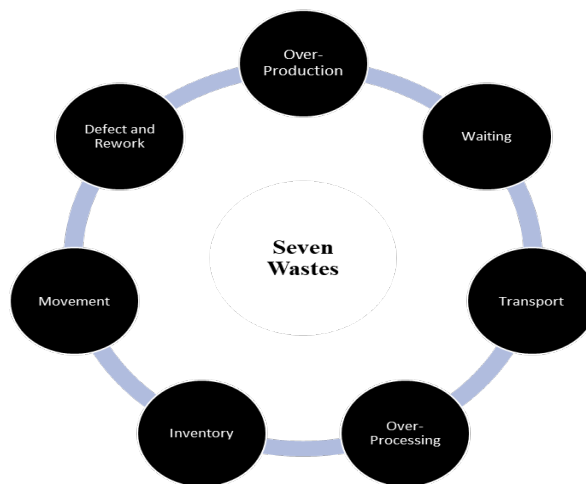
Rawat (*Schedule/Seiketsu*): Menetapkan tanggung jawab dan tanggal jatuh tempo untuk suatu kegiatan. Panduan penjadwalan 3S sebelumnya serta mencegah kemunduran ke kondisi yang tidak bersih atau tidak teratur. Item dikembalikan ke tempatnya semula dan pembersihan rutin akan menghilangkan kebutuhan untuk proyek pembersihan khusus. Penjadwalan membutuhkan daftar periksa dan jadwal untuk menjaga dan meningkatkan kerapian.

Rajin (*Sustain/Shitsuke*): Menetapkan cara untuk memastikan perawatan manufaktur atau perbaikan proses. Disiplin tetap dijaga. Memanfaatkan proses yang tepat pada akhirnya akan menjadi rutinitas. Pelatihan adalah kunci untuk mempertahankan upaya dan keterlibatan semua pihak. Pengelolaan harus memastikan komitmen untuk menjaga 4S sebelumnya agar proses ini berhasil.

Manfaat 5S meliputi:

1. Tempat kerja yang lebih bersih dan aman
2. Kepuasan pelanggan melalui organisasi yang lebih baik
3. Peningkatan kualitas, produktivitas, dan efektivitas

Proses Kaizen berfokus pada perbaikan secara obyektif dengan membagi proses secara jelas dan mudah dipahami sehingga pemborosan diidentifikasi, ide-ide perbaikan dibuat, dan pemborosan diidentifikasi dan dihilangkan (T. Agustyady & Badiru, 2012b). Filosofinya termasuk mengurangi waktu siklus dan waktu tunggu, pada gilirannya meningkatkan produktivitas, mengurangi pekerjaan dalam proses (WIP), mengurangi cacat, meningkatkan kapasitas, meningkatkan fleksibilitas, dan memperbaiki tata letak melalui teknik manajemen visual. Waktu siklus operator perlu dipahami untuk mengurangi waktu non-produktif. Operator juga harus memiliki lintas fungsi sehingga mereka dapat menjalankan fungsi pekerjaan yang berbeda dan beban kerja dari setiap fungsi seimbang. Setiap pekerjaan yang dilakukan seharusnya tidak hanya menjadi pekerjaan yang memiliki nilai tambah, tetapi juga pekerjaan yang meningkatkan permintaan pelanggan. WIP harus dihilangkan untuk mengurangi persediaan. Persediaan harus dilihat sebagai suatu uang yang ketinggalan dalam proses dan harus dikurangi sebanyak mungkin. WIP dapat dikurangi dengan mengurangi waktu penyiapan, mengangkut sejumlah kecil keluaran *batch*, dan penyeimbangan jalur. Kemacetan proses harus dihilangkan dengan menemukan tugas yang tidak memiliki nilai tambah dan menghilangkan waktu berlebih yang dihabiskan oleh mesin dan manusia. Tata letak yang fleksibel akan meningkatkan efisiensi yang mengarah ke tujuh pemborosan seperti ditunjukkan pada gambar 19.



Gambar 5.6 Tujuh *Waste*

Terkadang pemborosan kedelapan ditambahkan dan dikaitkan dengan akronim *Downtime* yang meliputi:

1. Cacat / perbaikan
2. Produksi berlebih
3. Menunggu
4. Tidak memanfaatkan bakat karyawan
5. Transportasi / pergerakan material
6. Persediaan
7. Gerakan
8. Pemrosesan yang berlebihan

Ada dua konsep utama Lean:

1. Limbah (*waste*)
2. Manajemen yang transparan

Memahami akar penyebab faktor sangat penting karena ini mengungkap apa yang tidak kelihatan dengan apa yang dapat dilihat pada awalnya. Mengajukan pertanyaan sebagai klarifikasi dengan cara yang tidak mengancam akan membantu mengungkapkan fakta sebenarnya.

Lean memiliki lima cara penerapan yang digunakan:

1. Fokus
2. Pendekatan umum
3. Keterlibatan karyawan secara penuh
4. Berbagi praktik terbaik
5. Terhubung ke tujuan perusahaan

Metodologi *training-the-trainer* memberdayakan karyawan untuk menjadi pemimpin dan mendapatkan keterlibatan karyawan sambil menunjukkan siapa yang benar-benar mempercayainya dan siapa yang ingin melakukan perubahan. Tidak ada dua rencana implementasi Lean yang sama. Mereka membutuhkan dukungan proses dan alat yang kuat. Inisiatif melakukan uji coba menunjukkan di mana kesalahan umum terjadi secara langsung dan di mana perbaikan dapat dilakukan. Lean juga dapat melibatkan beberapa alat statistik. Alat tersebut menunjukkan efisiensi dan keseimbangan tenaga kerja.

F. TPM DAN SIX SIGMA

Six Sigma paling tepat didefinisikan sebagai pendekatan perbaikan proses bisnis yang berusaha menemukan dan menghilangkan penyebab cacat dan kesalahan, mengurangi waktu siklus, mengurangi biaya operasi, meningkatkan produktivitas, memenuhi harapan pelanggan, mencapai pemanfaatan aset yang lebih tinggi, dan meningkatkan laba atas investasi (ROI) (T. Agustiady & Badiru,

2012a). Six Sigma berkaitan dengan menghasilkan hasil data melalui inisiatif dukungan manajemen. Six Sigma berkaitan dengan keberlanjutan karena tanpa data aktual, keputusan akan diambil secara *trial and error*. Lingkungan berkelanjutan membutuhkan data aktual untuk mendukung keputusan sehingga metode yang digunakan untuk perbaikan kedepan. Metodologi dasar Six Sigma mencakup pendekatan metode lima langkah berikut yang disingkat dengan akronim DMAIC (Cudney & Kestle, 2010):

1. *Define* (mendefinisikan): memulai proyek, mendeskripsikan masalah secara rinci, mengidentifikasi tujuan dan cakupan proyek, dan menentukan pelanggan utama dan atribut *critical-to-quality* (CTQ).
2. *Measure* (mengukur): memahami data dan proses dengan tujuan mengetahui spesifikasi yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan pelanggan, mengembangkan dan mengevaluasi sistem pengukuran, dan mengukur kinerja proses saat ini.
3. *Analyze* (analisis): Mengidentifikasi potensi penyebab masalah, menganalisis proses saat ini, mengidentifikasi hubungan antara *input*, proses dan *output*, serta melakukan analisis data.
4. *Improve* (meningkatkan): Menghasilkan solusi berdasarkan akar penyebab dan analisis berdasarkan data sambil menerapkan tindakan yang efektif.
5. *Control* (mengendalikan): Menyelesaikan sistem kontrol dan memverifikasi kemampuan jangka panjang untuk kesuksesan jangka panjang dan berkelanjutan.

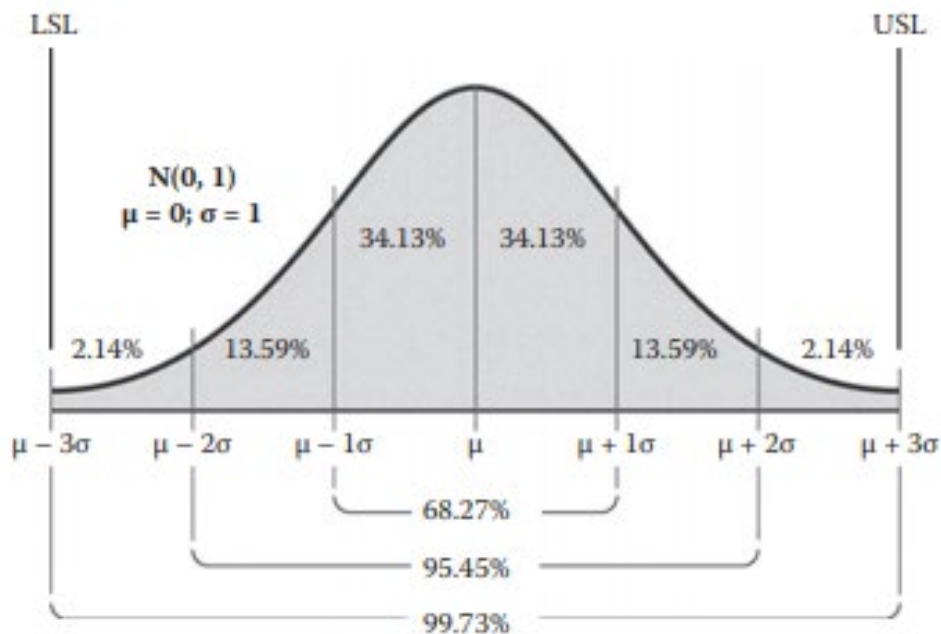
Tujuan Six Sigma adalah mengupayakan kesempurnaan dengan mengurangi variasi dan memenuhi permintaan pelanggan. Pelanggan diketahui membuat spesifikasi untuk proses. Secara statistik, Six Sigma adalah proses yang menghasilkan 3,4 cacat per sejuta peluang (Cudney, 2009). Cacat didefinisikan sebagai peristiwa apa pun di luar spesifikasi pelanggan. Peluang dianggap sebagai salah satu dari jumlah total peluang terjadinya cacat. Tabel 5.1 menjelaskan *defect per million opportunity* (DPMO) dan tingkat sigma.

Tabel 5.1 Cacat Sig Sigma Per Sejuta Peluang (DPMO)

Sigma Spread	DPMO	Percent Defective	Percent Yield	Short-Term C_{pk}	Long-Term C_{pk}
1	691.462,00	69%	31%	0,33	-0,17
2	308.538,00	31%	69%	0,67	0,17
3	66.807,00	7%	93,3%	1	0,5
4	6.210,00	0,62%	99,38%	1,33	0,83

Sigma Spread	DPMO	Percent Defective	Percent Yield	Short-Term C_{pk}	Long-Term C_{pk}
5	233	0,02%	99,98%	1,67	1,17
6	3,4	0%	100%	2	1,5

Distribusi normal yang mendasari model statistik dari model Six Sigma ditunjukkan pada gambar 5.7 Huruf Yunani σ (sigma) menandai jarak pada sumbu horizontal antara mean μ dan titik belok kurva. Semakin besar jarak, semakin besar sebaran nilai yang dijumpai (Agustiady & Badiru, 2012b). Gambar tersebut menunjukkan mean 0 dan deviasi standar 1, yaitu, $\mu = 0$ dan $\sigma = 1$. Plot tersebut juga menggambarkan area di bawah kurva normal dalam rentang yang berbeda di sekitar mean. Batas spesifikasi atas dan bawah (USL dan LSL) itu adalah $\pm 3\sigma$ dari mean atau dalam sebaran enam sigma. Karena sifat-sifat distribusi normal, nilai yang terletak sejauh $\pm 6\sigma$ dari mean jarang terjadi karena sebagian besar titik data (99,73%) berada dalam $\pm 3\sigma$ dari mean kecuali untuk proses yang benar-benar di luar kendali.



Gambar 5.7 Daerah Kurva Normal

Six Sigma memungkinkan tidak lebih dari 3,4 cacat per sejuta suku cadang yang diproduksi atau 3,4 kesalahan per sejuta aktivitas dalam operasi layanan atau dengan kata lain Six Sigma mensyaratkan proses 99,99966% sempurna untuk menghasilkan hanya 3,4 cacat per juta, yaitu $3,4 / 1.000.000 = 0,0000034 =$

0,00034%. Artinya luas daerah di bawah kurva normal dalam $\pm 6\sigma$ adalah 99,99966% dengan luas cacat 0,00034%. Berikut ini adalah seperangkat Six Sigma yang paling umum digunakan saat metodologi DMAIC dipakai:

1. Project charter
2. SIPOC
3. Kano model
4. CTQ
5. Affinity diagram
6. Measurement system analysis
7. Gage R&R
8. Variation
9. Graphical analysis
10. Location and spread
11. Process capabilities
12. Cause-and-effect diagram
13. Failure modes and effects analysis (FMEA)
14. Process mapping
15. Hypothesis testing
16. Analysis of variance (ANOVA)
17. Correlation
18. Linear regression
19. Theory of constraints
20. Single-minute exchange of dies (SMED)
21. Total productive maintenance (TPM)
22. Design for Six Sigma
23. Quality function deployment
24. Design of experiments (DOE)
25. Control charts
26. Control plan

Lean dan Six Sigma berjalan seiring untuk saling melengkapi. Lean adalah seperangkat alat yang diarahkan pada aliran proses dan pengelolaan limbah, sedangkan Six Sigma adalah tentang mengurangi variasi. Lean Six Sigma secara keseluruhan menunjukkan program yang lengkap dan memiliki banyak alat yang dapat dipertukarkan. Kombinasi dari kedua alat tersebut membuat prosesnya lengkap dan lebih menyeluruh. Kedua perangkat tersebut mencakup manajemen proyek dan keuntungan efisiensi. Tidak ada alat yang dapat diselesaikan tanpa keberlanjutannya dan penggunaan perbaikan berkelanjutan. Six Sigma dan Lean menangani proses prediksi untuk mengurangi pemborosan dan variasi, di mana Lean menggunakan pendekatan yang lebih visual dan Six Sigma menggunakan pendekatan yang lebih statistik. Memahami kompleksitas proyek dan kebutuhan

bisnis penting ketika memutuskan alat apa yang dibutuhkan. Sebagian besar organisasi memulai dengan alat manajemen visual, dan setelah area limbah dapat ditentukan, statistik memainkan peran penting dalam membuat perubahan dalam proses. Pentingnya konsep adalah mengadaptasi filosofi untuk membuat perbaikan yang berkelanjutan.

1. Project Charters

Piagam proyek adalah definisi proyek yang meliputi:

- a. Pernyataan masalah
- b. Tinjauan ruang lingkup, peserta, tujuan, dan persyaratan
- c. Otorisasi proyek baru
- d. Peran dan tanggung jawab
- e. Setelah piagam proyek disetujui, itu tidak boleh diubah.

Piagam proyek dimulai dengan nama proyek, departemen fokus, area fokus, dan produk atau proses. Piagam proyek berfungsi sebagai titik fokus di seluruh proyek untuk memastikan proyek berada pada jalurnya dan orang-orang yang tepat berpartisipasi dan dimintai pertanggungjawaban. Pentingnya piagam proyek sehubungan dengan keberlanjutan adalah bahwa itu adalah dokumen resmi untuk mendidik dan memberikan tata kelola suatu proyek baru. Keberlanjutan perlu memanfaatkan berbagai ilmu pengetahuan untuk bisa mencapai tujuan dan sasaran. Piagam proyek akan berfungsi sebagai dokumen resmi untuk organisasi dengan pendekatan tertentu.

2. SIPOC

SIPOC mengidentifikasi:

- a. Tugas dan aktivitas utama
- b. Batasan proses
- c. Hasil proses
- d. Siapa yang menerima *output* (pelanggan)
- e. Apa yang dibutuhkan pelanggan dari keluaran
- f. Proses *input*
- g. Siapa yang memasok *input* (pemasok)
- h. Proses apa yang membutuhkan masukan
- i. Metrik terbaik untuk diukur

SIPOC adalah singkatan dari *Supplier, Input, Process, Output, Customer* seperti ditunjukkan pada gambar 5.8.

Supplier	Input	Process	Output	Customer
----------	-------	---------	--------	----------

Gambar 5.8 SIPOC

Supplier (pemasok): Mengenali dan bekerja sama dengan pemasok sambil membantu pemasok meningkat.

Input (masukan): Berusaha keras untuk terus meningkatkan masukan dengan mencoba melakukan yang hal benar di awal.

Process (proses): Menjelaskan proses pada tingkat tinggi, tetapi dengan cukup detail untuk didemonstrasikan kepada seorang eksekutif atau manajer. Pahami prosesnya sepenuhnya dengan mengetahuinya 100%. Hilangkan kesalahan apa pun dengan menerapkan sebuah poka-yoke.

Output (keluaran): Berusaha keras untuk terus meningkatkan *output* dengan memanfaatkan metrik.

Customer (pelanggan): Pertahankan persyaratan pelanggan dengan mengingat bahwa mereka adalah aspek terpenting dari proyek. Pelanggan menentukan spesifikasi kebutuhannya, sehingga perlu menjaga CTQ dari pelanggan.

Langkah-langkah SIPOC:

- a. Mendapatkan sudut pandang proses dari tingkat pimpinan.
- b. Mengidentifikasi proses dalam bentuk sederhana.
- c. Mengidentifikasi *input* eksternal seperti bahan mentah, karyawan dan lainnya.
- d. Mengidentifikasi kebutuhan pelanggan, juga dikenal sebagai keluaran.
- e. Memastikan untuk memasukkan semua langkah-langkah yang memiliki nilai tambah dan non-nilai tambah.
- f. Memasukkan variabel proses dan keluaran produk.

SIPOC menyiratkan bahwa proses tersebut mudah dipahami dan membantu dalam mengidentifikasi peluang untuk perbaikan.

SIPOC penting dalam konsep keberlanjutan karena membantu mengembangkan solusi untuk pengembangan. Biasanya proses tersebut dipetakan dalam definisi yang baik dengan dimulai dari tingkat pimpinan terlebih dahulu.

Bagian penting dari SIPOC adalah melihat detail dari status saat ini dan melihat perbaikan apa yang dapat dilakukan untuk status masa depan. Menambahkan spesifikasi untuk *input* apa pun dapat mengidentifikasi celah dalam proses. Membandingkan satu proses ke proses lainnya juga akan mengidentifikasi kesenjangan.

3. Kano Model

Model Kano dikembangkan oleh Noriaki Kano pada 1980-an. Model Kano adalah alat grafis yang selanjutnya mengkategorikan suara pelanggan (VOC) dan CTQ ke dalam tiga kelompok berbeda:

- a. Keinginan memiliki (*must-haves*)
- b. Kinerja (*performance*)
- c. Tingkat kepuasan (*delighters*)

Model Kano membantu mengidentifikasi CTQ dengan menambahkan nilai kebutuhan yang penting dengan kebutuhan yang tidak terlalu berpengaruh di mana memiliki lebih banyak belum tentu lebih baik.

Model Kano melibatkan pelanggan dengan memahami atribut produk yang kemungkinan besar penting bagi pelanggan. Tujuan dari alat ini adalah untuk mendukung spesifikasi produk yang dibuat oleh pelanggan dan melakukan diskusi dengan melibatkan anggota tim. Model tersebut membedakan fitur produk dari kebutuhan pelanggan dengan memahami kebutuhan dan barang yang tidak diperlukan sama sekali. Kano juga menghasilkan metodologi untuk memetakan tanggapan konsumen dengan kuesioner yang berfokus pada kualitas menarik melalui kualitas terbalik. Lima kategori preferensi pelanggan adalah sebagai berikut:

- a. Menarik (*attractives*)
- b. Satu dimensi (*one dimensional*)
- c. Harus (*must be*)
- d. Acuh tak acuh (*indifferent*)
- e. Terbalik (*reverse*)

Kualitas yang menarik adalah kualitas yang memberikan kepuasan saat dipenuhi, namun ini tidak akan menghasilkan ketidakpuasan jika tidak dipenuhi.

Kualitas satu dimensi adalah kualitas yang memberikan kepuasan saat terpenuhi, dan ketidakpuasan jika tidak terpenuhi.

Kualitas harus adalah kualitas yang diterima begitu saja jika dipenuhi, tetapi memberikan ketidakpuasan saat tidak dipenuhi.

Kualitas yang acuh tak acuh adalah kualitas yang tidak baik atau buruk, yang tidak menghasilkan kepuasan atau ketidakpuasan pelanggan.

Kualitas terbalik adalah kualitas yang menghasilkan tingkat ketidakpuasan yang tinggi dari beberapa pelanggan dan menunjukkan bahwa sebagian besar pelanggan tidak sama.

Model Kano sangat penting untuk digunakan saat proses berkelanjutan karena penting untuk membedakan aspek mana yang harus kita capai untuk melindungi lingkungan kita dan aspek mana yang dapat kita tingkatkan secara bertahap.

4. CTQ

Critical to quality (CTQ) adalah karakteristik yang penting bagi pelanggan. Mereka berasal dari suara pelanggan (VOC). CTQ adalah metrik terukur dan mempunyai nilai yang berasal dari VOC. CTQ sangat penting untuk komunikasi karena kita perlu memahami aspek kritis yang paling penting bagi pelanggan. Memanfaatkan VOC untuk manufaktur secara internal adalah cara yang baik untuk memahami proses yang sangat diketahui oleh karyawan. Oleh karena itu, pekerja produksi adalah pelanggan dan pertanyaan diberikan kepada mereka.

5. Diagram Afinitas

Diagram afinitas adalah perangkat yang digunakan untuk menempatkan sejumlah besar informasi secara terorganisir dengan mengelompokkan data menjadi karakteristik tertentu. Diagram afinitas adalah perangkat organisasi untuk mengetahui VOC Langkah-langkah untuk memperoleh diagram afinitas adalah sebagai berikut:

- Langkah 1: Mendefinisikan pertanyaan dengan jelas atau fokus pada tugas.
- Langkah 2: Mencatat semua tanggapan peserta pada catatan.
- Langkah 3: Mengumpulkan semua kartu catatan.
- Langkah 4: Mencari dan mengidentifikasi tema atau persoalan yang ada.
- Langkah 5: Memulai memindahkan kartu catatan tempel ke dalam tema sampai semua jawaban dialokasikan.
- Langkah 6: Mengevaluasi kembali dan membuat penyesuaian.

6. Analisa Sistem Pengukuran

Pengukur R&R

Pengukur R&R adalah teknik analisis sistem pengukuran (*Measurement System Analysis*, MSA) yang menggunakan data berkelanjutan berdasarkan prinsip-prinsip berikut:

- a. Data harus dalam kendali statistik.
- b. Variabilitas harus kecil dibandingkan dengan spesifikasi produk.
- c. Diskriminasi harus sekitar 1/10 dari spesifikasi produk atau variasi proses.
- d. Sumber variasi proses yang mungkin terungkap melalui pengukuran sistem.
- e. Pengulangan dan reproduktifitas adalah kontributor utama kesalahan pengukuran.
- f. Variasi total sama dengan variasi produk nyata ditambah variasi karena sistem pengukuran.
- g. Variasi sistem pengukuran sama dengan variasi karena pengulangan ditambah variasi karena reproduktifitas.

- h. Variabilitas total (yang diamati) adalah variabilitas aktual dan variabilitas pengukuran.
- c. *Diskriminasi* adalah jumlah desimal yang dapat diukur oleh sistem. Penambahan ukuran harus sekitar 1/10 dari lebar spesifikasi produk atau variasi proses yang menyediakan kategori berbeda.
- d. *Akurasi* adalah kualitas rata-rata yang mendekati nilai sebenarnya.
- e. *Nilai* sebenarnya adalah nilai yang benar secara teoritis.
- f. *Bias* adalah jarak antara nilai rata-rata pengukuran dan nilai sebenarnya, jumlah di mana instrumen pengukuran secara konsisten melenceng, atau kesalahan sistematis.
- g. *Akurasi instrumen* adalah perbedaan antara nilai rata-rata yang diamati dari pengukuran dan nilai sebenarnya. Bias dapat diukur berdasarkan instrumen atau operator. Bias operator terjadi ketika operator yang berbeda menghitung rata-rata berbeda yang dapat dideteksi untuk ukuran yang sama. Hasil bias instrumen ketika instrumen yang berbeda menghitung rata-rata deteksi yang berbeda untuk ukuran yang sama.
- h. *Presisi* mencakup variasi total dalam sistem pengukuran, mengukur variasi alami dari pengukuran berulang, serta pengulangan dan reproduksibilitas.
- i. *Pengulangan* adalah variabilitas yang melekat pada perangkat pengukuran. Ini terjadi ketika pengukuran berulang dibuat dari variabel yang sama dalam kondisi yang benar-benar identik (operator, penyiapan, unit pengujian, kondisi lingkungan yang sama) dalam jangka pendek. Pengulangan diperkirakan dengan simpangan baku yang dikumpulkan dari distribusi pengukuran berulang dan selalu lebih kecil dari variasi total sistem.
- j. *Reproduksibilitas* adalah variasi yang dihasilkan saat pengukuran dilakukan dalam kondisi berbeda. Kondisi yang berbeda dapat berupa operator, pengaturan, unit pengujian, atau kondisi lingkungan dalam jangka panjang. Reproduksibilitas diperkirakan dengan deviasi standar rata-rata pengukuran dari kondisi pengukuran yang berbeda.
- k. *Indeks kemampuan pengukuran* juga dikenal sebagai rasio presisi terhadap toleransi (P/T). Persamaannya adalah:

$$P/T = (5.15 \times \sigma_{MS}) / \text{Toleransi} \quad (5.2)$$

Rasio P/T biasanya dinyatakan dalam persen dan menunjukkan berapa persen toleransi yang diambil oleh kesalahan pengukuran. Ini mempertimbangkan pengulangan dan reproduktifitas. Rasio ideal adalah 8% atau kurang, dimana rasio yang dapat diterima adalah 30% atau kurang. Deviasi standar 5,15 menyumbang 99% variasi MS (*measurement system*) dan merupakan standar industri.

Rasio P/T adalah perkiraan paling umum tingkat presisi suatu sistem pengukuran. Ini berguna untuk menentukan seberapa baik kinerja sistem

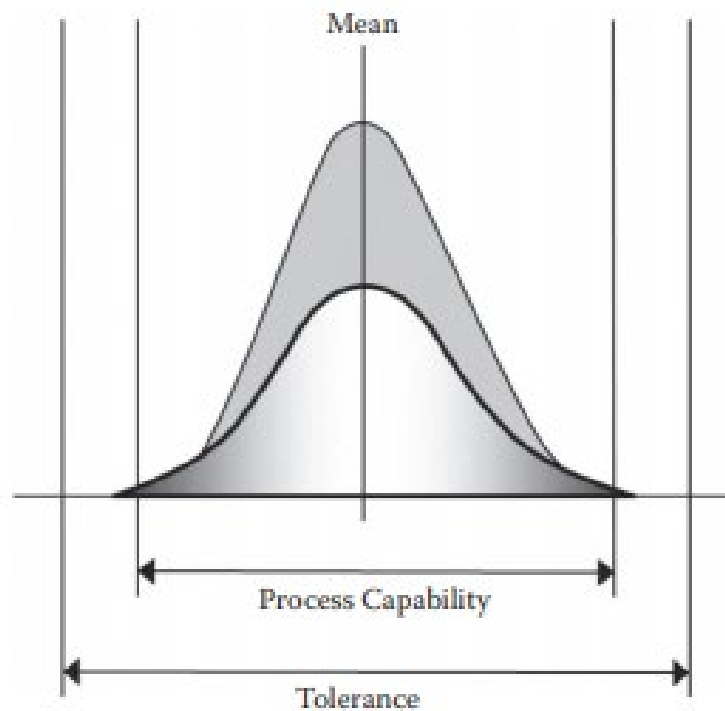
pengukuran sehubungan dengan spesifikasinya. Namun, spesifikasinya mungkin tidak akurat atau perlu penyesuaian. Rumusnya adalah:

$$\% \text{ R\&R} = (\sigma_{\text{MS}} / \sigma_{\text{Total}}) \times 100 \quad (5.3)$$

Perumusan di atas menunjukkan persentase variasi total yang diambil oleh kesalahan pengukuran dan mencakup pengulangan dan reproduktifitas..

7. Kemampuan Proses (*Process Capabilities*)

Kemampuan suatu proses adalah penyebaran yang memuat sebagian besar nilai-nilai distribusi proses. Kapabilitas hanya dapat ditetapkan pada proses yang stabil dengan distribusi yang hanya memiliki variasi penyebab yang sama. Kemampuan proses ditunjukkan pada gambar 5.9.



Gambar 5.9 Kemampuan Proses

Capable Process (C_p)

Suatu proses mampu ($C_p \geq 1$) jika toleransi alaminya terletak dalam toleransi atau spesifikasi teknis. Ukuran kapabilitas proses dari proses yang stabil adalah $6\hat{\sigma}$, di mana $\hat{\sigma}$ adalah variabilitas proses inheren yang diperkirakan dari proses tersebut. Nilai minimum $C_p = 1,33$ umumnya digunakan untuk proses yang sedang berlangsung. Ini memastikan tingkat penolakan yang sangat rendah sebesar 0,007%, dan oleh karena itu merupakan strategi yang efektif untuk mencegah item yang tidak sesuai. C_p secara matematis didefinisikan sebagai:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{\text{allowable process spread}}{\text{actual process spread}} \quad (5.4)$$

dimana USL adalah batas spesifikasi atas, LSL adalah batas spesifikasi bawah dan C_p hanya mengukur pengaruh dari variabilitas yang melekat.

Indeks Kemampuan (C_{pk})

Pemusatan proses dapat dinilai ketika spesifikasi dua sisi tersedia. Jika indeks kapabilitas (C_{pk}) sama dengan atau lebih besar dari 1,33, maka proses tersebut mungkin cukup terpusat. C_{pk} juga dapat digunakan jika hanya ada spesifikasi satu sisi. Untuk spesifikasi dua sisi, secara matematis dapat didefinisikan sebagai:

$$C_{pk} = \text{Minimum} \left[\frac{USL - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma} \right] \quad (5.5)$$

di mana \bar{X} adalah rata-rata proses keseluruhan.

Namun, untuk spesifikasi satu sisi, C_{pk} aktual yang diperoleh dilaporkan. Ini dapat digunakan untuk menentukan persentase pengamatan di luar spesifikasi. Tujuan jangka panjang keseluruhan adalah untuk membuat C_p dan C_{pk} sebesar mungkin dengan terus meningkatkan atau mengurangi variabilitas proses, $\hat{\sigma}$, untuk setiap iterasi sehingga persentase yang lebih besar dari produk mendekati nilai target karakteristik kualitas utama. Idealnya adalah memusatkan proses dengan variabilitas nol.

Jika suatu proses terpusat tetapi tidak mampu, satu atau beberapa tindakan mungkin diperlukan. Salah satu tindakan mungkin adalah mengintegrasikan eksperimen yang dirancang untuk mendapatkan pengetahuan tambahan tentang proses dan untuk merancang strategi kontrol. Jika variabilitas yang berlebihan diperoleh, maka perlu melakukan berbagai desain dengan tujuan memperkirakan berbagai sumber variabilitas. Sumber variabilitas ini kemudian dapat dievaluasi untuk menentukan strategi apa yang digunakan untuk mengurangi atau menghilangkannya secara permanen. Tindakan lain mungkin berupa mengubah spesifikasi atau melanjutkan produksi dan kemudian menyortir barang. Tiga karakteristik dari suatu proses dapat diamati berkenaan dengan kapabilitas, seperti dirangkum di bawah ini:

- a. Prosesnya mungkin terpusat dan mampu.
- b. Prosesnya mungkin mampu tetapi tidak terpusat.
- c. Prosesnya mungkin terpusat tetapi tidak mampu.

Kemungkinan Penerapan Indeks Kemampuan Proses

Potensi penerapan dari indeks kapabilitas proses dirangkum di bawah ini:

- a. Komunikasi: Cp dan Cpk telah digunakan dalam industri untuk membangun bahasa umum tanpa dimensi yang berguna untuk menilai kinerja proses produksi. masalah teknik, kualitas, manufaktur, dan lainnya serta dapat mengkomunikasikan dan memahami proses dengan kapabilitas tinggi.
- b. Perbaikan berkelanjutan: Indeks ini dapat digunakan untuk memantau peningkatan berkelanjutan dengan mengamati perubahan distribusi kemampuan proses. Misalnya, jika ada 20% proses dengan kapabilitas antara 1 dan 1,67 dalam satu bulan, dan beberapa di antaranya ditingkatkan menjadi antara 1,33 dan 2,0 pada bulan berikutnya, maka ini merupakan indikasi bahwa peningkatan telah terjadi.
- c. Audit: Ada banyak jenis audit yang digunakan saat ini untuk menilai kinerja sistem mutu. Perbandingan kemampuan dalam proses dengan kemampuan yang ditentukan dari audit dapat membantu mengembangkan area yang bermasalah.
- d. Prioritas perbaikan: Suatu catatan dari semua proses dengan nilai Cp atau Cpk yang tidak dapat diterima dapat menjadi dasar dalam menetapkan prioritas untuk perbaikan proses.
- e. Pencegahan produk yang tidak sesuai (*non-conforming*): Untuk kualifikasi proses, sangat wajar untuk menetapkan kemampuan benchmark Cpk = 1,33 yang akan membuat produk yang tidak sesuai (*non-conforming*) menjadi tidak mungkin dalam banyak kasus.

Potensi Penyalahgunaan Cp dan Cpk

Terlepas dari beberapa kemungkinan aplikasinya, indeks kapabilitas proses memiliki beberapa potensi sumber penyalahgunaan, seperti yang dirangkum di bawah ini:

- a. Masalah dan kekurangan:
 - Cpk dapat meningkat tanpa perbaikan proses meskipun pengujian berulang mengurangi variabilitas pengujian.
 - Semakin lebar spesifikasinya, semakin besar Cp atau Cpk, tetapi tindakan ini tidak memperbaiki proses.
 - Analisis cenderung berfokus pada angka daripada proses.
- b. Pengendalian proses: Analisis cenderung menentukan kemampuan proses sebelum pengendalian statistik ditetapkan. Kebanyakan orang tidak menyadari bahwa penentuan kapabilitas didasarkan pada variasi penyebab umum proses dan apa yang dapat diharapkan di masa depan. Adanya

penyebab khusus karena adanya variasi membuat prediksi tidak mungkin dan indeks kemampuan menjadi tidak jelas.

- c. Non-normalitas: Beberapa proses menghasilkan distribusi tidak normal untuk beberapa karakteristik. Karena indeks kapabilitas sangat sensitif terhadap penyimpangan dari normalitas, maka transformasi data dapat digunakan untuk mencapai perkiraan normalitas.
- d. Komputasi: Sebagian besar alat berbasis komputer tidak menggunakan R rata-rata/ d_2 untuk menghitung σ .

Ketika alat analitis dan statistik digabungkan dengan pendekatan manajerial yang baik, organisasi dapat memperoleh manfaat dari penerapan strategi peningkatan yang kuat. Salah satu pendekatan yang muncul sebagai prinsip manajerial yang baik adalah Lean, yang telah berhasil diterapkan pada banyak operasi industri.

C_p dan C_{pk} adalah analisis kapabilitas yang hanya dapat dilakukan dengan data normal. Sangat mudah untuk menggunakan data apa pun untuk analisis kemampuan, terutama pada sistem perangkat lunak yang akan menghitung data secara otomatis. Langkah pertama dalam melakukan analisis kapabilitas adalah memiliki data kontinu dan memeriksa normalitas. Hanya jika datanya normal maka studi kapabilitas dapat dilakukan. Jika datanya tidak normal, variasi penyebab khusus dicari. Poin data hanya dapat diambil jika alasannya diketahui untuk titik data yang merupakan pencilan (yaitu, perubahan suhu, perubahan shift, dll.). Setelah pencilan ditemukan karena alasan yang diketahui, pencilan dapat dihapus dan data dapat diperiksa normalitasnya sekali lagi. Jika tidak ada akar penyebab pencilan, lebih banyak data harus diambil, tetapi analisis kapabilitas tidak boleh dilakukan sampai normalitas terbukti. Pentingnya menemukan peralatan atau produk yang mampu dalam bisnis melalui kemampuan proses akan memungkinkan variasi ditemukan melalui *benchmarking*. Proses terbaik harus digunakan untuk teknik perbandingan ini. Praktik terbaik di kelas (BIC) harus dilakukan pada peralatan / produk / proses yang berbeda. Kemudian perbaikan harus dilakukan di area yang tidak mampu. Sangat penting untuk melakukan pemeliharaan preventif pada setiap dan semua peralatan agar peralatan tetap bekerja pada kemampuan proses setinggi mungkin. Ketika dua atau lebih peralatan dibandingkan, langkah pertama adalah melakukan uji normalitas seperti yang disebutkan di atas. Peralatan normal kemudian diperiksa kemampuan prosesnya. Analisis kapabilitas proses harus dilanjutkan secara sistematis (yaitu, bulanan atau kuartalan) untuk memahami apakah prosesnya membaik. Perbaikan berkelanjutan harus dilakukan pada peralatan untuk kemampuan terbaik.

8. Analisis Grafis

Analisis grafis adalah representasi visual dari perangkat yang menunjukkan hal penting dari suatu proyek. Perangkat umum yang biasa digunakan adalah dotplots, histogram, normality plot, Pareto diagrams, second-level Pareto analysis (*stratification*), boxplots, scatter plot, dan marginal plot. Plot data adalah langkah awal penting untuk semua jenis analisis data karena ini adalah representasi visual dari data. Ringkasan analisis grafis dapat mencakup ukuran sampel, mean, deviasi standar, varians, skewness, kurtosis, nilai-p, dan interval kepercayaan. Bagan Pareto akan dapat menunjukkan representasi visual dari apa yang paling sering terjadi dengan memisahkan beberapa yang vital versus yang sepele.

9. Diagram Sebab-Akibat

Setelah proses dipetakan, diagram sebab-akibat (C&E) dapat diselesaikan. Proses ini penting karena menyelesaikan analisis akar masalah. Dasar di balik analisis akar penyebab adalah menanyakan "Mengapa?" lima kali untuk mendapatkan akar masalah yang sebenarnya. Ini dikenal sebagai lima *why*. Banyak tindakan yang biasa dilakukan untuk memperbaiki suatu masalah, tetapi masalah yang sebenarnya tidak terselesaikan.

Diagram sebab-akibat disebut juga sebagai diagram tulang ikan karena secara visual terlihat seperti ikan dimana tulang menjadi penyebab dan kepala ikan sebagai akibatnya.

Tulang ikan dibagi menjadi kategori paling penting dalam memecahkan suatu masalah:

- a. Pengukuran (*measurement*)
- b. Bahan (*material*)
- c. Pelaku (*man, personnel*)
- d. Lingkungan (*environment*)
- e. Metode (*method*)
- f. Mesin/peralatan (*machine*)

Proses ini membutuhkan tim untuk melakukan banyak tukar pikiran di mana mereka fokus pada penyebab masalah berdasarkan kategori. Kepala ikan adalah pernyataan masalahnya.

10. Analisis Bentuk & Efek Kegagalan (Failure Mode & Effect Analysis, FMEA)

Untuk memilih suatu tindakan dari diagram C&E dan memprioritaskan proyek, maka FMEA dilakukan. FMEA akan mengidentifikasi penyebabnya,

menilai risiko, dan menentukan langkah selanjutnya. Langkah-langkah menuju FMEA adalah sebagai berikut:

- a. Menentukan langkah-langkah proses.
- b. Menentukan fungsi.
- c. Menentukan mode kegagalan potensial.
- d. Menentukan efek potensial dari kegagalan.
- e. Menentukan tingkat keparahan kegagalan.
- f. Menentukan mekanisme potensial kegagalan.
- g. Menentukan kontrol proses saat ini.
- h. Menentukan terjadinya kegagalan.
- i. Menentukan mekanisme deteksi kontrol proses saat ini.
- j. Menentukan kemudahan mendeteksi kegagalan.
- k. Mengalikan tingkat keparahan (*severity*), kejadian (*occurrence*), dan deteksi (*detection/likelihood*) untuk menghitung angka prioritas risiko (RPN).
- l. Tentukan tindakan yang direkomendasikan.
- m. Tetapkan tindakan dengan tanggal target utama kepada personel yang bertanggung jawab.
- n. Tinjau kembali proses setelah tindakan diambil untuk memperbaikinya.
- o. Hitung ulang RPN dengan perbaikan.

Kriteria deteksi (*likelihood*), keparahan (*severity*) dan kejadian (*occurrence*) ditunjukkan pada tabel 5.2 sampai 11 dan format FMEA ditunjukkan pada tabel 5.5.

Tabel 5.2 Kriteria Tingkat Deteksi (*Likelihood*)

Deteksi	Kriteria:	
	Kemungkinan Adanya Cacat Akan Dideteksi oleh suatu Pengujian sebelum Produk lanjut ke Proses Berikutnya	Ranking
Hampir tidak mungkin	Pengujian mendeteksi <80% dari kegagalan	10
Sangat kecil	Pengujian mendeteksi 80% dari kegagalan	9
Kecil	Pengujian mendeteksi 82.5% dari kegagalan	8
Sangat rendah	Pengujian mendeteksi 85% dari kegagalan	7
Rendah	Pengujian mendeteksi 87.5% dari kegagalan	6
Sedang	Pengujian mendeteksi 90% dari kegagalan	5
Cukup tinggi	Pengujian mendeteksi 92.5% dari kegagalan	4
Tinggi	Pengujian mendeteksi 95% dari kegagalan	3
Sangat tinggi	Pengujian mendeteksi 97.5% dari kegagalan	2
Hampir pasti	Pengujian mendeteksi 99.5% dari kegagalan	1

Tabel 5.3 Kriteria Tingkat Keparahan (*Severity*)

Pengaruh	Kriteria: Tingkat keparahan dari pengaruh	Ranking
Berbahaya-tanpa peringatan	Peringkat tingkat keparahan yang sangat tinggi ketika mode kegagalan potensial mempengaruhi keselamatan dan melibatkan ketidakpatuhan tanpa adanya peringatan	10
Berbahaya-dengan peringatan	Peringkat tingkat keparahan yang sangat tinggi ketika mode kegagalan potensial mempengaruhi keselamatan dan melibatkan ketidakpatuhan terhadap peringatan	9
Sangat besar	Proses tidak dapat dioperasikan, dan kehilangan fungsi utamanya	8
Besar	Proses dapat dioperasikan, tetapi dengan fungsionalitas yang berkurang dan pelanggan yang tidak puas	7
Sedang	Proses dapat dioperasikan, tetapi tidak mudah untuk dibuat. Pelanggan merasa tidak nyaman	6
Kecil	Proses dapat dioperasikan, tetapi tidak nyaman dengan tingkat kinerja yang berkurang. Pelanggan tidak puas	5
Sangat kecil	Prosesnya tidak sesuai 100%. Sebagian besar pelanggan dapat melihat cacatnya	4
Minor	Prosesnya tidak sesuai 100%. Beberapa pelanggan dapat melihat cacatnya	3
Sangat minor	Prosesnya tidak sesuai 100%. Sangat sedikit pelanggan yang dapat melihat kerusakan tersebut	2
Tidak ada	Tidak ada pengaruh	1

Tabel 5.4 Kriteria Tingkat Kejadian (*Occurrence*)

Kemungkinan gagal	Tingkat kemungkinan gagal	Ranking
Kegagalan tidak bisa dihindari	≥ 1 dari 2	10
	1 dari 3	9
Tinggi: Kegagalan berulang	1 dari 8	8
	1 dari 20	7
	1 dari 80	6
Sedang: Kegagalan sesekali	1 dari 400	5
	1 dari 2000	4
Rendah: Sangat sedikit	1 dari 15000	3

Kemungkinan gagal	Tingkat kemungkinan gagal	Ranking
mengalami kegagalan	1 dari 150000	2
Sangat rendah: Kegagalan tidak mungkin terjadi	≤ 1 dari 1500000	1

Tabel 5.5 Format *Failure Mode and Effect Analysis*

#	Process Function (step)	Potential Failure Modes (process defects)	Potential Failure Effects (KPOVs)	S E V	C I S S	Potential Causes of Failure (KPTVs)	O C C	Current Process Control	D E T	R E P N	Recommended Action	Responsible Person & Target Date	Taken Actions	S E V	O C C	D E T	R E P N
1																	
2																	

Hal yang terlihat dari FMEA yang menjadi aspek penting keberlanjutan adalah penurunan RPN setelah item tindakan. Penting untuk memahami tingkat keparahan proses bagi pelanggan dan meningkatkan kemampuan proses untuk meningkatkan proses tersebut. Penurunan RPN akan membuat seluruh proses lebih berkelanjutan dengan mampu memberikan proses yang memiliki kemampuan terbaik melalui manajemen proyek yang menyeluruh. Penting untuk memelihara FMEA agar begitu proses diperbaiki, maka tindakan itu tidak dilupakan.

11. Pengujian Hipotesis

Pengujian hipotesis memvalidasi asumsi yang dibuat dengan verifikasi proses berdasarkan ukuran statistik. Penting untuk menggunakan setidaknya 30 data untuk pengujian hipotesis sehingga ada cukup data untuk memvalidasi hasilnya.

Normalitas titik data harus ditemukan untuk hipotesis pengujian agar akurat. Asumsi ditunjukkan dalam hipotesis nol dan alternatif, dimana:

H_0 (hipotesis nol): Perbedaannya sama dengan nilai referensi yang dipilih; $\mu_1 - \mu_2 = 0$.

H_a (hipotesis alternatif): Perbedaan tidak sama dengan nilai referensi yang dipilih; $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$.

Contoh uji-T berpasangan untuk pengujian hipotesis ditunjukkan pada tabel 5.6.

Tabel 5.6 Contoh Uji Hipotesis dengan Uji T Berpasangan (Paired T-test)

	Paired T for Before-After		Standard N	
	N	Mean	Mean Deviation	SE Mean
Before	30	83,623	5,195	0,948
After	30	79,697	4,998	0,913
Difference	30	3,93	7,41	1,35

Note: 95% CI for mean difference = (1,16; 6,69), T-test of mean difference = 0 (versus not = 0), T-value = 2,90, p-value = 0,007

Perbedaan rata-rata antara kedua bahan pengujian tidak sama dengan nol untuk tingkat kepercayaan 95%, yang menunjukkan perbedaan di antara keduanya. Nilai p kecil ($p = 0,007$) lebih lanjut menunjukkan bahwa data tidak konsisten dengan $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$, artinya kedua bahan pengujian tersebut memiliki perbedaan. Secara khusus, salah satu pengujian (mean = 79.697) berkinerja lebih baik daripada pengujian yang lain (mean = 83.623) dalam hal pengendalian beban selama rentang waktu. Kesimpulannya adalah tolak H_0 yaitu perbedaannya tidak sama dengan nilai referensi yang dipilih: $\mu_1 - \mu_2$ tidak = 0.

12. ANOVA

Tujuan dari *analysis of variance* (ANOVA) adalah untuk menentukan apakah ada hubungan antara variabel bebas (independen) dan variabel terikat (dependen). Ada ANOVA satu arah yang mencakup varian satu faktor dan ANOVA dua arah yang menyertakan varian dua faktor. Tiga jenis variabilitas yang biasa ditemui adalah:

- Total (*total*): Total variabilitas dalam semua pengamatan.
- Antara (*between*): Variasi antara rata-rata subkelompok.
- Di dalam (*within*): Variasi peluang acak dalam setiap subkelompok, juga dikenal sebagai kebisingan.

Prinsip-prinsip untuk ANOVA satu arah dan ANOVA dua arah adalah sama kecuali bahwa dalam ANOVA dua arah, berbagai masalah dapat diambil dari berbagai tingkatan.

Jika ANOVA menunjukkan bahwa setidaknya salah satu cara berbeda, perbandingan *berpasangan* dilakukan untuk menunjukkan adanya perbedaan rata-rata. Residual, varians, dan normalitas harus diperiksa serta plot pengaruh dan plot interaksi harus dibuat.

Outliers juga harus dicari dalam metode ANOVA yang menunjukkan bahwa variabilitas terpengaruh. Plot pengaruh utama menunjukkan nilai rata-

rata untuk masing-masing faktor yang dibandingkan. Perbedaan antara tingkat faktor dapat dilihat dengan kemiringan di garis. Nilai-p dapat membantu menentukan apakah perbedaannya signifikan. Plot interaksi menunjukkan rata-rata untuk kombinasi faktor yang berbeda.

13. Korelasi

Hubungan linier antara dua variabel kontinu dapat diukur melalui koefisien korelasi. Koefisien korelasi adalah nilai antara -1 dan 1.

- Jika nilainya sekitar 0, tidak ada hubungan linier.
- Jika nilainya kurang dari 0,5, berarti ada korelasi yang lemah.
- Jika nilainya kurang dari 0,8, berarti ada korelasi sedang.
- Jika nilainya lebih besar dari 0,8, berarti ada korelasi yang kuat.
- Jika nilainya sekitar 1, berarti ada korelasi sempurna.

14. Regresi Linier Sederhana

Analisis regresi menggambarkan hubungan antara dependen dan variabel bebas sebagai fungsi $y = f(x)$.

Persamaan untuk regresi linier sederhana sebagai model adalah:

$$Y = b_0 + b_1X + \epsilon_E \quad (5.6)$$

dimana Y adalah variabel dependen, b_0 adalah titik potong sumbu, b_1 adalah gradien dari garis regresi, x adalah variabel independen, dan ϵ_E adalah bentuk kesalahan atau residual.

15. Teori Kendala

Dr. Eliyahu M. Goldratt menciptakan teori kendala (theory of constraint, TOC). Teori manajemen ini membuktikan bahwa setiap sistem memiliki setidaknya satu kendala yang membatasi efisiensi 100%. Analisis suatu sistem akan menunjukkan batas-batas sistem tersebut. TOC tidak hanya menunjukkan penyebab kendala, tetapi juga menyediakan cara untuk menyelesaikan kendala. Ada dua konsep dasar dengan TOC:

- a. Sistem sebagai rantai
- b. *Throughput*, manajemen inventaris, dan biaya operasional

Kinerja seluruh sistem disebut rantai. Kinerja sistem didasarkan pada tautan rantai terlemah atau batasan. Tautan yang tersisa dikenal sebagai nonconstraints. Setelah batasan diperbaiki, sistem menjadi lebih produktif atau efisien, tetapi selalu ada tautan atau batasan terlemah. Proses ini berlanjut hingga efisiensi 100%.

Misalnya, ada tiga lini produksi dengan kapasitas produksi sebagai berikut:

- a. 250 unit / hari

b. 500 unit / hari

c. 600 unit / hari

Tautan terlemah adalah lini produksi 1 karena menghasilkan jumlah unit / hari paling sedikit. Tautan terlemah diselidiki hingga mencapai kapasitas non-kendala. Setelah perbaikan dilakukan, mata rantai baru terlemah diselidiki sampai potensi penuh dari lini produksi dapat dipenuhi tanpa melebihi permintaan pasar. Jika permintaan eksternal lebih kecil dari kapasitas internal, ini dikenal sebagai kendala eksternal. Throughput dapat didefinisikan dalam rumus berikut:

$$\frac{\text{Sales price} - \text{Variable costs}}{\text{Time}}$$

(5.7)

Keuntungan harus dipahami saat berhadapan dengan throughput. Persediaan dikenal sebagai bahan mentah, barang yang belum jadi, suku cadang yang dibeli, dan setiap investasi yang dilakukan. Persediaan harus dilihat sebagai dolar di rak. Inventaris apa pun akan sia-sia kecuali digunakan tepat waktu. Biaya operasional harus mencakup semua biaya yang digunakan untuk menghasilkan barang. Semakin sedikit biaya operasinya, semakin baik. Biaya ini harus mencakup tenaga kerja langsung, utilitas, persediaan, dan depresiasi aset.

Menerapkan konsep TOC membantu memandu membuat tautan terlemah menjadi lebih kuat. Ada lima langkah untuk proses TOC:

- a. Identifikasi kendala atau tautan terlemah.
- b. Memanfaatkan kendala dengan membuatnya seefisien mungkin tanpa mengeluarkan uang untuk kendala atau mempertimbangkan peningkatan.
- c. Menundukkan segala sesuatu yang lain ke dalam kendala. Sesuaikan sisa sistem sehingga batasan beroperasi pada produktivitas maksimumnya. Evaluasi perbaikan untuk memastikan kendala telah ditangani dengan baik dan tidak lagi menjadi kendala. Jika masih kendala, selesaikan langkah-langkahnya; jika tidak, lewati langkah 4.
- d. Tingkatkan kendala. Langkah ini hanya diperlukan jika langkah 2 dan 3 tidak berhasil. Organisasi harus mengambil tindakan apa pun atas kendala tersebut untuk menghilangkan masalah. Ini adalah proses di mana uang harus dibelanjakan untuk kendala atau peningkatan harus diselidiki.
- e. Identifikasi kendala berikutnya dan mulai proses lima langkah dari awal. Kendala harus dipantau dan perbaikan berkelanjutan harus diselesaikan.

Dari berbagai uraian di atas, TPM dan Six Sigma berjalan seiring dengan adanya perhitungan berbasis data untuk mendorong peningkatan sekaligus mendorong karyawan untuk berpartisipasi dan memiliki pengaruh atas proses. Kinerja yang dapat dimiliki perusahaan dengan integrasi TPM dan Six Sigma akan meningkatkan fleksibilitas dan meningkatkan kualitas pengendalian proses. Pendekatan Six Sigma mencakup struktur proyek dengan statistik metodologi untuk meningkatkan proses. Pendekatan TPM mendukung keberlanjutan Six Sigma melalui proses pembelajaran di tempat kerja sambil menggabungkan keterlibatan dan momentum operator. Prosesnya dimulai dengan *lean manufactur* dengan menghilangkan pemborosan dan memiliki lingkungan yang bersih serta meningkatkan pemahaman atas peralatan dan keandalannya.

G. TANTANGAN DAN MASA DEPAN PENERAPAN TPM

1. Penerapan TPM di Bidang Jasa dan Kesehatan

TPM dimulai di industri manufaktur. Namun, peralatan juga ada di industri jasa dan kesehatan. Fokus peralatan dalam jasa dan kesehatan sebagian besar pada penggunaan dan bukan pada perawatan. Ada kebutuhan untuk melakukan perawatan proaktif dengan keterlibatan karyawan di seluruh organisasi untuk memaksimalkan efektivitas keseluruhan dalam industri ini (Cudney, 2009). Serupa dengan manfaat di bidang manufaktur, TPM membantu organisasi jasa dan kesehatan memaksimalkan efektivitas proses dan peralatan, mengurangi cacat dan waktu henti, serta meningkatkan kepuasan kerja dan semangat kerja karyawan. Ini membantu meminimalkan perawatan tidak terjadwal, yang dapat menjadi sangat penting terutama dalam kesehatan. Manfaat lain yang lebih terlihat dalam industri ini dibandingkan manufaktur adalah berkurangnya biaya administrasi, kerusakan peralatan kantor, dan keluhan pelanggan, dan peningkatan produktivitas fungsi pendukung.

Dalam industri jasa, ukuran efisiensi biasanya menggunakan efisiensi kinerja keseluruhan (operational performance efficiency, OPE) daripada efisiensi peralatan secara keseluruhan. OPE adalah ukuran efektivitas orang atau proses yang digunakan untuk mencapai target faktor yang memiliki nilai tambah dan bukan. OPE mencakup waktu tunggu, keterlambatan pengiriman, proses pengerjaan ulang, proses penggantian, pergerakan yang tidak perlu, dan banyak bentuk limbah lainnya. Tiga faktor yang berkontribusi termasuk penjadwalan, kinerja operator, dan kinerja proses. Dalam industri kesehatan, ada banyak peralatan yang perlu dirawat seperti peralatan rontgen, alat sterilisasi, dan mesin penyimpanan obat. Tujuan TPM di rumah sakit adalah untuk mengurangi waktu henti mesin yang tidak direncanakan, tingkat kesalahan, dan biaya pengoperasian sekaligus meningkatkan kapasitas peralatan dan keselamatan karyawan dan

pasien. Fokus dalam perawatan alat kesehatan harus bergeser dari penggunaan peralatan medis ke perawatan peralatan medis.

2. Menerapkan Konsep TPM ke Siklus Hidup Desain dan Pengembangan

TPM merupakan bagian integral dari *Lean* yang merupakan penggabungan dari beberapa metode dan alat tambahan yang beragam dengan menyediakan perangkat yang lebih holistik dan terintegrasi untuk perbaikan proses. Perangkat yang sama ini dapat diterapkan untuk merancang dan mengembangkan produk dan jasa. Saat merancang dan mengembangkan produk dan jasa, maka perlu mempertimbangkan TPM selama konsep disain, terutama karena produk dan layanan baru menjadi semakin kompleks dan beragam. Oleh karena itu, perlu untuk lebih erat menggabungkan dan mengintegrasikan seluruh layanan dan proses pengembangan produk dengan TPM dan *Lean*. Metodologi yang komprehensif diperlukan dengan memanfaatkan teknik *Lean* dengan mempertimbangkan TPM untuk merancang produk (aplikasi), proses, atau layanan dengan benar pada tahap awal. Desain biasanya menyumbang 70% dari biaya produk, dan 80% masalah kualitas tanpa disadari dirancang ke dalam produk (aplikasi), proses, atau layanan (Cudney *et al.*, 2013). Oleh karena itu, sepertiga dari anggaran harus dikhususkan untuk memperbaiki masalah dalam desain dengan dua pertiga pertama dari anggaran.

Tiga aspek peningkatan proses pengembangan produk meliputi:

- a. Memaksimalkan profitabilitas
- b. Meminimalkan waktu
- c. Meminimalkan biaya

Ketiga aspek ini harus seimbang tanpa mengorbankan nilai dari perspektif pelanggan. Desain ramping/bantuan pengembangan produk dalam mengidentifikasi dan mengurangi atau menghilangkan pemborosan dalam proses pengembangan produk. Desain *lean* berfokus pada pembuangan limbah dari semua aspek produk dan proses pengembangan terkait sebelum dimulainya pembuatan. Desain *lean* membahas seluruh siklus hidup suatu produk. Lebih khusus lagi, desain *Lean* menargetkan pemotongan biaya produksi selama siklus desain dan mempercepat waktu ke pasar. Bentuk limbah yang paling umum dalam desain produk, seperti yang ditunjukkan pada tabel 5.7 (Kearney, 2003).

Tabel 5.7 Disain Limbah

Tempat Pengurangan Limbah	% Disain Limbah
Desain yang tidak pernah digunakan, diselesaikan, atau	Tidak

Tempat Pengurangan Limbah	% Disain Limbah
dikirim	diketahui
Waktu henti saat mencari informasi, menunggu hasil tes, dll.	33-50%
Dokumen dan prototipe yang tidak perlu	
Pengetahuan desain yang kurang dimanfaatkan, misalnya di bagian yang mahal	18%
Desain berlebihan, seperti fitur yang tidak dibutuhkan pelanggan	8%
Memvalidasi kesalahan manufaktur di awal proses desain	17%
Desain buruk yang menghasilkan cacat produk	15%

Lima prinsip desain Lean meliputi (Mascitelli, 2004):

Prinsip 1: Mendefinisikan masalah pelanggan dengan tepat dan identifikasi fungsi spesifik yang harus dilakukan untuk menyelesaikan masalah tersebut.

Prinsip 2: Mengidentifikasi proses tercepat yang dengannya fungsi yang teridentifikasi dapat diintegrasikan ke dalam produk berkualitas tinggi dan berbiaya rendah.

Prinsip 3: Menghapus item biaya yang tidak perlu atau berlebihan untuk mengungkap solusi produk yang optimal.

Prinsip 4: Mendengarkan suara pelanggan sesering mungkin dan berulang-ulang selama proses pengembangan.

Prinsip 5: Menanamkan alat dan metode pengurangan biaya ke dalam file praktik bisnis dan budaya Anda untuk memungkinkan pengurangan biaya.

Area utama pemborosan dalam desain produk berasal dari penundaan proses, penggunaan kembali desain, cacat, dan efisiensi proses. Keterlambatan proses disebabkan karena waktu yang hilang untuk mencari informasi, menunggu hasil tes, dan menunggu umpan balik. Pemborosan dari penggunaan kembali desain disebabkan karena tidak belajar dari pengalaman desain sebelumnya, tidak mengurangi fitur yang tidak diperlukan, dan desain yang tidak pernah digunakan, diselesaikan, atau dikirim. Limbah yang rusak berasal dari desain yang buruk dan masalah garansi. Akhirnya, pemborosan efisiensi proses disebabkan oleh kurangnya pemanfaatan pengetahuan desain dan tidak memvalidasi kesalahan manufaktur lebih awal. Ada beberapa cara untuk mengurangi biaya dalam siklus desain dengan mengurangi biaya material langsung, biaya tenaga kerja langsung, biaya operasional, biaya desain tidak berulang, dan investasi modal khusus produk. Biaya bahan langsung dapat dikurangi dengan menggunakan suku cadang

umum, penyederhanaan desain, pengurangan cacat, dan pengurangan jumlah suku cadang. Biaya tenaga kerja langsung dapat dikurangi melalui penyederhanaan desain, desain untuk pembuatan dan perakitan, dan proses standarisasi. Overhead operasional dapat dikurangi dengan meningkatkan pemanfaatan bersama, peralatan modal, dan desain modular. Biaya desain yang tidak berulang dapat dikurangi dengan standarisasi, rekayasa nilai, dan strategi desain platform. Investasi modal khusus produk dapat diminimalkan dengan menggunakan rekayasa nilai, standarisasi bagian, dan aliran satu bagian.

Lima hukum desain Lean (Huthwaite, 2004):

- 1) Hukum nilai strategis: memastikan disainer memberikan nilai kepada semua pemangku kepentingan selama siklus hidup produk.
- 2) Hukum pencegahan limbah: mencegah limbah di semua aspek kehidupan produk.
- 3) Hukum tarik pasar: mengantisipasi perubahan untuk mewujudkan produk yang tepat pada waktu yang tepat.
- 4) Hukum aliran inovasi: menciptakan ide baru untuk menyenangkan pelanggan dan membedakan produk suatu organisasi.
- 5) Hukum umpan balik terakhir: menggunakan umpan balik prediktif untuk meramalkan hubungan sebab-akibat.

Dengan memasukkan prinsip-prinsip Lean ke dalam desain produk dan proses, perbaikan lebih lanjut dapat dilakukan pada desain produk atau layanan. Proses pengembangan produk dapat dipersingkat, membawa produk ke pasar lebih cepat sambil tetap memastikan nilai bagi pelanggan.

3. Faktor Keterlibatan dan Keberhasilan

Ada beberapa elemen penting untuk menerapkan TPM dan selanjutnya menjadi organisasi yang ramping (*lean*) dan mempertahankan pelaksanaan proses yang efisien (*lean*). Harus ada alasan yang jelas, memaksa, dan mendesak untuk berubah. Kepemimpinan lintas fungsi harus memimpin organisasi secara proaktif dan terlihat melalui proses perubahan. Ini berarti mendapatkan pemimpin yang tepat untuk bekerja sama mengembangkan visi tentang apa yang dibutuhkan organisasi dan strategi untuk mencapainya. "Pemimpin yang tepat" adalah mereka yang memiliki kekuatan yang cukup untuk memimpin perubahan di seluruh organisasi. Kepemimpinan harus terus menerus mengkomunikasikan dan mencontohkan visi dan strategi baru. Kepemimpinan harus mendobrak hambatan untuk melakukan perbaikan yang diperlukan. Selain itu, kepemimpinan harus melibatkan orang-orang yang paling dekat dengan masalah yang menjadi prioritas utama atau memberi peluang untuk mengidentifikasi, merancang, mengembangkan, merencanakan, dan melaksanakan perbaikan. Kepemimpinan harus memanfaatkan keberhasilan dan praktik terbaik untuk melakukan perbaikan

dengan menghilangkan pemborosan di bidang lain. Kepemimpinan harus membantu setiap orang dalam organisasi memahami hubungan antara kegiatan peningkatan dan hasil dengan visi organisasi sehingga perilaku baru menjadi bagian dari cara melibatkan orang dan menjalankan bisnis.

Penerapan TPM yang berhasil membutuhkan keterlibatan total dari manajemen puncak. Pemimpin harus menciptakan lingkungan yang memungkinkan anggota untuk berpartisipasi dalam keputusan yang mempengaruhi pekerjaan mereka, menyuarakan pendapat yang jujur, dan secara konstruktif mengkritik dan melawan tradisi. Ini mungkin melibatkan reorientasi organisasi dan mengubah perilaku yang mengakar. Sangatlah penting suatu kepemimpinan yang mengkomunikasikan visi yang jelas, menciptakan rasa urgensi, menekankan pelatihan berkelanjutan, dan merangsang pekerja dan manajer untuk sama-sama terlibat dalam jenis eksperimen secara kooperatif yang merupakan landasan penting bagi pembelajaran organisasi.

Kepemimpinan harus mengidentifikasi visi, menyelaraskan karyawan di semua tingkat organisasi dengan visi tersebut, dan memotivasi karyawan untuk mencapai visi tersebut. Perubahan membutuhkan kepemimpinan.

Aspek penting dari suatu kepemimpinan meliputi:

- a. Arah yang jelas
- b. Tujuan dan alasan yang fokus
- c. Ketersediaan untuk membiarkan orang:
 - 1) Membuat kesalahan tanpa menyalahkan atau membalas
 - 2) Mengekspresikan perasaan mereka secara terbuka
 - 3) Mendapatkan penghargaan atas ide, pekerjaan, dan kesuksesan mereka

Elemen yang diperlukan untuk perubahan meliputi:

- a. Perubahan tujuan
- b. Perubahan visi
- c. *Champion*, sponsor, fasilitator, tim
- d. Pelatihan
- e. Sistem yang memungkinkan terwujudnya *Lean*
- f. Metrik kinerja proses

Ada beberapa faktor dalam keberhasilan implementasi TPM. Pertama, kepemimpinan harus mempersiapkan dan memotivasi orang melalui orientasi yang luas untuk perbaikan terus-menerus, kualitas, dan pelatihan serta merekrut pekerja dengan keterampilan yang sesuai. Elemen kunci dari orientasi ini adalah untuk menciptakan pemahaman yang sama tentang kebutuhan untuk mengimplementasikan TPM. Kepemimpinan juga harus menyusun implementasi TPM dengan fokus pada keterlibatan total karyawan. Ini dimungkinkan oleh

kepemimpinan yang mendorong pengambilan keputusan dan pengembangan sistem ke tingkat yang paling rendah. Penting juga untuk berbagi informasi, mengelola ekspektasi, dan mengidentifikasi serta memberdayakan para pendukung terutama manajer operasional.

Aspek kunci lainnya adalah menciptakan suasana eksperimen dengan menoleransi kesalahan dan bersabar. Kepemimpinan harus menentukan ukuran kinerja yang jelas dan realistis, terukur, dan adanya sistem penghargaan serta menyingkirkan tujuan kinerja yang kaku selama implementasi. Kebutuhan untuk melaksanakan proyek percontohan sebelum menerapkan budaya di seluruh organisasi sangat penting. Kepemimpinan juga harus fokus pada penyediaan saluran komunikasi yang jelas dan konsisten. Fakta bahwa manajemen ingin karyawan mengetahui bagaimana akhir suatu organisasi mendorong karyawan untuk terlibat dalam tantangan besar. Ini dapat dicapai melalui papan yang mudah dilihat dengan metrik utama dan tiga tiang lampu dengan warna hijau, kuning, dan merah di sel produksi. Pengawasan kinerja visual adalah bagian penting dari komunikasi yang jelas. Metrik harus diterbitkan dan ditampilkan untuk digunakan sebagai metrik kinerja harian melalui tim atau departemen *lean* atau papan indikator kinerja utama yang memungkinkan pemasangan metrik dan meningkatkan komunikasi dalam sub-kelompok.

CEO dan manajemen atas harus terlibat secara aktif dan nyata dalam memantau dan memperbarui metrik. Kepemimpinan juga harus mengatasi masalah "Apa untungnya bagi saya?" Kepemimpinan harus menangani masalah ketidaksesuaian kompensasi. Ini melibatkan pembersihan kerangka di internal perusahaan melalui komunikasi yang jelas dan transparan. Yang teratas dalam daftar adalah ingkar janji, rencana insentif yang tidak adil untuk memilih kelompok, dan kurangnya keadilan. Oleh karena itu, definisi yang jelas tentang "apa untungnya bagi saya" harus muncul sebelum memulai penerapan TPM karena cara orang diberi kompensasi dan termotivasi secara langsung mempengaruhi seberapa sukses penerapannya. Bagian dari penerapan TPM yang sukses bergantung pada kerangka organisasi. Identifikasi yang terbaik dari manajemen puncak yang akan secara aktif mendukung penerapan TPM. *Champion* juga perlu menyediakan, waktu untuk menghadiri semua presentasi *lean*/proses perbaikan, dan siap untuk membuat keputusan cepat berdasarkan pemahaman mereka tentang manfaat yang akan diperoleh dari penerapan TPM.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustiady, T., & Badiru, A. B. (2012a). *Statistical Techniques for Project Control*. CRC Press.
- Agustiady, T., & Badiru, A. B. (2012b). *Sustainability: Utilizing Lean Six Sigma Techniques*. CRC Press.
- Agustiady, T. K., & Cudney, E. A. (2016). *Total Productive Maintenance: Strategies and Implementation Guide*. CRC Press.
- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Strategies and success factors for overcoming challenges in TPM implementation in Indian manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(2), 123–147.
- AMC Pamphlet No. 750-2. (1985). *Guide to Reliability Centered Maintenance*. Department of the Army.
- AMCP 706-132. (1975). *Engineering Design Handbook: Maintenance Engineering Techniques*. Department of Defense.
- AMCP-766-133. (1976). *Engineering Design Handbook: Maintainability Engineering Theory and Practice*. Department of Defense.
- Blanchard, B. S., Verma, D., & Peterson, E. L. (1995). *Maintainability*. John Wiley & Sons.
- Boucly, F. (1998). *Le management de la maintenance. Evolution et mutation*. Afnor.
- Brauer, D. C., & Brauer, G. D. (1987). Reliability-centered maintenance. *IEEE Transac. Reliability*, 36, 17–24.
- Campbell, J. D. (1995). *Uptime. Strategies for excellence in maintenance management*. Productivity Press.
- Campbell, J. D., & Jardine, A. K. S. (2001). *Maintenance excellence: Optimizing equipment life-cycle decisions*. Marcel Dekker.
- Cudney, E. (2009). . *Using Hoshin Kanri to Improve the Value Stream*. Productivity Press.
- Cudney, E., Furterer, S., & Dietrich, D. (2013). *Lean Systems: Applications and Case Studies in Manufacturing, Service, and Healthcare*. CRC Press.
- Cudney, E., & Kestle, R. (2010). *Implementing Lean Six Sigma throughout the Supply Chain: The Comprehensive and Transparent Case Study*. Productivity Press.

- Dhillon, B. S. (1983a). *Reliability Engineering in Systems Design and Operation*. Van Nostrand Reinhold Co.
- Dhillon, B. S. (1983b). *Systems Reliability, Maintainability, and Management*. Petrocelli Books.
- Dhillon, B. S. (1988). *Mechanical Reliability: Theory, Models, and Applications*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Dhillon, B. S. (1999). *Design Reliability: Fundamentals and Application*. CRC Press.
- Dhillon, B. S. (2002). *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. CRC Press.
- Dhillon, B. S., & Singh, C. (1981). *Engineering Reliability: New Techniques and Applications*. John Wiley & Sons.
- Duffuaa, S. O., Raouf, A., & Campbell, J. D. (2000). *Planning and control of maintenance systems*. John Wiley and Sons.
- EN 13306:2001. (2001). *Maintenance Terminology. European Standard. CEN (European Committee for Standardization)*.
- Eti, M. C., Ogaji, S. O. T., & Probert, S. D. (2004). Implementing total productive maintenance in Nigerian manufacturing industries. *Applied Energy*, 70(4), 385–401.
- Huthwaite, B. (2004). *The Lean Design Solution*. Institute for Lean Design.
- Jardine, A. K. S. (1973). *Maintenance, Replacement and Reliability*. Pitman Publishing.
- Kearney, A. T. (2003). *The Line on Design: How to Reduce Material Cost by Eliminating Design Waste*. <http://www.atkearney.com>
- Levitt, J. (1997a). *Maintenance Management*. Industrial Press.
- Levitt, J. (1997b). Managing preventing maintenance. *Maintenance Technology*, February, 20–30.
- Marquez, A. C. (2007). *Maintenance Management Framework*. Springer Series in Reliability Engineering.
- Mascitelli, R. (2004). *The Lean Design Guidebook*. Technology Perspectives.
- McKenna, T., & Oliverson, R. (1997). *Glossary of Reliability and Maintenance Terms*. Gulf Publishing Company.

- MICOM 750-8. (1972). *Maintenance of Supplies and Equipment*. Department of Defense.
- Modgil, S., & Sharma, S. (2016). Total productive maintenance, total quality management and operational performance: An empirical study of Indian pharmaceutical industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22(4), 353–377.
- Moubray, J. (1997). *Reliability Centered Maintenance*. Industrial Press.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: total productive maintenance.(Translation)*. Productivity Press.
- Nakajima, S. (1989). *An introduction to TPM*. Productivity Press.
- NASA. (1996). *Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment*. National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- NAVAIR 00-25-403. (1996). *Guidelines for the Naval Aviation Reliability-Centered Maintenance Process*. Naval Air Systems Command, Department of Defense.
- Netherton, D. (1999). RCM tasks. *Maintenance Technology*, 7/8, 61–69.
- Niebel, B. W. (1994). *Engineering Maintenance Management*. Marcel Dekker.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability Centered Maintenance*. Dolby Access Press.
- Omdahl, T. P. (1988). *Reliability, Availability, and Maintainability (RAM) Dictionary*. ASQC Quality Press.
- Palmer, R. D. (1999). *Maintenance Planning and Scheduling*. Mc Graw Hill.
- Patton, J. D. (1983). *Preventive Maintenance*. Instrument Society of America, Research Triangle Park.
- Picknell, J., & Steel, K. A. (1997). Using a CMMS to support RCM. *Maintenance Technology*, 10, 110–117.
- RADC. (1988). *Reliability Engineer's Toolkit*. The Systems Reliability and Engineering Division, Rome Air Development Center, Griffiss Air Force Base, Rome.
- Robinson, C. J., & Ginder, A. P. (1995). *Implementing TPM: The North American Experience*. Productivity Press.

- Rosenheim, D. E. (1958). Analysis of reliability improvement through redundancy. *Proceedings of the New York University Conference on Reliability Theory, New York University, New York*, 119–142.
- Shenoy, D., & Bhadury, B. (1998). *Maintenance resources management: Adapting MRP*. Taylor and Francis.
- Shooman, M. L. (1968). *Probabilistic Reliability: An Engineering Approach*. McGraw-Hill.
- Vagliasindi, F. (1989). *Gestire la manutenzione. Perche e come*. Franco Angeli.
- Von Alven, W. H. (1964). *Reliability Engineering*. Prentice-Hall.
- Westerkamp, T. A. (1997). *Maintenance Manager's Standard Manual*. Prentice-Hall.
- Wild, R. (1985). *Essentials of Production and Operations Management*. Holt, Rinehart, and Winston.
- Wireman, T. (1990). *World class maintenance management*. Industrial Press.
- Wireman, T. (1998). *Developing performance indicators for managing maintenance*. Industrial Press.