BUKU REFERENSI

REKAYASA PERAWATAN MESIN

Pendekatan Preventive, Predictive, dan Corrective Maintenance



Fardinal, SST., MPdT
Ir. Adriansyah, ST, MT
Rivanol Chadry ST, MT
Ir. Menhendry, Dipl. Ing. HTL, M.Eng
Rakiman, ST., MT
Rina, S.Pd., M.T

BUKU REFERENSI

REKAYASA PERAWATAN MESIN

Pendekatan *Preventive, Predictive,* dan *Corrective Maintenance*

Fardinal, SST., MPdT
Ir. Adriansyah, ST, MT
Rivanol Chadry ST, MT
Ir. Menhendry, Dipl. Ing. HTL, M.Eng
Rakiman, ST., MT
Rina, S.Pd., M.T

PT MEDIA PENERBIT INDONESIA

BUKU REFERENSI

REKAYASA PERAWATAN MESIN

Pendekatan *Preventive, Predictive*, dan *Corrective Maintenance*

Ditulis oleh:

Fardinal, SST., MPdT
Ir. Adriansyah, ST, MT
Rivanol Chadry ST, MT
Ir. Menhendry, Dipl. Ing. HTL, M.Eng
Rakiman, ST., MT
Rina, S.Pd., M.T

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang keras memperbanyak, menerjemahkan atau mengutip baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit.

ISBN: 978-634-316-101-1
X + 243 hlm; 18,2 x 25,7 cm.
Cetakan I, oktober 2026

Desain Cover dan Tata Letak:
Melvin Mirsal

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh
PT Media Penerbit Indonesia
Royal Suite No. 6C, Jalan Sedap Malam IX, Sempakata
Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan 20131
Telp: 081362150605
Email: ptmediapenerbitindonesia@gmail.com
Web: https://mediapenerbitindonesia.com
Anggota IKAPI No.088/SUT/2024

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas selesainya penyusunan buku referensi yang berjudul "Rekayasa Perawatan Mesin: Pendekatan *Preventive*, *Predictive*, dan *Corrective Maintenance*". Buku ini disusun sebagai upaya untuk menghadirkan pembahasan yang sistematis dan aplikatif mengenai bidang rekayasa perawatan mesin, sebuah disiplin ilmu yang memiliki peran strategis dalam menjaga keandalan, keselamatan, dan produktivitas sistem produksi di berbagai sektor industri.

Perkembangan teknologi industri yang begitu pesat menuntut adanya pemahaman yang mendalam mengenai bagaimana suatu peralatan produksi dapat dipertahankan performanya sepanjang umur pakainya secara efisien. Oleh karena itu, buku ini disusun dengan memadukan konsep-konsep fundamental keandalan mesin dengan tinjauan literatur terkini dari berbagai jurnal ilmiah nasional maupun internasional, sehingga diharapkan dapat memberikan wawasan yang relevan dengan perkembangan praktik industri saat ini.

Pada tahap awal penyusunannya, buku ini memuat dua bab pembuka yang membahas konsep dasar rekayasa perawatan mesin serta keandalan dan kegagalan mesin, sebagai fondasi pemahaman sebelum pembaca melangkah pada pembahasan strategi perawatan yang lebih spesifik pada bab-bab selanjutnya. Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan pada edisi berikutnya.

Penyusunan buku ini juga dilandasi oleh keprihatinan penulis terhadap masih terbatasnya literatur berbahasa Indonesia yang membahas rekayasa perawatan mesin secara komprehensif dan berbasis riset terkini, meskipun kebutuhan industri nasional terhadap sumber daya manusia yang kompeten di bidang ini terus meningkat seiring dengan pertumbuhan sektor manufaktur dan industri berat di berbagai wilayah tanah air. Melalui buku ini, penulis berupaya menjembatani

kesenjangan tersebut dengan menyajikan materi yang tidak hanya bersifat teoretis, tetapi juga aplikatif dan relevan dengan konteks industri nasional.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan inspirasi selama proses penyusunan buku ini, baik secara langsung maupun tidak langsung. Ucapan terima kasih khusus disampaikan kepada rekan-rekan akademisi dan praktisi industri yang telah berbagi wawasan berharga mengenai praktik perawatan mesin di lapangan, yang turut memperkaya perspektif penulis dalam menyusun setiap bab dalam buku ini.

Akhir kata, penulis berharap buku ini dapat memberikan manfaat bagi mahasiswa, akademisi, praktisi industri, maupun pembaca umum yang memiliki ketertarikan pada bidang rekayasa perawatan mesin, serta dapat menjadi salah satu rujukan yang memperkaya khazanah keilmuan teknik di Indonesia.

Salam Hangat

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **iii**
DAFTAR TABEL ..... **vii**
DAFTAR GAMBAR ..... **ix**

PENDAHULUAN **1**

BAB 1 KONSEP DASAR REKAYASA PERAWATAN MESIN **5**
1.1 Pengertian dan Ruang Lingkup Rekayasa Perawatan Mesin 5
1.2 Tujuan dan Fungsi Perawatan Mesin 11
1.3 Perkembangan Sistem *Maintenance* di Industri 17
1.4 Peran Perawatan dalam Keandalan dan Produktivitas 24
Rangkuman Bab 1 29
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 1 30

BAB 2 KEANDALAN DAN KEGAGALAN MESIN **33**
2.1 Konsep *Reliability*, *Maintainability*, dan *Availability* 33
2.2 Karakteristik dan Pola Kegagalan Mesin 39
2.3 Faktor Penyebab Kerusakan Mesin 45
2.4 Analisis Kegagalan pada Sistem Mesin 52
Rangkuman Bab 2 58
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 2 59

BAB 3 MANAJEMEN PERAWATAN MESIN **63**
3.1 Perencanaan dan Penjadwalan Perawatan 63
3.2 Organisasi dan Sumber Daya *Maintenance* 66
3.3 Pengelolaan Suku Cadang dan Inventori 69
3.4 Dokumentasi dan Sistem Informasi Perawatan 72
Rangkuman Bab 3 74
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 3 75
BAB 4 *PREVENTIVE MAINTENANCE* **77**

4.1 Konsep dan Prinsip *Preventive Maintenance* 77
4.2 Penyusunan Program *Preventive Maintenance* 80
4.3 Inspeksi dan Pelumasan Berkala 82
4.4 Evaluasi Efektivitas *Preventive Maintenance* 85
Rangkuman Bab 4 87
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 4 88

BAB 5 *PREDICTIVE MAINTENANCE* 91
5.1 Konsep dan Strategi *Predictive Maintenance* 91
5.2 *Condition monitoring* pada Mesin Industri 93
5.3 Teknik Diagnostik dan Prediksi Kerusakan 96
5.4 Implementasi *Predictive Maintenance* di Industri 98
Rangkuman Bab 5 101
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 5 101

BAB 6 *CORRECTIVE MAINTENANCE* 103
6.1 Konsep dan Jenis *Corrective Maintenance* 103
6.2 Prosedur *Troubleshooting* Mesin 109
6.3 Teknik Perbaikan dan Penggantian Komponen 115
6.4 Evaluasi Tindakan *Corrective Maintenance* 120
Rangkuman Bab 6 126
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 6 127

BAB 7 ANALISIS DAN DIAGNOSTIK KONDISI MESIN 129
7.1 Analisis Getaran (*Vibration Analysis*) 129
7.2 Analisis Termografi dan Suhu Operasi 134
7.3 Analisis Pelumas dan Kondisi Komponen 139
7.4 Interpretasi Data Monitoring Mesin 144
Rangkuman Bab 7 149
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 7 150

BAB 8 *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE* (RCM) 153
8.1 Konsep dan Prinsip RCM 153
8.2 Analisis Fungsi dan Kegagalan Sistem 159
8.3 Penentuan Strategi Perawatan Berbasis RCM 163
8.4 Implementasi RCM pada Sistem Industri 169
Rangkuman Bab 8 174

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 8 175

BAB 9 *TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE* (TPM) 177
9.1 Konsep dan Pilar TPM..... 177
9.2 *Autonomous Maintenance* 182
9.3 *Planned Maintenance* dan *Continuous Improvement*..... 187
9.4 Pengukuran Kinerja melalui OEE 192
Rangkuman Bab 9..... 196
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 9 197

BAB 10 KESELAMATAN DAN STANDAR DALAM PERAWATAN MESIN 199
10.1 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) dalam *Maintenance* 199
10.2 *Lock Out Tag Out* (LOTO) dan Pengendalian Risiko 203
10.3 Standar dan Regulasi Perawatan Mesin..... 208
10.4 Audit dan Evaluasi Sistem Perawatan 213
Rangkuman Bab 10..... 217
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 10 218

BAB 11 PENUTUP 221

DAFTAR PUSTAKA 225
GLOSARIUM 233
INDEKS..... 237
BIOGRAFI PENULIS..... 241
SINOPSIS 243

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Perbandingan Ruang Lingkup Pendekatan Perawatan Mesin 101
Tabel 1.2 Dimensi Tujuan dan Fungsi Perawatan Mesin 167
Tabel 2.1 Indikator Kunci dalam Analisis *Reliability*, *Maintainability*, dan *Availability* 438
Tabel 2.2 Klasifikasi Faktor Penyebab Kerusakan Mesin 55
Tabel 2.3 Perbandingan Metode Analisis Kegagalan Mesin 60
Tabel 3.1 Perbedaan Fungsi Perencanaan dan Penjadwalan Perawatan 68
Tabel 3.2 Klasifikasi Suku Cadang Berdasarkan Kekritisan dan Pergerakan 73
Tabel 4.1 Perbandingan *Time-Based* dan *Usage-Based Preventive Maintenance* 879
Tabel 5.1 Perbandingan *Preventive Maintenance* dan *Predictive Maintenance* 95
Tabel 6.1 Perbandingan Jenis *Corrective maintenance* 10813
Tabel 6.1b Contoh Klasifikasi Gejala Umum dan Kemungkinan Penyebab pada Mesin Berputar 11419
Tabel 6.2 Kriteria Keputusan Repair vs Replace pada Komponen Kritis 12025
Tabel 6.3 Indikator Kunci Evaluasi Kinerja *Corrective Maintenance* 12530
Tabel 7.1 Pola Frekuensi Karakteristik pada Analisis Getaran Mesin Berputar 13440
Tabel 7.2 Korelasi Multi-Parameter untuk Diagnosis Kerusakan Bantalan 14855
Tabel 8.1 Tujuh Pertanyaan Fundamental dalam Metodologi RCM 15864
Tabel 8.2 Contoh Lembar Kerja Analisis Fungsi dan Kegagalan RCM 16370
Tabel 8.3 Daftar Periksa Tahapan Implementasi RCM pada Organisasi 17481
Tabel 9.1 Delapan Pilar *Total Productive Maintenance* 18290

Tabel 9.2 Siklus PDCA dalam Proyek *Focused Improvement* (Kaizen)..... 200
Tabel 9.3 Komponen Perhitungan *Overall equipment effectiveness* (OEE) 204
Tabel 10.1 Hierarki Pengendalian Risiko dalam Aktivitas Perawatan Mesin..... 213
Tabel 10.2 Ringkasan Standar dan Regulasi Kunci dalam Perawatan Mesin..... 223
Tabel 10.3 Contoh Ruang Lingkup Audit Sistem Perawatan Komprehensif 228

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kedudukan Rekayasa Perawatan dalam Sistem Produksi 111
Gambar 1.2 Evolusi Pendekatan Perawatan Mesin dari Masa ke Masa 25
Gambar 1.3 Keterkaitan Perawatan Mesin dengan Keandalan dan Produktivitas 30
Gambar 2.1 Kurva Bak Mandi (*Bathtub Curve*) Pola Kegagalan Komponen Mesin 48
Gambar 2.2 Alur Umum Proses Analisis Kegagalan Mesin 658
Gambar 3.1 Perbandingan Struktur Organisasi Perawatan 769
Gambar 4.1 Siklus Pelaksanaan Program *Preventive maintenance* 87
Gambar 5.1 Teknik *Condition monitoring* pada Mesin Berputar 98
Gambar 6.1 Alur Sistematis Prosedur *Troubleshooting* Mesin 11519
Gambar 7.1 Informasi Diagnostik dari Analisis Pelumas 14451
Gambar 8.1 Konsep P-F Interval dalam Penentuan Strategi RCM 16875
Gambar 9.1 Tujuh Langkah Implementasi *Autonomous Maintenance* 18795
Gambar 10.1 Alur Prosedur LOTOTO (*Lock Out, Tag Out, Try Out*) 219

PENDAHULUAN

Industri manufaktur dan proses di seluruh dunia, termasuk di Indonesia, senantiasa dihadapkan pada tantangan untuk menjaga peralatan produksinya tetap beroperasi secara andal, efisien, dan aman sepanjang waktu. Di tengah persaingan global yang semakin ketat dan tuntutan efisiensi biaya yang semakin tinggi, kemampuan suatu organisasi dalam mengelola aset produksinya melalui sistem perawatan yang tepat menjadi salah satu faktor penentu keberhasilan bisnis jangka panjang. Buku referensi ini disusun untuk menjawab kebutuhan tersebut, dengan menghadirkan pembahasan yang sistematis mengenai rekayasa perawatan mesin, mulai dari konsep dasar hingga strategi penerapan yang aplikatif di lapangan.

Rekayasa perawatan mesin merupakan disiplin ilmu yang terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi, mulai dari pendekatan konvensional yang bersifat reaktif hingga pendekatan modern yang berbasis data dan kecerdasan buatan. Buku ini secara khusus mengangkat tiga pendekatan utama dalam strategi perawatan mesin, yaitu *preventive maintenance*, *predictive maintenance*, dan *corrective maintenance*, yang masing-masing memiliki karakteristik, kelebihan, dan konteks penerapan yang berbeda-beda. Pemahaman yang komprehensif terhadap ketiga pendekatan tersebut memungkinkan pembaca untuk merancang strategi perawatan yang optimal, disesuaikan dengan karakteristik mesin dan kebutuhan organisasi masing-masing.

Secara keseluruhan, buku ini terdiri atas sebelas bab yang disusun secara sistematis, dimulai dari konsep dasar rekayasa perawatan mesin, keandalan dan kegagalan mesin, manajemen perawatan, hingga pembahasan mendalam mengenai *preventive, predictive*, dan *corrective maintenance*, analisis dan diagnostik kondisi mesin, *reliability centered maintenance* (RCM), *total productive maintenance* (TPM), serta keselamatan dan standar dalam perawatan mesin. Pada edisi penerbitan ini, seluruh sebelas bab telah lengkap

disajikan, yaitu Bab 1 mengenai konsep dasar rekayasa perawatan mesin, Bab 2 mengenai keandalan dan kegagalan mesin, Bab 3 mengenai manajemen perawatan mesin, Bab 4 mengenai *preventive maintenance*, Bab 5 mengenai *predictive maintenance*, Bab 6 mengenai *corrective maintenance*, Bab 7 mengenai analisis dan diagnostik kondisi mesin, Bab 8 mengenai *reliability centered maintenance* (RCM), Bab 9 mengenai *total productive maintenance* (TPM), Bab 10 mengenai keselamatan dan standar dalam perawatan mesin, serta Bab 11 sebagai penutup yang merangkum benang merah keseluruhan pembahasan buku ini.

Kesebelas bab ini dirancang untuk membangun kerangka berpikir yang runtut, mulai dari pemahaman konseptual mengenai perawatan mesin, keandalan dan kegagalan, kerangka manajerial dalam mengelola fungsi perawatan, hingga penerapan teknis ketiga strategi perawatan utama, yaitu *preventive, predictive*, dan *corrective maintenance*, dilengkapi dengan pembahasan mendalam mengenai teknik analisis dan diagnostik kondisi mesin, kerangka kerja *reliability centered maintenance* yang mengintegrasikan ketiga strategi tersebut secara sistematis, pendekatan *total productive maintenance* yang melibatkan seluruh elemen organisasi, serta aspek keselamatan dan standar yang menaungi keseluruhan praktik perawatan. Bab 9 membahas konsep dan pilar TPM, *autonomous maintenance*, *planned maintenance* dan *continuous improvement*, hingga pengukuran kinerja melalui OEE. Bab 10 menguraikan keselamatan dan kesehatan kerja, prosedur *lock out tag out*, standar dan regulasi, hingga audit dan evaluasi sistem perawatan. Bab 11 menutup keseluruhan pembahasan dengan merangkum benang merah dan memberikan refleksi bagi pembaca.

Buku ini disusun dengan memadukan landasan teori klasik dalam bidang keandalan dan perawatan dengan tinjauan literatur terkini dari berbagai jurnal ilmiah nasional dan internasional terbitan lima tahun terakhir, sehingga pembahasannya tetap relevan dengan perkembangan praktik industri masa kini. Berbagai contoh, tabel, dan diagram disertakan di sepanjang buku untuk membantu pembaca memahami konsep-konsep yang dibahas secara lebih konkret dan aplikatif. Setiap bab juga dilengkapi dengan rangkuman dan pertanyaan

diskusi yang dapat digunakan sebagai bahan evaluasi pemahaman, baik dalam konteks pembelajaran mandiri maupun dalam konteks perkuliahan dan pelatihan di lingkungan industri.

Buku referensi ini ditujukan bagi mahasiswa teknik mesin, teknik industri, dan program studi terkait lainnya, para praktisi dan teknisi perawatan di lingkungan industri, akademisi yang mengampu mata kuliah terkait keandalan dan perawatan mesin, serta pembaca umum yang memiliki ketertarikan untuk memperdalam pemahaman mengenai bidang rekayasa perawatan mesin. Penulis berharap buku ini dapat menjadi salah satu rujukan yang bermanfaat dalam memperkaya khazanah keilmuan teknik perawatan di Indonesia, sekaligus mendorong penerapan praktik perawatan yang lebih baik di berbagai sektor industri nasional.

Sistematika penulisan buku ini dirancang agar setiap bab dapat dipahami secara mandiri sekaligus saling berkaitan dengan bab lainnya dalam satu kesatuan alur berpikir yang runtut. Setiap bab dibuka dengan uraian konseptual yang disertai kutipan dan sitasi dari literatur ilmiah terkini, dilengkapi dengan tabel dan diagram yang memvisualisasikan konsep-konsep kunci, dan ditutup dengan rangkuman serta pertanyaan diskusi yang dapat digunakan pembaca untuk menguji pemahamannya secara mandiri maupun dalam konteks diskusi kelompok di lingkungan akademik atau pelatihan industri.

Penulis menyadari bahwa bidang rekayasa perawatan mesin terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi, sehingga buku ini akan terus disempurnakan pada edisi-edisi berikutnya seiring dengan penerbitan bab-bab lanjutan yang membahas strategi *preventive, predictive*, dan *corrective maintenance* secara lebih mendalam, analisis dan diagnostik kondisi mesin, *reliability centered maintenance, total productive maintenance*, hingga aspek keselamatan dan standar dalam perawatan mesin. Pembaca yang menantikan pembahasan lebih lanjut mengenai penerapan teknis dari ketiga strategi perawatan tersebut dipersilakan untuk mengikuti penerbitan edisi lanjutan dari buku referensi ini.



BAB 1
KONSEP DASAR REKAYASA PERAWATAN MESIN

1.1 Pengertian dan Ruang Lingkup Rekayasa Perawatan Mesin

Rekayasa perawatan mesin, atau yang dalam kepustakaan internasional dikenal sebagai *maintenance engineering*, merupakan cabang ilmu keteknikan yang mempelajari secara sistematis bagaimana suatu peralatan atau sistem produksi dapat dipertahankan fungsinya sepanjang umur pakai yang direncanakan. Bidang ini tidak sekadar berbicara tentang tindakan memperbaiki mesin yang rusak, tetapi mencakup keseluruhan siklus mulai dari perancangan strategi perawatan, pemilihan metode inspeksi, penjadwalan tindakan, hingga evaluasi kinerja peralatan secara berkelanjutan. Dalam konteks industri modern, perawatan tidak lagi dipandang sebagai aktivitas pendukung yang bersifat reaktif, melainkan sebagai fungsi strategis yang menopang keberlangsungan proses produksi secara keseluruhan.

Secara definitif, *maintenance* dapat dipahami sebagai kombinasi dari seluruh tindakan teknis, administratif, dan manajerial yang dilakukan sepanjang siklus hidup suatu item dengan tujuan mempertahankan atau mengembalikan item tersebut pada kondisi yang mampu menjalankan fungsi yang dipersyaratkan. Definisi ini menegaskan bahwa aktivitas perawatan memiliki dua orientasi utama, yaitu tindakan yang bersifat menjaga (*preservative*) agar kerusakan tidak terjadi, dan tindakan yang bersifat memulihkan (*restorative*) ketika kegagalan telah terjadi. Kajian mengenai kebijakan perawatan yang memadukan pendekatan korektif dan preventif menegaskan bahwa pemilihan strategi yang tepat sangat bergantung pada karakteristik kegagalan komponen serta konsekuensi operasional yang ditimbulkan apabila komponen tersebut berhenti berfungsi (Aulia & Widjajati, 2021).

Ruang lingkup rekayasa perawatan mesin pada dasarnya sangat luas dan bersinggungan dengan berbagai disiplin ilmu lain, mulai dari teknik mesin, teknik industri, ilmu material, hingga teknologi informasi. Cakupan tersebut meliputi perencanaan kebutuhan perawatan berdasarkan analisis risiko kegagalan, penyusunan prosedur inspeksi dan pelumasan, pengelolaan suku cadang dan logistik perawatan, penerapan teknologi pemantauan kondisi berbasis sensor, hingga analisis data historis kerusakan untuk keperluan pengambilan keputusan. Cakupan yang luas ini menjadikan rekayasa perawatan sebagai bidang interdisipliner yang menuntut penguasaan aspek teknis sekaligus manajerial secara seimbang, sebab kegagalan dalam salah satu aspek dapat berdampak pada efektivitas keseluruhan sistem perawatan yang dibangun.

Dalam praktiknya, ruang lingkup rekayasa perawatan mesin lazim dibagi menjadi tiga kelompok besar pendekatan, yaitu *corrective maintenance* yang dilakukan setelah kegagalan terjadi, *preventive maintenance* yang dilakukan secara terjadwal untuk mencegah kegagalan, dan *predictive maintenance* yang mengandalkan data kondisi aktual mesin untuk memprediksi waktu kegagalan. Ketiga pendekatan tersebut bukanlah pilihan yang saling eksklusif, melainkan saling melengkapi dalam suatu kerangka manajemen perawatan yang terintegrasi. Tinjauan literatur mengenai keandalan dalam manajemen operasional menegaskan bahwa organisasi yang matang dalam pengelolaan asetnya cenderung mengombinasikan ketiga pendekatan tersebut secara proporsional sesuai dengan kritikalitas mesin dan dampak ekonomis dari kegagalannya (Aulia dkk., 2026).

Pemahaman yang tepat mengenai batas dan cakupan rekayasa perawatan mesin menjadi penting karena akan menentukan bagaimana organisasi menyusun struktur manajemen perawatannya. Sebagian perusahaan masih memandang unit perawatan sebagai fungsi pendukung yang bersifat administratif semata, padahal secara konseptual perawatan merupakan bagian integral dari rekayasa keandalan sistem produksi. Pergeseran cara pandang ini sejalan dengan perkembangan pendekatan berbasis risiko dan keandalan yang menempatkan aktivitas perawatan sebagai instrumen pengendalian

mutu, biaya, dan keselamatan kerja secara simultan, bukan sekadar upaya menjaga mesin tetap menyala.

Sebagai suatu bidang keilmuan, rekayasa perawatan mesin juga memiliki objek kajian yang beragam, mulai dari komponen tunggal seperti bantalan dan sabuk transmisi, hingga sistem kompleks seperti lini produksi otomatis yang melibatkan ratusan sensor dan aktuator. Pada level komponen, kajian perawatan berfokus pada karakteristik material dan mekanisme keausan spesifik, sedangkan pada level sistem, kajian perawatan lebih menekankan interaksi antar-subsistem dan dampak kegagalan satu komponen terhadap keseluruhan proses produksi. Perbedaan level analisis ini menuntut pendekatan metodologis yang berbeda pula, sehingga seorang perekayasa perawatan dituntut memiliki kemampuan berpikir dari perspektif mikro maupun makro secara bersamaan.

Ruang lingkup rekayasa perawatan mesin juga mencakup aspek regulasi dan standar teknis yang berlaku, baik pada tingkat nasional maupun internasional. Standar semacam ini biasanya mengatur prosedur inspeksi keselamatan, klasifikasi tingkat kegagalan, hingga persyaratan sertifikasi bagi teknisi perawatan pada peralatan bertekanan atau instalasi listrik industri. Kepatuhan terhadap standar tersebut tidak hanya menjadi kewajiban hukum, tetapi juga menjadi jaminan mutu bahwa proses perawatan telah dilaksanakan sesuai kaidah keteknikan yang teruji, sehingga risiko kegagalan yang membahayakan pekerja maupun lingkungan sekitar dapat diminimalkan secara sistematis.

Dari sisi akademik, rekayasa perawatan mesin merupakan bidang yang terus berkembang seiring bertambahnya volume penelitian yang membahas integrasi antara ilmu keandalan klasik dengan teknologi digital mutakhir. Perkembangan ini tercermin dari semakin banyaknya publikasi ilmiah yang mengkaji penerapan algoritma kecerdasan buatan untuk mendukung pengambilan keputusan perawatan, sekaligus menegaskan bahwa disiplin ini tidak bersifat statis, melainkan terus bertransformasi mengikuti kebutuhan industri yang semakin kompleks dan dinamis dari waktu ke waktu.

Rekayasa perawatan mesin juga perlu dipahami sebagai bidang yang menuntut keseimbangan antara pengetahuan teoritis dan

pengalaman praktis di lapangan. Penguasaan teori keandalan, statistik kegagalan, dan prinsip mekanika semata tidak akan cukup tanpa diimbangi dengan pemahaman kontekstual mengenai kondisi operasi nyata suatu mesin, termasuk kebiasaan operator, karakteristik lingkungan kerja, dan keterbatasan sumber daya yang dihadapi organisasi. Kombinasi antara landasan ilmiah yang kokoh dan kepekaan terhadap realitas lapangan inilah yang membedakan seorang perekayasa perawatan yang kompeten dari sekadar teknisi yang hanya menjalankan prosedur perbaikan secara mekanis tanpa pemahaman mendalam mengenai akar permasalahannya.

Ruang lingkup rekayasa perawatan mesin turut mencakup dimensi ekonomi rekayasa (*engineering economy*), yang menuntut kemampuan menganalisis kelayakan investasi perawatan dari sudut pandang finansial. Setiap keputusan mengenai strategi perawatan, misalnya apakah suatu komponen perlu diganti secara preventif atau dibiarkan hingga gagal, memiliki implikasi biaya yang berbeda dan perlu dievaluasi melalui analisis biaya siklus hidup (*life cycle cost*). Kemampuan menerjemahkan keputusan teknis ke dalam bahasa finansial yang dapat dipahami oleh manajemen menjadi keterampilan penting bagi perekayasa perawatan modern, terutama ketika harus mengajukan usulan investasi peralatan pemantauan kondisi atau penambahan sumber daya perawatan kepada pengambil keputusan di level korporat.

Dalam skala organisasi yang lebih luas, ruang lingkup rekayasa perawatan mesin juga bersinggungan dengan manajemen rantai pasok, khususnya terkait pengadaan suku cadang kritis yang memiliki lead time pengiriman panjang atau berasal dari pemasok tunggal. Ketergantungan pada suku cadang impor, misalnya, dapat menjadi titik rentan dalam sistem perawatan apabila tidak diantisipasi melalui perencanaan inventori yang matang, sehingga aspek rantai pasok perlu menjadi bagian integral dari perencanaan strategi perawatan, bukan dipandang sebagai urusan terpisah yang hanya menjadi tanggung jawab departemen pengadaan semata.

Batasan ruang lingkup rekayasa perawatan mesin juga perlu ditegaskan agar tidak tumpang tindih secara berlebihan dengan bidang

rekayasa produksi maupun rekayasa kualitas. Meskipun ketiganya saling berkaitan erat, rekayasa perawatan secara spesifik berfokus pada upaya mempertahankan kapabilitas fungsional peralatan, sementara rekayasa produksi lebih menitikberatkan pada optimasi proses konversi bahan baku menjadi produk jadi, dan rekayasa kualitas berfokus pada pengendalian karakteristik produk akhir. Kejelasan batasan ini penting agar tanggung jawab masing-masing fungsi dalam organisasi dapat didefinisikan secara jelas, sekaligus membuka ruang kolaborasi yang produktif di antara ketiga fungsi tersebut tanpa menimbulkan ambiguitas tanggung jawab.

Cakupan rekayasa perawatan mesin juga mencakup aspek pengembangan kompetensi sumber daya manusia, mengingat efektivitas seluruh sistem perawatan pada akhirnya sangat bergantung pada kualitas teknisi dan insinyur yang menjalankannya. Program pelatihan berkelanjutan, sertifikasi kompetensi teknis, serta transfer pengetahuan antar-generasi teknisi menjadi bagian tidak terpisahkan dari ruang lingkup rekayasa perawatan yang komprehensif, sebab teknologi perawatan tercanggih sekalipun tidak akan memberikan manfaat optimal apabila tidak didukung oleh sumber daya manusia yang memiliki kompetensi memadai untuk mengoperasikan dan menginterpretasikan hasilnya secara tepat.

Terakhir, ruang lingkup rekayasa perawatan mesin juga mencakup dimensi keberlanjutan (*sustainability*), yang semakin mendapat perhatian seiring meningkatnya kesadaran global terhadap isu lingkungan. Praktik perawatan yang baik berkontribusi terhadap keberlanjutan melalui perpanjangan umur pakai aset, pengurangan limbah komponen yang harus diganti prematur, serta optimasi konsumsi energi mesin selama beroperasi. Dimensi keberlanjutan ini menjadikan rekayasa perawatan mesin bukan hanya relevan dari sisi efisiensi operasional semata, tetapi juga sejalan dengan tuntutan tanggung jawab sosial dan lingkungan yang semakin menjadi perhatian utama para pemangku kepentingan industri di seluruh dunia.

Pemahaman komprehensif mengenai ruang lingkup rekayasa perawatan mesin juga perlu mempertimbangkan perbedaan konteks antara industri proses (*process industry*) dan industri manufaktur diskrit

(*discrete manufacturing*). Pada industri proses seperti kilang minyak, petrokimia, atau pembangkit listrik, mesin umumnya beroperasi secara kontinu selama berbulan-bulan tanpa henti, sehingga strategi perawatan harus dirancang untuk meminimalkan kebutuhan penghentian operasi (*shutdown*) yang biayanya sangat tinggi. Sebaliknya, pada industri manufaktur diskrit, mesin lebih sering mengalami siklus hidup-mati yang memberikan lebih banyak kesempatan untuk melakukan inspeksi dan perawatan preventif tanpa mengganggu produksi secara signifikan, sehingga strategi yang diterapkan pun perlu disesuaikan dengan karakteristik operasi masing-masing jenis industri tersebut.

Cakupan rekayasa perawatan mesin juga mencakup pertimbangan terhadap skala waktu perencanaan yang berbeda-beda, mulai dari perencanaan operasional harian, perencanaan taktis bulanan hingga tahunan, sampai perencanaan strategis jangka panjang yang berkaitan dengan siklus hidup aset secara keseluruhan. Perencanaan pada skala waktu yang berbeda ini memerlukan tingkat detail dan jenis data yang berbeda pula, di mana perencanaan operasional harian lebih menekankan pada respons cepat terhadap kondisi aktual mesin, sedangkan perencanaan strategis jangka panjang lebih menekankan pada analisis tren dan proyeksi kebutuhan investasi peralatan di masa mendatang.

Tabel 1.1 Perbandingan Ruang Lingkup Pendekatan Perawatan Mesin

Aspek	*Preventive maintenance*	*Predictive maintenance*	*Corrective maintenance*
Waktu pelaksanaan	Terjadwal berkala	Berdasarkan kondisi aktual	Setelah kegagalan terjadi
Basis pengambilan keputusan	Interval waktu/penggunaan	Data sensor dan diagnostik	Laporan kerusakan
Biaya perawatan	Sedang, terencana	Investasi awal tinggi, jangka panjang efisien	Cenderung tinggi dan tidak terduga
Risiko downtime	Rendah hingga sedang	Rendah	Tinggi
Contoh tindakan	Penggantian oli	Analisis getaran	Penggantian

Aspek	*Preventive maintenance*	*Predictive maintenance*	*Corrective maintenance*
	berkala	dan termografi	komponen yang gagal

Gambar 1.1 Kedudukan Rekayasa Perawatan dalam Sistem Produksi



Diagram ini menunjukkan bahwa rekayasa perawatan mesin bukan fungsi yang berdiri sendiri, melainkan bersinggungan dan berinteraksi secara aktif dengan fungsi perencanaan produksi, manajemen mutu, sumber daya manusia, serta rantai pasok dalam mendukung kinerja perusahaan secara keseluruhan.

1.2 Tujuan dan Fungsi Perawatan Mesin

Tujuan utama dari kegiatan perawatan mesin adalah menjaga agar peralatan produksi senantiasa berada dalam kondisi siap operasi sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan, sehingga proses produksi dapat berjalan tanpa gangguan yang berarti. Tujuan ini tidak berdiri sendiri, melainkan berkaitan erat dengan tujuan perusahaan secara keseluruhan, yaitu mencapai efisiensi biaya produksi, menjaga kualitas produk, serta memenuhi target volume produksi yang telah direncanakan. Kajian mengenai manfaat manajemen perawatan bagi bengkel dan industri menegaskan bahwa keberadaan fungsi perawatan yang terkelola dengan baik berkontribusi langsung terhadap

kelangsungan operasional dan daya saing perusahaan di tengah tuntutan pasar yang semakin ketat (Nasution dkk., 2021).

Fungsi perawatan mesin dapat dijabarkan ke dalam beberapa dimensi yang saling berkaitan. Pertama, fungsi teknis yang berkaitan dengan upaya menjaga performa mekanis, elektris, maupun kontrol dari suatu peralatan agar tetap sesuai dengan parameter desainnya. Kedua, fungsi ekonomis yang berorientasi pada pengendalian biaya total kepemilikan aset, termasuk biaya perawatan, biaya kehilangan produksi akibat downtime, dan biaya penggantian komponen. Ketiga, fungsi keselamatan yang memastikan bahwa mesin yang beroperasi tidak menimbulkan risiko kecelakaan kerja maupun kerusakan lingkungan. Ketiga fungsi ini harus dikelola secara seimbang, sebab penekanan berlebihan pada salah satu aspek dapat mengorbankan aspek lainnya, misalnya penghematan biaya perawatan yang justru meningkatkan risiko kegagalan mendadak dan kecelakaan kerja.

Selain tiga fungsi tersebut, perawatan mesin juga memiliki fungsi strategis dalam mendukung keberlanjutan bisnis jangka panjang. Mesin yang dirawat dengan baik memiliki umur pakai yang lebih panjang, sehingga menunda kebutuhan investasi penggantian aset baru yang biasanya membutuhkan biaya modal besar. Di samping itu, ketersediaan data historis perawatan yang terdokumentasi dengan baik dapat menjadi dasar pengambilan keputusan strategis, misalnya dalam menentukan apakah suatu mesin perlu diperbarui, dimodifikasi, atau dipensiunkan. Fungsi strategis ini semakin relevan ketika perusahaan dihadapkan pada tekanan efisiensi biaya dan tuntutan keberlanjutan operasional dalam jangka panjang.

Tujuan perawatan juga dapat ditinjau dari perspektif kualitas produk yang dihasilkan. Mesin yang tidak dirawat dengan baik cenderung menghasilkan produk dengan variabilitas dimensi atau kualitas yang lebih tinggi, karena komponen yang mengalami keausan akan memengaruhi presisi proses produksi. Oleh karena itu, banyak organisasi manufaktur modern mengaitkan program perawatan mesin dengan sistem manajemen mutu yang mereka terapkan, sehingga perawatan tidak lagi dipandang sebagai biaya semata, melainkan sebagai investasi untuk menjaga konsistensi mutu produk yang

berdampak langsung pada kepuasan pelanggan dan reputasi perusahaan di pasar.

Fungsi perawatan juga dapat ditelaah dari sudut pandang manajemen risiko, di mana setiap potensi kegagalan mesin dipetakan berdasarkan probabilitas kejadian dan tingkat keparahan dampaknya. Pendekatan ini memungkinkan organisasi untuk mengalokasikan sumber daya perawatan secara proporsional, dengan memprioritaskan mesin-mesin yang memiliki risiko tinggi terhadap keselamatan kerja, kerugian finansial, atau gangguan lingkungan. Dengan demikian, fungsi perawatan tidak dijalankan secara merata pada seluruh peralatan tanpa pembedaan, melainkan disesuaikan dengan tingkat kritikalitas masing-masing mesin terhadap keberlangsungan operasi perusahaan secara keseluruhan.

Tujuan lain yang tidak kalah penting adalah menjaga citra dan kepatuhan perusahaan terhadap regulasi keselamatan kerja serta lingkungan. Kegagalan mesin yang menyebabkan kecelakaan kerja atau pencemaran lingkungan dapat menimbulkan konsekuensi hukum dan reputasional yang jauh lebih besar dibandingkan biaya perawatan itu sendiri. Oleh karena itu, banyak perusahaan besar menjadikan kepatuhan terhadap standar keselamatan dan lingkungan sebagai salah satu indikator kinerja utama dari fungsi perawatan, sejajar dengan indikator produktivitas dan efisiensi biaya yang selama ini menjadi fokus utama pengelolaan aset produksi.

Pada tataran operasional sehari-hari, fungsi perawatan juga berperan dalam menjaga konsistensi kapasitas produksi terpasang (*installed capacity*) agar tetap sesuai dengan rencana produksi yang telah ditetapkan oleh manajemen. Ketidaksesuaian antara kapasitas aktual dengan kapasitas rencana akibat mesin yang sering mengalami gangguan dapat berdampak pada ketidakmampuan perusahaan memenuhi komitmen pengiriman kepada pelanggan, yang pada akhirnya dapat merusak hubungan bisnis jangka panjang. Fungsi ini menegaskan bahwa keberadaan unit perawatan yang solid merupakan prasyarat bagi keandalan rantai pasok perusahaan secara menyeluruh.

Tujuan perawatan mesin juga dapat dipahami melalui kacamata siklus hidup aset (*asset life cycle*), yang membentang mulai dari tahap

perencanaan pengadaan, instalasi, operasi, hingga akhirnya penghentian pemakaian atau penggantian aset. Pada setiap tahap siklus hidup tersebut, fungsi perawatan memiliki peran yang berbeda-beda; pada tahap awal, perawatan berfokus pada memastikan instalasi dan komisioning berjalan sesuai standar, sedangkan pada tahap akhir siklus hidup, fungsi perawatan lebih berorientasi pada pengambilan keputusan mengenai kelayakan investasi lanjutan atau penggantian aset secara menyeluruh. Pandangan siklus hidup ini membantu organisasi menghindari kesalahan umum berupa fokus berlebihan pada perawatan jangka pendek tanpa mempertimbangkan dampaknya terhadap keseluruhan umur ekonomis aset.

Fungsi perawatan juga memiliki keterkaitan erat dengan pengelolaan pengetahuan organisasi (*organizational knowledge management*), sebab setiap tindakan perawatan yang dilakukan menghasilkan data dan pengalaman berharga yang dapat digunakan untuk menyempurnakan praktik perawatan di masa mendatang. Organisasi yang mampu mendokumentasikan dan mengelola pengetahuan hasil perawatan secara sistematis akan memiliki keunggulan kompetitif berupa kurva pembelajaran yang lebih cepat dibandingkan organisasi yang mengandalkan pengetahuan tacit pada individu tertentu saja, yang berisiko hilang apabila individu tersebut berpindah tempat kerja atau pensiun tanpa proses alih pengetahuan yang memadai kepada generasi teknisi berikutnya.

Fungsi perawatan mesin juga dapat ditinjau dari perspektif hubungan antara departemen perawatan dengan departemen produksi, yang idealnya terjalin secara kolaboratif dan bukan bersifat konfrontatif. Pada banyak organisasi, kedua departemen ini kerap kali memiliki kepentingan yang tampak bertentangan, di mana produksi menuntut mesin beroperasi terus-menerus untuk mengejar target output, sementara perawatan membutuhkan waktu henti terjadwal untuk melakukan inspeksi dan perbaikan preventif. Fungsi manajemen perawatan yang baik mampu menjembatani kepentingan tersebut melalui komunikasi dan perencanaan bersama, sehingga jadwal perawatan dapat disusun dengan mempertimbangkan rencana produksi tanpa mengorbankan keandalan mesin dalam jangka panjang.

Tujuan perawatan mesin pada akhirnya juga bermuara pada peningkatan kepercayaan diri organisasi dalam merencanakan operasi jangka panjang. Ketika suatu perusahaan memiliki keyakinan tinggi terhadap keandalan peralatannya, mereka dapat mengambil keputusan bisnis yang lebih agresif, misalnya menerima pesanan dalam volume besar dengan tenggat waktu ketat, tanpa harus khawatir berlebihan terhadap risiko gangguan produksi akibat kegagalan mesin yang tidak terduga. Kepercayaan diri operasional semacam ini merupakan aset tidak berwujud yang bernilai strategis, meskipun sering kali tidak tercatat secara eksplisit dalam laporan keuangan perusahaan.

Fungsi perawatan juga berperan penting dalam mendukung fleksibilitas produksi, terutama pada industri yang menerapkan sistem produksi campuran (*mixed model production*) dengan pergantian jenis produk yang relatif sering. Mesin yang memiliki tingkat keandalan tinggi memungkinkan perusahaan melakukan pergantian jalur produksi (*changeover*) dengan lebih percaya diri, tanpa risiko tambahan berupa kegagalan mesin yang muncul akibat penyesuaian konfigurasi produksi. Dengan demikian, fungsi perawatan turut berkontribusi terhadap kemampuan perusahaan dalam merespons perubahan permintaan pasar secara lebih adaptif dan responsif dibandingkan perusahaan dengan tingkat keandalan mesin yang rendah.

Tujuan dan fungsi perawatan pada industri berskala kecil dan menengah tidak selalu identik dengan industri berskala besar, mengingat keterbatasan sumber daya yang sering kali dihadapi oleh pelaku usaha kecil dalam membangun sistem perawatan formal. Meskipun demikian, prinsip dasar mengenai pentingnya menjaga kesiapan operasional mesin tetap berlaku secara universal, sehingga industri kecil dapat menerapkan versi sederhana dari fungsi perawatan yang sama, misalnya melalui pencatatan manual riwayat kerusakan dan penjadwalan pelumasan rutin, tanpa harus bergantung pada sistem informasi perawatan berbasis komputer yang kompleks dan mahal.

Pada akhirnya, keberagaman tujuan dan fungsi perawatan yang telah diuraikan menegaskan bahwa perawatan mesin merupakan aktivitas multidimensi yang tidak dapat direduksi hanya menjadi tindakan teknis semata. Pemahaman yang utuh terhadap keseluruhan

tujuan dan fungsi ini menjadi bekal penting bagi perekayasa perawatan dalam merancang program perawatan yang selaras dengan kebutuhan bisnis organisasi secara menyeluruh, bukan sekadar menjalankan rutinitas teknis tanpa keterkaitan yang jelas dengan tujuan strategis perusahaan secara keseluruhan.

Fungsi perawatan juga dapat ditinjau dari perspektif manajemen perubahan (*change management*), terutama ketika suatu organisasi bertransisi dari pendekatan perawatan konvensional menuju pendekatan yang lebih proaktif dan berbasis data. Transisi semacam ini sering kali menghadapi resistensi dari personel yang telah terbiasa dengan cara kerja lama, sehingga keberhasilan implementasi fungsi perawatan yang baru tidak hanya bergantung pada kesiapan teknologi, tetapi juga pada kesiapan budaya organisasi dan komitmen manajemen dalam mengelola proses perubahan tersebut secara bertahap dan terencana, termasuk melalui program pelatihan dan komunikasi yang efektif kepada seluruh personel yang terlibat.

Terakhir, fungsi perawatan mesin juga perlu dipahami dalam konteks tanggung jawab sosial perusahaan (*corporate social responsibility*), mengingat kegagalan mesin yang menyebabkan insiden keselamatan atau pencemaran lingkungan dapat berdampak luas pada masyarakat sekitar lokasi operasi perusahaan, bukan hanya pada internal organisasi semata. Perusahaan yang menjalankan fungsi perawatan secara bertanggung jawab turut berkontribusi pada terciptanya hubungan yang harmonis dengan masyarakat dan lingkungan sekitar, sekaligus memperkuat lisensi sosial untuk beroperasi (*social license to operate*) yang menjadi prasyarat penting bagi keberlangsungan usaha jangka panjang, terutama pada industri dengan risiko lingkungan yang signifikan.

Tabel 1.2 Dimensi Tujuan dan Fungsi Perawatan Mesin

Dimensi	Fokus Utama	Contoh Indikator Keberhasilan
Teknis	Menjaga performa mekanis dan kontrol mesin	Tingkat penyimpangan parameter operasi
Ekonomis	Mengendalikan biaya	Rasio biaya perawatan

Dimensi	Fokus Utama	Contoh Indikator Keberhasilan
	total kepemilikan aset	terhadap nilai aset
Keselamatan	Mencegah kecelakaan kerja dan insiden lingkungan	Jumlah insiden akibat kegagalan mesin
Strategis	Mendukung keberlanjutan bisnis jangka panjang	Umur pakai aset dan tingkat investasi ulang
Kualitas	Menjaga konsistensi mutu hasil produksi	Tingkat cacat produk akibat penyimpangan mesin

1.3 Perkembangan Sistem *Maintenance* di Industri

Sistem perawatan mesin telah mengalami evolusi yang cukup panjang sejalan dengan perkembangan teknologi dan filosofi manajemen industri. Pada tahap paling awal, pendekatan yang dominan adalah *breakdown maintenance*, yaitu tindakan perbaikan yang baru dilakukan setelah mesin benar-benar berhenti berfungsi. Pendekatan ini dianggap paling sederhana namun berisiko tinggi karena kegagalan mesin sering kali terjadi pada saat yang tidak terduga dan dapat mengganggu keseluruhan rantai produksi. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas mesin industri dan tuntutan produktivitas, pendekatan reaktif semacam ini dinilai tidak lagi memadai untuk menjamin kelangsungan operasi dalam skala besar.

Perkembangan berikutnya ditandai dengan munculnya konsep *preventive maintenance* pada pertengahan abad ke-20, yang menekankan pentingnya tindakan pencegahan melalui inspeksi dan penggantian komponen secara terjadwal. Pendekatan ini kemudian berkembang lebih lanjut menjadi *reliability centered maintenance* (RCM), sebuah kerangka kerja sistematis yang menentukan strategi perawatan berdasarkan analisis fungsi, mode kegagalan, dan konsekuensi kegagalan suatu sistem. Tinjauan literatur mengenai keadaan praktik RCM di berbagai sektor industri menunjukkan bahwa metode ini telah diadopsi secara luas sejak pertama kali diperkenalkan

di industri penerbangan pada dekade 1960-an, dan terus berkembang penerapannya ke berbagai sektor industri lain seperti manufaktur, energi, hingga infrastruktur sipil (Geisbush & Ariaratnam, 2023).

Memasuki era digital, perkembangan sistem maintenance semakin dipercepat oleh kemajuan teknologi sensor, komunikasi data, dan kecerdasan buatan yang menjadi fondasi dari konsep *predictive maintenance* dan *maintenance 4.0*. Pendekatan berbasis kondisi ini memungkinkan pemantauan performa mesin secara *real-time* melalui data getaran, suhu, arus listrik, maupun parameter operasi lainnya, sehingga tanda-tanda awal kegagalan dapat dideteksi jauh sebelum kerusakan aktual terjadi. Kajian sistematis mengenai pemantauan berbasis kondisi menegaskan bahwa integrasi teknologi sensor dengan algoritma pembelajaran mesin telah menjadi arah utama pengembangan sistem perawatan modern, terutama pada mesin-mesin berputar yang memiliki risiko kegagalan mekanis tinggi (Ali & Abdelhadi, 2022).

Perkembangan sistem informasi manajemen perawatan berbasis komputer atau *computerized maintenance management system* (CMMS) turut mengubah cara organisasi mengelola data perawatan. Sistem ini memungkinkan pencatatan riwayat kerusakan, penjadwalan otomatis, hingga analisis tren kegagalan dilakukan secara terintegrasi dalam satu platform digital. Pemanfaatan teknologi cerdas dalam rantai pasok dan operasi manufaktur, termasuk sistem pemantauan aset digital, terbukti berkontribusi terhadap peningkatan kinerja operasional perusahaan secara signifikan, sebagaimana ditunjukkan dalam kajian mengenai transformasi rantai pasok digital pada industri manufaktur (Lee dkk., 2024). Perkembangan ini menandai pergeseran paradigma perawatan dari yang semula bersifat manual dan intuitif menjadi berbasis data dan analitik.

Di Indonesia sendiri, adopsi berbagai pendekatan perawatan modern seperti RCM dan *total productive maintenance* (TPM) semakin banyak ditemukan pada studi kasus di berbagai sektor industri, mulai dari manufaktur tekstil, pengolahan pangan, hingga industri semen dan energi. Berbagai studi kasus penerapan RCM pada mesin bubut, mesin filling, dan sistem produksi lain di perusahaan-perusahaan nasional menunjukkan bahwa metode ini mampu memberikan rekomendasi

interval perawatan yang lebih terukur dibandingkan pendekatan konvensional berbasis pengalaman semata (Rachmayanti & Prasetyawan, 2021). Fenomena ini mengindikasikan bahwa perkembangan sistem maintenance modern bukan lagi eksklusif milik industri di negara maju, tetapi telah menjadi kebutuhan nyata bagi industri nasional yang ingin bersaing secara global.

Perkembangan sistem maintenance juga tidak lepas dari perubahan filosofi manajemen yang melandasinya. Pada era awal industrialisasi, perawatan dipandang sebagai fungsi teknis yang terpisah dari proses produksi dan sepenuhnya menjadi tanggung jawab departemen teknik. Namun, seiring berkembangnya konsep *total productive maintenance*, tanggung jawab perawatan mulai didistribusikan kepada operator lini produksi melalui konsep *autonomous maintenance*, di mana operator dilatih untuk melakukan inspeksi dasar, pembersihan, dan pelumasan mesin yang mereka operasikan sehari-hari. Pergeseran filosofi ini mengubah budaya kerja organisasi secara mendasar, dari yang semula memisahkan peran produksi dan perawatan menjadi budaya kerja yang mengintegrasikan keduanya secara kolaboratif.

Selain perubahan filosofi manajemen, perkembangan sistem maintenance juga didorong oleh tuntutan efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan yang semakin ketat pada dekade terakhir. Mesin yang tidak dirawat dengan baik cenderung mengonsumsi energi lebih besar akibat gesekan berlebih, kebocoran sistem hidraulik atau pneumatik, maupun ketidaksesuaian parameter operasi. Oleh karena itu, banyak perusahaan mulai mengintegrasikan indikator efisiensi energi ke dalam program perawatan mereka, sehingga perawatan mesin tidak hanya berorientasi pada keandalan produksi, tetapi juga berkontribusi terhadap pencapaian target keberlanjutan dan pengurangan jejak karbon perusahaan secara keseluruhan.

Tren terkini dalam perkembangan sistem maintenance juga menunjukkan semakin populernya konsep *digital twin*, yaitu representasi virtual dari suatu mesin atau sistem fisik yang diperbarui secara real-time berdasarkan data operasional aktual. Melalui *digital twin*, tim perawatan dapat mensimulasikan berbagai skenario operasi

dan memprediksi dampaknya terhadap keandalan komponen tanpa harus melakukan eksperimen langsung pada mesin fisik. Kajian mengenai penerapan *digital twin* pada sistem konveyor untuk keperluan perawatan prediktif menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu meningkatkan akurasi prediksi kegagalan dibandingkan model statistik konvensional, sekaligus mempercepat proses pengambilan keputusan perawatan (Pulcini & Modoni, 2024).

Perkembangan sistem maintenance di Indonesia juga tidak dapat dilepaskan dari konteks transformasi industri nasional menuju era digital, meskipun tingkat adopsinya masih bervariasi antar-sektor dan antar-skala usaha. Perusahaan besar dengan modal yang memadai cenderung lebih cepat mengadopsi teknologi pemantauan kondisi berbasis sensor dan sistem informasi perawatan terintegrasi, sementara industri kecil dan menengah masih banyak yang mengandalkan pendekatan *preventive maintenance* konvensional berbasis jadwal tetap. Kesenjangan adopsi teknologi ini menjadi tantangan tersendiri dalam upaya meningkatkan daya saing industri nasional secara merata, sekaligus membuka peluang bagi pengembangan solusi perawatan yang lebih terjangkau dan sesuai dengan kapasitas industri skala menengah ke bawah.

Perkembangan regulasi dan standar internasional turut memengaruhi arah perkembangan sistem maintenance di berbagai sektor industri. Berbagai standar keandalan dan perawatan yang diterbitkan oleh badan standardisasi internasional memberikan kerangka acuan yang semakin diadopsi secara luas, tidak hanya oleh industri multinasional tetapi juga oleh industri nasional yang ingin memenuhi persyaratan pasar ekspor. Adopsi standar internasional ini mendorong perusahaan untuk mendokumentasikan proses perawatan mereka secara lebih formal dan terukur, yang pada gilirannya turut mempercepat pergeseran dari praktik perawatan informal menuju sistem manajemen perawatan yang lebih profesional dan terstandardisasi.

Ke depan, perkembangan sistem maintenance diproyeksikan akan semakin diwarnai oleh integrasi antara data perawatan dengan sistem perencanaan sumber daya perusahaan (*enterprise resource*

planning) secara menyeluruh, sehingga keputusan perawatan tidak lagi diambil secara terisolasi, melainkan mempertimbangkan implikasinya terhadap perencanaan produksi, manajemen inventori, dan bahkan strategi pemasaran perusahaan secara bersamaan. Integrasi lintas fungsi semacam ini menuntut perekayasa perawatan masa depan untuk memiliki wawasan yang lebih luas melampaui aspek teknis semata, mencakup pemahaman terhadap keseluruhan ekosistem bisnis tempat mesin yang mereka rawat beroperasi di dalamnya.

Perkembangan sistem maintenance juga tercermin dari semakin populernya model bisnis *maintenance as a service*, di mana perusahaan produsen mesin tidak lagi hanya menjual unit peralatan, tetapi juga menawarkan layanan perawatan berkelanjutan berbasis data pemantauan jarak jauh (*remote monitoring*). Model bisnis ini memungkinkan produsen mesin memantau kondisi kesehatan peralatan mereka yang tersebar di berbagai lokasi pelanggan secara terpusat, sehingga dapat memberikan rekomendasi perawatan yang lebih presisi berdasarkan data operasional aktual, sekaligus membuka sumber pendapatan berkelanjutan baru bagi produsen di luar penjualan unit peralatan itu sendiri.

Sejalan dengan perkembangan tersebut, kebutuhan akan standar interoperabilitas data antar-perangkat pemantauan dari berbagai vendor turut menjadi perhatian penting dalam perkembangan sistem maintenance modern. Ketiadaan standar interoperabilitas dapat menyebabkan perusahaan yang menggunakan peralatan dari berbagai vendor kesulitan mengintegrasikan data pemantauan ke dalam satu platform terpadu, sehingga menghambat analisis lintas mesin yang komprehensif. Upaya standardisasi protokol komunikasi data industri terus dikembangkan oleh berbagai konsorsium teknologi untuk mengatasi tantangan interoperabilitas ini, sehingga sistem maintenance masa depan dapat beroperasi secara lebih terbuka dan saling terhubung antar-platform.

Perkembangan sistem maintenance di sektor energi terbarukan turut menjadi contoh menarik mengenai bagaimana pendekatan perawatan modern diterapkan pada konteks yang relatif baru, misalnya pada turbin angin dan panel surya berskala besar. Karakteristik lokasi

instalasi yang sering kali terpencil dan sulit dijangkau menjadikan pendekatan *predictive maintenance* berbasis sensor jarak jauh sebagai kebutuhan mendasar, bukan sekadar pilihan tambahan, mengingat biaya mobilisasi tim teknisi ke lokasi terpencil untuk melakukan inspeksi rutin dapat menjadi sangat signifikan apabila dilakukan secara konvensional tanpa dukungan data pemantauan jarak jauh yang memadai.

Perkembangan sistem maintenance juga tidak lepas dari perubahan pola pikir mengenai kepemilikan aset itu sendiri, dari yang semula berorientasi pada kepemilikan fisik penuh menjadi berorientasi pada hasil (*outcome-based*), di mana perusahaan lebih mementingkan ketersediaan fungsi mesin dibandingkan kepemilikan unit fisiknya. Pola pikir ini mendorong berkembangnya skema leasing peralatan yang disertai jaminan tingkat ketersediaan tertentu dari penyedia, sehingga risiko kegagalan mesin secara bertahap bergeser dari pengguna akhir kepada penyedia peralatan yang memiliki insentif lebih besar untuk menjaga keandalan produk mereka sepanjang masa kontrak layanan.

Sejarah perkembangan sistem maintenance juga mengajarkan bahwa setiap generasi pendekatan perawatan tidak sepenuhnya menggantikan generasi sebelumnya, melainkan saling melengkapi dalam suatu ekosistem strategi perawatan yang terintegrasi. Perusahaan modern pada umumnya tetap menerapkan *corrective maintenance* untuk komponen non-kritis dengan biaya penggantian rendah, sembari menerapkan *preventive maintenance* untuk komponen dengan pola kegagalan yang dapat diprediksi berdasarkan waktu, dan *predictive maintenance* untuk komponen kritis bernilai tinggi yang memerlukan pemantauan kondisi secara kontinu, sehingga kombinasi ketiganya membentuk portofolio strategi perawatan yang optimal secara keseluruhan.

Perkembangan sistem maintenance juga tercermin dari semakin banyaknya penelitian yang mengeksplorasi penerapan pembelajaran mesin (*machine learning*) untuk keperluan diagnostik dan prognostik kegagalan mesin berputar. Algoritma seperti jaringan saraf tiruan dan metode pembelajaran mendalam (*deep learning*) semakin banyak digunakan untuk mengenali pola sinyal getaran yang kompleks dan

sulit diinterpretasikan melalui analisis spektrum frekuensi konvensional, sehingga mampu meningkatkan akurasi deteksi dini kegagalan pada komponen seperti bantalan dan roda gigi (Romanssini dkk., 2023). Perkembangan ini menandai babak baru dalam sejarah rekayasa perawatan, di mana peran analis data mulai sejajar pentingnya dengan peran teknisi mekanik tradisional dalam tim perawatan modern.

Perkembangan sistem maintenance di masa mendatang juga diperkirakan akan semakin diwarnai oleh kolaborasi antara manusia dan sistem kecerdasan buatan dalam pengambilan keputusan perawatan, di mana algoritma memberikan rekomendasi berbasis data namun keputusan akhir tetap berada di tangan insinyur perawatan yang memahami konteks operasional secara menyeluruh. Pendekatan kolaboratif semacam ini dipandang lebih realistis dibandingkan visi otomasi penuh, mengingat kompleksitas dan variabilitas kondisi lapangan industri yang sering kali sulit sepenuhnya direpresentasikan dalam model algoritmik, betapapun canggihnya teknologi yang digunakan untuk mendukung proses pengambilan keputusan tersebut.

Sebagai penutup pembahasan mengenai perkembangan sistem maintenance, penting bagi pembaca untuk memahami bahwa penerapan teknologi perawatan canggih bukanlah tujuan akhir itu sendiri, melainkan sarana untuk mencapai tujuan yang lebih fundamental, yaitu keandalan, keselamatan, dan efisiensi operasional. Organisasi yang tergesa-gesa mengadopsi teknologi *predictive maintenance* tanpa terlebih dahulu membangun fondasi manajemen perawatan yang solid, termasuk kedisiplinan pencatatan data dan budaya kerja yang mendukung, berisiko tidak memperoleh manfaat optimal dari investasi teknologi tersebut. Oleh karena itu, perjalanan menuju sistem maintenance modern idealnya ditempuh secara bertahap, dimulai dari penguatan fondasi manajemen perawatan dasar sebelum melangkah pada adopsi teknologi yang lebih kompleks dan canggih.

Gambar 1.2 Evolusi Pendekatan Perawatan Mesin dari Masa ke Masa

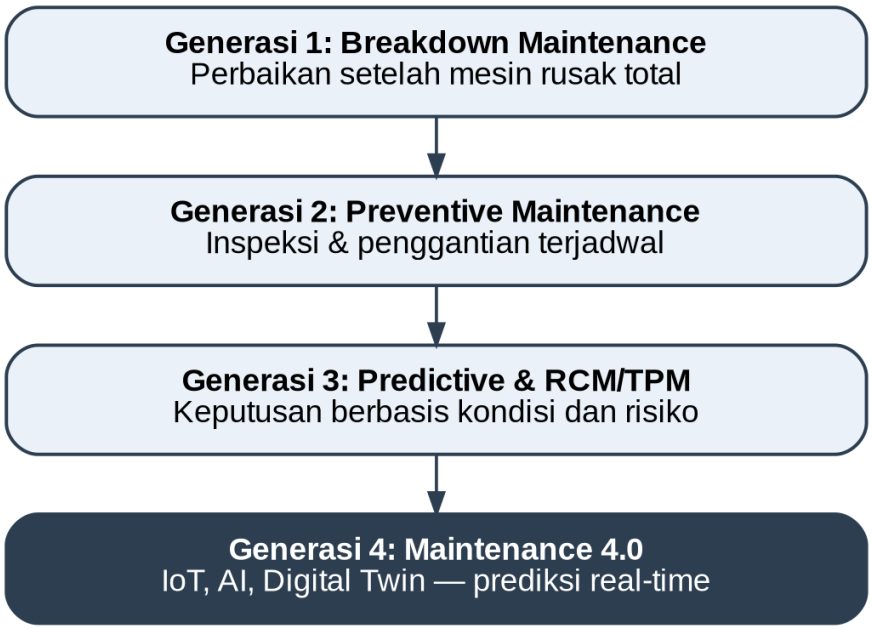


Diagram di atas menggambarkan pergeseran filosofi perawatan mesin dari pendekatan reaktif menuju pendekatan proaktif dan prediktif yang didukung oleh teknologi digital, sejalan dengan tren maintenance 4.0 pada industri modern.

1.4 Peran Perawatan dalam Keandalan dan Produktivitas

Keandalan sistem produksi dan produktivitas perusahaan memiliki keterkaitan yang sangat erat dengan efektivitas fungsi perawatan yang dijalankan. Mesin yang mengalami kegagalan secara berulang akan menyebabkan gangguan pada aliran produksi, meningkatnya waktu henti (*downtime*), serta pembengkakan biaya operasional akibat perbaikan darurat maupun kehilangan kesempatan produksi. Studi mengenai evaluasi kebijakan perawatan pada peralatan produksi menunjukkan bahwa perusahaan yang menerapkan sistem perawatan terstruktur cenderung memiliki tingkat ketersediaan mesin yang lebih tinggi dibandingkan perusahaan yang masih mengandalkan pendekatan perbaikan reaktif semata (Nauli Siregar dkk., 2022).

Konsep keandalan dalam konteks perawatan mesin tidak dapat dilepaskan dari tiga indikator utama, yaitu *reliability*, *maintainability*, dan *availability*, yang secara bersama-sama mencerminkan kemampuan suatu sistem untuk menjalankan fungsinya secara konsisten. Analisis terhadap ketiga indikator tersebut memberikan gambaran kuantitatif mengenai performa suatu mesin, misalnya melalui perhitungan *mean time between failure* (MTBF) dan *mean time to repair* (MTTR), yang kemudian dapat digunakan sebagai dasar penentuan interval perawatan yang optimal. Kajian mengenai integrasi analisis reliabilitas dan ketersediaan pada alat berat menunjukkan bahwa penentuan interval perawatan yang didasarkan pada data historis kegagalan mampu menekan frekuensi kerusakan mendadak secara signifikan dibandingkan interval perawatan yang ditetapkan secara subjektif (Rahman, 2026).

Peran perawatan terhadap produktivitas juga tercermin dari kontribusinya terhadap indikator *overall equipment effectiveness* (OEE), yang mengukur efektivitas mesin dari tiga dimensi, yaitu ketersediaan, performa, dan kualitas keluaran. Tinjauan komprehensif mengenai penerapan *total productive maintenance* menegaskan bahwa peningkatan nilai OEE secara konsisten berkorelasi dengan keberhasilan implementasi program perawatan yang melibatkan seluruh elemen organisasi, mulai dari operator lini produksi hingga manajemen puncak, bukan hanya menjadi tanggung jawab teknisi perawatan semata (Biswas, 2024). Dengan demikian, keberhasilan program perawatan sangat ditentukan oleh sejauh mana budaya perawatan tertanam dalam keseluruhan organisasi, bukan sekadar prosedur teknis yang berdiri sendiri.

Selain berdampak pada aspek operasional, efektivitas perawatan mesin juga memiliki implikasi finansial yang signifikan bagi perusahaan. Biaya kepemilikan aset yang efisien sangat dipengaruhi oleh seberapa baik mesin tersebut dirawat sepanjang umur pakainya, termasuk biaya energi, biaya suku cadang, dan biaya tenaga kerja perawatan. Kajian mengenai metrik efisiensi biaya peralatan dalam industri manufaktur menunjukkan bahwa perusahaan yang mampu mengintegrasikan data operasional dan data perawatan dalam satu kerangka evaluasi biaya memiliki keunggulan kompetitif yang lebih

baik dibandingkan perusahaan yang mengelola kedua aspek tersebut secara terpisah (Liew dkk., 2024). Hal ini menegaskan bahwa perawatan mesin bukan sekadar aktivitas teknis, melainkan juga instrumen pengendalian biaya strategis bagi keberlangsungan bisnis.

Hubungan antara perawatan dan produktivitas juga dapat dilihat dari perspektif kapasitas efektif suatu lini produksi. Kapasitas terpasang suatu mesin sering kali jauh lebih tinggi dibandingkan kapasitas efektif yang benar-benar dapat dimanfaatkan akibat adanya kerugian waktu, kerugian kecepatan, dan kerugian kualitas yang ditimbulkan oleh masalah perawatan. Selisih antara kapasitas terpasang dan kapasitas efektif inilah yang menjadi target utama dari program perawatan yang baik, sebab setiap peningkatan ketersediaan dan performa mesin secara langsung akan meningkatkan kapasitas efektif tanpa memerlukan investasi tambahan pada peralatan baru, sehingga menjadikan perawatan sebagai sumber peningkatan produktivitas yang relatif efisien dari sisi biaya.

Peran perawatan terhadap keandalan sistem juga tercermin dari kontribusinya dalam mengurangi variabilitas proses produksi. Mesin yang beroperasi pada kondisi optimal akan menghasilkan keluaran dengan variabilitas yang lebih rendah dibandingkan mesin yang mengalami degradasi performa akibat kurangnya perawatan. Variabilitas proses yang rendah pada gilirannya akan memudahkan perusahaan dalam melakukan perencanaan produksi dan pengendalian mutu, karena parameter proses menjadi lebih dapat diprediksi dan dikendalikan, sehingga menurunkan kebutuhan akan tindakan koreksi mendadak yang biasanya membutuhkan biaya dan waktu tambahan yang tidak sedikit.

Kontribusi perawatan terhadap produktivitas juga dapat dianalisis melalui pendekatan biaya kegagalan total, yang membandingkan biaya investasi pada program perawatan proaktif dengan potensi kerugian yang dapat dihindari, seperti kehilangan produksi, biaya lembur tenaga kerja untuk mengejar target yang tertunda, hingga potensi kehilangan pelanggan akibat keterlambatan pengiriman. Perbandingan biaya semacam ini pada umumnya menunjukkan bahwa investasi pada program perawatan yang matang

jauh lebih menguntungkan secara finansial dibandingkan membiarkan mesin beroperasi tanpa program perawatan yang memadai, meskipun manfaat finansial tersebut sering kali tidak langsung terlihat dalam laporan keuangan jangka pendek perusahaan.

Studi mengenai kinerja operasional pada industri pengolahan menunjukkan bahwa perusahaan yang secara konsisten menerapkan evaluasi berkala terhadap peralatan produksinya cenderung mampu mempertahankan tingkat ketersediaan mesin yang lebih stabil dari waktu ke waktu dibandingkan perusahaan yang hanya melakukan perawatan secara insidental (Nauli Siregar dkk., 2022). Konsistensi dalam pelaksanaan evaluasi ini menjadi indikator penting dari kematangan budaya perawatan suatu organisasi, yang pada akhirnya tercermin dari stabilitas produktivitas jangka panjang perusahaan tersebut dibandingkan dengan kompetitornya di industri yang sama.

Peran perawatan dalam mendukung keandalan juga dapat dilihat dari kontribusinya terhadap keselamatan kerja secara langsung. Sebagian besar insiden kecelakaan kerja di lingkungan industri berat memiliki keterkaitan dengan kegagalan mekanis atau kelistrikan pada peralatan yang seharusnya dapat dicegah melalui program perawatan yang memadai, misalnya kegagalan sistem pengereman pada alat berat atau kegagalan katup pengaman pada bejana bertekanan. Oleh karena itu, keandalan mesin tidak hanya berdampak pada aspek produktivitas ekonomi semata, tetapi juga menjadi lini pertahanan penting dalam melindungi keselamatan jiwa pekerja yang berinteraksi langsung dengan peralatan tersebut setiap harinya.

Kontribusi perawatan terhadap produktivitas juga tercermin dari perannya dalam mendukung fleksibilitas kapasitas produksi ketika perusahaan menghadapi lonjakan permintaan mendadak. Mesin yang memiliki riwayat perawatan baik dan tingkat keandalan tinggi dapat dioperasikan pada kapasitas mendekati batas maksimalnya untuk sementara waktu guna memenuhi lonjakan permintaan, tanpa risiko kegagalan yang berlebihan. Sebaliknya, mesin dengan riwayat perawatan buruk cenderung tidak dapat diandalkan untuk beroperasi pada kondisi ekstrem semacam itu, sehingga membatasi kemampuan perusahaan dalam merespons peluang pasar yang bersifat temporer

namun berpotensi memberikan keuntungan signifikan apabila dapat dipenuhi tepat waktu.

Peran perawatan terhadap keandalan dan produktivitas juga dapat dikaji melalui perspektif reputasi merek dan kepercayaan pelanggan jangka panjang. Perusahaan yang secara konsisten mampu memenuhi pesanan tepat waktu dengan kualitas yang stabil, berkat dukungan mesin yang andal, akan membangun reputasi sebagai mitra bisnis yang dapat diandalkan di mata pelanggan maupun mitra rantai pasok mereka. Reputasi semacam ini pada gilirannya dapat membuka peluang kerja sama bisnis baru dan memperkuat posisi tawar perusahaan dalam negosiasi kontrak jangka panjang, sehingga manfaat perawatan mesin yang baik pada akhirnya merambat jauh melampaui batas-batas operasional pabrik itu sendiri.

Peran perawatan juga dapat dilihat dari sudut pandang manajemen talenta, sebab organisasi dengan sistem perawatan yang matang dan modern cenderung lebih menarik bagi tenaga kerja terampil dibandingkan organisasi dengan praktik perawatan yang tertinggal. Insinyur dan teknisi muda umumnya lebih tertarik bekerja pada perusahaan yang menerapkan teknologi pemantauan kondisi terkini dan memberikan kesempatan pengembangan kompetensi di bidang analitik data perawatan, sehingga kematangan sistem perawatan turut memengaruhi daya tarik perusahaan sebagai tempat kerja bagi talenta terbaik di bidang teknik, yang pada gilirannya berkontribusi pada keberlanjutan kapabilitas organisasi dalam jangka panjang.

Pada akhirnya, peran perawatan dalam mendukung keandalan dan produktivitas perlu dipahami sebagai investasi jangka panjang, bukan sekadar pengeluaran operasional rutin. Perusahaan yang mampu membangun sistem perawatan yang matang, didukung oleh data yang akurat dan sumber daya manusia yang kompeten, akan memperoleh keunggulan berupa stabilitas produksi, efisiensi biaya, serta reputasi mutu produk yang lebih terjaga di mata pelanggan. Pemahaman inilah yang mendasari pentingnya mempelajari rekayasa perawatan mesin secara komprehensif, sebagaimana akan diuraikan lebih lanjut pada bab-bab berikutnya dalam buku ini, mulai dari konsep keandalan dan

kegagalan hingga penerapan strategi *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance* secara terintegrasi.

Gambar 1.3 Keterkaitan Perawatan Mesin dengan Keandalan dan Produktivitas



Diagram ini menunjukkan alur keterkaitan antara efektivitas program perawatan mesin dengan peningkatan keandalan, ketersediaan, dan pada akhirnya produktivitas serta daya saing perusahaan secara keseluruhan.

Rangkuman Bab 1

Bab ini telah menguraikan konsep dasar rekayasa perawatan mesin sebagai disiplin ilmu interdisipliner yang berperan strategis dalam menjaga keandalan, keselamatan, dan produktivitas sistem produksi. Rekayasa perawatan tidak sekadar mencakup tindakan perbaikan reaktif, melainkan meliputi keseluruhan siklus perencanaan, pemilihan strategi, pelaksanaan, hingga evaluasi kinerja perawatan

yang terintegrasi dengan fungsi produksi, mutu, keselamatan, dan manajemen rantai pasok perusahaan secara menyeluruh.

Tujuan dan fungsi perawatan mesin bersifat multidimensi, mencakup dimensi teknis, ekonomis, keselamatan, strategis, dan kualitas, yang seluruhnya perlu dikelola secara seimbang agar organisasi dapat memperoleh manfaat optimal dari investasi perawatan yang dilakukan. Perawatan yang efektif berkontribusi tidak hanya pada kelancaran operasional harian, tetapi juga pada keberlanjutan bisnis jangka panjang melalui perpanjangan umur pakai aset dan pengendalian biaya kepemilikan secara keseluruhan.

Perkembangan sistem maintenance telah mengalami evolusi panjang, mulai dari pendekatan *breakdown maintenance* yang reaktif, *preventive maintenance* yang terjadwal, hingga *predictive maintenance* dan maintenance 4.0 yang berbasis data dan teknologi digital. Perkembangan ini mencerminkan pergeseran filosofi perawatan dari yang semula bersifat reaktif menjadi proaktif dan prediktif, didukung oleh kemajuan teknologi sensor, komunikasi data, dan kecerdasan buatan yang semakin terjangkau bagi berbagai skala industri.

Terakhir, peran perawatan dalam mendukung keandalan dan produktivitas perusahaan telah ditegaskan melalui berbagai bukti empiris dari literatur ilmiah, yang menunjukkan bahwa program perawatan yang matang berkontribusi signifikan terhadap peningkatan ketersediaan mesin, efisiensi biaya, kualitas produk, dan keselamatan kerja. Pemahaman menyeluruh terhadap konsep dasar ini menjadi fondasi penting sebelum pembaca melangkah pada pembahasan mengenai keandalan dan kegagalan mesin secara lebih mendalam pada bab berikutnya.

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 1

1. Jelaskan mengapa rekayasa perawatan mesin dipandang sebagai disiplin interdisipliner, dan sebutkan minimal tiga bidang ilmu lain yang bersinggungan dengannya beserta bentuk keterkaitannya.

2. Uraikan perbedaan antara fungsi teknis, ekonomis, keselamatan, dan strategis dari perawatan mesin, serta berikan contoh konkret masing-masing fungsi tersebut pada suatu industri manufaktur.

3. Diskusikan bagaimana pergeseran filosofi perawatan dari *breakdown maintenance* menuju *predictive maintenance* memengaruhi struktur organisasi dan kompetensi sumber daya manusia yang dibutuhkan pada unit perawatan suatu perusahaan.

4. Jelaskan konsep *total productive maintenance* (TPM) dan bagaimana konsep *autonomous maintenance* di dalamnya mengubah pembagian tanggung jawab antara operator dan teknisi perawatan.

5. Analisislah keterkaitan antara efektivitas program perawatan dengan indikator *overall equipment effectiveness* (OEE), serta jelaskan mengapa OEE dapat dijadikan indikator kinerja lintas fungsi, bukan hanya indikator unit perawatan semata.

6. Berikan argumen mengenai mengapa perawatan mesin perlu dipandang sebagai investasi jangka panjang alih-alih sekadar pengeluaran operasional rutin, disertai dengan ilustrasi perhitungan biaya kegagalan total secara sederhana.

7. Diskusikan tantangan apa saja yang mungkin dihadapi oleh industri kecil dan menengah di Indonesia dalam mengadopsi pendekatan perawatan modern seperti RCM dan *predictive maintenance*, serta usulkan solusi yang realistis sesuai kapasitas mereka.

8. Jelaskan bagaimana konsep *digital twin* dapat dimanfaatkan dalam konteks perawatan mesin, serta identifikasi minimal dua tantangan implementasinya pada industri berskala menengah dengan keterbatasan infrastruktur digital.

9. Uraikan bagaimana perkembangan model bisnis *maintenance as a service* dapat mengubah pola tanggung jawab keandalan antara produsen mesin dan perusahaan pengguna, serta diskusikan implikasinya terhadap struktur biaya perawatan jangka panjang.



BAB 2
KEANDALAN DAN KEGAGALAN MESIN

2.1 Konsep Reliability, Maintainability, dan Availability

Konsep *reliability* atau keandalan didefinisikan sebagai probabilitas suatu komponen atau sistem untuk menjalankan fungsi yang dipersyaratkan dalam kondisi operasi tertentu selama periode waktu yang ditentukan tanpa mengalami kegagalan. Definisi ini mengandung empat elemen penting, yaitu probabilitas, fungsi yang dipersyaratkan, kondisi operasi, dan periode waktu, yang seluruhnya harus dipertimbangkan secara bersamaan ketika mengevaluasi keandalan suatu mesin. Kajian mengenai reliabilitas dan pemeliharaan berbasis risiko menekankan bahwa keandalan bukanlah nilai statis, melainkan besaran probabilistik yang dapat berubah sepanjang waktu seiring dengan akumulasi jam operasi dan kondisi lingkungan kerja mesin tersebut (Melani dkk., 2023).

Maintainability atau keterawatan merupakan konsep yang berkaitan dengan kemudahan suatu sistem untuk dikembalikan ke kondisi operasionalnya setelah mengalami kegagalan, yang biasanya diukur melalui parameter *mean time to repair* (MTTR). Semakin rendah nilai MTTR suatu mesin, semakin baik tingkat keterawatannya, karena menunjukkan bahwa proses perbaikan dapat dilakukan dengan cepat dan efisien. Faktor-faktor yang memengaruhi keterawatan antara lain kemudahan akses terhadap komponen, ketersediaan suku cadang, kompetensi teknisi, serta kelengkapan dokumentasi teknis mesin. Desain mesin yang mempertimbangkan aspek keterawatan sejak tahap perancangan awal terbukti dapat menekan waktu henti produksi secara signifikan dibandingkan desain yang tidak memperhitungkan kemudahan perawatan.

Availability atau ketersediaan merupakan gabungan dari konsep keandalan dan keterawatan, yang menggambarkan proporsi waktu suatu mesin berada dalam kondisi siap beroperasi dibandingkan dengan total waktu yang direncanakan untuk beroperasi. Secara matematis, ketersediaan dapat dihitung dari perbandingan antara *mean time between failure* (MTBF) dengan penjumlahan MTBF dan MTTR. Nilai ketersediaan yang tinggi mengindikasikan bahwa mesin jarang mengalami kegagalan dan, apabila terjadi kegagalan, dapat diperbaiki dengan cepat. Ketiga konsep ini, yaitu *reliability*, *maintainability*, dan *availability*, sering disingkat sebagai RAM dan menjadi kerangka analisis fundamental dalam evaluasi performa sistem perawatan di berbagai sektor industri, termasuk pada mesin pembangkit listrik dan alat berat (Arrahman dkk., 2021).

Ketiga indikator RAM tersebut saling memengaruhi satu sama lain dan tidak dapat dievaluasi secara terpisah. Peningkatan keandalan melalui pemilihan material yang lebih baik atau desain yang lebih kokoh dapat menurunkan frekuensi kegagalan, namun apabila tidak diimbangi dengan kemudahan perawatan yang memadai, ketersediaan mesin secara keseluruhan tetap dapat rendah akibat waktu perbaikan yang lama ketika kegagalan benar-benar terjadi. Oleh karena itu, perancangan strategi perawatan yang efektif harus mempertimbangkan keseimbangan antara ketiga aspek tersebut, disesuaikan dengan tingkat kritikalitas mesin terhadap keseluruhan proses produksi serta konsekuensi finansial dan keselamatan yang mungkin ditimbulkan apabila mesin tersebut mengalami kegagalan.

Penerapan konsep RAM dalam praktik industri umumnya diwujudkan melalui pengumpulan data historis kegagalan dan waktu perbaikan secara sistematis, yang kemudian dianalisis menggunakan pendekatan statistik seperti distribusi Weibull untuk memodelkan pola kegagalan komponen. Data hasil analisis ini menjadi dasar bagi penyusunan jadwal *preventive maintenance* yang lebih presisi dibandingkan pendekatan berbasis rekomendasi pabrikan semata, sebab kondisi operasi aktual di lapangan sering kali berbeda dari kondisi standar pengujian pabrikan. Ketepatan dalam memodelkan pola kegagalan inilah yang menjadi kunci keberhasilan penerapan strategi perawatan berbasis keandalan pada industri modern.

Selain ketiga indikator utama tersebut, literatur keandalan modern juga mengenal konsep *dependability* sebagai istilah payung yang mencakup *reliability*, *maintainability*, *availability*, sekaligus aspek keselamatan (*safety*) dan integritas sistem secara menyeluruh. Konsep ini semakin relevan pada sistem produksi yang terintegrasi dengan teknologi otomasi dan kendali digital, di mana kegagalan pada satu subsistem dapat merambat menjadi kegagalan pada subsistem lain apabila tidak ada mekanisme proteksi yang memadai. Analisis dependability yang komprehensif memungkinkan perekayasa perawatan untuk menilai bukan hanya probabilitas kegagalan komponen individual, tetapi juga dampak sistemik yang mungkin ditimbulkannya terhadap keseluruhan rantai produksi.

Pengukuran indikator RAM dalam praktiknya menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait ketersediaan dan kualitas data historis kegagalan. Banyak perusahaan, khususnya di negara berkembang, belum memiliki sistem pencatatan kegagalan yang terstruktur, sehingga perhitungan MTBF dan MTTR sering kali dilakukan berdasarkan estimasi kasar atau data yang tidak lengkap. Keterbatasan ini menegaskan pentingnya investasi pada sistem informasi manajemen perawatan sejak tahap awal, karena kualitas keputusan perawatan berbasis keandalan sangat bergantung pada kualitas data yang menjadi dasar analisisnya, sebagaimana ditekankan dalam berbagai kajian mengenai keandalan dan pemeliharaan berbasis risiko (Melani dkk., 2023).

Penerapan konsep *reliability*, *maintainability*, dan *availability* juga perlu mempertimbangkan konteks operasi spesifik dari setiap industri. Mesin yang beroperasi secara kontinu selama 24 jam pada industri proses seperti petrokimia atau semen memiliki tuntutan ketersediaan yang jauh lebih tinggi dibandingkan mesin yang beroperasi secara intermiten pada industri manufaktur diskrit. Perbedaan konteks operasi ini memengaruhi bagaimana target nilai RAM ditetapkan, serta strategi perawatan mana yang paling sesuai untuk diterapkan, sehingga tidak ada satu standar nilai RAM yang berlaku universal bagi seluruh jenis industri tanpa mempertimbangkan karakteristik operasionalnya masing-masing.

Analisis *reliability* juga dapat dilakukan pada tingkat sistem, bukan hanya pada tingkat komponen individual, melalui pemodelan konfigurasi keandalan seri, paralel, maupun kombinasi keduanya. Pada konfigurasi seri, kegagalan satu komponen akan menyebabkan kegagalan keseluruhan sistem, sehingga keandalan sistem selalu lebih rendah dibandingkan keandalan komponen penyusunnya. Sebaliknya, pada konfigurasi paralel yang menerapkan redundansi, sistem tetap dapat berfungsi meskipun salah satu komponen mengalami kegagalan, sehingga keandalan sistem secara keseluruhan dapat ditingkatkan. Pemahaman terhadap konfigurasi keandalan sistem ini penting bagi perekayasa perawatan dalam menentukan komponen mana yang paling kritis untuk mendapatkan prioritas perawatan lebih tinggi dibandingkan komponen lain dalam satu sistem yang sama.

Nilai *maintainability* suatu sistem juga dapat ditingkatkan melalui penerapan prinsip *design for maintainability* sejak tahap perancangan mesin, misalnya dengan menyediakan akses yang mudah bagi teknisi untuk melakukan inspeksi dan penggantian komponen tanpa harus membongkar seluruh unit mesin. Prinsip ini semakin banyak diadopsi oleh produsen peralatan industri modern, yang menyadari bahwa biaya kepemilikan total suatu mesin sangat dipengaruhi oleh kemudahan perawatannya sepanjang umur pakai, bukan hanya oleh harga pembelian awal semata. Perusahaan yang cermat dalam memilih peralatan produksi idealnya turut mempertimbangkan aspek *maintainability* ini sebagai salah satu kriteria evaluasi dalam proses pengadaan mesin baru.

Ketersediaan (*availability*) suatu sistem juga dapat dibedakan menjadi beberapa jenis pengukuran, yaitu *inherent availability* yang hanya memperhitungkan waktu perbaikan aktif, *achieved availability* yang turut memperhitungkan waktu tunggu logistik dan administratif, serta *operational availability* yang mencerminkan kondisi ketersediaan aktual di lapangan termasuk seluruh faktor penundaan yang mungkin terjadi. Perbedaan jenis pengukuran ini penting untuk dipahami agar perusahaan tidak salah menafsirkan angka ketersediaan yang dilaporkan, sebab nilai *inherent availability* yang tinggi belum tentu mencerminkan kondisi ketersediaan operasional yang sesungguhnya dialami oleh lini produksi di lapangan.

Konsep RAM juga memiliki keterkaitan erat dengan analisis risiko, sebab keandalan pada dasarnya merupakan ukuran probabilitas ketiadaan kegagalan, sedangkan risiko mempertimbangkan probabilitas kegagalan tersebut bersama dengan konsekuensinya. Pendekatan pemeliharaan berbasis risiko (*risk-based maintenance*) menggabungkan analisis RAM dengan penilaian konsekuensi kegagalan untuk menentukan prioritas perawatan yang lebih tepat sasaran, terutama pada industri dengan konsekuensi kegagalan yang sangat bervariasi antar-jenis peralatan, seperti industri kilang minyak dan gas yang memiliki ribuan komponen dengan tingkat kritikalitas berbeda-beda (Melani dkk., 2023).

Estimasi parameter keandalan komponen dalam praktiknya sering kali menggunakan distribusi probabilitas tertentu, dengan distribusi Weibull menjadi salah satu yang paling populer digunakan dalam rekayasa perawatan karena fleksibilitasnya dalam memodelkan ketiga fase kurva bak mandi melalui penyesuaian parameter bentuknya. Ketika parameter bentuk distribusi Weibull bernilai kurang dari satu, data mengindikasikan pola kegagalan dini; ketika bernilai mendekati satu, pola kegagalan bersifat acak; dan ketika bernilai lebih dari satu, pola kegagalan mengindikasikan mekanisme keausan yang dominan. Kemampuan menginterpretasikan parameter statistik semacam ini menjadi keterampilan analitis penting yang perlu dikuasai oleh perekayasa perawatan modern.

Penerapan analisis RAM juga perlu memperhatikan dinamika perubahan kondisi operasi dari waktu ke waktu, sebab parameter keandalan yang dihitung berdasarkan data historis tidak selalu dapat diekstrapolasikan secara linear ke masa depan apabila terjadi perubahan signifikan pada kondisi operasi, beban kerja, atau bahkan modifikasi desain komponen. Oleh karena itu, analisis RAM idealnya bersifat dinamis dan diperbarui secara berkala, bukan dilakukan sekali dan digunakan sebagai acuan tetap dalam jangka waktu yang sangat panjang tanpa peninjauan ulang terhadap relevansinya dengan kondisi operasi terkini.

Sebagai penutup subbab ini, penting ditegaskan bahwa ketiga konsep *reliability*, *maintainability*, dan *availability* bukanlah sekadar

rumus matematis yang dihitung untuk keperluan pelaporan semata, melainkan alat bantu pengambilan keputusan yang harus dipahami secara kontekstual oleh seluruh pemangku kepentingan perawatan. Insinyur perawatan yang mampu menerjemahkan angka-angka RAM menjadi rekomendasi tindakan yang konkret dan dapat dieksekusi akan memberikan nilai tambah yang jauh lebih besar bagi organisasi dibandingkan sekadar menyajikan laporan statistik tanpa interpretasi yang bermakna bagi pengambilan keputusan strategis perusahaan.

Penguasaan konsep RAM juga menjadi bekal penting bagi perekayasa perawatan dalam berkomunikasi secara efektif dengan manajemen puncak, yang umumnya lebih memahami bahasa finansial dan risiko dibandingkan istilah teknis keandalan. Kemampuan menerjemahkan nilai *availability* yang rendah menjadi estimasi kerugian finansial akibat downtime, misalnya, akan jauh lebih mudah dipahami dan meyakinkan manajemen untuk menyetujui investasi tambahan pada program perawatan, dibandingkan hanya menyajikan angka MTBF dan MTTR tanpa konteks dampak bisnisnya secara eksplisit dan mudah dipahami oleh pengambil keputusan non-teknis.

Konsep RAM juga relevan untuk dipahami dalam konteks perbandingan kelayakan investasi antara mesin baru dengan mesin lama yang telah melewati sebagian besar umur ekonomisnya. Analisis RAM yang cermat dapat membantu perusahaan menentukan titik keseimbangan (*break-even point*) antara biaya perawatan mesin lama yang terus meningkat akibat penurunan keandalan, dengan biaya investasi mesin baru yang menawarkan tingkat keandalan lebih tinggi namun membutuhkan modal awal yang signifikan, sehingga keputusan investasi peralatan dapat diambil berdasarkan analisis data yang objektif, bukan sekadar intuisi atau kebiasaan yang berlaku selama ini.

Tabel 2.1 Indikator Kunci dalam Analisis *Reliability*, *Maintainability*, dan *Availability*

Indikator	Definisi Singkat	Rumus/Ukuran	Manfaat bagi Perawatan
Reliability (R)	Probabilitas mesin berfungsi	$R(t) = e^{(-t/MTBF)}$	Menentukan interval inspeksi

Indikator	Definisi Singkat	Rumus/Ukuran	Manfaat bagi Perawatan
	tanpa gagal dalam periode tertentu		optimal
MTBF	Rata-rata waktu antar kegagalan	Total jam operasi / jumlah kegagalan	Mengukur tingkat keandalan komponen
MTTR	Rata-rata waktu perbaikan	Total waktu perbaikan / jumlah perbaikan	Mengukur efisiensi tim perawatan
Availability (A)	Proporsi waktu mesin siap beroperasi	A = MTBF / (MTBF + MTTR)	Dasar evaluasi kinerja sistem produksi

2.2 Karakteristik dan Pola Kegagalan Mesin

Kegagalan mesin pada dasarnya tidak terjadi secara acak sepenuhnya, melainkan mengikuti pola tertentu yang dapat diidentifikasi melalui analisis statistik terhadap data historis kerusakan. Salah satu model klasik yang digunakan untuk menggambarkan pola kegagalan adalah kurva bak mandi atau *bathtub curve*, yang membagi siklus hidup komponen menjadi tiga fase, yaitu fase kegagalan dini (*infant mortality*), fase kegagalan acak (*random failure*), dan fase kegagalan akibat keausan (*wear-out failure*). Pemahaman terhadap fase mana suatu komponen berada sangat menentukan strategi perawatan yang paling tepat untuk diterapkan pada komponen tersebut.

Fase kegagalan dini umumnya terjadi tidak lama setelah mesin baru dipasang atau setelah komponen baru diganti, yang disebabkan oleh cacat produksi, kesalahan instalasi, atau ketidaksesuaian spesifikasi komponen. Fase kegagalan acak terjadi pada periode operasi normal mesin, di mana laju kegagalan relatif konstan dan lebih dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti beban kerja berlebih atau kondisi lingkungan yang tidak terduga. Sementara itu, fase kegagalan akibat keausan terjadi menjelang akhir umur pakai komponen, ditandai

dengan meningkatnya laju kegagalan seiring bertambahnya usia pemakaian akibat degradasi material secara bertahap. Studi mengenai analisis keandalan sistem produksi menegaskan bahwa identifikasi fase kegagalan yang tepat menjadi dasar penting dalam menentukan apakah suatu komponen memerlukan pendekatan *preventive*, *predictive*, atau justru dibiarkan hingga gagal secara alami (Setiawan & Nugroho, 2022).

Selain pola berdasarkan kurva bak mandi, kegagalan mesin juga dapat diklasifikasikan berdasarkan mekanisme fisiknya, seperti kegagalan mekanis akibat kelelahan material (*fatigue*), kegagalan akibat korosi, kegagalan akibat keausan permukaan (*wear*), maupun kegagalan akibat kesalahan operasional. Setiap mekanisme kegagalan memiliki karakteristik gejala awal yang berbeda dan dapat dideteksi melalui teknik pemantauan yang berbeda pula. Sebagai contoh, kegagalan akibat kelelahan material pada komponen berputar sering kali dapat dideteksi lebih dini melalui analisis sinyal getaran, sementara kegagalan akibat korosi lebih tepat dipantau melalui inspeksi visual dan pengukuran ketebalan material secara berkala.

Karakteristik kegagalan mesin berputar seperti motor, pompa, dan bantalan (*bearing*) menjadi perhatian khusus dalam literatur rekayasa perawatan karena komponen tersebut banyak dijumpai pada hampir seluruh jenis mesin industri. Kajian mengenai teknik pemantauan getaran untuk keperluan perawatan prediktif menunjukkan bahwa sebagian besar kegagalan pada mesin berputar berawal dari kerusakan bantalan, ketidaksejajaran poros (*misalignment*), maupun ketidakseimbangan (*unbalance*), yang masing-masing menghasilkan tanda tangan getaran (*vibration signature*) yang khas dan dapat diidentifikasi melalui analisis spektrum frekuensi (Romanssini dkk., 2023). Pemahaman terhadap pola-pola kegagalan tersebut memungkinkan teknisi perawatan melakukan diagnosis dini sebelum kerusakan berkembang menjadi kegagalan total yang menyebabkan mesin berhenti beroperasi secara mendadak.

Pola kegagalan juga dapat dianalisis dari perspektif konsekuensi yang ditimbulkannya terhadap sistem secara keseluruhan, bukan hanya dari sisi mekanisme fisiknya semata. Sebagian kegagalan bersifat kritis

karena berdampak langsung pada keselamatan kerja atau menghentikan seluruh lini produksi, sementara sebagian kegagalan lain bersifat minor karena hanya memengaruhi performa mesin tanpa menghentikan operasi secara total. Klasifikasi kegagalan berdasarkan tingkat konsekuensi ini menjadi dasar penting dalam metode *reliability centered maintenance*, yang akan dibahas lebih mendalam pada bab tersendiri dalam buku ini, guna memastikan alokasi sumber daya perawatan diarahkan pada komponen-komponen yang memiliki risiko dan konsekuensi kegagalan paling signifikan.

Beberapa kajian kontemporer juga mengkritisi keterbatasan model kurva bak mandi klasik, terutama pada mesin-mesin modern yang dilengkapi dengan sistem kendali elektronik dan perangkat lunak tertanam. Berbeda dengan komponen mekanis yang mengikuti pola keausan fisik, kegagalan pada perangkat elektronik dan perangkat lunak cenderung tidak menunjukkan fase kegagalan akibat keausan yang jelas, melainkan lebih dipengaruhi oleh faktor keusangan teknologi (*obsolescence*) dan kompatibilitas sistem. Perbedaan karakteristik ini menuntut perekayasa perawatan untuk tidak menerapkan satu model kegagalan secara seragam pada seluruh jenis komponen, melainkan menyesuaikan model analisis dengan sifat dasar dari komponen yang dianalisis.

Pola kegagalan juga dapat bersifat bertahap (*gradual failure*) maupun mendadak (*sudden failure*), yang masing-masing memiliki implikasi berbeda terhadap strategi deteksi dini yang perlu diterapkan. Kegagalan bertahap, seperti keausan bantalan atau penurunan efisiensi pelumasan, umumnya dapat dideteksi melalui pemantauan tren parameter operasi dari waktu ke waktu, sehingga memberikan jendela waktu yang cukup bagi tim perawatan untuk melakukan intervensi sebelum kegagalan total terjadi. Sebaliknya, kegagalan mendadak seperti patahnya poros akibat beban kejut sulit diprediksi melalui pemantauan tren, sehingga strategi mitigasinya lebih menekankan pada desain yang tangguh dan mekanisme proteksi otomatis dibandingkan pada deteksi dini semata.

Pemahaman terhadap pola kegagalan mesin turut diperkaya oleh perkembangan basis data kegagalan industri yang semakin banyak

dipublikasikan dalam literatur ilmiah, baik dalam bentuk basis data spesifik industri maupun basis data generik yang dapat diadaptasi. Ketersediaan basis data semacam ini memungkinkan perusahaan yang belum memiliki riwayat kegagalan internal yang memadai untuk tetap dapat melakukan estimasi awal parameter keandalan komponen, meskipun idealnya estimasi tersebut tetap perlu dikalibrasi ulang seiring terkumpulnya data operasional aktual dari mesin yang bersangkutan di lokasi operasi masing-masing perusahaan.

Karakteristik pola kegagalan juga dipengaruhi oleh jenis pembebanan yang dialami suatu komponen, apakah bersifat statis, dinamis berulang (*cyclic loading*), maupun beban kejut (*impact loading*). Komponen yang mengalami pembebanan dinamis berulang, seperti poros dan roda gigi pada mesin berputar, umumnya lebih rentan terhadap kegagalan kelelahan material dibandingkan komponen yang hanya menahan beban statis. Pemahaman terhadap karakteristik pembebanan ini membantu perekayasa perawatan dalam memilih teknik pemantauan yang paling relevan, misalnya analisis tegangan siklik untuk komponen berbeban dinamis, sehingga upaya deteksi dini kegagalan dapat difokuskan pada mekanisme kerusakan yang paling mungkin terjadi sesuai karakteristik pembebanan masing-masing komponen.

Pola kegagalan pada tingkat sistem juga perlu dibedakan dari pola kegagalan pada tingkat komponen, sebab suatu sistem dapat mengalami kegagalan fungsional meskipun tidak ada satu pun komponen penyusunnya yang mengalami kerusakan fisik, misalnya akibat kesalahan kalibrasi sensor atau parameter kendali yang tidak sesuai. Fenomena kegagalan fungsional semacam ini menegaskan bahwa analisis pola kegagalan tidak dapat hanya berfokus pada kondisi fisik komponen, tetapi juga perlu mencakup evaluasi terhadap kesesuaian parameter operasi dan kalibrasi sistem kendali secara berkala sebagai bagian integral dari program perawatan preventif.

Karakteristik kegagalan pada komponen elektronik dan sistem kendali berbasis perangkat lunak juga semakin relevan untuk dipahami seiring meningkatnya tingkat otomasi pada mesin industri modern. Berbeda dengan kegagalan mekanis yang umumnya dapat diamati

melalui gejala fisik seperti getaran atau suara abnormal, kegagalan pada sistem kendali digital sering kali bersifat intermiten dan sulit direproduksi, misalnya akibat gangguan elektromagnetik, kesalahan pemrograman, atau interaksi tak terduga antar-modul perangkat lunak. Karakteristik kegagalan yang berbeda ini menuntut pendekatan diagnostik yang juga berbeda, melibatkan kompetensi teknisi instrumentasi dan kendali di samping kompetensi teknisi mekanik konvensional.

Studi mengenai pola kegagalan pada gigi transmisi dan komponen berputar lainnya menunjukkan bahwa degradasi material akibat kelelahan sering kali didahului oleh tanda-tanda awal yang dapat dideteksi melalui perubahan pola getaran pada frekuensi harmonik tertentu, jauh sebelum kerusakan struktural yang signifikan terjadi (Feng dkk., 2023). Temuan semacam ini menegaskan pentingnya pemantauan berkelanjutan terhadap sinyal getaran sebagai indikator dini pola kegagalan, alih-alih hanya mengandalkan inspeksi visual berkala yang sering kali baru dapat mendeteksi kerusakan setelah mencapai tahap yang relatif lanjut dan sulit diperbaiki tanpa penggantian komponen secara menyeluruh.

Pemahaman terhadap pola kegagalan komponen juga perlu mempertimbangkan efek interaksi antar-mode kegagalan, di mana satu mekanisme kegagalan dapat mempercepat atau memicu mekanisme kegagalan lain yang berbeda. Sebagai contoh, korosi pada permukaan komponen dapat menciptakan titik konsentrasi tegangan yang kemudian mempercepat inisiasi retak kelelahan pada lokasi yang sama, sehingga kombinasi kedua mekanisme tersebut menghasilkan laju kegagalan yang jauh lebih cepat dibandingkan apabila kedua mekanisme tersebut bekerja secara terpisah. Efek interaksi semacam ini menjadikan analisis pola kegagalan sebagai bidang kajian yang kompleks dan menuntut kehati-hatian dalam interpretasinya.

Pola kegagalan juga dapat dipelajari melalui pendekatan komparatif antar-industri, di mana karakteristik kegagalan mesin sejenis dapat berbeda secara signifikan tergantung pada konteks operasinya. Sebagai ilustrasi, motor listrik yang beroperasi pada industri semen dengan tingkat paparan debu tinggi cenderung

menunjukkan pola kegagalan yang berbeda dibandingkan motor listrik sejenis yang beroperasi pada industri farmasi dengan lingkungan yang jauh lebih terkendali kebersihannya. Perbandingan lintas industri semacam ini memberikan wawasan berharga mengenai sejauh mana faktor lingkungan operasi memengaruhi laju dan pola kegagalan komponen, meskipun spesifikasi teknis komponennya identik.

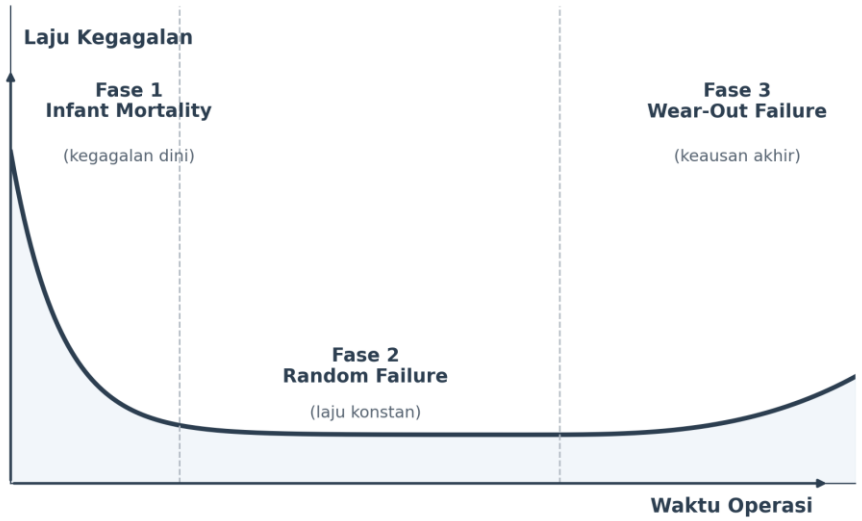
Analisis pola kegagalan berbasis populasi (*population-based failure analysis*) juga semakin banyak diterapkan pada perusahaan yang mengoperasikan armada mesin sejenis dalam jumlah besar, seperti perusahaan transportasi atau perusahaan dengan banyak cabang produksi. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola kegagalan yang konsisten di seluruh populasi mesin, sehingga tindakan pencegahan dapat diterapkan secara serentak pada seluruh unit yang berisiko, alih-alih menunggu kegagalan terjadi pada masing-masing unit secara terpisah sebelum tindakan korektif diambil, yang tentunya jauh lebih efisien dari sisi biaya dan waktu respons organisasi secara keseluruhan.

Pemahaman terhadap pola kegagalan mesin pada akhirnya perlu disikapi secara adaptif, mengingat karakteristik kegagalan suatu mesin dapat berubah seiring waktu akibat modifikasi desain, perubahan kondisi operasi, atau bahkan perubahan kebijakan perawatan yang diterapkan sebelumnya. Model pola kegagalan yang disusun berdasarkan data historis beberapa tahun ke belakang tetap perlu ditinjau ulang secara berkala, sehingga rekomendasi strategi perawatan yang dihasilkan senantiasa mencerminkan kondisi mesin yang paling mutakhir, bukan sekadar mengulang asumsi lama yang mungkin sudah tidak lagi relevan dengan kondisi aktual di lapangan.

Sebagai penutup subbab ini, pemahaman yang mendalam terhadap karakteristik dan pola kegagalan mesin memberikan bekal penting bagi perekayasa perawatan untuk tidak memperlakukan seluruh komponen mesin secara seragam dalam satu strategi perawatan tunggal. Setiap komponen, dengan mekanisme dan pola kegagalannya masing-masing, menuntut pendekatan pemantauan dan pencegahan yang disesuaikan secara spesifik, sehingga alokasi sumber daya perawatan dapat dioptimalkan berdasarkan pemahaman yang akurat mengenai

bagaimana dan kapan setiap jenis komponen berisiko mengalami kegagalan, sebagaimana akan dibahas lebih lanjut dalam kaitannya dengan faktor penyebab kerusakan pada subbab berikutnya.

Gambar 2.1 Kurva Bak Mandi (*Bathtub Curve*) Pola Kegagalan Komponen Mesin



Kurva bak mandi menggambarkan tiga fase kegagalan komponen mesin sepanjang siklus hidupnya. Fase awal ditandai laju kegagalan tinggi akibat cacat produksi, fase tengah relatif stabil, dan fase akhir kembali meningkat akibat keausan material seiring bertambahnya usia pakai.

2.3 Faktor Penyebab Kerusakan Mesin

Kerusakan mesin pada umumnya disebabkan oleh kombinasi berbagai faktor yang dapat dikelompokkan menjadi faktor teknis, faktor operasional, dan faktor lingkungan. Faktor teknis mencakup hal-hal seperti kualitas material komponen, presisi proses manufaktur, serta ketepatan desain yang mempertimbangkan beban kerja aktual mesin. Kesalahan pada tahap desain atau pemilihan material yang tidak sesuai dengan kondisi operasi dapat menjadi akar penyebab kegagalan yang berulang, meskipun program perawatan telah dijalankan dengan baik. Oleh karena itu, analisis penyebab kerusakan mesin tidak dapat hanya

berfokus pada aspek perawatan semata, tetapi juga perlu menelaah kesesuaian desain mesin dengan kondisi operasional di lapangan.

Faktor operasional berkaitan erat dengan bagaimana mesin dioperasikan oleh penggunanya sehari-hari, termasuk kepatuhan terhadap prosedur operasi standar, beban kerja yang diberikan, serta kompetensi operator dalam mengoperasikan mesin secara benar. Pengoperasian mesin di luar kapasitas desainnya, baik dari sisi kecepatan, beban, maupun suhu operasi, dapat mempercepat laju keausan komponen dan meningkatkan risiko kegagalan mendadak. Kajian mengenai kebijakan perawatan preventif pada mesin bubut menunjukkan bahwa sebagian besar kerusakan komponen kritis dapat ditelusuri akarnya pada praktik operasional yang tidak sesuai standar, di samping faktor keausan alami akibat pemakaian jangka panjang (Akbar & Widiasih, 2022).

Faktor lingkungan juga memiliki peran yang tidak dapat diabaikan dalam menyebabkan kerusakan mesin, terutama pada industri yang beroperasi di lingkungan dengan kondisi ekstrem seperti suhu tinggi, kelembaban berlebih, paparan debu, atau bahan kimia korosif. Kondisi lingkungan yang tidak terkendali dapat mempercepat proses korosi pada komponen logam, menurunkan kualitas pelumas, serta memengaruhi kinerja komponen elektronik pada sistem kendali mesin modern. Perusahaan yang beroperasi pada lingkungan kerja ekstrem umumnya perlu menerapkan program perawatan yang lebih intensif dibandingkan perusahaan yang beroperasi pada lingkungan yang lebih terkendali, termasuk penggunaan material tahan korosi dan sistem proteksi tambahan pada komponen-komponen kritis.

Faktor manusia atau *human factor* juga merupakan penyebab signifikan dari kerusakan mesin, baik dalam bentuk kesalahan pengoperasian, kelalaian dalam pelaksanaan prosedur perawatan, maupun kesalahan pada saat perbaikan atau pemasangan komponen. Kesalahan pemasangan komponen, misalnya ketidaksejajaran poros atau pengencangan baut yang tidak sesuai torsi yang dipersyaratkan, dapat menjadi penyebab tersembunyi dari kegagalan berulang yang sulit diidentifikasi apabila tidak dilakukan investigasi mendalam. Aspek ini menegaskan pentingnya pelatihan dan sertifikasi kompetensi

bagi teknisi dan operator mesin sebagai bagian integral dari strategi pencegahan kerusakan, bukan hanya mengandalkan kecanggihan teknologi perawatan semata.

Interaksi antara faktor teknis, operasional, lingkungan, dan manusia inilah yang pada akhirnya membentuk pola kegagalan yang kompleks pada suatu sistem mesin. Studi mengenai kegagalan komponen hidraulis pada pompa sentrifugal menunjukkan bahwa konfigurasi sistem yang kurang tepat dapat berinteraksi dengan kondisi operasi tertentu sehingga mempercepat degradasi komponen dan menurunkan keandalan sistem secara keseluruhan, sebagaimana ditunjukkan dalam analisis kegagalan teknik pada sistem pompa industri (Chen dkk., 2021). Pemahaman menyeluruh terhadap keterkaitan berbagai faktor tersebut menjadi dasar penting bagi rekayasa perawatan dalam merancang strategi pencegahan yang komprehensif, bukan sekadar menangani gejala kerusakan yang tampak di permukaan.

Faktor penyebab kerusakan mesin juga dapat ditinjau dari sisi manajerial, terutama terkait kebijakan pengadaan suku cadang dan penjadwalan perawatan yang kurang tepat. Penggunaan suku cadang non-orisinal atau di luar spesifikasi yang direkomendasikan pabrikan, meskipun dapat menghemat biaya dalam jangka pendek, sering kali menjadi penyebab tersembunyi dari kegagalan berulang akibat ketidaksesuaian toleransi dimensi atau kualitas material. Demikian pula, kebijakan penundaan perawatan terjadwal demi mengejar target produksi jangka pendek kerap kali berujung pada kegagalan yang jauh lebih mahal biayanya dibandingkan penghematan yang diperoleh dari penundaan tersebut, sehingga menegaskan pentingnya konsistensi manajemen dalam menjalankan program perawatan yang telah direncanakan.

Kerusakan mesin akibat interaksi antar-komponen dalam suatu sistem juga patut mendapat perhatian khusus, mengingat kegagalan pada satu komponen sering kali memicu kegagalan berantai (*cascading failure*) pada komponen lain yang terhubung dalam satu rangkaian fungsional. Sebagai contoh, ketidakseimbangan pada poros motor dapat menimbulkan getaran berlebih yang kemudian mempercepat keausan

bantalan, kopling, maupun komponen transmisi lain yang terhubung dengannya. Fenomena kegagalan berantai semacam ini menegaskan pentingnya pendekatan analisis sistem secara holistik, bukan hanya menganalisis komponen secara terisolasi tanpa mempertimbangkan keterkaitannya dengan komponen lain dalam satu sistem mesin yang sama.

Faktor usia peralatan dan riwayat modifikasi yang pernah dilakukan terhadap suatu mesin turut memengaruhi pola kerusakan yang mungkin timbul di kemudian hari. Mesin yang telah beroperasi dalam waktu lama dan mengalami beberapa kali modifikasi atau perbaikan besar (*overhaul*) cenderung memiliki karakteristik kegagalan yang berbeda dibandingkan mesin baru dengan spesifikasi asli dari pabrikan, sehingga riwayat teknis lengkap suatu mesin menjadi informasi penting yang perlu didokumentasikan secara cermat oleh tim perawatan sebagai dasar analisis penyebab kerusakan di masa mendatang.

Faktor penyebab kerusakan mesin juga dapat ditelaah dari sisi kualitas energi yang dipasok ke sistem, terutama pada mesin yang mengandalkan motor listrik sebagai penggerak utama. Ketidakstabilan tegangan, fluktuasi frekuensi, maupun ketidakseimbangan fasa pada suplai listrik dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada kumparan motor dan mempercepat degradasi isolasi listrik, yang pada akhirnya berujung pada kegagalan motor sebelum mencapai umur pakai yang diharapkan. Permasalahan kualitas energi semacam ini sering kali luput dari perhatian tim perawatan mekanis, padahal kontribusinya terhadap tingkat kegagalan mesin listrik industri tergolong cukup signifikan, terutama pada kawasan industri dengan infrastruktur kelistrikan yang belum sepenuhnya stabil.

Kontaminasi pada sistem pelumasan juga merupakan faktor penyebab kerusakan mesin yang sering kali tidak disadari hingga menimbulkan kerusakan signifikan pada komponen yang bergesekan. Kontaminan berupa partikel debu, air, maupun produk oksidasi pelumas dapat mempercepat keausan permukaan komponen dan menurunkan efektivitas pelumasan secara drastis. Praktik pemantauan kondisi pelumas secara berkala, termasuk analisis kandungan partikel

logam di dalamnya, menjadi salah satu teknik deteksi dini yang efektif untuk mengidentifikasi potensi kerusakan komponen internal sebelum gejala kerusakan tersebut termanifestasi secara mekanis dan dapat dirasakan langsung oleh operator mesin.

Faktor getaran berlebih akibat ketidaksejajaran (*misalignment*) maupun ketidakseimbangan (*unbalance*) pada komponen berputar merupakan salah satu penyebab kerusakan mesin yang paling sering ditemukan di lapangan, namun sekaligus paling mudah dicegah apabila prosedur pemasangan dan penyeimbangan komponen dilakukan dengan benar sejak awal. Getaran berlebih yang dibiarkan berlangsung dalam waktu lama dapat merambat menyebabkan kerusakan pada komponen di sekitarnya, termasuk fondasi mesin, sistem perpipaan yang terhubung, hingga peralatan instrumentasi yang sensitif terhadap getaran, sehingga dampaknya dapat meluas jauh melampaui komponen yang menjadi sumber getaran awal.

Faktor desain fondasi dan instalasi mesin juga sering kali menjadi penyebab kerusakan yang kurang mendapat perhatian, terutama pada mesin berkapasitas besar yang menghasilkan gaya dinamis signifikan selama beroperasi. Fondasi yang tidak dirancang dengan mempertimbangkan karakteristik dinamis mesin dapat menyebabkan resonansi struktural yang memperbesar amplitudo getaran, sehingga mempercepat kerusakan komponen meskipun mesin itu sendiri dalam kondisi baik. Permasalahan semacam ini menegaskan pentingnya keterlibatan disiplin ilmu teknik sipil dan struktur dalam tahap perancangan instalasi mesin berat, sebagai pelengkap dari kajian teknik mesin yang biasanya menjadi fokus utama.

Faktor penyimpanan dan penanganan suku cadang sebelum dipasang juga dapat menjadi penyebab kerusakan mesin yang tersembunyi. Komponen presisi seperti bantalan dan segel (*seal*) sangat rentan terhadap kerusakan akibat penyimpanan yang tidak sesuai standar, misalnya terpapar kelembaban berlebih atau tertumpuk beban berat, sehingga meskipun komponen tersebut belum pernah digunakan, kualitasnya telah menurun sebelum instalasi dilakukan. Kesadaran mengenai pentingnya penanganan suku cadang yang tepat, mulai dari penerimaan hingga instalasi, menjadi bagian penting dari upaya

pencegahan kerusakan mesin yang sering kali terlewatkan dalam program perawatan konvensional.

Faktor komunikasi dan koordinasi antar-shift kerja juga dapat menjadi penyebab tersembunyi dari kerusakan mesin, terutama pada perusahaan yang beroperasi dalam sistem kerja bergilir (*shift work*) selama 24 jam. Informasi mengenai anomali atau gejala awal kerusakan yang teramati oleh operator pada satu shift tidak selalu tersampaikan secara efektif kepada operator shift berikutnya, sehingga gejala tersebut dapat berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius sebelum akhirnya ditindaklanjuti. Penerapan sistem serah terima kerja (*handover*) yang terstruktur dan terdokumentasi menjadi salah satu langkah sederhana namun efektif untuk mengurangi risiko kerusakan akibat kesenjangan komunikasi semacam ini.

Faktor penuaan teknologi (*technological obsolescence*) juga perlu dipertimbangkan sebagai penyebab tidak langsung dari kerusakan mesin, terutama pada peralatan yang telah beroperasi cukup lama sehingga komponen penggantinya sudah tidak lagi diproduksi oleh pabrikan asli. Kondisi ini memaksa perusahaan menggunakan komponen alternatif yang mungkin tidak sepenuhnya sesuai spesifikasi asli, yang pada gilirannya dapat meningkatkan risiko ketidaksesuaian teknis dan mempercepat terjadinya kerusakan berulang pada mesin yang bersangkutan, sehingga perencanaan penggantian aset menjadi pertimbangan penting yang tidak dapat ditunda terlalu lama oleh manajemen perusahaan.

Sebagai rangkuman, keseluruhan faktor penyebab kerusakan mesin yang telah diuraikan menunjukkan bahwa kerusakan jarang disebabkan oleh satu faktor tunggal secara terisolasi, melainkan merupakan hasil interaksi kompleks antara berbagai faktor teknis, operasional, lingkungan, manusia, dan manajerial. Oleh karena itu, pendekatan pencegahan kerusakan yang efektif menuntut analisis menyeluruh yang mempertimbangkan seluruh dimensi tersebut secara simultan, bukan hanya berfokus pada satu aspek saja, sehingga program perawatan yang dirancang dapat benar-benar menyasar akar permasalahan dan bukan sekadar menangani gejala kerusakan yang tampak di permukaan semata.

Pemahaman terhadap faktor penyebab kerusakan mesin juga perlu diintegrasikan ke dalam proses desain ulang (*redesign*) komponen atau sistem yang berulang kali mengalami kegagalan dengan mekanisme serupa. Ketika suatu komponen menunjukkan pola kegagalan berulang meskipun telah menjalani program perawatan preventif yang memadai, hal tersebut sering kali mengindikasikan adanya kelemahan mendasar pada desain atau pemilihan material komponen itu sendiri, yang tidak dapat diatasi semata-mata melalui intensifikasi jadwal perawatan, melainkan memerlukan tinjauan ulang terhadap spesifikasi teknis komponen yang bersangkutan secara menyeluruh.

Faktor budaya organisasi juga memainkan peran penting yang sering kali kurang mendapat perhatian dalam pembahasan penyebab kerusakan mesin. Organisasi dengan budaya kerja yang menghargai pelaporan dini terhadap gejala anomali, tanpa rasa takut disalahkan (*blame culture*), cenderung mampu mendeteksi dan mencegah kerusakan lebih dini dibandingkan organisasi dengan budaya kerja yang menghukum pelaporan masalah. Membangun budaya keterbukaan semacam ini menjadi salah satu investasi jangka panjang yang sering kali memberikan dampak lebih besar terhadap pengurangan tingkat kerusakan mesin dibandingkan investasi pada teknologi pemantauan canggih semata, tanpa disertai perubahan budaya kerja yang mendukung penerapannya secara efektif.

Tabel 2.2 Klasifikasi Faktor Penyebab Kerusakan Mesin

Kategori Faktor	Contoh Penyebab	Dampak Umum terhadap Mesin
Teknis/Desain	Pemilihan material tidak sesuai beban kerja	Kegagalan struktural dini
Operasional	Pengoperasian di luar kapasitas desain	Percepatan keausan komponen
Lingkungan	Suhu, kelembaban, dan paparan korosif	Korosi dan degradasi pelumas
Manusia	Kesalahan pemasangan atau prosedur	Kegagalan tersembunyi dan berulang

Kategori Faktor	Contoh Penyebab	Dampak Umum terhadap Mesin
	perawatan	
Manajerial	Penundaan jadwal perawatan, suku cadang tidak sesuai spesifikasi	Kegagalan berulang dan biaya perbaikan meningkat

2.4 Analisis Kegagalan pada Sistem Mesin

Analisis kegagalan merupakan proses sistematis untuk mengidentifikasi akar penyebab suatu kegagalan mesin dengan tujuan mencegah terulangnya kejadian serupa di masa mendatang. Proses ini umumnya dimulai dengan pengumpulan data kejadian kegagalan, meliputi waktu terjadinya kegagalan, gejala yang muncul sebelum kegagalan, kondisi operasi pada saat kegagalan terjadi, serta riwayat perawatan komponen yang bersangkutan. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan berbagai metode, seperti *Root Cause Analysis* (RCA), *Fault Tree Analysis* (FTA), maupun *failure mode and effect analysis* (FMEA), yang masing-masing memiliki pendekatan dan tingkat kedalaman analisis yang berbeda.

Fault Tree Analysis merupakan metode analisis kegagalan yang menggunakan pendekatan deduktif dengan menyusun diagram pohon logika yang menghubungkan kejadian kegagalan puncak (*top event*) dengan berbagai kejadian dasar (*basic event*) yang menjadi penyebabnya. Metode ini sangat berguna untuk mengidentifikasi kombinasi kegagalan komponen yang dapat menyebabkan kegagalan sistem secara keseluruhan, terutama pada sistem yang memiliki redundansi atau mekanisme keselamatan berlapis. Penerapan FTA pada proses produksi industri menunjukkan bahwa metode ini efektif digunakan untuk mengidentifikasi titik-titik kritis dalam suatu sistem yang berkontribusi paling besar terhadap probabilitas kegagalan total, sehingga upaya perbaikan dapat difokuskan pada titik-titik tersebut secara lebih efisien (Rahmawati & Nugroho, 2022).

Failure mode and effect analysis mengambil pendekatan yang sedikit berbeda dengan berfokus pada identifikasi seluruh kemungkinan mode kegagalan suatu komponen beserta dampaknya terhadap sistem secara keseluruhan, yang kemudian diberi peringkat berdasarkan tingkat keparahan, frekuensi kejadian, dan kemudahan deteksi. Hasil peringkat ini, yang sering disebut sebagai *risk priority number* (RPN), digunakan untuk menentukan prioritas tindakan perbaikan atau pencegahan yang perlu dilakukan. Metode FMEA banyak digunakan sebagai tahap awal dalam penyusunan program *reliability centered maintenance*, karena memberikan gambaran komprehensif mengenai berbagai skenario kegagalan yang mungkin terjadi pada suatu sistem sebelum strategi perawatan yang lebih rinci disusun.

Perkembangan teknologi digital turut memperkaya metode analisis kegagalan modern, terutama melalui pemanfaatan data historis dalam jumlah besar yang dianalisis menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk mengidentifikasi pola kegagalan yang sulit dikenali melalui analisis manual. Kajian mengenai sistem pendukung keputusan berbasis *Internet of Things* dan pembelajaran mesin untuk keperluan perawatan prediktif menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data mampu mengidentifikasi korelasi tersembunyi antara berbagai parameter operasi dengan kejadian kegagalan, yang sulit ditemukan melalui pendekatan analisis konvensional berbasis pengalaman teknisi semata (Rosati dkk., 2023). Pendekatan berbasis data ini menjadi pelengkap penting bagi metode analisis kegagalan tradisional, bukan pengganti sepenuhnya, karena pemahaman mendalam mengenai prinsip kerja mesin tetap diperlukan untuk menginterpretasikan hasil analisis data secara tepat.

Hasil analisis kegagalan yang dilakukan secara konsisten akan membentuk basis pengetahuan (*knowledge base*) yang sangat berharga bagi organisasi dalam jangka panjang, karena dapat digunakan untuk memperbaiki desain komponen, menyempurnakan prosedur operasi, maupun menyesuaikan interval perawatan berdasarkan pengalaman kegagalan aktual di lapangan. Dokumentasi hasil analisis kegagalan yang baik juga bermanfaat sebagai bahan pembelajaran bagi teknisi baru, sehingga pengetahuan mengenai karakteristik kegagalan mesin tidak hanya bertumpu pada individu tertentu, melainkan menjadi aset

pengetahuan organisasi yang dapat diwariskan dan dikembangkan secara berkelanjutan seiring dengan bertambahnya pengalaman operasional perusahaan.

Proses analisis kegagalan idealnya tidak berhenti pada tahap identifikasi akar penyebab semata, melainkan berlanjut pada tahap verifikasi efektivitas tindakan perbaikan yang diterapkan. Tindakan perbaikan yang tidak diverifikasi keefektifannya berisiko hanya menghilangkan gejala kegagalan sementara tanpa benar-benar mengatasi akar masalahnya, sehingga kegagalan serupa berpotensi terulang kembali di kemudian hari. Oleh karena itu, siklus analisis kegagalan yang baik senantiasa mencakup tahap pemantauan pascaperbaikan untuk memastikan bahwa tindakan yang diambil benar-benar efektif dalam mencegah terulangnya kegagalan dengan mekanisme yang sama.

Analisis kegagalan pada sistem mesin yang kompleks juga sering kali memerlukan pendekatan lintas disiplin, melibatkan tidak hanya insinyur mesin, tetapi juga insinyur material, insinyur listrik, dan bahkan ahli statistik untuk memodelkan data kegagalan secara lebih akurat. Kolaborasi lintas disiplin ini menjadi semakin penting pada sistem produksi modern yang mengintegrasikan komponen mekanis, elektrik, dan digital dalam satu kesatuan fungsional, sehingga kegagalan pada satu domain dapat memiliki akar penyebab yang berasal dari domain lain yang berbeda, menuntut sudut pandang analisis yang lebih luas dan komprehensif.

Analisis kegagalan juga dapat memanfaatkan pendekatan simulasi numerik, seperti analisis elemen hingga (*finite element analysis*), untuk memvalidasi hipotesis mengenai penyebab kegagalan struktural pada komponen mesin. Simulasi semacam ini memungkinkan insinyur perawatan memodelkan distribusi tegangan pada komponen dalam berbagai skenario pembebanan tanpa harus melakukan pengujian fisik yang merusak, sehingga dapat membantu memastikan apakah suatu kegagalan disebabkan oleh desain yang tidak memadai untuk menahan beban aktual, ataukah disebabkan oleh faktor lain seperti cacat material atau kondisi operasi yang menyimpang dari asumsi desain awal.

Keterlibatan pihak eksternal, seperti konsultan spesialis atau laboratorium uji independen, terkadang diperlukan dalam analisis kegagalan pada kasus-kasus yang sangat kompleks atau memiliki implikasi hukum, misalnya kegagalan yang menyebabkan kecelakaan kerja serius. Pelibatan pihak ketiga yang independen dapat memberikan perspektif objektif tambahan di luar bias internal organisasi, sekaligus memberikan legitimasi tambahan terhadap hasil investigasi apabila diperlukan untuk keperluan pelaporan kepada otoritas pengawas ketenagakerjaan atau untuk keperluan klaim asuransi terkait kerugian yang ditimbulkan oleh kegagalan mesin tersebut.

Analisis kegagalan yang baik juga perlu mempertimbangkan dimensi biaya dalam menentukan kedalaman investigasi yang dilakukan, sebab tidak semua kegagalan memerlukan tingkat kedalaman analisis yang sama. Kegagalan pada komponen non-kritis dengan biaya penggantian rendah cukup dianalisis secara ringkas untuk keperluan pencatatan, sementara kegagalan pada komponen kritis dengan konsekuensi keselamatan atau finansial signifikan memerlukan investigasi mendalam yang melibatkan berbagai metode analisis secara komprehensif. Prinsip proporsionalitas semacam ini penting diterapkan agar sumber daya investigasi kegagalan dialokasikan secara efisien, sesuai dengan tingkat risiko dan konsekuensi yang ditimbulkan oleh masing-masing jenis kegagalan yang terjadi pada sistem mesin perusahaan.

Kualitas analisis kegagalan juga sangat bergantung pada ketepatan waktu pelaksanaannya. Investigasi yang dilakukan segera setelah kegagalan terjadi cenderung menghasilkan temuan yang lebih akurat dibandingkan investigasi yang tertunda, karena bukti fisik seperti pola keausan, serpihan komponen, maupun kondisi pelumas pada saat kegagalan dapat berubah atau hilang seiring berjalannya waktu dan berlanjutnya operasi mesin. Oleh karena itu, banyak organisasi menetapkan prosedur baku yang mewajibkan pengamanan lokasi dan komponen yang gagal segera setelah insiden terjadi, sebelum dilakukan tindakan perbaikan, guna memastikan bukti yang diperlukan untuk analisis akar penyebab tetap tersedia secara utuh.

Analisis kegagalan yang efektif juga menuntut penggunaan teknik bertanya berulang seperti metode *five whys*, yang mendorong tim investigasi untuk terus menggali lebih dalam di balik setiap jawaban penyebab kegagalan yang teridentifikasi, hingga mencapai akar masalah yang sesungguhnya dan bukan hanya gejala permukaan. Sebagai ilustrasi, kegagalan bantalan tidak cukup dijelaskan hanya dengan alasan bantalan aus semata, melainkan perlu ditelusuri lebih lanjut mengapa bantalan tersebut aus lebih cepat dari perkiraan, apakah akibat pelumasan yang tidak memadai, kontaminasi, beban berlebih, atau kombinasi dari berbagai faktor tersebut secara bersamaan.

Pemanfaatan analisis metalurgi dan uji laboratorium juga sering kali diperlukan dalam investigasi kegagalan komponen kritis, terutama untuk memastikan apakah kegagalan disebabkan oleh cacat material bawaan, proses manufaktur yang tidak sesuai standar, atau murni akibat kondisi operasi yang ekstrem. Pemeriksaan fraktografi terhadap permukaan patahan komponen, misalnya, dapat mengungkapkan pola kegagalan kelelahan yang khas berupa garis-garis pantai (*beach marks*), yang membedakannya dari pola kegagalan akibat beban berlebih mendadak yang biasanya menunjukkan permukaan patahan yang lebih kasar dan tidak beraturan.

Integrasi hasil analisis kegagalan ke dalam basis data terpusat perusahaan juga memungkinkan dilakukannya analisis tren lintas waktu dan lintas lokasi, terutama bagi perusahaan yang mengoperasikan mesin sejenis di berbagai fasilitas produksi. Analisis tren semacam ini dapat mengungkapkan pola kegagalan sistemik yang mungkin tidak terlihat apabila data hanya dianalisis secara terisolasi pada satu unit mesin atau satu lokasi produksi saja, sehingga memberikan wawasan yang lebih komprehensif mengenai kelemahan desain atau praktik operasional yang mungkin berlaku secara umum pada seluruh armada peralatan sejenis yang dimiliki perusahaan.

Sebagai penutup pembahasan bab ini, pemahaman yang mendalam mengenai keandalan dan pola kegagalan mesin menjadi fondasi yang tidak tergantikan sebelum organisasi dapat merancang strategi perawatan yang tepat sasaran. Tanpa pemahaman yang memadai mengenai bagaimana dan mengapa suatu mesin mengalami

kegagalan, program perawatan yang disusun berisiko menjadi tidak efektif, baik karena terlalu konservatif sehingga membebani biaya secara berlebihan, maupun terlalu longgar sehingga membiarkan risiko kegagalan kritis tetap tinggi. Bab-bab selanjutnya dalam buku ini akan menguraikan bagaimana pemahaman keandalan dan kegagalan tersebut diterjemahkan ke dalam strategi *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance* secara lebih rinci dan aplikatif.

Tabel 2.3 Perbandingan Metode Analisis Kegagalan Mesin

Metode	Pendekatan	Kelebihan Utama	Keterbatasan
Root Cause Analysis (RCA)	Investigasi mendalam pasca-kejadian	Mengidentifikasi akar masalah secara spesifik	Bersifat reaktif, dilakukan setelah kegagalan terjadi
Fault Tree Analysis (FTA)	Deduktif, diagram logika kegagalan	Efektif untuk sistem dengan banyak interaksi komponen	Membutuhkan data probabilitas yang akurat
FMEA	Induktif, berbasis mode kegagalan komponen	Dapat dilakukan sejak tahap desain (proaktif)	Bergantung pada penilaian subjektif tim analis
Analisis berbasis data (*Machine Learning*)	Pengenalan pola dari data historis besar	Mampu mendeteksi korelasi tersembunyi	Membutuhkan volume data dan infrastruktur digital memadai

Gambar 2.2 Alur Umum Proses Analisis Kegagalan Mesin

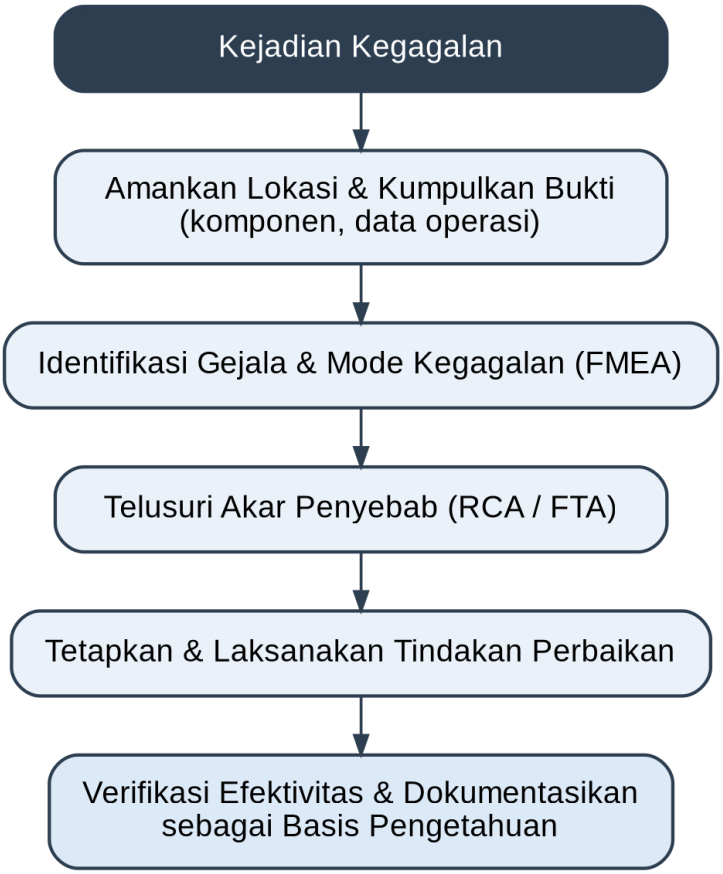


Diagram ini menggambarkan tahapan umum dalam proses analisis kegagalan mesin, mulai dari pengamanan bukti hingga dokumentasi hasil sebagai basis pengetahuan organisasi untuk pencegahan kegagalan serupa di masa mendatang.

Rangkuman Bab 2

Bab ini telah menguraikan konsep keandalan dan kegagalan mesin sebagai fondasi ilmiah bagi seluruh strategi perawatan yang akan dibahas pada bab-bab selanjutnya. Konsep *reliability*, *maintainability*, dan *availability* (RAM) menjadi kerangka analisis fundamental yang memungkinkan organisasi mengukur dan mengevaluasi performa mesin secara kuantitatif, sekaligus menjadi dasar bagi penyusunan kebijakan interval perawatan yang lebih presisi dibandingkan

pendekatan yang hanya mengandalkan intuisi atau rekomendasi generik dari pabrikan peralatan.

Pemahaman terhadap karakteristik dan pola kegagalan mesin, termasuk model kurva bak mandi dan klasifikasi mekanisme kegagalan berdasarkan sifat fisiknya, memberikan landasan bagi perekayasa perawatan untuk memilih strategi deteksi dan pencegahan yang paling sesuai dengan jenis kegagalan yang dihadapi. Pola kegagalan bertahap dan mendadak menuntut pendekatan mitigasi yang berbeda, sebagaimana kegagalan mekanis dan kegagalan pada sistem kendali digital juga memerlukan kompetensi diagnostik yang berbeda pula dari tim perawatan yang menanganinya.

Faktor penyebab kerusakan mesin bersifat multidimensi, mencakup faktor teknis, operasional, lingkungan, manusia, hingga manajerial, yang saling berinteraksi membentuk pola kegagalan yang kompleks pada suatu sistem produksi. Pemahaman menyeluruh terhadap keterkaitan berbagai faktor tersebut menjadi prasyarat penting sebelum organisasi dapat merancang program pencegahan kerusakan yang benar-benar efektif dan menyasar akar permasalahan, bukan sekadar menangani gejala kerusakan yang tampak di permukaan semata.

Terakhir, analisis kegagalan yang sistematis melalui metode seperti *Root Cause Analysis*, *Fault Tree Analysis*, dan *failure mode and effect analysis* menjadi instrumen penting bagi organisasi untuk belajar dari setiap kejadian kegagalan yang dialami, sehingga kejadian serupa dapat dicegah terulang di masa mendatang. Integrasi hasil analisis kegagalan ke dalam basis pengetahuan organisasi yang terdokumentasi dengan baik akan membentuk siklus pembelajaran berkelanjutan yang menjadi ciri khas organisasi dengan budaya perawatan yang matang dan berorientasi pada keandalan jangka panjang.

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 2

1. Jelaskan perbedaan mendasar antara konsep *reliability*, *maintainability*, dan *availability*, serta bagaimana ketiganya saling

memengaruhi dalam menentukan kinerja suatu sistem mesin secara keseluruhan.

2. Sebuah mesin produksi memiliki total waktu operasi 4.000 jam dengan 8 kali kejadian kegagalan sepanjang periode tersebut, serta total waktu perbaikan kumulatif sebesar 40 jam. Hitunglah nilai MTBF, MTTR, dan *availability* mesin tersebut, kemudian interpretasikan maknanya bagi tim perawatan.

3. Uraikan ketiga fase pada kurva bak mandi (*bathtub curve*) beserta karakteristik masing-masing fase, dan berikan contoh kasus nyata untuk setiap fase yang mungkin dijumpai pada mesin produksi di industri manufaktur.

4. Diskusikan mengapa faktor manusia (*human factor*) sering kali menjadi penyebab tersembunyi dari kegagalan mesin yang berulang, dan bagaimana organisasi dapat mengurangi risiko tersebut melalui pendekatan pelatihan dan standardisasi prosedur kerja.

5. Bandingkan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dengan *failure mode and effect analysis* (FMEA) dari segi pendekatan, kelebihan, dan keterbatasan masing-masing dalam konteks analisis kegagalan sistem mesin industri.

6. Jelaskan mengapa distribusi Weibull banyak digunakan dalam pemodelan pola kegagalan komponen mesin, serta bagaimana interpretasi parameter bentuknya dapat membantu menentukan strategi perawatan yang tepat.

7. Berikan contoh kasus kegagalan berantai (*cascading failure*) pada suatu sistem mesin dan jelaskan bagaimana pendekatan analisis sistem secara holistik dapat membantu mencegah terjadinya kegagalan serupa di masa mendatang.

8. Jelaskan perbedaan antara inherent *availability*, *achieved availability*, dan *operational availability*, serta diskusikan mengapa perbedaan ini penting dipahami agar perusahaan tidak salah menafsirkan laporan kinerja perawatan mesinnya.

9. Uraikan bagaimana teknik *five whys* dapat digunakan dalam investigasi kegagalan mesin, serta berikan contoh penerapannya pada kasus kegagalan bantalan (*bearing*) yang berulang pada suatu mesin produksi.



BAB 3
MANAJEMEN PERAWATAN MESIN

3.1 Perencanaan dan Penjadwalan Perawatan

Perencanaan perawatan (*maintenance planning*) merupakan proses menentukan apa yang perlu dikerjakan, sumber daya apa yang dibutuhkan, dan bagaimana pekerjaan tersebut akan dilaksanakan, sebelum suatu tindakan perawatan benar-benar dijalankan di lapangan. Perencanaan yang baik mencakup identifikasi ruang lingkup pekerjaan, estimasi kebutuhan tenaga kerja dan material, penyusunan prosedur kerja yang aman, serta antisipasi terhadap kemungkinan kendala yang dapat menghambat pelaksanaan pekerjaan. Tanpa perencanaan yang memadai, pelaksanaan perawatan cenderung berjalan secara improvisatif, sehingga rentan menimbulkan pemborosan waktu, keterlambatan penyelesaian pekerjaan, dan risiko keselamatan kerja yang lebih tinggi bagi teknisi yang melaksanakannya.

Penjadwalan perawatan (*maintenance scheduling*) merupakan kelanjutan dari proses perencanaan, yang secara spesifik menentukan kapan suatu pekerjaan perawatan akan dilaksanakan dan siapa yang akan mengerjakannya. Meskipun sering dianggap sebagai satu kesatuan aktivitas, perencanaan dan penjadwalan sesungguhnya merupakan dua fungsi yang berbeda: perencanaan menjawab pertanyaan mengenai apa dan bagaimana suatu pekerjaan dilakukan, sedangkan penjadwalan menjawab pertanyaan mengenai kapan dan siapa yang mengerjakannya. Kekeliruan dalam memisahkan kedua fungsi ini sering kali menjadi salah satu penyebab utama mengapa program perawatan pada suatu organisasi tidak berjalan optimal, meskipun secara teknis sumber daya yang dimiliki sebenarnya sudah memadai untuk melaksanakan pekerjaan tersebut.

Penyusunan jadwal perawatan yang efektif perlu mempertimbangkan keseimbangan antara ketersediaan mesin bagi kebutuhan produksi dengan kebutuhan waktu henti bagi pelaksanaan pekerjaan perawatan itu sendiri. Pendekatan yang umum diterapkan adalah penjadwalan berbasis prioritas, di mana pekerjaan dikelompokkan berdasarkan tingkat urgensi dan dampaknya terhadap keselamatan maupun produksi, sehingga sumber daya perawatan yang terbatas dapat dialokasikan secara optimal pada pekerjaan-pekerjaan yang memberikan dampak paling signifikan terlebih dahulu, alih-alih dikerjakan berdasarkan urutan kedatangan permintaan semata tanpa mempertimbangkan tingkat kepentingannya.

Salah satu tantangan utama dalam perencanaan dan penjadwalan perawatan adalah rendahnya proporsi waktu kerja produktif teknisi (*wrench time*) yang benar-benar digunakan untuk mengerjakan tugas perawatan itu sendiri, dibandingkan dengan waktu yang terbuang untuk mencari informasi, menunggu suku cadang, atau menunggu izin kerja. Organisasi dengan perencanaan dan penjadwalan yang tidak terstruktur umumnya hanya mencapai wrench time sekitar 20 hingga 35 persen, sementara organisasi dengan praktik perencanaan kelas dunia dapat mencapai wrench time hingga 55 persen atau lebih, menunjukkan besarnya potensi peningkatan produktivitas yang dapat diperoleh melalui perbaikan sistem perencanaan dan penjadwalan perawatan semata, tanpa memerlukan penambahan jumlah personel perawatan.

Pemanfaatan *computerized maintenance management system* (CMMS) semakin menjadi tulang punggung bagi proses perencanaan dan penjadwalan perawatan modern, karena memungkinkan integrasi data pekerjaan, ketersediaan suku cadang, dan alokasi tenaga kerja dalam satu platform terpadu. Kajian komprehensif mengenai penerapan CMMS pada industri manufaktur menunjukkan bahwa sistem ini berkontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi operasional, optimalisasi pemanfaatan sumber daya, dan penurunan waktu henti mesin, melalui kemampuannya mengelola perintah kerja, data aset, dan jadwal perawatan preventif secara otomatis dan terdokumentasi dengan baik.

Penjadwalan perawatan juga perlu mempertimbangkan keterkaitannya dengan rencana produksi (*production schedule*) secara eksplisit, sehingga waktu henti yang dibutuhkan untuk pekerjaan perawatan dapat diselaraskan dengan periode produksi yang paling tidak mengganggu pemenuhan target output. Pendekatan penjadwalan terintegrasi semacam ini menuntut komunikasi dan koordinasi yang erat antara departemen perawatan dan departemen produksi, sebagaimana telah dibahas pada bab sebelumnya, agar kedua fungsi tersebut dapat bersinergi alih-alih saling berbenturan kepentingan dalam memperebutkan waktu operasional mesin yang sama.

Horizon waktu perencanaan dan penjadwalan perawatan lazimnya dibagi ke dalam beberapa tingkatan, mulai dari perencanaan jangka panjang (tahunan) yang berfokus pada perawatan besar (*overhaul*) dan investasi peralatan, perencanaan jangka menengah (bulanan) yang mengatur alokasi sumber daya dan suku cadang, hingga penjadwalan jangka pendek (mingguan dan harian) yang menentukan urutan pekerjaan spesifik bagi setiap teknisi. Hierarki perencanaan berjenjang ini memastikan bahwa keputusan strategis jangka panjang dapat diterjemahkan secara konsisten ke dalam tindakan operasional harian, tanpa kehilangan keterkaitan antara tujuan besar organisasi dengan aktivitas teknis yang dilaksanakan di lapangan setiap harinya.

Evaluasi kepatuhan jadwal (*schedule compliance*) menjadi indikator penting untuk menilai efektivitas proses perencanaan dan penjadwalan yang diterapkan. Tingkat kepatuhan jadwal yang rendah, di bawah 80 persen misalnya, umumnya mengindikasikan adanya masalah mendasar dalam proses perencanaan, baik berupa estimasi waktu pekerjaan yang tidak akurat, gangguan pekerjaan darurat yang terlalu sering mengganggu jadwal terencana, maupun kurangnya disiplin organisasi dalam menjalankan jadwal yang telah disusun. Pemantauan indikator ini secara berkala memungkinkan organisasi mengidentifikasi akar masalah perencanaan secara dini, sebelum berdampak lebih jauh terhadap keandalan keseluruhan sistem produksi perusahaan.

Tabel 3.1 Perbedaan Fungsi Perencanaan dan Penjadwalan Perawatan

Aspek	Perencanaan (*Planning*)	Penjadwalan (*Scheduling*)
Fokus utama	Apa dan bagaimana pekerjaan dilakukan	Kapan dan siapa yang mengerjakan
Horizon waktu	Jangka menengah hingga panjang	Jangka pendek (harian/mingguan)
Output	Prosedur kerja, kebutuhan material dan tenaga kerja	Urutan dan waktu pelaksanaan pekerjaan
Pihak yang terlibat	Perencana perawatan, teknisi senior	Supervisor lapangan, koordinator produksi
Indikator keberhasilan	Akurasi estimasi sumber daya	Tingkat kepatuhan jadwal (*schedule compliance*)

3.2 Organisasi dan Sumber Daya *Maintenance*

Struktur organisasi unit perawatan memiliki pengaruh besar terhadap efektivitas pelaksanaan program perawatan secara keseluruhan. Terdapat beberapa model struktur organisasi yang umum diterapkan, mulai dari struktur tersentralisasi (*centralized*) di mana seluruh sumber daya perawatan dikelola oleh satu unit pusat yang melayani seluruh area produksi, struktur terdesentralisasi (*decentralized*) di mana setiap area produksi memiliki tim perawatan tersendiri, hingga struktur hibrida yang menggabungkan kedua pendekatan tersebut sesuai kebutuhan spesifik organisasi. Pemilihan struktur yang tepat perlu mempertimbangkan skala operasi, kompleksitas peralatan, dan sebaran geografis fasilitas produksi yang dimiliki perusahaan.

Struktur tersentralisasi umumnya menawarkan keunggulan berupa efisiensi pemanfaatan sumber daya, karena tenaga kerja dan peralatan khusus dapat digunakan secara bergantian di berbagai area sesuai kebutuhan, tanpa duplikasi sumber daya pada masing-masing

area produksi. Namun demikian, struktur ini juga memiliki keterbatasan berupa waktu respons yang lebih lambat terhadap kebutuhan mendesak, karena tim perawatan perlu berpindah dari satu lokasi ke lokasi lain, serta berkurangnya pemahaman kontekstual teknisi terhadap karakteristik spesifik mesin pada area tertentu, dibandingkan apabila mereka ditempatkan secara permanen pada satu area produksi tertentu.

Sebaliknya, struktur terdesentralisasi menawarkan keunggulan berupa respons yang lebih cepat dan pemahaman yang lebih mendalam terhadap karakteristik mesin di area tersebut, karena teknisi bekerja secara konsisten pada peralatan yang sama dalam jangka waktu panjang. Kelemahan utama struktur ini terletak pada potensi duplikasi sumber daya dan kurang optimalnya pemanfaatan tenaga kerja spesialis yang mungkin dibutuhkan hanya sesekali pada masing-masing area, sehingga struktur ini umumnya lebih sesuai diterapkan pada organisasi dengan fasilitas produksi yang tersebar secara geografis atau memiliki karakteristik proses yang sangat berbeda antar-area produksi.

Sumber daya manusia merupakan komponen paling krusial dalam organisasi perawatan, mengingat secanggih apapun teknologi dan sistem yang diterapkan, keberhasilan pelaksanaannya tetap bergantung pada kompetensi personel yang mengoperasikannya. Kompetensi yang dibutuhkan pada organisasi perawatan modern tidak lagi terbatas pada keterampilan mekanis dan kelistrikan konvensional semata, tetapi juga mencakup kemampuan analisis data, pemahaman terhadap teknologi sensor dan pemantauan kondisi, serta kemampuan berkomunikasi secara efektif dengan berbagai fungsi lain dalam organisasi, mengingat kompleksitas pekerjaan perawatan yang semakin bersifat lintas disiplin pada era industri modern saat ini.

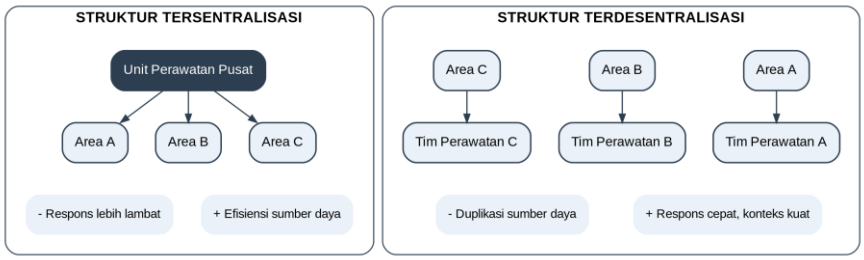
Perencanaan sumber daya manusia pada organisasi perawatan perlu mempertimbangkan komposisi yang tepat antara teknisi generalis, yang mampu menangani berbagai jenis pekerjaan perawatan umum, dengan teknisi spesialis yang memiliki keahlian mendalam pada bidang tertentu, seperti spesialis instrumentasi, spesialis kelistrikan tegangan tinggi, atau spesialis analisis getaran. Komposisi yang tidak seimbang, misalnya terlalu banyak generalis tanpa cukup spesialis untuk

menangani permasalahan kompleks, dapat menghambat penyelesaian pekerjaan perawatan yang memerlukan keahlian mendalam, sementara terlalu banyak spesialis dengan sedikit generalis dapat mengakibatkan pemborosan sumber daya untuk pekerjaan rutin yang sebenarnya tidak memerlukan keahlian spesialis tersebut.

Selain sumber daya manusia, organisasi perawatan juga memerlukan sumber daya peralatan pendukung, seperti alat ukur, alat diagnostik, kendaraan operasional, serta fasilitas bengkel untuk perbaikan komponen yang dapat dilakukan secara internal. Investasi pada peralatan pendukung ini perlu dipertimbangkan secara cermat, dengan mempertimbangkan frekuensi penggunaan, biaya investasi, dan alternatif penyewaan atau kerja sama dengan pihak eksternal untuk peralatan yang jarang digunakan namun membutuhkan investasi besar, sehingga alokasi modal organisasi dapat digunakan secara lebih efisien dan proporsional sesuai kebutuhan aktual di lapangan.

Pengembangan kompetensi berkelanjutan bagi personel perawatan menjadi kebutuhan yang tidak dapat diabaikan, mengingat teknologi dan metode perawatan terus berkembang seiring waktu. Program pelatihan yang terstruktur, sertifikasi kompetensi formal, serta mekanisme transfer pengetahuan antar-generasi teknisi perlu menjadi bagian integral dari strategi pengelolaan sumber daya manusia pada organisasi perawatan, agar organisasi tidak kehilangan kapabilitas krusial ketika terjadi pergantian personel akibat pensiun, pengunduran diri, atau mutasi ke bagian lain dalam perusahaan.

Gambar 3.1 Perbandingan Struktur Organisasi Perawatan



Perbandingan dua model struktur organisasi perawatan yang umum diterapkan. Pemilihan struktur perlu disesuaikan dengan skala operasi, sebaran lokasi, dan karakteristik proses produksi masing-masing perusahaan.

3.3 Pengelolaan Suku Cadang dan Inventori

Pengelolaan suku cadang merupakan salah satu aspek manajemen perawatan yang paling menentukan kecepatan pemulihan mesin ketika terjadi kegagalan, sekaligus salah satu sumber biaya terbesar dalam operasional perawatan apabila tidak dikelola dengan baik. Suku cadang yang tidak tersedia saat dibutuhkan dapat memperpanjang waktu henti mesin secara signifikan, sementara suku cadang yang menumpuk berlebihan mengakibatkan modal kerja perusahaan terkunci pada persediaan yang tidak produktif, sehingga diperlukan keseimbangan yang cermat antara ketersediaan dan efisiensi biaya dalam pengelolaan inventori suku cadang.

Klasifikasi suku cadang berdasarkan tingkat kekritisan menjadi langkah awal yang penting dalam menyusun kebijakan inventori yang tepat. Suku cadang kritis, yang kegagalannya berdampak langsung pada penghentian produksi atau risiko keselamatan, umumnya perlu selalu tersedia dalam stok meskipun frekuensi penggunaannya rendah, sementara suku cadang non-kritis dengan dampak minimal dapat dikelola dengan kebijakan inventori yang lebih longgar, mengandalkan waktu pengadaan dari pemasok tanpa perlu disimpan dalam jumlah besar di gudang perusahaan. Tinjauan literatur mengenai manajemen suku cadang pada era Industri 4.0 menegaskan bahwa klasifikasi berbasis kekritisan menjadi salah satu kategori utama dalam kerangka

pengelolaan suku cadang modern, di samping karakteristik permintaan dan jaringan kepemilikan suku cadang tersebut (Kulshrestha dkk., 2024).

Metode klasifikasi FSN (*fast-moving*, *slow-moving*, *non-moving*) banyak digunakan dalam praktik industri untuk mengelompokkan suku cadang berdasarkan frekuensi pergerakannya, yang kemudian menjadi dasar penentuan kebijakan pengadaan dan penyimpanan yang berbeda untuk masing-masing kategori. Suku cadang fast-moving umumnya dikelola dengan metode stok minimum-maksimum untuk memastikan ketersediaan berkelanjutan tanpa kelebihan stok, sementara suku cadang slow-moving dan non-moving memerlukan evaluasi berkala untuk menentukan apakah stok tersebut masih relevan dipertahankan atau perlu dilakukan tindakan lain seperti pengembalian ke pemasok atau penghapusan dari daftar inventori perusahaan.

Penerapan metode *economic order quantity* (EOQ) dan variannya, seperti *periodic order quantity* (POQ), sering digunakan untuk menentukan jumlah dan waktu pemesanan suku cadang yang optimal, dengan mempertimbangkan trade-off antara biaya pemesanan dan biaya penyimpanan. Studi mengenai pengendalian persediaan suku cadang mesin produksi pada industri semen menunjukkan bahwa penerapan metode EOQ dan POQ secara konsisten mampu menekan total biaya persediaan dibandingkan pendekatan pengadaan yang dilakukan secara ad hoc tanpa perhitungan kuantitatif yang jelas, sekaligus menjaga tingkat ketersediaan suku cadang pada level yang memadai untuk mendukung kelancaran operasi produksi perusahaan.

Pengelolaan suku cadang juga perlu mempertimbangkan strategi jaringan kepemilikan, apakah suku cadang dikelola sepenuhnya oleh perusahaan pengguna, disediakan melalui kerja sama dengan produsen peralatan asli (*original equipment manufacturer*), ataukah melalui pihak ketiga penyedia layanan suku cadang. Masing-masing strategi memiliki implikasi berbeda terhadap biaya kepemilikan, kecepatan respons, dan tingkat ketergantungan perusahaan terhadap pihak eksternal, sehingga pemilihan strategi yang tepat perlu disesuaikan dengan tingkat kekritisan peralatan, ketersediaan suku

cadang di pasar, dan kapasitas modal kerja yang dimiliki oleh perusahaan pengguna peralatan tersebut.

Integrasi antara sistem pengelolaan suku cadang dengan sistem perencanaan perawatan turut menjadi perhatian penting dalam literatur terkini, mengingat kebutuhan suku cadang pada dasarnya merupakan turunan langsung dari kebijakan perawatan yang diterapkan. Kajian mengenai model gabungan perawatan dan inventori suku cadang menunjukkan bahwa pendekatan yang mengintegrasikan data kondisi mesin secara langsung ke dalam keputusan pengadaan suku cadang mampu mengurangi risiko kekurangan maupun kelebihan stok dibandingkan pendekatan yang mengelola kedua fungsi tersebut secara terpisah tanpa keterkaitan data yang jelas antara keduanya.

Praktik penyimpanan dan penanganan suku cadang juga memerlukan perhatian khusus, sebagaimana telah disinggung pada bab sebelumnya, mengingat komponen presisi seperti bantalan dan segel sangat rentan terhadap kerusakan akibat penyimpanan yang tidak sesuai standar. Fasilitas penyimpanan suku cadang idealnya dilengkapi dengan pengendalian suhu dan kelembaban yang memadai, sistem identifikasi dan penataan yang memudahkan pencarian, serta prosedur rotasi stok untuk memastikan suku cadang yang disimpan dalam jangka waktu lama tidak mengalami penurunan kualitas sebelum sempat digunakan pada saat dibutuhkan.

Tabel 3.2 Klasifikasi Suku Cadang Berdasarkan Kekritisan dan Pergerakan

Kategori	Karakteristik	Kebijakan Inventori yang Disarankan
Kritis, *fast-moving*	Sering digunakan, kegagalan berdampak besar	Stok minimum-maksimum, selalu tersedia
Kritis, *slow-moving*	Jarang digunakan, kegagalan berdampak besar	Selalu tersimpan meski jarang dipakai
Non-kritis, *fast-moving*	Sering digunakan, dampak kegagalan rendah	EOQ/POQ, pengadaan rutin terjadwal

Kategori	Karakteristik	Kebijakan Inventori yang Disarankan
Non-kritis, *non-moving*	Jarang/tidak pernah digunakan	Evaluasi berkala, pertimbangkan penghapusan

3.4 Dokumentasi dan Sistem Informasi Perawatan

Dokumentasi perawatan yang baik menjadi fondasi bagi seluruh proses pengambilan keputusan dalam manajemen perawatan, mulai dari perencanaan jadwal, analisis kegagalan, hingga evaluasi kinerja keseluruhan sistem perawatan. Dokumentasi yang dimaksud mencakup data riwayat kerusakan, catatan tindakan perawatan yang telah dilakukan, spesifikasi teknis peralatan, prosedur kerja standar, serta data hasil pemantauan kondisi mesin dari waktu ke waktu. Tanpa dokumentasi yang memadai, organisasi kehilangan kemampuan untuk belajar dari pengalaman masa lalu, sehingga cenderung mengulangi kesalahan yang sama secara berulang tanpa pernah benar-benar memperbaiki akar permasalahannya secara sistematis.

Perkembangan teknologi informasi telah mengubah secara fundamental cara organisasi mendokumentasikan dan mengelola data perawatan, dari sistem pencatatan manual berbasis kertas menuju *computerized maintenance management system* (CMMS) yang terintegrasi. Sistem CMMS modern umumnya mencakup modul manajemen aset, manajemen perintah kerja, manajemen inventori suku cadang, penjadwalan *preventive maintenance*, serta pelaporan dan analitik kinerja perawatan dalam satu platform terpadu, sehingga memudahkan akses dan analisis data bagi seluruh pemangku kepentingan yang terlibat dalam pengelolaan perawatan mesin di perusahaan.

Manfaat penerapan CMMS tidak hanya terbatas pada efisiensi administratif, tetapi juga mencakup peningkatan kualitas pengambilan keputusan melalui ketersediaan data historis yang akurat dan mudah diakses. Kajian komprehensif mengenai CMMS pada industri manufaktur menunjukkan bahwa penerapan sistem ini berkontribusi

terhadap peningkatan efisiensi operasional, pemanfaatan sumber daya yang lebih optimal, dan penurunan waktu henti mesin, melalui kapabilitas dasar seperti pengelolaan perintah kerja, manajemen aset dan inventori, serta penjadwalan perawatan preventif yang terotomatisasi secara sistematis.

Implementasi CMMS yang berhasil tidak semata-mata bergantung pada kecanggihan fitur perangkat lunak yang dipilih, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kualitas proses implementasi itu sendiri, termasuk pembentukan tim implementasi lintas fungsi yang melibatkan departemen perawatan, produksi, dan teknologi informasi, migrasi data aset yang akurat dari sistem lama, serta pelatihan pengguna yang memadai agar seluruh personel dapat memanfaatkan sistem tersebut secara optimal. Organisasi yang mengabaikan aspek implementasi ini berisiko memperoleh sistem yang canggih secara teknis namun tidak benar-benar dimanfaatkan secara efektif oleh penggunanya di lapangan.

Kualitas data yang dimasukkan ke dalam sistem informasi perawatan menjadi faktor penentu utama nilai manfaat yang dapat diperoleh dari sistem tersebut, sesuai dengan prinsip umum dalam pengelolaan data bahwa kualitas keluaran analisis tidak akan pernah melebihi kualitas data masukannya. Disiplin pencatatan data yang konsisten oleh seluruh teknisi lapangan, termasuk pencatatan waktu mulai dan selesai pekerjaan, deskripsi gejala kerusakan yang jelas, serta suku cadang yang digunakan, menjadi prasyarat penting agar data yang terkumpul dalam sistem benar-benar dapat diandalkan untuk keperluan analisis keandalan dan pengambilan keputusan strategis di kemudian hari.

Sistem informasi perawatan modern juga semakin terintegrasi dengan sistem perencanaan sumber daya perusahaan (*enterprise resource planning*) secara menyeluruh, memungkinkan data perawatan dihubungkan langsung dengan data keuangan, pengadaan, dan produksi. Integrasi semacam ini memungkinkan analisis biaya perawatan yang lebih akurat, otomatisasi proses pengadaan suku cadang berdasarkan kebutuhan aktual, serta visibilitas yang lebih baik bagi manajemen puncak mengenai kontribusi fungsi perawatan terhadap kinerja bisnis perusahaan secara keseluruhan, bukan sekadar

dipandang sebagai pusat biaya yang terpisah dari fungsi bisnis inti perusahaan.

Keamanan dan integritas data perawatan juga menjadi perhatian yang semakin penting seiring dengan meningkatnya digitalisasi sistem perawatan, mengingat data operasional dan konfigurasi sistem kendali mesin yang tersimpan dalam sistem informasi perawatan berpotensi menjadi target serangan siber apabila tidak dilindungi dengan memadai. Organisasi perlu menerapkan kebijakan keamanan siber yang sesuai, termasuk kontrol akses yang ketat, pencadangan data secara berkala, dan pemisahan jaringan antara sistem informasi perawatan dengan sistem kendali operasional mesin, guna mencegah potensi gangguan yang dapat berdampak serius terhadap keandalan dan keselamatan operasi produksi perusahaan.

Sebagai penutup pembahasan bab ini, manajemen perawatan yang efektif pada dasarnya merupakan perpaduan harmonis antara perencanaan dan penjadwalan yang matang, struktur organisasi dan sumber daya manusia yang kompeten, pengelolaan suku cadang yang efisien, serta dokumentasi dan sistem informasi yang andal. Keempat pilar tersebut saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan satu sama lain; kelemahan pada salah satu pilar akan membatasi efektivitas keseluruhan sistem manajemen perawatan, betapapun kuatnya pilar-pilar lain yang telah dibangun oleh organisasi. Pemahaman menyeluruh terhadap keempat pilar ini menjadi bekal penting sebelum pembaca mempelajari penerapan strategi *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance* secara lebih spesifik pada bab-bab selanjutnya.

Rangkuman Bab 3

Bab ini telah menguraikan empat pilar utama manajemen perawatan mesin, yaitu perencanaan dan penjadwalan, organisasi dan sumber daya, pengelolaan suku cadang dan inventori, serta dokumentasi dan sistem informasi perawatan. Perencanaan menjawab pertanyaan apa dan bagaimana suatu pekerjaan dilakukan, sedangkan penjadwalan menentukan kapan dan siapa yang mengerjakannya; pemisahan yang jelas antara kedua fungsi ini menjadi kunci peningkatan produktivitas kerja teknisi perawatan secara signifikan.

Struktur organisasi perawatan, baik tersentralisasi, terdesentralisasi, maupun hibrida, perlu dipilih sesuai dengan skala operasi dan karakteristik fasilitas produksi perusahaan, didukung oleh komposisi sumber daya manusia yang tepat antara teknisi generalis dan spesialis. Pengelolaan suku cadang yang baik menuntut klasifikasi berdasarkan kekritisan dan pola pergerakan, dipadukan dengan metode kuantitatif seperti EOQ dan POQ untuk mengoptimalkan keseimbangan antara ketersediaan dan efisiensi biaya inventori.

Terakhir, dokumentasi dan sistem informasi perawatan, khususnya melalui penerapan CMMS, menjadi tulang punggung bagi seluruh proses pengambilan keputusan dalam manajemen perawatan modern. Keberhasilan penerapan sistem informasi ini tidak hanya bergantung pada kecanggihan teknologi yang dipilih, tetapi juga pada kualitas proses implementasi, disiplin pencatatan data, serta integrasinya dengan sistem informasi bisnis lain di dalam organisasi secara menyeluruh.

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 3

1. Jelaskan perbedaan mendasar antara fungsi perencanaan dan penjadwalan perawatan, serta mengapa pemisahan kedua fungsi ini penting bagi peningkatan produktivitas kerja teknisi perawatan.
2. Bandingkan struktur organisasi perawatan tersentralisasi dan terdesentralisasi, serta diskusikan konteks industri seperti apa yang lebih sesuai untuk masing-masing struktur tersebut.
3. Uraikan bagaimana metode klasifikasi FSN dapat digunakan untuk menentukan kebijakan inventori suku cadang yang berbeda-beda sesuai karakteristik pergerakannya.
4. Diskusikan mengapa suku cadang kritis dengan frekuensi penggunaan rendah tetap perlu disimpan dalam stok, meskipun hal tersebut tampak tidak efisien dari sudut pandang manajemen inventori konvensional.

5. Jelaskan faktor-faktor apa saja yang menentukan keberhasilan implementasi CMMS pada suatu organisasi, di luar aspek kecanggihan fitur perangkat lunak itu semata.

6. Analisislah mengapa kualitas data yang dimasukkan ke dalam sistem informasi perawatan menjadi faktor penentu utama nilai manfaat yang dapat diperoleh dari sistem tersebut.

7. Diskusikan risiko keamanan siber yang mungkin timbul dari digitalisasi sistem informasi perawatan, serta langkah-langkah mitigasi yang dapat diterapkan oleh organisasi untuk mengatasinya.



BAB 4
PREVENTIVE MAINTENANCE

4.1 Konsep dan Prinsip *Preventive Maintenance*

Preventive maintenance didefinisikan sebagai tindakan perawatan yang dilaksanakan secara terjadwal berdasarkan interval waktu atau penggunaan tertentu, dengan tujuan mencegah terjadinya kegagalan sebelum kegagalan tersebut benar-benar muncul. Prinsip dasar dari *preventive maintenance* adalah bahwa lebih murah dan lebih aman untuk mencegah kerusakan melalui inspeksi dan penggantian komponen secara terjadwal, dibandingkan menunggu komponen tersebut gagal dan menimbulkan dampak yang lebih besar terhadap produksi, keselamatan, maupun biaya perbaikan yang harus ditanggung oleh perusahaan.

Preventive maintenance secara konseptual berbeda dari *predictive maintenance*, meskipun keduanya sama-sama bersifat proaktif. *Preventive maintenance* mendasarkan keputusan tindakannya pada interval waktu atau penggunaan yang telah ditetapkan sebelumnya, tanpa mempertimbangkan kondisi aktual komponen pada saat tindakan dilaksanakan, sedangkan *predictive maintenance* mendasarkan keputusannya pada data kondisi aktual komponen yang dipantau secara berkelanjutan. Perbedaan mendasar ini memiliki implikasi penting: *preventive maintenance* berisiko melakukan penggantian komponen yang sebenarnya masih dalam kondisi baik (*over-maintenance*), sementara *predictive maintenance* berupaya memaksimalkan pemanfaatan umur pakai komponen berdasarkan kondisi aktualnya.

Terdapat dua jenis utama *preventive maintenance* yang umum diterapkan dalam praktik industri, yaitu *time-based maintenance* yang menetapkan interval perawatan berdasarkan satuan waktu kalender, seperti mingguan atau bulanan, dan *usage-based maintenance* yang menetapkan interval berdasarkan satuan penggunaan aktual, seperti jam

operasi atau jumlah siklus produksi. Pemilihan antara kedua pendekatan tersebut perlu mempertimbangkan karakteristik mekanisme kegagalan komponen yang bersangkutan; komponen yang mekanisme kegagalannya lebih dipengaruhi oleh waktu, seperti degradasi karet akibat paparan lingkungan, lebih sesuai menggunakan pendekatan time-based, sementara komponen yang kegagalannya lebih dipengaruhi oleh intensitas penggunaan lebih sesuai menggunakan pendekatan usage-based.

Penentuan interval *preventive maintenance* yang optimal merupakan salah satu tantangan teknis utama dalam penerapan strategi ini, mengingat interval yang terlalu pendek akan meningkatkan biaya perawatan dan waktu henti produksi secara tidak perlu, sementara interval yang terlalu panjang meningkatkan risiko kegagalan sebelum jadwal perawatan berikutnya tiba. Kajian mengenai optimasi periode *preventive maintenance* menunjukkan bahwa penentuan interval yang tepat berdasarkan analisis statistik data kegagalan historis mampu mengurangi ekspektasi waktu henti secara signifikan sekaligus meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan, dibandingkan penentuan interval yang hanya mengandalkan rekomendasi generik dari pabrikan peralatan (Al-Duais dkk., 2022).

Prinsip *preventive maintenance* juga mengenal konsep kebijakan penggantian, seperti *age replacement policy* yang mengganti komponen setelah mencapai usia tertentu sejak dipasang, dan *block replacement policy* yang mengganti seluruh komponen sejenis secara serentak pada interval tetap tanpa mempertimbangkan usia individual masing-masing komponen. Studi mengenai penerapan metode age replacement pada komponen mesin kertas menunjukkan bahwa pendekatan ini efektif digunakan untuk menentukan interval penggantian dan pemeriksaan optimal berdasarkan minimisasi total biaya downtime, khususnya pada komponen dengan pola kegagalan yang mengikuti distribusi probabilitas yang dapat dimodelkan secara matematis dengan baik (Ramadhan & Widiasih, 2023).

Penerapan *preventive maintenance* yang berlebihan tanpa mempertimbangkan kondisi aktual komponen dapat menimbulkan dampak negatif yang kurang disadari, yaitu *maintenance-induced*

failure, di mana tindakan pembongkaran dan pemasangan ulang komponen yang sebenarnya masih dalam kondisi baik justru menimbulkan risiko kerusakan baru akibat kesalahan prosedur pemasangan, kontaminasi selama proses pembongkaran, atau gangguan terhadap komponen di sekitarnya yang sebelumnya berfungsi normal. Fenomena ini menjadi salah satu argumen utama mengapa strategi *predictive maintenance* semakin banyak dipertimbangkan sebagai pelengkap, bahkan pengganti sebagian, dari *preventive maintenance* konvensional pada komponen-komponen kritis tertentu.

Prinsip fundamental yang perlu dipegang dalam penerapan *preventive maintenance* adalah bahwa strategi ini paling efektif diterapkan pada komponen dengan pola kegagalan yang berkaitan erat dengan usia pemakaian (*age-related failure*), sebagaimana dijelaskan melalui konsep kurva bak mandi pada bab sebelumnya, dan menjadi kurang efektif pada komponen dengan pola kegagalan acak yang tidak berkaitan dengan usia pemakaian. Kesalahan dalam menerapkan *preventive maintenance* pada komponen yang sebenarnya memiliki pola kegagalan acak dapat mengakibatkan pemborosan sumber daya perawatan tanpa memberikan manfaat pengurangan risiko kegagalan yang signifikan, sehingga pemahaman terhadap karakteristik pola kegagalan komponen menjadi prasyarat penting sebelum menetapkan strategi *preventive maintenance* yang tepat.

Tabel 4.1 Perbandingan *Time-Based* dan *Usage-Based Preventive Maintenance*

Aspek	*Time-based maintenance*	*Usage-based maintenance*
Dasar penjadwalan	Satuan waktu kalender (hari/minggu/bulan)	Satuan penggunaan aktual (jam/siklus)
Cocok untuk	Komponen dipengaruhi lingkungan/waktu	Komponen dipengaruhi intensitas pemakaian
Contoh penerapan	Penggantian filter udara bulanan	Penggantian oli setiap 500 jam operasi
Kelemahan utama	Tidak sensitif	Membutuhkan

Aspek	*Time-based maintenance*	*Usage-based maintenance*
	terhadap variasi beban kerja	pencatatan penggunaan yang akurat

4.2 Penyusunan Program *Preventive Maintenance*

Penyusunan program *preventive maintenance* yang efektif diawali dengan proses identifikasi dan inventarisasi seluruh peralatan yang menjadi objek perawatan, dilengkapi dengan data spesifikasi teknis, riwayat kegagalan, dan tingkat kekritisan masing-masing peralatan terhadap keseluruhan proses produksi. Tahap ini menjadi fondasi penting karena akan menentukan skala dan kompleksitas program *preventive maintenance* yang perlu dikembangkan, serta membantu organisasi memprioritaskan alokasi sumber daya perawatan pada peralatan-peralatan yang memiliki dampak paling signifikan terhadap keandalan dan keselamatan operasi produksi perusahaan.

Setelah inventarisasi peralatan selesai dilakukan, langkah selanjutnya adalah menentukan daftar tugas perawatan (*maintenance task list*) untuk masing-masing peralatan, yang mencakup jenis pekerjaan yang perlu dilakukan, interval pelaksanaan, estimasi durasi pekerjaan, serta kebutuhan sumber daya seperti tenaga kerja, suku cadang, dan peralatan pendukung. Penyusunan daftar tugas ini idealnya mengombinasikan rekomendasi dari pabrikan peralatan, standar industri yang berlaku, serta pengalaman empiris organisasi dari riwayat kegagalan yang pernah terjadi sebelumnya, sehingga program yang disusun benar-benar relevan dengan kondisi operasi aktual perusahaan, bukan sekadar menyalin rekomendasi generik tanpa penyesuaian konteks.

Penyusunan program *preventive maintenance* juga perlu mempertimbangkan pengelompokan tugas berdasarkan interval yang sama ke dalam satu paket pekerjaan (*maintenance package*), sehingga waktu henti mesin yang dibutuhkan dapat dioptimalkan dengan menggabungkan beberapa tugas perawatan sekaligus dalam satu

kesempatan penghentian operasi, dibandingkan menghentikan mesin secara terpisah untuk setiap tugas perawatan yang berbeda-beda. Pendekatan pengelompokan ini terutama relevan bagi mesin-mesin dengan biaya penghentian operasi yang tinggi, di mana setiap kesempatan penghentian perlu dimanfaatkan seoptimal mungkin untuk menyelesaikan sebanyak mungkin pekerjaan perawatan yang telah dijadwalkan.

Dokumentasi prosedur kerja standar (*standard operating procedure*) untuk setiap tugas *preventive maintenance* menjadi elemen penting yang sering kali terlewatkan dalam penyusunan program, padahal keberadaan prosedur yang jelas dan terstandardisasi sangat menentukan konsistensi kualitas pelaksanaan pekerjaan, terlepas dari siapa teknisi yang mengerjakannya. Prosedur kerja yang baik mencakup langkah-langkah pelaksanaan secara rinci, spesifikasi teknis yang harus dipenuhi, peralatan keselamatan yang diperlukan, serta kriteria penerimaan hasil pekerjaan, sehingga variabilitas kualitas pelaksanaan antar-teknisi dapat diminimalkan secara signifikan.

Program *preventive maintenance* yang baik juga perlu mempertimbangkan aspek keselamatan kerja secara eksplisit, termasuk prosedur *lock out tag out* (LOTO) untuk mengisolasi sumber energi berbahaya sebelum pekerjaan perawatan dilaksanakan, penggunaan alat pelindung diri yang sesuai, serta identifikasi bahaya spesifik yang mungkin timbul selama pelaksanaan masing-masing jenis pekerjaan perawatan. Integrasi aspek keselamatan ke dalam program *preventive maintenance* sejak tahap perencanaan, bukan sekadar ditambahkan sebagai lampiran terpisah, mencerminkan kematangan budaya keselamatan kerja pada suatu organisasi perawatan.

Penentuan frekuensi review dan pembaruan program *preventive maintenance* juga perlu ditetapkan secara berkala, mengingat karakteristik kegagalan peralatan dapat berubah seiring waktu akibat perubahan kondisi operasi, modifikasi peralatan, atau akumulasi data kegagalan baru yang memberikan wawasan tambahan mengenai pola kegagalan aktual. Organisasi yang tidak pernah meninjau ulang program *preventive maintenance* yang telah disusun berisiko menjalankan program yang semakin tidak relevan dengan kondisi

aktual peralatan, baik karena terlalu konservatif maupun karena tidak lagi memadai untuk mengantisipasi risiko kegagalan yang berkembang seiring waktu.

Keterlibatan operator lini produksi dalam penyusunan dan pelaksanaan sebagian tugas *preventive maintenance*, sejalan dengan konsep *autonomous maintenance* dalam kerangka *total productive maintenance* yang akan dibahas lebih mendalam pada bab tersendiri, dapat memperluas kapasitas pelaksanaan program *preventive maintenance* tanpa harus menambah jumlah personel teknisi perawatan secara signifikan. Operator yang dilatih untuk melakukan inspeksi dasar, pembersihan, dan pelumasan sederhana dapat mendeteksi gejala awal kerusakan lebih cepat, mengingat mereka berinteraksi langsung dengan mesin sepanjang waktu operasi, dibandingkan teknisi perawatan yang hanya mengunjungi mesin pada saat jadwal inspeksi terjadwal tiba.

4.3 Inspeksi dan Pelumasan Berkala

Inspeksi berkala merupakan salah satu komponen inti dari *preventive maintenance*, yang bertujuan mendeteksi tanda-tanda awal kerusakan atau penyimpangan kondisi peralatan sebelum berkembang menjadi kegagalan yang lebih serius. Inspeksi dapat dilakukan melalui berbagai metode, mulai dari inspeksi visual sederhana yang mengandalkan panca indera teknisi, hingga inspeksi menggunakan alat bantu seperti termometer inframerah, alat ukur getaran genggam, atau kamera endoskopi untuk memeriksa bagian internal peralatan yang tidak dapat diakses secara langsung tanpa melakukan pembongkaran.

Efektivitas inspeksi visual sangat bergantung pada kompetensi dan pengalaman teknisi yang melaksanakannya, mengingat kemampuan mengenali anomali visual, suara abnormal, atau bau yang tidak biasa merupakan keterampilan yang berkembang seiring pengalaman dan tidak dapat sepenuhnya distandardisasi melalui prosedur tertulis semata. Oleh karena itu, program pelatihan dan pendampingan bagi teknisi junior oleh teknisi senior yang berpengalaman menjadi investasi penting untuk membangun kapabilitas inspeksi visual yang mumpuni dalam jangka panjang, di

samping penyediaan daftar periksa (*checklist*) yang terstruktur untuk memastikan konsistensi cakupan inspeksi.

Pelumasan berkala merupakan salah satu tugas *preventive maintenance* yang paling fundamental namun sering kali kurang mendapat perhatian yang memadai, padahal degradasi permukaan akibat gesekan mekanis yang tidak memadai pelumasannya diperkirakan menjadi penyebab dari sebagian besar kegagalan komponen mekanis pada mesin industri. Program pelumasan yang efektif mencakup pemilihan jenis pelumas yang sesuai dengan spesifikasi peralatan, penentuan interval pelumasan yang tepat, serta prosedur aplikasi yang benar untuk mencegah kontaminasi atau pemberian pelumas yang berlebihan, yang keduanya sama-sama dapat merugikan kinerja komponen yang dilumasi.

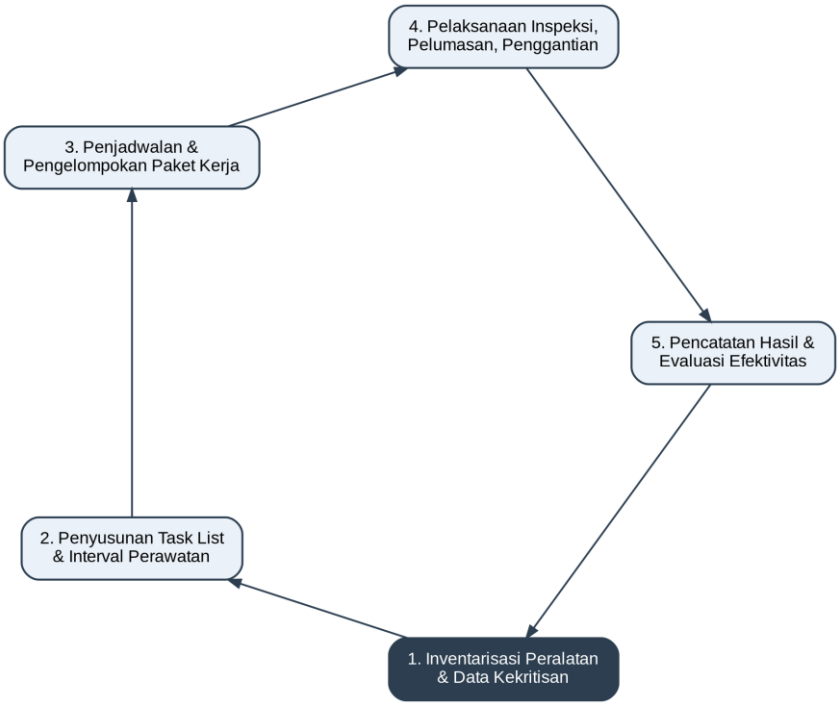
Kontaminasi pelumas merupakan salah satu masalah yang paling sering menjadi akar penyebab kegagalan komponen, sebagaimana telah dibahas pada bab sebelumnya, sehingga program pelumasan yang baik perlu disertai dengan praktik pengendalian kontaminasi yang ketat, mulai dari penyimpanan pelumas yang tepat, penggunaan wadah dan alat aplikasi yang bersih, hingga penyaringan pelumas sebelum digunakan pada peralatan yang sensitif terhadap kontaminasi partikel. Praktik-praktik sederhana semacam ini, meskipun tampak remeh, terbukti memberikan dampak signifikan terhadap perpanjangan umur pakai komponen yang dilumasi secara konsisten dari waktu ke waktu.

Analisis pelumas (*oil analysis*) menjadi teknik pelengkap yang semakin banyak diadopsi untuk memantau kondisi pelumas dan komponen yang dilumasinya secara tidak langsung, melalui pemeriksaan parameter seperti viskositas, kandungan air, tingkat oksidasi, dan keberadaan partikel logam hasil keausan komponen. Peningkatan konsentrasi partikel logam tertentu dalam pelumas dapat menjadi indikator dini kerusakan komponen internal, seperti bantalan atau roda gigi, jauh sebelum gejala kerusakan tersebut dapat dideteksi melalui metode inspeksi konvensional lainnya, sehingga analisis pelumas sering kali dikategorikan sebagai jembatan antara pendekatan *preventive* dan *predictive maintenance*.

Penentuan rute inspeksi dan pelumasan (*lubrication route*) yang efisien menjadi aspek praktis penting dalam pelaksanaan program ini, terutama pada fasilitas produksi berskala besar dengan jumlah titik pelumasan yang banyak dan tersebar. Penyusunan rute yang mempertimbangkan urutan lokasi secara logis dapat menghemat waktu perjalanan teknisi secara signifikan, sehingga lebih banyak waktu dapat dialokasikan untuk pelaksanaan tugas inspeksi dan pelumasan itu sendiri, dibandingkan waktu yang terbuang untuk berpindah dari satu titik ke titik lain tanpa urutan yang efisien.

Standardisasi peralatan dan bahan pelumas juga menjadi pertimbangan penting dalam penyusunan program pelumasan berkala, mengingat penggunaan terlalu banyak jenis pelumas yang berbeda pada satu fasilitas produksi meningkatkan kompleksitas pengelolaan inventori dan risiko kesalahan penggunaan pelumas yang tidak sesuai spesifikasi pada peralatan tertentu. Upaya konsolidasi dan standardisasi jenis pelumas yang digunakan, tanpa mengorbankan kesesuaian teknis terhadap kebutuhan masing-masing peralatan, dapat menyederhanakan pengelolaan program pelumasan secara keseluruhan sekaligus mengurangi risiko kesalahan manusia dalam pelaksanaannya di lapangan.

Gambar 4.1 Siklus Pelaksanaan Program *Preventive Maintenance*



Siklus pelaksanaan program *preventive maintenance* bersifat iteratif dan berkelanjutan, di mana hasil evaluasi efektivitas menjadi masukan bagi penyempurnaan task list dan interval perawatan pada siklus berikutnya.

4.4 Evaluasi Efektivitas *Preventive Maintenance*

Evaluasi efektivitas program *preventive maintenance* diperlukan untuk memastikan bahwa sumber daya yang telah diinvestasikan pada program tersebut benar-benar memberikan manfaat sepadan berupa penurunan tingkat kegagalan dan peningkatan keandalan peralatan. Tanpa evaluasi yang sistematis, organisasi berisiko terus menjalankan program *preventive maintenance* yang sebenarnya tidak lagi efektif atau bahkan berlebihan, tanpa pernah menyadari bahwa sumber daya yang dialokasikan untuk program tersebut dapat dimanfaatkan secara lebih produktif pada aspek perawatan lain yang lebih membutuhkan perhatian.

Salah satu indikator utama untuk mengevaluasi efektivitas *preventive maintenance* adalah rasio antara pekerjaan perawatan

terencana (*planned maintenance*) dengan pekerjaan perawatan tidak terencana (*unplanned/emergency maintenance*) yang dilaksanakan dalam suatu periode. Organisasi dengan program *preventive maintenance* yang efektif umumnya menunjukkan tren peningkatan proporsi pekerjaan terencana dan penurunan proporsi pekerjaan darurat dari waktu ke waktu, yang mengindikasikan bahwa program *preventive maintenance* berhasil mencegah kegagalan yang sebelumnya sering terjadi secara tidak terduga sebelum program tersebut diterapkan secara konsisten.

Indikator lain yang relevan adalah tren *mean time between failure* (MTBF) untuk peralatan yang menjadi objek program *preventive maintenance*, di mana peningkatan nilai MTBF dari waktu ke waktu mengindikasikan efektivitas program dalam mengurangi frekuensi kegagalan. Namun demikian, evaluasi berdasarkan MTBF perlu dilakukan secara hati-hati dengan mempertimbangkan periode waktu yang cukup panjang, mengingat fluktuasi jangka pendek dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor lain di luar efektivitas program *preventive maintenance* itu sendiri, seperti perubahan beban kerja atau kondisi lingkungan operasi yang tidak konsisten.

Evaluasi biaya juga menjadi dimensi penting dalam menilai efektivitas *preventive maintenance*, melalui perbandingan antara biaya pelaksanaan program *preventive maintenance* dengan estimasi biaya kegagalan yang berhasil dihindari berkat program tersebut. Perbandingan semacam ini membantu organisasi mengidentifikasi apakah tingkat investasi pada *preventive maintenance* sudah berada pada titik optimal, ataukah masih terdapat ruang untuk penyesuaian, baik berupa peningkatan intensitas program pada komponen yang masih sering mengalami kegagalan, maupun pengurangan intensitas pada komponen yang jarang menunjukkan tanda-tanda kegagalan meskipun interval perawatan telah diperpanjang.

Audit kepatuhan pelaksanaan program (*PM compliance audit*) juga perlu dilakukan secara berkala untuk memastikan bahwa jadwal *preventive maintenance* yang telah disusun benar-benar dilaksanakan sesuai rencana, bukan hanya tercatat sebagai selesai dalam sistem tanpa pelaksanaan aktual yang memadai di lapangan. Praktik pencatatan

pekerjaan sebagai selesai tanpa pelaksanaan yang sesungguhnya, yang terkadang terjadi akibat tekanan target produksi atau keterbatasan waktu, dapat menciptakan ilusi keandalan yang menyesatkan, di mana catatan menunjukkan kepatuhan tinggi namun risiko kegagalan aktual tetap tidak berkurang secara signifikan.

Evaluasi efektivitas *preventive maintenance* idealnya juga mempertimbangkan analisis terhadap kegagalan yang tetap terjadi meskipun program *preventive maintenance* telah dilaksanakan secara konsisten, guna mengidentifikasi apakah kegagalan tersebut disebabkan oleh interval perawatan yang belum tepat, prosedur kerja yang kurang memadai, atau memang merupakan kegagalan dengan pola acak yang secara inheren tidak dapat dicegah sepenuhnya melalui *preventive maintenance* semata. Analisis semacam ini menjadi masukan berharga untuk penyempurnaan program *preventive maintenance* secara berkelanjutan, sekaligus menjadi indikasi apakah diperlukan pendekatan strategi perawatan lain, seperti *predictive maintenance*, untuk komponen-komponen tertentu yang telah diidentifikasi.

Sebagai penutup pembahasan bab ini, penerapan *preventive maintenance* yang efektif menuntut lebih dari sekadar kepatuhan terhadap jadwal yang telah disusun, tetapi juga evaluasi berkelanjutan yang memastikan bahwa program tersebut senantiasa relevan dan proporsional terhadap kebutuhan aktual peralatan. Organisasi yang mampu membangun siklus evaluasi dan penyempurnaan yang konsisten akan memperoleh manfaat optimal dari investasi *preventive maintenance* yang dilakukan, sekaligus membangun fondasi yang kokoh sebelum melangkah pada penerapan strategi *predictive maintenance* yang lebih canggih, sebagaimana akan dibahas secara mendalam pada bab berikutnya.

Rangkuman Bab 4

Bab ini telah menguraikan konsep dan prinsip dasar *preventive maintenance* sebagai strategi perawatan yang mengandalkan interval waktu atau penggunaan terjadwal untuk mencegah kegagalan. Dua pendekatan utama, yaitu time-based dan *usage-based maintenance*, perlu dipilih sesuai dengan karakteristik mekanisme kegagalan masing-

masing komponen, dipadukan dengan kebijakan penggantian seperti age replacement dan block replacement yang disesuaikan dengan pola kegagalan aktual peralatan.

Penyusunan program *preventive maintenance* yang efektif menuntut proses sistematis mulai dari inventarisasi peralatan, penyusunan daftar tugas, pengelompokan paket pekerjaan, hingga dokumentasi prosedur kerja standar yang mengintegrasikan aspek keselamatan kerja secara eksplisit. Inspeksi dan pelumasan berkala menjadi komponen inti pelaksanaan program, dengan analisis pelumas berperan sebagai jembatan penting menuju pendekatan *predictive maintenance* yang lebih canggih.

Evaluasi efektivitas program *preventive maintenance* perlu dilakukan secara berkelanjutan melalui berbagai indikator, seperti rasio pekerjaan terencana terhadap tidak terencana, tren MTBF, analisis biaya, dan audit kepatuhan pelaksanaan. Siklus evaluasi dan penyempurnaan yang konsisten menjadi kunci agar program *preventive maintenance* senantiasa relevan dan proporsional terhadap kebutuhan aktual peralatan dari waktu ke waktu.

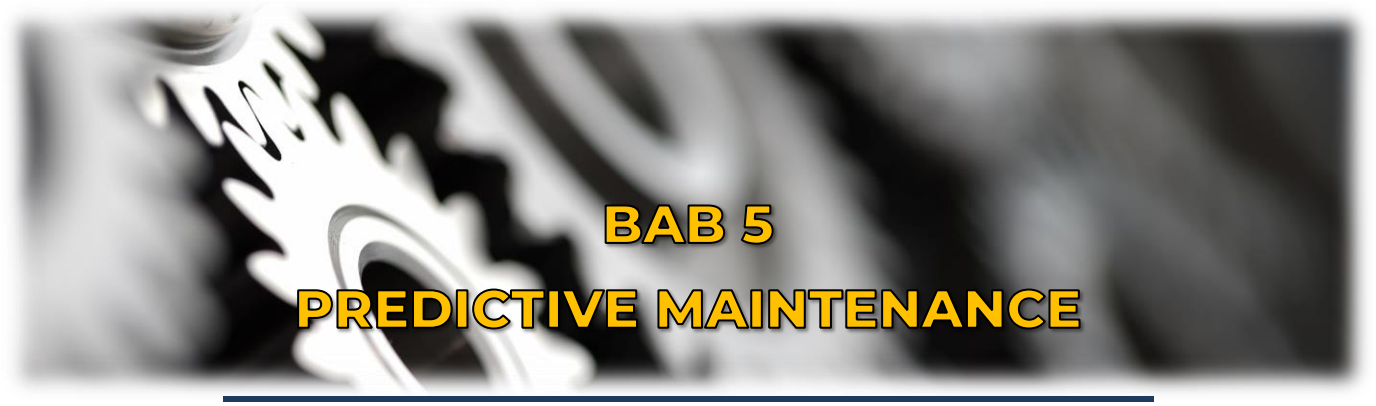
Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 4

1. Jelaskan perbedaan antara *time-based maintenance* dan *usage-based maintenance*, serta berikan contoh komponen mesin yang lebih sesuai menggunakan masing-masing pendekatan tersebut.
2. Diskusikan fenomena *maintenance-induced failure* dan jelaskan mengapa *preventive maintenance* yang berlebihan dapat menimbulkan risiko kegagalan baru pada suatu peralatan.
3. Uraikan langkah-langkah sistematis dalam menyusun program *preventive maintenance*, mulai dari inventarisasi peralatan hingga dokumentasi prosedur kerja standar.
4. Jelaskan peran analisis pelumas sebagai jembatan antara pendekatan *preventive* dan *predictive maintenance*, serta parameter apa saja yang umum dianalisis dalam praktik ini.

5. Sebutkan minimal tiga indikator yang dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas program *preventive maintenance*, serta jelaskan keterbatasan masing-masing indikator tersebut.

6. Diskusikan mengapa audit kepatuhan pelaksanaan (PM *compliance audit*) penting dilakukan, meskipun catatan sistem menunjukkan bahwa seluruh jadwal *preventive maintenance* telah dilaksanakan sesuai rencana.

7. Analisislah bagaimana konsep *autonomous maintenance* dapat memperluas kapasitas pelaksanaan program *preventive maintenance* tanpa harus menambah jumlah teknisi perawatan secara signifikan.



BAB 5
PREDICTIVE MAINTENANCE

5.1 Konsep dan Strategi *Predictive Maintenance*

Predictive maintenance merupakan strategi perawatan yang mendasarkan keputusan tindakannya pada kondisi aktual peralatan, yang dipantau secara berkelanjutan melalui berbagai teknik pengukuran dan analisis data, alih-alih mengandalkan interval waktu atau penggunaan tetap sebagaimana pada *preventive maintenance* konvensional. Prinsip dasar dari *predictive maintenance* adalah melakukan tindakan perawatan tepat pada saat dibutuhkan, tidak terlalu cepat sehingga memboroskan umur pakai komponen yang sebenarnya masih baik, dan tidak terlalu lambat sehingga berisiko mengalami kegagalan sebelum tindakan perawatan sempat dilaksanakan.

Predictive maintenance sering pula disebut sebagai *condition-based maintenance* (CBM), mengingat kedua istilah tersebut pada dasarnya merujuk pada filosofi yang sama, yaitu pengambilan keputusan perawatan berdasarkan kondisi aktual peralatan. Tinjauan literatur komprehensif mengenai condition-based maintenance menegaskan bahwa pendekatan ini terdiri atas tiga tahapan utama yang saling berkaitan, yaitu akuisisi data kondisi peralatan, pemrosesan dan analisis data untuk mendiagnosis kondisi aktual, serta pengambilan keputusan perawatan berdasarkan hasil diagnosis dan prognosis yang dihasilkan dari analisis tersebut (Ali & Abdelhadi, 2022).

Strategi *predictive maintenance* menawarkan keunggulan signifikan dibandingkan *preventive maintenance* konvensional, terutama dalam hal optimalisasi pemanfaatan umur pakai komponen dan pengurangan risiko *maintenance-induced failure* yang telah dibahas pada bab sebelumnya. Namun demikian, penerapan *predictive maintenance* juga menuntut investasi awal yang lebih besar, baik dalam bentuk peralatan sensor dan pemantauan, infrastruktur pengolahan data, maupun kompetensi analis yang mampu menginterpretasikan data

kondisi menjadi keputusan perawatan yang tepat, sehingga penerapannya perlu dipertimbangkan secara cermat berdasarkan analisis kelayakan biaya-manfaat pada masing-masing jenis peralatan.

Tidak seluruh peralatan dalam suatu fasilitas produksi memerlukan penerapan *predictive maintenance*, mengingat investasi yang dibutuhkan cukup signifikan. Peralatan yang paling sesuai menjadi kandidat penerapan *predictive maintenance* umumnya adalah peralatan dengan tingkat kekritisan tinggi terhadap proses produksi, biaya kegagalan yang besar, serta karakteristik kegagalan yang dapat dideteksi lebih dini melalui parameter yang terukur, seperti mesin berputar dengan komponen bantalan dan roda gigi yang menghasilkan sinyal getaran khas ketika mengalami degradasi, sebagaimana telah dibahas pada bab mengenai keandalan dan kegagalan mesin.

Strategi *predictive maintenance* dapat diklasifikasikan berdasarkan pendekatan analisisnya menjadi tiga kategori utama, yaitu pendekatan berbasis model fisik (*physics-based*) yang menggunakan persamaan matematis untuk memodelkan degradasi komponen, pendekatan berbasis data (*data-driven*) yang mengandalkan pembelajaran mesin untuk mengenali pola dari data historis, serta pendekatan hibrida yang menggabungkan kedua pendekatan tersebut. Pendekatan berbasis data semakin dominan pada perkembangan terkini seiring dengan meningkatnya ketersediaan data sensor dan kemajuan algoritma pembelajaran mesin, meskipun pendekatan berbasis model fisik tetap relevan terutama pada kasus dengan data historis yang terbatas.

Konsep *remaining useful life* (RUL) menjadi salah satu keluaran kunci yang diharapkan dari sistem *predictive maintenance* yang matang, yaitu estimasi mengenai berapa lama lagi suatu komponen dapat beroperasi sebelum diperkirakan mengalami kegagalan, berdasarkan tren degradasi yang teramati dari data pemantauan kondisi. Kajian mengenai prediksi RUL pada sistem mekanis menunjukkan bahwa pendekatan pembelajaran mendalam yang mampu memanfaatkan data siklus hidup yang tidak lengkap sekalipun dapat menghasilkan estimasi RUL yang cukup akurat, membuka peluang penerapan *predictive maintenance* bahkan pada

kondisi ketersediaan data yang belum sepenuhnya ideal (Lin dkk., 2024).

Penerapan strategi *predictive maintenance* yang efektif menuntut pergeseran budaya kerja organisasi dari yang semula berorientasi pada kepatuhan jadwal tetap menuju budaya yang berorientasi pada data dan analisis kondisi aktual. Pergeseran ini tidak selalu mudah dilakukan, terutama pada organisasi dengan budaya kerja konvensional yang telah lama terbiasa dengan *preventive maintenance* berbasis jadwal, sehingga diperlukan program manajemen perubahan yang terstruktur, termasuk pelatihan dan sosialisasi manfaat *predictive maintenance* kepada seluruh pemangku kepentingan yang terlibat dalam proses transisi tersebut.

Tabel 5.1 Perbandingan *Preventive Maintenance* dan *Predictive Maintenance*

Aspek	*Preventive maintenance*	*Predictive maintenance*
Dasar keputusan	Interval waktu/penggunaan tetap	Kondisi aktual peralatan
Investasi awal	Relatif rendah	Relatif tinggi (sensor, sistem analitik)
Risiko over-maintenance	Tinggi	Rendah
Kebutuhan kompetensi	Teknisi mekanik/kelistrikan umum	Analis data dan spesialis diagnostik
Cocok untuk	Komponen dengan pola kegagalan terkait usia	Komponen kritis bernilai tinggi, mesin berputar

5.2 *Condition monitoring* pada Mesin Industri

Condition monitoring merupakan proses pemantauan berkelanjutan terhadap parameter operasional dan fisik suatu peralatan untuk mendeteksi perubahan kondisi yang mengindikasikan potensi

kegagalan. Teknik *condition monitoring* yang diterapkan sangat bervariasi tergantung pada jenis peralatan dan mekanisme kegagalan yang ingin dideteksi, mulai dari pemantauan parameter operasi sederhana seperti suhu dan tekanan, hingga teknik yang lebih kompleks seperti analisis spektrum getaran dan termografi inframerah yang memerlukan peralatan dan keahlian interpretasi khusus.

Analisis getaran (*vibration analysis*) merupakan salah satu teknik *condition monitoring* yang paling banyak diterapkan pada mesin berputar, mengingat hampir seluruh mekanisme kegagalan pada komponen berputar, seperti ketidaksejajaran, ketidakseimbangan, kerusakan bantalan, dan kerusakan roda gigi, menghasilkan tanda tangan getaran yang khas dan dapat diidentifikasi melalui analisis spektrum frekuensi. Tinjauan komprehensif mengenai teknik pemantauan getaran untuk perawatan prediktif menegaskan bahwa metode ini menjadi strategi kunci dalam pengurangan biaya perawatan dan menjadi aplikasi wajib pada industri modern, mengingat biaya perawatan dapat mencapai 15 hingga 60 persen dari biaya produksi total, bahkan hingga 50 persen pada industri berat (Romanssini dkk., 2023).

Termografi inframerah (*infrared thermography*) merupakan teknik *condition monitoring* non-kontak yang memanfaatkan kamera termal untuk mendeteksi anomali suhu pada komponen elektrik dan mekanis. Teknik ini sangat efektif untuk mendeteksi masalah seperti sambungan listrik yang longgar, ketidakseimbangan beban pada sistem kelistrikan tiga fasa, atau gesekan berlebih pada komponen mekanis, mengingat sebagian besar anomali tersebut menghasilkan peningkatan suhu lokal yang dapat dideteksi secara visual melalui citra termal, jauh sebelum anomali tersebut berkembang menjadi kegagalan yang lebih serius dan sulit diperbaiki.

Analisis pelumas, sebagaimana telah disinggung pada bab sebelumnya, juga merupakan teknik *condition monitoring* yang penting, khususnya untuk mendeteksi keausan komponen internal yang tidak dapat diamati secara langsung tanpa pembongkaran. Selain analisis kandungan partikel logam, analisis pelumas modern juga mencakup pemeriksaan sifat kimiawi pelumas seperti tingkat oksidasi,

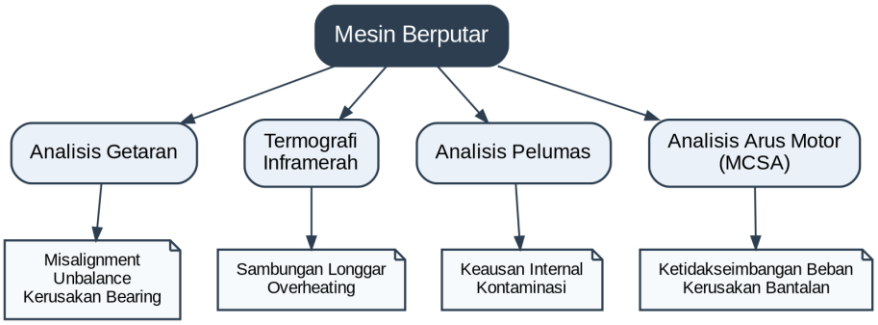
kontaminasi air, dan degradasi aditif, yang secara kolektif memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi kesehatan komponen yang dilumasi maupun kualitas pelumas itu sendiri sebagai media pelindung komponen tersebut.

Pemantauan parameter listrik, seperti analisis arus motor (*motor current signature analysis*), menjadi teknik *condition monitoring* yang semakin populer untuk mendeteksi kerusakan pada motor listrik dan beban mekanis yang digerakkannya, tanpa memerlukan sensor tambahan yang dipasang langsung pada komponen mekanis. Teknik ini memanfaatkan fakta bahwa anomali mekanis pada beban yang digerakkan motor, seperti ketidakseimbangan atau kerusakan bantalan, akan termanifestasi sebagai modulasi pada sinyal arus listrik motor, sehingga dapat dideteksi melalui analisis spektrum sinyal arus tersebut secara relatif sederhana dan berbiaya rendah dibandingkan pemasangan sensor getaran khusus.

Perkembangan teknologi sensor nirkabel dan *Internet of Things* (IoT) telah secara signifikan menurunkan biaya implementasi *condition monitoring*, memungkinkan pemantauan kondisi diterapkan pada lebih banyak peralatan dibandingkan era sebelumnya yang mengandalkan sistem pemantauan kabel yang mahal dan kompleks untuk dipasang. Sensor nirkabel bertenaga rendah memungkinkan pemantauan kontinu pada peralatan yang sebelumnya hanya dipantau secara periodik melalui inspeksi manual, membuka peluang deteksi dini kegagalan yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan secara ekonomis pada skala luas di seluruh fasilitas produksi.

Integrasi berbagai teknik *condition monitoring* dalam satu platform pemantauan terpadu (*multi-parameter monitoring*) menjadi tren yang semakin berkembang, mengingat setiap teknik pemantauan memiliki sensitivitas yang berbeda terhadap jenis kegagalan tertentu, sehingga kombinasi beberapa teknik dapat memberikan gambaran diagnostik yang lebih komprehensif dibandingkan mengandalkan satu teknik tunggal saja. Pendekatan multi-parameter ini juga membantu mengurangi risiko kesalahan diagnosis (*false positive* maupun *false negative*) yang dapat terjadi apabila keputusan hanya didasarkan pada satu jenis parameter pemantauan semata.

Gambar 5.1 Teknik *Condition Monitoring* pada Mesin Berputar



Berbagai teknik *condition monitoring* dapat digunakan secara bersamaan untuk mendeteksi jenis kegagalan yang berbeda pada mesin berputar, sehingga memberikan gambaran diagnostik yang lebih komprehensif dan mengurangi risiko kesalahan diagnosis.

5.3 Teknik Diagnostik dan Prediksi Kerusakan

Diagnostik kerusakan merupakan proses interpretasi data kondisi monitoring untuk mengidentifikasi jenis dan lokasi kegagalan yang sedang atau akan terjadi pada suatu peralatan. Proses ini menuntut kombinasi antara pemahaman mendalam mengenai prinsip kerja mekanis peralatan dengan keterampilan analisis sinyal, mengingat data mentah dari sensor umumnya perlu diolah terlebih dahulu melalui berbagai teknik pemrosesan sinyal sebelum dapat diinterpretasikan secara bermakna oleh analis maupun sistem otomatis yang digunakan untuk mendukung proses diagnostik tersebut.

Analisis domain frekuensi melalui transformasi Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) merupakan teknik pemrosesan sinyal yang paling fundamental dalam diagnostik getaran, yang mengonversi sinyal getaran dari domain waktu menjadi domain frekuensi, sehingga komponen frekuensi spesifik yang berkaitan dengan mekanisme kegagalan tertentu, seperti frekuensi karakteristik kerusakan bantalan atau frekuensi putaran poros, dapat diidentifikasi secara lebih jelas dibandingkan hanya mengamati sinyal getaran mentah dalam domain waktu yang cenderung tampak sebagai gelombang kompleks tanpa pola yang mudah diinterpretasikan.

Selain analisis domain frekuensi konvensional, teknik analisis lanjutan seperti dekomposisi wavelet (*wavelet decomposition*) dan pemfilteran lolos-pita (*band-pass filtering*) semakin banyak digunakan untuk diagnostik kegagalan yang lebih kompleks, terutama pada kondisi operasi dengan kecepatan putaran yang bervariasi atau ketika sinyal kegagalan tenggelam di antara derau (*noise*) latar belakang yang tinggi. Studi mengenai diagnostik kerusakan bantalan menggunakan kombinasi teknik pemfilteran lolos-pita dan dekomposisi wavelet menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu mengekstraksi tanda tangan kegagalan yang tersamar secara lebih efektif dibandingkan analisis spektrum frekuensi konvensional semata (Wood dkk., 2023).

Perkembangan kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin telah membuka babak baru dalam teknik diagnostik dan prediksi kerusakan, di mana algoritma dilatih untuk mengenali pola kegagalan secara otomatis dari data historis, tanpa memerlukan perumusan aturan diagnostik secara eksplisit oleh manusia. Kajian mengenai penerapan kecerdasan buatan untuk mendukung pengawasan kegagalan mesin dan perbaikannya menunjukkan bahwa pendekatan berbasis pembelajaran mesin mampu meningkatkan akurasi deteksi dan mengurangi ketergantungan pada keahlian analis manusia untuk interpretasi data yang kompleks, meskipun tetap memerlukan validasi dan pengawasan manusia dalam pengambilan keputusan akhir (Rojek dkk., 2023).

Prognostik, sebagai kelanjutan dari diagnostik, berfokus pada prediksi kapan suatu kegagalan diperkirakan akan terjadi di masa mendatang, berdasarkan tren degradasi yang teramati dari data historis dan data kondisi terkini. Berbeda dengan diagnostik yang bersifat retrospektif atau mengidentifikasi kondisi saat ini, prognostik bersifat prospektif dan menghasilkan estimasi probabilistik mengenai *remaining useful life* komponen, yang menjadi dasar bagi perencanaan tindakan perawatan yang optimal, baik dari segi waktu pelaksanaan maupun alokasi sumber daya yang dibutuhkan untuk melaksanakan tindakan tersebut.

Tantangan utama dalam pengembangan model diagnostik dan prognostik berbasis pembelajaran mesin adalah keterbatasan ketersediaan data kegagalan aktual, mengingat kegagalan peralatan

pada umumnya merupakan kejadian yang relatif jarang dibandingkan dengan data kondisi normal operasi, sehingga model yang dilatih berisiko mengalami ketidakseimbangan data (*class imbalance*) yang dapat menurunkan akurasi deteksi kegagalan yang sesungguhnya. Berbagai teknik telah dikembangkan untuk mengatasi tantangan ini, termasuk teknik augmentasi data sintetis dan pembelajaran transfer dari domain peralatan sejenis yang memiliki lebih banyak data kegagalan historis yang tersedia.

Validasi hasil diagnostik dan prognostik terhadap kondisi aktual di lapangan menjadi langkah krusial yang tidak boleh dilewatkan, mengingat model analitik secanggih apapun tetap berpotensi menghasilkan kesalahan prediksi, baik berupa peringatan dini yang ternyata tidak diikuti kegagalan aktual (*false alarm*), maupun kegagalan aktual yang tidak berhasil diprediksi sebelumnya (*missed detection*). Proses validasi dan kalibrasi berkelanjutan terhadap data lapangan aktual menjadi kunci untuk membangun kepercayaan organisasi terhadap sistem diagnostik dan prognostik yang diterapkan, sekaligus terus menyempurnakan akurasi model dari waktu ke waktu seiring bertambahnya data yang terkumpul.

5.4 Implementasi *Predictive Maintenance* di Industri

Implementasi *predictive maintenance* pada suatu organisasi idealnya dilaksanakan secara bertahap, dimulai dari peralatan dengan tingkat kekritisan tertinggi dan potensi manfaat paling signifikan, sebelum diperluas secara bertahap ke peralatan lain sesuai dengan ketersediaan sumber daya dan pembelajaran yang diperoleh dari tahap implementasi awal. Pendekatan bertahap ini memungkinkan organisasi membangun kompetensi dan kepercayaan diri secara progresif, sekaligus meminimalkan risiko kegagalan implementasi yang dapat terjadi apabila *predictive maintenance* diterapkan secara serentak pada skala besar tanpa pengalaman dan kesiapan organisasi yang memadai.

Kajian mengenai sistem pendukung keputusan berbasis *Internet of Things* dan pembelajaran mesin untuk *predictive maintenance* pada era Industri 4.0 menegaskan bahwa keberhasilan implementasi tidak semata-mata ditentukan oleh kecanggihan algoritma yang digunakan,

tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kualitas integrasi antara sumber data historis dengan data sensor waktu nyata, serta kemampuan sistem untuk menerjemahkan hasil analisis menjadi rekomendasi tindakan yang dapat langsung ditindaklanjuti oleh tim perawatan di lapangan (Rosati dkk., 2023).

Studi kasus penerapan *digital twin* pada sistem konveyor untuk keperluan *predictive maintenance* menunjukkan bahwa representasi virtual peralatan yang diperbarui secara berkelanjutan berdasarkan data operasional aktual mampu meningkatkan akurasi prediksi kegagalan dibandingkan model statistik konvensional, sekaligus memungkinkan simulasi berbagai skenario operasi tanpa risiko terhadap peralatan fisik yang sesungguhnya (Pulcini & Modoni, 2024). Pendekatan *digital twin* ini semakin banyak diadopsi pada industri dengan peralatan bernilai tinggi, di mana investasi pada representasi virtual yang akurat dapat memberikan pengembalian investasi yang signifikan melalui pengurangan risiko kegagalan tak terduga.

Implementasi *predictive maintenance* juga menuntut perubahan pada struktur organisasi perawatan, dengan munculnya peran baru seperti analis keandalan (*reliability engineer*) dan analis data perawatan (*maintenance data analyst*) yang bertanggung jawab menginterpretasikan hasil analisis kondisi dan menerjemahkannya menjadi rekomendasi tindakan bagi tim pelaksana di lapangan. Organisasi yang berhasil mengimplementasikan *predictive maintenance* secara efektif umumnya telah menyesuaikan struktur organisasi dan deskripsi peran mereka untuk mengakomodasi kebutuhan kompetensi baru ini, alih-alih memaksakan tanggung jawab analitik tambahan pada teknisi mekanik konvensional yang belum tentu memiliki latar belakang analisis data yang memadai.

Tantangan implementasi *predictive maintenance* pada industri skala menengah dan kecil di Indonesia umumnya berkaitan dengan keterbatasan modal investasi awal untuk peralatan sensor dan infrastruktur analitik, serta keterbatasan sumber daya manusia yang memiliki kompetensi analisis data dan diagnostik teknis yang memadai. Meskipun demikian, perkembangan teknologi sensor nirkabel yang semakin terjangkau dan tersedianya platform analitik berbasis

komputasi awan (*cloud computing*) membuka peluang bagi industri skala menengah untuk mulai mengadopsi *predictive maintenance* secara bertahap dan proporsional, tanpa harus melakukan investasi besar sekaligus di awal penerapannya.

Pengukuran keberhasilan implementasi *predictive maintenance* perlu dilakukan melalui indikator kuantitatif yang jelas, seperti penurunan jumlah kegagalan tak terduga, peningkatan nilai *overall equipment effectiveness* (OEE), penurunan biaya perawatan total, serta peningkatan akurasi prediksi kegagalan dari waktu ke waktu seiring bertambahnya data dan penyempurnaan model analitik yang digunakan. Organisasi yang tidak menetapkan indikator keberhasilan yang jelas sejak awal implementasi berisiko kesulitan mengevaluasi apakah investasi *predictive maintenance* yang telah dilakukan benar-benar memberikan nilai tambah yang sepadan bagi keseluruhan operasi perusahaan.

Kolaborasi antara organisasi dengan penyedia teknologi eksternal, baik berupa produsen sensor, penyedia platform analitik, maupun konsultan spesialis keandalan, sering kali menjadi jalur yang lebih realistis bagi organisasi yang belum memiliki kompetensi internal memadai untuk membangun sistem *predictive maintenance* sepenuhnya secara mandiri. Model kolaborasi semacam ini memungkinkan organisasi memperoleh manfaat *predictive maintenance* secara lebih cepat, sembari secara bertahap membangun kompetensi internal melalui transfer pengetahuan dari mitra eksternal, sehingga ketergantungan terhadap pihak eksternal dapat dikurangi secara progresif seiring dengan matangnya kapabilitas organisasi dalam mengelola sistem *predictive maintenance* secara mandiri.

Sebagai penutup pembahasan bab ini, *predictive maintenance* merupakan puncak evolusi strategi perawatan proaktif yang telah dibahas sepanjang buku ini, dari *preventive maintenance* yang berbasis jadwal tetap, menuju pendekatan yang sepenuhnya didasarkan pada kondisi aktual peralatan. Meskipun menawarkan potensi manfaat yang signifikan, keberhasilan penerapan *predictive maintenance* sangat bergantung pada kesiapan organisasi dari berbagai aspek, mulai dari infrastruktur teknologi, kompetensi sumber daya manusia, hingga

kematangan budaya kerja berbasis data, sebagaimana telah diuraikan sepanjang bab ini secara komprehensif.

Rangkuman Bab 5

Bab ini telah menguraikan konsep *predictive maintenance* sebagai strategi perawatan yang mendasarkan keputusan tindakannya pada kondisi aktual peralatan, berbeda dengan *preventive maintenance* yang berbasis interval tetap. Strategi ini menawarkan keunggulan optimalisasi umur pakai komponen, namun menuntut investasi awal yang lebih besar pada infrastruktur sensor, sistem analitik, dan kompetensi sumber daya manusia yang memadai.

Condition monitoring mencakup berbagai teknik seperti analisis getaran, termografi inframerah, analisis pelumas, dan analisis arus motor, yang masing-masing memiliki sensitivitas berbeda terhadap jenis kegagalan tertentu, sehingga kombinasi beberapa teknik memberikan gambaran diagnostik yang lebih komprehensif. Teknik diagnostik dan prognostik, mulai dari analisis domain frekuensi konvensional hingga pendekatan berbasis pembelajaran mesin, menjadi kunci untuk menerjemahkan data kondisi menjadi estimasi remaining useful life yang akurat.

Implementasi *predictive maintenance* idealnya dilaksanakan secara bertahap, dimulai dari peralatan kritis dengan potensi manfaat tertinggi, didukung oleh struktur organisasi yang mengakomodasi peran baru seperti analis keandalan dan analis data perawatan. Keberhasilan implementasi perlu diukur melalui indikator kuantitatif yang jelas, sekaligus mempertimbangkan kolaborasi dengan pihak eksternal bagi organisasi yang belum memiliki kompetensi internal yang memadai.

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 5

1. Jelaskan perbedaan mendasar antara *predictive maintenance* dan *preventive maintenance*, serta diskusikan mengapa investasi awal *predictive maintenance* umumnya lebih besar.

2. Uraikan kriteria yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan peralatan mana yang menjadi kandidat prioritas penerapan *predictive maintenance* pada suatu fasilitas produksi.

3. Bandingkan minimal tiga teknik *condition monitoring* yang telah dibahas dalam bab ini, serta jelaskan jenis kegagalan yang paling sesuai dideteksi oleh masing-masing teknik tersebut.

4. Jelaskan perbedaan antara diagnostik dan prognostik dalam konteks *predictive maintenance*, serta bagaimana konsep remaining useful life berkaitan dengan keduanya.

5. Diskusikan tantangan utama dalam pengembangan model diagnostik berbasis pembelajaran mesin, khususnya terkait keterbatasan data kegagalan aktual, serta pendekatan yang dapat digunakan untuk mengatasinya.

6. Analisislah mengapa implementasi *predictive maintenance* idealnya dilaksanakan secara bertahap, alih-alih diterapkan secara serentak pada seluruh peralatan dalam satu waktu.

7. Diskusikan tantangan spesifik yang mungkin dihadapi industri skala menengah di Indonesia dalam mengadopsi *predictive maintenance*, serta strategi realistis yang dapat ditempuh untuk mengatasi keterbatasan tersebut.

BAB 6
CORRECTIVE MAINTENANCE

6.1 Konsep dan Jenis Corrective Maintenance

Corrective maintenance (CM) merupakan tindakan perawatan yang dilaksanakan setelah suatu peralatan mengalami kegagalan atau penurunan performa di bawah standar yang dipersyaratkan, dengan tujuan mengembalikan peralatan tersebut ke kondisi fungsional semula. Berbeda dengan *preventive* dan *predictive maintenance* yang bersifat proaktif dan berupaya mencegah kegagalan sebelum terjadi, *corrective maintenance* pada dasarnya bersifat reaktif, meskipun tidak seluruhnya identik dengan pendekatan perawatan yang sepenuhnya tidak terencana. Pemahaman yang keliru mengenai *corrective maintenance* sebagai strategi yang selalu buruk atau primitif perlu diluruskan, mengingat dalam konteks tertentu, *corrective maintenance* justru merupakan pilihan strategi yang paling rasional secara ekonomis.

Terdapat dua jenis utama *corrective maintenance* yang perlu dibedakan secara jelas, yaitu *planned corrective maintenance* dan *unplanned corrective maintenance*. *Planned corrective maintenance* dilaksanakan ketika suatu kegagalan atau gejala kerusakan telah terdeteksi lebih dini, namun tindakan perbaikannya sengaja dijadwalkan pada waktu yang paling tepat, misalnya menunggu waktu henti produksi terjadwal berikutnya, alih-alih segera dilaksanakan pada saat gejala tersebut pertama kali terdeteksi. Sebaliknya, *unplanned corrective maintenance* atau yang sering disebut sebagai *emergency maintenance* dilaksanakan segera setelah kegagalan tak terduga terjadi, tanpa kesempatan untuk melakukan perencanaan yang memadai terlebih dahulu.

Kajian mengenai transisi dari corrective menuju *predictive maintenance* pada industri kelistrikan menegaskan bahwa *corrective maintenance*, meskipun meminimalkan biaya servis langsung dan memperpanjang interval antar-tindakan perawatan, tetap membawa

konsekuensi berupa peningkatan risiko kegagalan peralatan yang tidak terduga, yang pada gilirannya dapat menimbulkan kerugian ekonomi jauh lebih besar dibandingkan biaya perawatan proaktif yang seharusnya dapat mencegah kegagalan tersebut (Molęda dkk., 2023). Pemahaman terhadap trade-off ini penting agar organisasi tidak secara membabi buta mengandalkan *corrective maintenance* semata dengan alasan penghematan biaya jangka pendek.

Strategi *corrective maintenance* tetap relevan dan bahkan menjadi pilihan yang tepat pada kondisi tertentu, terutama untuk komponen non-kritis dengan biaya penggantian rendah, komponen dengan pola kegagalan acak yang sulit diprediksi melalui pendekatan *preventive* maupun *predictive maintenance*, atau komponen yang memiliki redundansi memadai sehingga kegagalannya tidak langsung mengganggu keseluruhan sistem produksi. Pada kondisi semacam ini, investasi tambahan pada program *preventive* atau *predictive maintenance* justru tidak sepadan dengan manfaat yang diperoleh, sehingga membiarkan komponen tersebut beroperasi hingga gagal (*run to failure*) menjadi strategi yang secara ekonomis lebih rasional.

Rasio antara pekerjaan perawatan preventif dan korektif (*preventive-to-corrective ratio*) menjadi salah satu indikator penting untuk menilai kematangan sistem manajemen perawatan suatu organisasi. Studi mengenai perbandingan rasio perawatan preventif terhadap korektif pada bangunan menunjukkan bahwa organisasi dengan rasio yang lebih tinggi terhadap pekerjaan preventif cenderung memiliki total biaya perawatan yang lebih rendah dalam jangka panjang, meskipun biaya tahunan untuk program *preventive maintenance* itu sendiri tampak lebih besar dibandingkan organisasi yang lebih banyak mengandalkan *corrective maintenance* semata (Weeks & Leite, 2022).

Klasifikasi *corrective maintenance* juga dapat ditinjau dari perspektif tingkat kedalaman perbaikan yang dilaksanakan, mulai dari perbaikan sementara (*temporary repair*) yang bertujuan mengembalikan fungsi peralatan secara cepat meskipun belum menyelesaikan akar permasalahan secara tuntas, hingga perbaikan permanen (*permanent repair*) yang benar-benar menyelesaikan akar

penyebab kegagalan. Perbaikan sementara sering kali diperlukan pada situasi darurat untuk meminimalkan waktu henti produksi, namun perlu diikuti dengan penjadwalan perbaikan permanen pada kesempatan berikutnya, agar kegagalan serupa tidak terus berulang akibat akar masalah yang belum benar-benar teratasi.

Keputusan mengenai kapan suatu organisasi sebaiknya beralih dari strategi *corrective* menuju *preventive* atau *predictive maintenance* pada suatu komponen tertentu perlu didasarkan pada analisis data kegagalan historis secara sistematis, bukan sekadar intuisi atau kebiasaan semata. Indikator yang dapat digunakan antara lain frekuensi kegagalan komponen tersebut dalam periode waktu tertentu, dampak kegagalan terhadap produksi dan keselamatan, serta perbandingan biaya antara mempertahankan strategi corrective dengan berinvestasi pada strategi proaktif yang lebih mahal namun berpotensi menurunkan total biaya kegagalan dalam jangka panjang.

Corrective maintenance juga memiliki keterkaitan erat dengan konsep keandalan yang telah dibahas pada bab sebelumnya, khususnya terkait dengan *mean time to repair* (MTTR) sebagai indikator utama kecepatan pemulihan sistem setelah mengalami kegagalan. Organisasi yang mampu menekan nilai MTTR melalui prosedur *troubleshooting* yang efisien, ketersediaan suku cadang yang memadai, dan kompetensi teknisi yang tinggi akan memperoleh manfaat berupa peningkatan *availability* sistem secara keseluruhan, meskipun frekuensi kegagalan itu sendiri mungkin tidak berkurang secara signifikan dibandingkan dengan pendekatan strategi perawatan proaktif.

Analisis komprehensif mengenai strategi pemilihan jenis perawatan yang tepat menegaskan bahwa keputusan antara menerapkan corrective, *preventive*, atau *predictive maintenance* pada suatu komponen tertentu perlu mempertimbangkan berbagai kriteria secara simultan, termasuk skala usaha, biaya kegagalan mesin, dampak kegagalan terhadap jadwal produksi, dampak terhadap keselamatan kerja dan lingkungan, ketersediaan suku cadang, serta usia pakai peralatan yang bersangkutan. Pendekatan multi-kriteria semacam ini menegaskan bahwa tidak ada strategi tunggal yang secara universal optimal untuk seluruh jenis peralatan, melainkan perlu disesuaikan

secara spesifik berdasarkan karakteristik masing-masing komponen dan konteks operasional yang dihadapinya.

Corrective maintenance yang tidak dikelola dengan baik dapat menjerumuskan organisasi ke dalam siklus perawatan reaktif yang sulit diputus, di mana sebagian besar sumber daya perawatan habis teralokasikan untuk memadamkan kebakaran (*firefighting*) akibat kegagalan mendadak, sehingga tidak tersisa cukup waktu dan sumber daya untuk melaksanakan analisis mendalam dan perbaikan akar masalah secara permanen. Fenomena ini, yang sering disebut sebagai jebakan reaktif (*reactive trap*), menjadi tantangan nyata bagi banyak organisasi yang berupaya bertransisi dari budaya perawatan reaktif menuju budaya perawatan yang lebih proaktif dan terencana.

Pemetaan tingkat kematangan perawatan organisasi (*maintenance maturity assessment*) sering kali menggunakan proporsi pekerjaan corrective terhadap total pekerjaan perawatan sebagai salah satu indikator utama, di mana organisasi dengan tingkat kematangan rendah umumnya menghabiskan lebih dari 50 persen sumber daya perawatannya untuk pekerjaan corrective yang tidak terencana, sementara organisasi dengan tingkat kematangan tinggi mampu menekan proporsi tersebut hingga di bawah 20 persen melalui penerapan *preventive* dan *predictive maintenance* yang efektif. Pemetaan semacam ini menjadi alat diagnostik awal yang berguna bagi organisasi untuk mengevaluasi posisi mereka saat ini sebelum menyusun rencana perbaikan sistem perawatan secara menyeluruh.

Corrective maintenance juga perlu dipandang sebagai sumber data berharga bagi penyempurnaan strategi perawatan proaktif di masa mendatang, mengingat setiap kejadian kegagalan yang ditangani melalui *corrective maintenance* sesungguhnya merupakan data empiris mengenai pola kegagalan aktual peralatan, yang dapat digunakan untuk mengkalibrasi ulang interval *preventive maintenance* atau mengidentifikasi komponen yang memerlukan penerapan *predictive maintenance*. Perspektif ini menegaskan bahwa ketiga strategi perawatan, corrective, *preventive*, dan *predictive*, bukanlah pendekatan yang berdiri sendiri secara terpisah, melainkan membentuk suatu siklus

pembelajaran yang saling memperkuat dalam kerangka manajemen perawatan yang terintegrasi secara menyeluruh.

Aspek psikologis dan budaya kerja turut memengaruhi bagaimana *corrective maintenance* dijalankan dalam suatu organisasi. Pada organisasi dengan budaya kerja yang menghargai kecepatan tanggap darurat secara berlebihan tanpa diimbangi apresiasi setara terhadap upaya pencegahan, personel perawatan cenderung memperoleh pengakuan lebih besar ketika berhasil memulihkan kegagalan besar secara cepat, dibandingkan ketika berhasil mencegah kegagalan tersebut sama sekali melalui perawatan proaktif yang konsisten. Pergeseran budaya penghargaan ini, dari yang semula berorientasi pada heroisme penanganan darurat menuju apresiasi terhadap pencegahan yang senyap namun efektif, menjadi tantangan manajerial tersendiri yang perlu ditangani secara sadar oleh pemimpin organisasi perawatan.

Klasifikasi tingkat urgensi *corrective maintenance* (*priority classification*) menjadi elemen penting dalam pengelolaan sumber daya perawatan yang terbatas, khususnya ketika beberapa kejadian kegagalan terjadi secara bersamaan dan menuntut penentuan prioritas penanganan. Sistem klasifikasi yang umum diterapkan mempertimbangkan dampak terhadap keselamatan, dampak terhadap produksi, serta konsekuensi finansial dari setiap kegagalan, sehingga sumber daya perawatan yang terbatas dapat dialokasikan terlebih dahulu pada kegagalan dengan konsekuensi paling signifikan, alih-alih ditangani berdasarkan urutan pelaporan semata tanpa mempertimbangkan tingkat kepentingan relatifnya.

Corrective maintenance pada peralatan yang beroperasi di lokasi terpencil atau sulit dijangkau menghadirkan tantangan logistik tambahan yang perlu diantisipasi secara khusus, mengingat waktu mobilisasi teknisi dan suku cadang ke lokasi tersebut dapat menjadi komponen dominan dari keseluruhan MTTR. Organisasi yang mengoperasikan peralatan di lokasi terpencil, seperti instalasi pertambangan atau pembangkit listrik di luar Pulau Jawa, sering kali perlu mempertimbangkan strategi khusus seperti penempatan stok suku cadang kritis secara lokal atau kontrak layanan siaga dengan penyedia

jasa perawatan setempat, guna menekan dampak keterbatasan aksesibilitas terhadap kecepatan pemulihan kegagalan.

Peran kontrak layanan pihak ketiga (*third-party service contract*) dalam mendukung pelaksanaan *corrective maintenance* semakin banyak dipertimbangkan oleh organisasi yang tidak memiliki kapasitas internal memadai untuk menangani seluruh jenis kegagalan secara mandiri, terutama untuk peralatan dengan teknologi khusus yang memerlukan keahlian sangat spesifik. Pemilihan mitra penyedia layanan yang tepat, dengan mempertimbangkan rekam jejak waktu respons, kompetensi teknis, dan kejelasan tingkat layanan yang disepakati dalam perjanjian tingkat layanan (*service level agreement*), menjadi keputusan strategis yang berdampak langsung pada kecepatan dan kualitas pemulihan kegagalan yang dapat dicapai organisasi.

Dokumentasi kontrak dan perjanjian tingkat layanan dengan penyedia jasa eksternal perlu mencantumkan secara eksplisit target waktu respons dan waktu penyelesaian untuk berbagai tingkat urgensi kegagalan, disertai mekanisme eskalasi apabila target tersebut tidak terpenuhi. Kejelasan kontraktual semacam ini penting untuk memastikan akuntabilitas penyedia jasa eksternal, sekaligus memberikan dasar yang jelas bagi organisasi pengguna untuk mengevaluasi kinerja mitra penyedia layanan secara objektif dari waktu ke waktu, sebagai bagian dari proses pengelolaan hubungan pemasok jasa perawatan yang berkelanjutan.

Tabel 6.1 Perbandingan Jenis *Corrective Maintenance*

Jenis	Karakteristik	Kapan Diterapkan
Planned Corrective maintenance	Gejala terdeteksi, perbaikan dijadwalkan	Ada jendela waktu henti terjadwal terdekat
Unplanned/Emergency Maintenance	Kegagalan mendadak tanpa peringatan	Kegagalan tak terduga, produksi terhenti
Perbaikan Sementara	Mengembalikan fungsi cepat, akar	Situasi darurat, minimisasi downtime

Jenis	Karakteristik	Kapan Diterapkan
	masalah belum tuntas	
Perbaikan Permanen	Menyelesaikan akar penyebab kegagalan	Setelah perbaikan sementara, saat kondisi memungkinkan

6.2 Prosedur *Troubleshooting* Mesin

Troubleshooting merupakan proses sistematis untuk mengidentifikasi penyebab suatu gejala kerusakan atau kegagalan mesin, sebelum tindakan perbaikan yang tepat dapat dilaksanakan. Proses *troubleshooting* yang efektif menuntut pendekatan yang terstruktur, bukan sekadar mencoba-coba berbagai kemungkinan penyebab secara acak, mengingat pendekatan yang tidak sistematis berisiko memperpanjang waktu diagnosis, meningkatkan biaya perbaikan akibat penggantian komponen yang sebenarnya tidak bermasalah, dan bahkan berpotensi menimbulkan kerusakan tambahan akibat tindakan yang keliru terhadap komponen yang sesungguhnya masih berfungsi normal.

Langkah pertama dalam prosedur *troubleshooting* yang sistematis adalah pengumpulan informasi gejala secara komprehensif, mencakup kapan gejala pertama kali muncul, kondisi operasi pada saat gejala terjadi, riwayat perawatan sebelumnya, serta perubahan apapun yang terjadi menjelang munculnya gejala tersebut, seperti penggantian komponen, perubahan parameter operasi, atau kondisi lingkungan yang tidak biasa. Informasi yang dikumpulkan pada tahap awal ini menjadi dasar penting bagi penyusunan hipotesis penyebab kegagalan yang akan diuji pada tahap selanjutnya dalam proses *troubleshooting*.

Setelah informasi gejala terkumpul, langkah selanjutnya adalah penyusunan hipotesis mengenai kemungkinan penyebab kegagalan, yang kemudian diurutkan berdasarkan probabilitas kejadian dan kemudahan verifikasi. Teknisi berpengalaman umumnya mengurutkan hipotesis mulai dari penyebab yang paling umum dan paling mudah diverifikasi terlebih dahulu, sebelum beralih pada penyebab yang lebih

jarang terjadi atau lebih sulit diverifikasi, sehingga waktu *troubleshooting* dapat dioptimalkan dengan menghilangkan kemungkinan-kemungkinan yang paling mudah diperiksa terlebih dahulu sebelum menginvestigasi kemungkinan yang lebih kompleks.

Verifikasi hipotesis dilakukan melalui pengujian sistematis, baik melalui pengamatan langsung, pengukuran menggunakan alat ukur yang sesuai, maupun melalui proses eliminasi dengan menguji komponen secara terpisah dari sistem secara keseluruhan. Pendekatan eliminasi sistematis ini, yang sering disebut sebagai *half-split technique* pada sistem yang kompleks, membagi sistem menjadi dua bagian dan menguji masing-masing bagian secara terpisah untuk mengisolasi lokasi kegagalan secara lebih efisien, dibandingkan menguji setiap komponen secara individual satu per satu dari awal hingga akhir sistem yang kompleks.

Penggunaan alat bantu diagnostik yang tepat sangat menentukan efisiensi dan akurasi proses *troubleshooting*, mulai dari alat ukur sederhana seperti multimeter dan tang ampere untuk sistem kelistrikan, hingga alat diagnostik yang lebih canggih seperti osiloskop, penganalisis getaran genggam, atau perangkat lunak diagnostik yang terintegrasi dengan sistem kendali mesin berbasis komputer. Ketersediaan dan penguasaan alat bantu diagnostik yang memadai menjadi salah satu faktor pembeda utama antara organisasi dengan kapabilitas *troubleshooting* yang matang dan organisasi yang masih mengandalkan metode coba-coba dalam menangani kegagalan mesin.

Dokumentasi hasil *troubleshooting* menjadi tahap yang sering kali terlewatkan namun memiliki nilai jangka panjang yang signifikan, mengingat setiap kasus *troubleshooting* yang berhasil diselesaikan menghasilkan pengetahuan berharga mengenai hubungan antara gejala dan penyebab kegagalan pada peralatan tertentu. Basis pengetahuan *troubleshooting* yang terdokumentasi dengan baik, mencakup gejala, langkah diagnosis, penyebab yang teridentifikasi, dan tindakan perbaikan yang berhasil, dapat mempercepat proses *troubleshooting* pada kejadian serupa di masa mendatang, bahkan oleh teknisi yang belum pernah menangani kasus tersebut sebelumnya, karena mereka dapat merujuk pada dokumentasi kasus sejenis yang telah terselesaikan.

Pemanfaatan teknologi kecerdasan buatan untuk mendukung proses *troubleshooting* semakin berkembang, termasuk sistem berbasis *retrieval-augmented generation* (RAG) yang mampu mencari dan menyajikan prosedur *troubleshooting* yang relevan dari basis dokumentasi besar secara otomatis berdasarkan deskripsi gejala yang dimasukkan oleh teknisi. Pendekatan semacam ini berpotensi mengatasi tantangan klasik di mana pengetahuan *troubleshooting* tersebar di berbagai dokumen dan sulit diakses secara cepat pada saat dibutuhkan, terutama pada sistem siber-fisik (*cyber-physical system*) yang kompleks dengan volume dokumentasi teknis yang sangat besar.

Kompetensi *troubleshooting* yang mumpuni umumnya berkembang melalui kombinasi antara pemahaman teoritis mengenai prinsip kerja peralatan dengan pengalaman praktis menangani berbagai kasus kegagalan secara langsung di lapangan. Program mentoring yang memasangkan teknisi junior dengan teknisi senior yang berpengalaman menjadi salah satu metode paling efektif untuk mempercepat pengembangan kompetensi *troubleshooting*, mengingat sebagian besar keterampilan diagnostik bersifat tacit dan sulit sepenuhnya ditransfer hanya melalui pelatihan formal atau dokumentasi tertulis semata, tanpa disertai pengalaman langsung menangani kasus nyata di lapangan.

Troubleshooting pada sistem yang mengintegrasikan komponen mekanis, elektrik, dan digital secara bersamaan menuntut pendekatan lintas disiplin yang lebih kompleks dibandingkan *troubleshooting* pada sistem mekanis konvensional. Kegagalan pada sistem otomasi modern, misalnya, dapat disebabkan oleh kombinasi faktor mekanis, kesalahan pemrograman logika kendali, gangguan komunikasi jaringan industri, maupun interferensi elektromagnetik, sehingga tim *troubleshooting* idealnya melibatkan personel dengan keahlian gabungan mekanik, elektrik, dan instrumentasi kendali, bukan hanya mengandalkan satu bidang keahlian tunggal untuk menangani kompleksitas kegagalan sistem modern semacam itu.

Penggunaan diagram alir keputusan (*troubleshooting flowchart*) yang terstandardisasi untuk jenis kegagalan umum yang sering terjadi pada suatu peralatan dapat mempercepat proses diagnosis secara signifikan, terutama bagi teknisi yang belum memiliki pengalaman

ekstensif dengan peralatan tersebut. Diagram alir semacam ini idealnya disusun berdasarkan akumulasi pengalaman *troubleshooting* historis, mengorganisasikan gejala-gejala umum beserta langkah verifikasi yang perlu dilakukan secara berurutan, sehingga proses diagnosis dapat dilaksanakan secara konsisten oleh berbagai teknisi, terlepas dari tingkat pengalaman individual masing-masing personel yang menanganinya.

Pengukuran kinerja *troubleshooting* melalui indikator seperti *mean time to diagnose* (MTTD), yang mengukur rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk mengidentifikasi akar penyebab suatu kegagalan sejak gejala pertama kali dilaporkan, menjadi metrik pelengkap yang berguna di samping MTTR secara keseluruhan. Analisis MTTD secara terpisah dari waktu perbaikan aktual membantu organisasi mengidentifikasi apakah keterlambatan pemulihan sistem lebih banyak disebabkan oleh proses diagnosis yang lambat, ataukah oleh pelaksanaan perbaikan itu sendiri yang membutuhkan waktu lama, sehingga upaya perbaikan proses dapat difokuskan pada tahap yang benar-benar menjadi bottleneck utama.

Simulasi dan pelatihan *troubleshooting* berbasis skenario, baik menggunakan peralatan pelatihan fisik maupun simulator virtual, semakin banyak diterapkan sebagai metode pengembangan kompetensi yang aman dan terkendali, tanpa risiko terhadap peralatan produksi yang sesungguhnya. Pendekatan pelatihan berbasis simulasi memungkinkan teknisi berlatih menangani berbagai skenario kegagalan yang jarang terjadi namun berdampak signifikan, sehingga ketika skenario tersebut benar-benar terjadi di lapangan, teknisi telah memiliki pengalaman menangani situasi serupa meskipun hanya dalam lingkungan simulasi, yang terbukti secara signifikan mempercepat respons dan akurasi diagnosis pada kejadian nyata.

Troubleshooting jarak jauh (*remote troubleshooting*) semakin banyak dimanfaatkan dengan dukungan teknologi komunikasi video dan augmented reality, memungkinkan teknisi spesialis di lokasi terpusat memberikan panduan langsung kepada teknisi di lapangan yang mungkin belum memiliki pengalaman menangani jenis kegagalan tertentu. Pendekatan ini sangat bermanfaat bagi organisasi dengan

fasilitas produksi yang tersebar di berbagai lokasi geografis, di mana mobilisasi teknisi spesialis secara fisik ke setiap lokasi akan memakan waktu dan biaya yang signifikan, sehingga dukungan jarak jauh dapat mempercepat penyelesaian *troubleshooting* sekaligus mentransfer pengetahuan kepada teknisi lokal secara langsung dalam prosesnya.

Basis data pengetahuan *troubleshooting* yang dikelola secara terpusat perlu terus diperbarui dan divalidasi secara berkala, mengingat informasi yang usang atau tidak lagi relevan akibat modifikasi peralatan dapat menyesatkan teknisi yang mengandalkan basis data tersebut sebagai rujukan. Proses tata kelola konten (*content governance*) yang jelas, termasuk penunjukan penanggung jawab pembaruan dan mekanisme validasi sebelum informasi baru dipublikasikan ke dalam basis pengetahuan, menjadi praktik penting untuk menjaga kualitas dan keandalan basis pengetahuan *troubleshooting* dalam jangka panjang.

Klasifikasi kegagalan berdasarkan gejala umum yang teramati (*symptom-based classification*) membantu mempercepat identifikasi awal kemungkinan penyebab sebelum investigasi mendalam dilaksanakan, misalnya mengelompokkan gejala menjadi kategori kebisingan abnormal, getaran berlebih, panas berlebih, kebocoran fluida, atau kegagalan fungsi kendali. Pengelompokan awal semacam ini membantu teknisi mempersempit ruang lingkup hipotesis yang perlu diuji sejak tahap awal proses *troubleshooting*, alih-alih memulai investigasi tanpa arah yang jelas dan berpotensi menghabiskan waktu untuk memeriksa kemungkinan penyebab yang sebenarnya tidak relevan dengan gejala yang teramati.

Evaluasi berkala terhadap efektivitas proses *troubleshooting* organisasi, melalui audit sampel kasus yang telah diselesaikan, dapat mengungkap pola kesalahan umum atau area yang memerlukan penguatan, misalnya kecenderungan tim tertentu untuk melewati langkah verifikasi hipotesis secara sistematis dan langsung mengganti komponen berdasarkan dugaan semata. Umpan balik dari audit semacam ini menjadi masukan berharga bagi program pelatihan berkelanjutan, membantu organisasi terus menyempurnakan

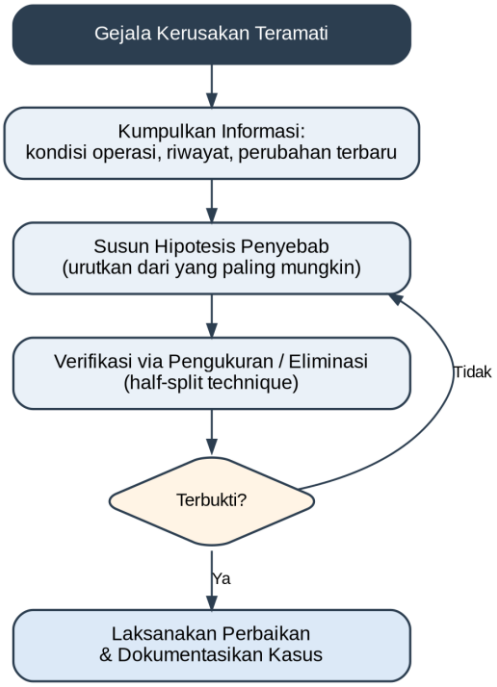
kompetensi *troubleshooting* timnya secara keseluruhan dari waktu ke waktu.

Investasi pada peralatan diagnostik portabel yang semakin canggih dan terjangkau, seperti multimeter dengan kemampuan logging data, kamera termal genggam, dan penganalisis getaran saku, memperluas kapabilitas *troubleshooting* lapangan tanpa memerlukan investasi besar pada infrastruktur tetap. Ketersediaan peralatan diagnostik portabel yang memadai bagi setiap tim *troubleshooting* di lapangan, bukan hanya terpusat pada satu tim spesialis, memungkinkan deteksi dan diagnosis awal yang lebih cepat pada berbagai lokasi secara bersamaan, sehingga waktu respons keseluruhan organisasi terhadap kejadian kegagalan dapat ditingkatkan secara signifikan.

Tabel 6.1b Contoh Klasifikasi Gejala Umum dan Kemungkinan Penyebab pada Mesin Berputar

Gejala	Kemungkinan Penyebab Umum	Metode Verifikasi Awal
Kebisingan abnormal	Kerusakan bantalan, roda gigi aus, pelumasan kurang	Analisis getaran, inspeksi suara terarah
Getaran berlebih	Unbalance, misalignment, kelonggaran mekanis	Analisis spektrum getaran
Suhu berlebih	Gesekan berlebih, pelumasan tidak memadai, beban lebih	Termografi, pengukuran suhu langsung
Kebocoran fluida	Segel aus, retak pada housing, sambungan longgar	Inspeksi visual, uji tekanan

Gambar 6.1 Alur Sistematis Prosedur *Troubleshooting* Mesin



Prosedur *troubleshooting* yang sistematis mempercepat identifikasi akar penyebab kegagalan melalui pengujian hipotesis yang terurut, dibandingkan pendekatan coba-coba yang tidak terstruktur.

6.3 Teknik Perbaikan dan Penggantian Komponen

Setelah akar penyebab kegagalan berhasil diidentifikasi melalui proses *troubleshooting*, tahap selanjutnya adalah pelaksanaan tindakan perbaikan, yang dapat berupa perbaikan komponen yang mengalami kerusakan atau penggantian komponen tersebut dengan yang baru. Keputusan antara memperbaiki atau mengganti komponen perlu mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk tingkat kerusakan yang dialami, ketersediaan dan biaya komponen pengganti, waktu yang dibutuhkan untuk masing-masing opsi, serta ketersediaan keahlian dan peralatan yang diperlukan untuk melaksanakan perbaikan secara internal di perusahaan.

Perbaikan komponen (*repair*) umumnya lebih ekonomis dibandingkan penggantian, terutama untuk komponen bernilai tinggi

atau komponen dengan lead time pengadaan yang panjang, namun menuntut ketersediaan keahlian teknis khusus dan peralatan yang memadai untuk melaksanakan perbaikan sesuai standar yang dipersyaratkan. Beberapa jenis kerusakan, seperti keausan permukaan komponen logam, dapat diperbaiki melalui teknik pelapisan ulang (*resurfacing*) atau pengelasan reparasi, sementara kerusakan lain, seperti retak struktural pada komponen kritis, mungkin tidak layak diperbaiki karena risiko kegagalan berulang yang tinggi meskipun telah diperbaiki secara teknis.

Penggantian komponen (*replacement*) menjadi pilihan yang lebih tepat ketika tingkat kerusakan sudah terlalu parah untuk diperbaiki secara ekonomis, ketika komponen pengganti tersedia dengan cepat dan biaya terjangkau, atau ketika perbaikan komponen berisiko menghasilkan kualitas yang tidak sepenuhnya setara dengan komponen baru, terutama untuk komponen dengan toleransi presisi tinggi seperti bantalan presisi atau komponen sistem kendali elektronik. Keputusan penggantian juga perlu mempertimbangkan kesesuaian spesifikasi komponen pengganti dengan spesifikasi asli, mengingat penggunaan komponen yang tidak sepenuhnya sesuai spesifikasi dapat menjadi penyebab kegagalan berulang di kemudian hari, sebagaimana telah dibahas pada bab mengenai faktor penyebab kerusakan mesin.

Prosedur kerja standar untuk pelaksanaan perbaikan dan penggantian komponen perlu didokumentasikan secara rinci, mencakup urutan pembongkaran dan pemasangan yang benar, torsi pengencangan baut yang dipersyaratkan, toleransi kesejajaran yang perlu dipenuhi, serta prosedur pengujian sebelum peralatan dikembalikan ke kondisi operasional. Kesalahan pada tahap pemasangan kembali komponen, seperti ketidaksejajaran poros atau pengencangan baut yang tidak sesuai spesifikasi, sebagaimana telah dibahas pada bab sebelumnya, merupakan salah satu penyebab tersembunyi dari kegagalan berulang yang sebenarnya dapat dicegah melalui kepatuhan terhadap prosedur kerja standar yang telah ditetapkan.

Aspek keselamatan kerja menjadi pertimbangan yang tidak dapat diabaikan dalam pelaksanaan perbaikan dan penggantian komponen, terutama untuk pekerjaan yang melibatkan sumber energi

berbahaya seperti sistem kelistrikan bertegangan tinggi, sistem hidraulik atau pneumatik bertekanan tinggi, maupun komponen berputar yang berpotensi menimbulkan cedera apabila prosedur isolasi energi tidak dilaksanakan dengan benar. Penerapan prosedur *lock out tag out* (LOTO) secara konsisten pada setiap pekerjaan perbaikan menjadi keharusan mutlak, tanpa pengecualian, terlepas dari seberapa mendesaknya tekanan waktu yang dihadapi untuk mengembalikan peralatan ke kondisi operasional secepat mungkin.

Teknik perbaikan modern semakin banyak memanfaatkan teknologi manufaktur aditif (*additive manufacturing*) untuk memproduksi komponen pengganti secara langsung di lokasi, terutama untuk komponen dengan lead time pengadaan konvensional yang panjang atau komponen yang sudah tidak lagi diproduksi oleh pabrikan asli. Meskipun teknologi ini masih menghadapi keterbatasan terkait kekuatan material dan biaya produksi untuk komponen bervolume besar, perkembangannya membuka peluang baru bagi strategi perbaikan yang lebih fleksibel, khususnya untuk suku cadang kritis dengan volume kebutuhan rendah namun konsekuensi kegagalan yang tinggi apabila tidak segera tersedia.

Validasi hasil perbaikan atau penggantian komponen melalui pengujian fungsional sebelum peralatan dikembalikan ke operasi penuh menjadi langkah penting yang tidak boleh dilewatkan, guna memastikan bahwa tindakan perbaikan yang dilakukan benar-benar efektif mengatasi masalah yang mendasarinya. Pengujian ini dapat mencakup pengukuran parameter operasi seperti getaran, suhu, atau tekanan pada kondisi operasi normal, dibandingkan dengan baseline yang telah ditetapkan sebelumnya, untuk memastikan peralatan benar-benar telah kembali pada kondisi performa yang diharapkan, bukan sekadar tampak berfungsi secara visual tanpa jaminan keandalan jangka panjang.

Manajemen suku cadang bekas pakai (*reconditioned parts*) menjadi pertimbangan ekonomis yang semakin banyak dieksplorasi dalam pelaksanaan *corrective maintenance*, terutama untuk komponen bernilai tinggi yang secara teknis masih dapat direkondisi untuk mengembalikan sebagian besar performanya mendekati kondisi baru.

Kajian mengenai strategi perawatan dan manajemen inventori suku cadang untuk penggunaan komponen rekondisi menegaskan bahwa pemanfaatan komponen bekas pakai yang telah direkondisi dengan tepat dapat memberikan penghematan biaya signifikan, meskipun perlu diimbangi dengan evaluasi cermat terhadap sisa umur pakai dan tingkat keandalan komponen tersebut dibandingkan komponen baru (Sagne & Niang, 2022).

Pemilihan strategi perbaikan juga perlu mempertimbangkan dampak terhadap garansi peralatan yang mungkin masih berlaku, mengingat sebagian besar produsen peralatan menetapkan persyaratan tertentu mengenai siapa yang berwenang melaksanakan perbaikan dan jenis suku cadang yang boleh digunakan agar garansi tetap berlaku. Pelanggaran terhadap persyaratan garansi, meskipun dapat mempercepat pemulihan peralatan dalam jangka pendek, berisiko menghilangkan hak klaim garansi untuk kerusakan terkait di masa mendatang, sehingga keputusan mengenai pelaksanaan perbaikan secara internal ataukah melalui mitra resmi produsen perlu mempertimbangkan implikasi jangka panjang ini secara cermat.

Standardisasi peralatan dan komponen di seluruh fasilitas produksi turut memudahkan pelaksanaan teknik perbaikan dan penggantian komponen, mengingat keseragaman spesifikasi mengurangi kompleksitas pengelolaan suku cadang dan memungkinkan teknisi mengembangkan keahlian yang lebih mendalam pada jenis peralatan yang terbatas, dibandingkan harus menguasai berbagai variasi peralatan dengan spesifikasi berbeda-beda. Upaya standardisasi ini idealnya dipertimbangkan sejak tahap pengadaan peralatan baru, bukan hanya sebagai upaya reaktif setelah keberagaman peralatan telah terlanjur terjadi dan sulit disederhanakan kembali.

Dokumentasi hasil perbaikan dan penggantian komponen secara rinci, mencakup foto sebelum dan sesudah perbaikan, spesifikasi komponen yang digunakan, serta parameter hasil pengujian fungsional, menjadi praktik yang bernilai tinggi bagi keperluan audit, klaim garansi, maupun sebagai referensi bagi penanganan kasus serupa di masa mendatang. Praktik dokumentasi yang konsisten ini, meskipun tampak menambah beban administratif bagi teknisi pelaksana, pada

akhirnya memberikan manfaat jangka panjang berupa peningkatan kualitas basis pengetahuan organisasi mengenai teknik perbaikan yang terbukti efektif untuk berbagai jenis kerusakan yang mungkin dihadapi.

Ketersediaan alat dan perkakas khusus (*specialized tooling*) yang dipersyaratkan untuk pelaksanaan perbaikan tertentu, seperti penarik bantalan (*bearing puller*), alat pemanas induksi untuk pemasangan bantalan dengan interferensi, atau alat penyeimbang dinamis (*dynamic balancing equipment*), perlu direncanakan sejak tahap perencanaan perawatan, bukan baru dicari ketika kebutuhan perbaikan mendesak sudah muncul. Investasi pada perkakas khusus ini perlu dipertimbangkan berdasarkan frekuensi penggunaan dan kekritisan pekerjaan yang membutuhkannya, dengan opsi alternatif berupa penyewaan atau kerja sama dengan penyedia jasa khusus untuk perkakas yang jarang digunakan namun membutuhkan investasi besar.

Kualitas hasil perbaikan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan kerja pada saat perbaikan dilaksanakan, terutama untuk pekerjaan presisi tinggi seperti perbaikan komponen berpelumas atau perbaikan sistem elektronik yang sensitif terhadap kontaminasi debu dan kelembaban. Penyediaan area kerja yang bersih dan terkendali, terutama untuk perbaikan komponen kritis bernilai tinggi, menjadi investasi yang sepadan dengan manfaat berupa penurunan risiko kegagalan dini akibat kontaminasi yang masuk selama proses perbaikan berlangsung, dibandingkan melaksanakan perbaikan presisi tinggi pada kondisi lingkungan kerja yang kurang terkendali di lapangan terbuka.

Sertifikasi kompetensi teknisi untuk jenis perbaikan tertentu, seperti pengelasan bertekanan tinggi, pekerjaan kelistrikan tegangan tinggi, atau perbaikan komponen bersertifikasi keselamatan, menjadi persyaratan yang tidak dapat ditawar pada banyak industri dengan regulasi ketat. Kepatuhan terhadap persyaratan sertifikasi ini tidak hanya menjadi kewajiban hukum, tetapi juga jaminan mutu bahwa perbaikan yang dilaksanakan memenuhi standar teknis minimum yang dipersyaratkan, sehingga risiko kegagalan berulang akibat kualitas perbaikan yang tidak memadai dapat diminimalkan sejak awal pelaksanaan pekerjaan perbaikan tersebut.

Evaluasi pasca-perbaikan dalam jangka menengah, misalnya melalui pemantauan kondisi komponen yang telah diperbaiki selama beberapa minggu hingga bulan setelah pekerjaan selesai, memberikan konfirmasi tambahan mengenai keberhasilan perbaikan yang telah dilaksanakan, melampaui sekadar pengujian fungsional segera setelah perbaikan selesai. Pendekatan pemantauan lanjutan semacam ini penting terutama untuk perbaikan pada komponen dengan mekanisme kegagalan yang berkembang secara bertahap, di mana efektivitas sesungguhnya dari suatu perbaikan baru dapat benar-benar dikonfirmasi setelah komponen tersebut mengalami periode operasi yang cukup panjang pasca-perbaikan.

Tabel 6.2 Kriteria Keputusan *Repair* vs *Replace* pada Komponen Kritis

Kriteria	Cenderung *Repair*	Cenderung *Replace*
Tingkat kerusakan	Ringan hingga sedang, masih dapat dipulihkan	Parah, struktural, atau di luar toleransi
Biaya relatif	Signifikan lebih rendah dari komponen baru	Selisih biaya tipis dengan komponen baru
Ketersediaan komponen baru	Lead time panjang atau sudah tidak diproduksi	Tersedia cepat dan mudah diperoleh
Toleransi presisi	Toleransi longgar, dapat direkondisi	Toleransi sangat ketat (presisi tinggi)
Dampak terhadap garansi	Tidak memengaruhi/garansi sudah habis	Perbaikan internal membatalkan garansi

6.4 Evaluasi Tindakan *Corrective Maintenance*

Evaluasi terhadap tindakan *corrective maintenance* yang telah dilaksanakan menjadi bagian penting dari siklus pembelajaran organisasi, guna memastikan bahwa setiap kejadian kegagalan memberikan kontribusi terhadap penyempurnaan sistem perawatan

secara keseluruhan, bukan sekadar diselesaikan dan dilupakan begitu saja. Evaluasi ini idealnya mencakup analisis terhadap efektivitas tindakan perbaikan yang dilakukan, kecepatan respons dan penyelesaian pekerjaan, biaya yang dikeluarkan, serta identifikasi peluang pencegahan agar kegagalan serupa tidak terulang kembali di masa mendatang pada komponen yang sama maupun komponen sejenis lainnya.

Penerapan metodologi investigasi insiden yang terstruktur, sebagaimana lazim digunakan dalam manajemen keselamatan kerja, dapat diadaptasi untuk memperkaya evaluasi kegagalan mesin, khususnya untuk kejadian dengan konsekuensi signifikan. Pendekatan ini menekankan pentingnya mendokumentasikan garis waktu kejadian secara rinci, mulai dari kondisi normal terakhir yang teramati hingga kegagalan benar-benar terjadi, sehingga pola dan sinyal peringatan dini yang mungkin terlewat sebelumnya dapat diidentifikasi secara sistematis untuk mencegah kejadian serupa berulang di masa mendatang pada peralatan yang sama maupun peralatan sejenis lainnya dalam fasilitas produksi.

Evaluasi *corrective maintenance* idealnya juga mempertimbangkan dampak kegagalan terhadap rantai pasok internal perusahaan, khususnya ketika kegagalan pada satu lini produksi berdampak pada ketersediaan komponen setengah jadi bagi lini produksi lain yang bergantung padanya. Analisis dampak berantai semacam ini membantu organisasi memahami bahwa biaya sesungguhnya dari suatu kegagalan sering kali jauh lebih besar daripada yang tercermin dalam catatan biaya perbaikan langsung pada unit yang mengalami kegagalan, terutama pada sistem produksi yang saling terhubung erat antara satu tahapan proses dengan tahapan berikutnya.

Indikator *mean time to repair* (MTTR) menjadi metrik kuantitatif utama untuk mengevaluasi kecepatan pelaksanaan *corrective maintenance*, yang dapat diuraikan lebih lanjut menjadi beberapa komponen waktu, mulai dari waktu deteksi kegagalan, waktu respons tim perawatan, waktu diagnosis atau *troubleshooting*, waktu pelaksanaan perbaikan aktual, hingga waktu pengujian dan verifikasi

sebelum peralatan dikembalikan ke operasi. Analisis terhadap masing-masing komponen waktu ini membantu organisasi mengidentifikasi tahap mana yang paling banyak berkontribusi terhadap total waktu henti, sehingga upaya perbaikan dapat difokuskan pada tahap yang paling signifikan tersebut.

Evaluasi biaya *corrective maintenance* perlu mencakup tidak hanya biaya langsung seperti suku cadang dan tenaga kerja, tetapi juga biaya tidak langsung seperti kehilangan produksi akibat waktu henti, biaya lembur untuk mengejar target produksi yang tertunda, serta potensi biaya reputasional apabila kegagalan tersebut berdampak pada keterlambatan pengiriman kepada pelanggan. Perhitungan biaya total kegagalan (*total failure cost*) yang komprehensif semacam ini memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai dampak sesungguhnya dari suatu kegagalan, dibandingkan hanya melihat biaya perbaikan langsung yang tercatat dalam sistem akuntansi perawatan semata.

Analisis tren kegagalan berulang (*repeat failure analysis*) menjadi aspek evaluasi yang krusial, guna mengidentifikasi apakah suatu komponen mengalami kegagalan dengan mekanisme yang sama secara berulang, yang mengindikasikan bahwa tindakan *corrective maintenance* sebelumnya belum benar-benar menyelesaikan akar penyebab kegagalan. Organisasi yang secara sistematis melacak dan menganalisis kegagalan berulang dapat mengidentifikasi komponen-komponen yang memerlukan tindakan lebih mendalam, seperti analisis kegagalan yang lebih komprehensif menggunakan metode *Root Cause Analysis*, atau bahkan tinjauan ulang terhadap desain komponen itu sendiri.

Evaluasi tindakan *corrective maintenance* juga perlu mempertimbangkan dampaknya terhadap keselamatan kerja, termasuk identifikasi apakah terdapat insiden nyaris celaka (*near miss*) atau kecelakaan kerja yang terjadi selama pelaksanaan perbaikan, serta apakah prosedur keselamatan kerja telah dipatuhi secara konsisten. Tekanan waktu yang tinggi pada situasi *corrective maintenance* darurat sering kali menjadi faktor risiko tambahan bagi keselamatan kerja, sehingga evaluasi perlu memastikan bahwa urgensi pemulihan produksi

tidak pernah mengorbankan aspek keselamatan teknisi yang melaksanakan pekerjaan perbaikan tersebut.

Umpan balik dari hasil evaluasi *corrective maintenance* idealnya diintegrasikan kembali ke dalam siklus manajemen perawatan secara keseluruhan, misalnya dengan menyesuaikan program *preventive maintenance* untuk komponen yang menunjukkan pola kegagalan berulang, mempertimbangkan penerapan *predictive maintenance* untuk komponen kritis yang sering mengalami kegagalan tak terduga, atau merevisi prosedur kerja standar yang terbukti belum memadai dalam mencegah kesalahan pemasangan komponen. Integrasi umpan balik semacam ini menegaskan bahwa *corrective maintenance* bukan aktivitas yang berdiri sendiri, melainkan bagian dari siklus pembelajaran berkelanjutan dalam keseluruhan sistem manajemen perawatan organisasi.

Benchmarking kinerja *corrective maintenance* terhadap standar industri atau organisasi sejenis juga menjadi praktik evaluasi yang bermanfaat, memungkinkan organisasi menilai posisi relatif kinerja perawatannya dibandingkan praktik terbaik yang berlaku umum di industri yang sama. Indikator seperti rasio biaya corrective terhadap total biaya perawatan, tingkat MTTR rata-rata untuk kategori peralatan tertentu, maupun frekuensi kegagalan per seribu jam operasi dapat dibandingkan dengan data benchmark industri, meskipun perbandingan tersebut perlu mempertimbangkan perbedaan konteks operasional yang mungkin memengaruhi validitas perbandingan secara langsung antar-organisasi yang berbeda karakteristiknya.

Evaluasi *corrective maintenance* juga perlu mempertimbangkan dampaknya terhadap moral dan kepuasan kerja tim perawatan, mengingat pekerjaan corrective yang bersifat darurat dan sering kali dilaksanakan di bawah tekanan waktu tinggi dapat berkontribusi terhadap kelelahan kerja dan penurunan motivasi teknisi dalam jangka panjang, apabila proporsi pekerjaan tersebut terlalu dominan dibandingkan pekerjaan terencana. Organisasi yang berhasil menekan proporsi *corrective maintenance* melalui penguatan strategi proaktif umumnya juga melaporkan peningkatan kepuasan kerja tim perawatan,

sebagai akibat dari berkurangnya tekanan kerja darurat yang harus dihadapi secara terus-menerus oleh personel perawatan.

Pelaporan hasil evaluasi *corrective maintenance* kepada manajemen puncak secara berkala, disertai dengan rekomendasi tindakan perbaikan yang konkret, menjadi praktik penting untuk memastikan bahwa temuan evaluasi benar-benar ditindaklanjuti dan tidak hanya menjadi catatan administratif yang terlupakan. Laporan yang efektif idealnya menyajikan tren kinerja dari waktu ke waktu, perbandingan terhadap target atau benchmark yang telah ditetapkan, serta implikasi finansial dari setiap rekomendasi perbaikan yang diusulkan, sehingga manajemen dapat mengambil keputusan alokasi sumber daya yang tepat berdasarkan data yang komprehensif dan mudah dipahami.

Pembelajaran lintas organisasi (*cross-organizational learning*) melalui forum berbagi pengalaman antar-perusahaan sejenis, baik dalam bentuk asosiasi industri maupun jaringan profesional bidang keandalan dan perawatan, dapat memperkaya wawasan evaluasi *corrective maintenance* suatu organisasi melampaui pengalaman internalnya sendiri. Berbagi studi kasus kegagalan dan solusi yang telah terbukti efektif di organisasi lain, tanpa mengungkap informasi rahasia bisnis yang sensitif, dapat mempercepat proses pembelajaran organisasi dan mencegah organisasi mengulangi kesalahan yang telah dialami dan diselesaikan oleh organisasi sejenis lainnya di industri yang sama.

Penetapan target perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement target*) untuk indikator kinerja *corrective maintenance*, seperti target penurunan MTTR sebesar persentase tertentu dalam periode waktu yang ditetapkan, memberikan arah yang jelas bagi upaya penyempurnaan tim perawatan dari waktu ke waktu. Target semacam ini idealnya ditetapkan secara realistis berdasarkan analisis kapasitas perbaikan yang mungkin dicapai, dan ditinjau ulang secara berkala untuk memastikan target tersebut tetap menantang namun dapat dicapai, sehingga memberikan motivasi yang sehat bagi tim perawatan tanpa menciptakan tekanan berlebihan yang justru dapat mengorbankan kualitas maupun keselamatan kerja demi mengejar target waktu semata.

Evaluasi *corrective maintenance* secara berkelanjutan pada akhirnya membentuk siklus umpan balik yang menghubungkan seluruh strategi perawatan yang telah dibahas sepanjang buku ini, dari *preventive* dan *predictive maintenance* yang berupaya mencegah kegagalan, hingga *corrective maintenance* yang menangani kegagalan yang tidak dapat dicegah, serta *reliability* centered maintenance yang akan dibahas pada bab berikutnya sebagai kerangka kerja integratif yang mengombinasikan seluruh strategi tersebut secara optimal berdasarkan karakteristik dan konsekuensi kegagalan masing-masing komponen dalam suatu sistem produksi.

Sebagai penutup pembahasan bab ini, *corrective maintenance* perlu dipahami secara proporsional, bukan sebagai strategi yang secara inheren buruk untuk dihindari sepenuhnya, melainkan sebagai salah satu komponen dalam portofolio strategi perawatan yang terintegrasi, sebagaimana telah ditekankan sejak bab pembuka buku ini. Keberhasilan penerapan *corrective maintenance* sangat ditentukan oleh kecepatan dan ketepatan prosedur *troubleshooting*, kualitas pelaksanaan perbaikan atau penggantian komponen, serta konsistensi evaluasi dan pembelajaran dari setiap kejadian kegagalan yang terjadi, sehingga organisasi dapat terus menyempurnakan keseimbangan optimal antara strategi *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance* dari waktu ke waktu.

Tabel 6.3 Indikator Kunci Evaluasi Kinerja *Corrective Maintenance*

Indikator	Definisi	Manfaat Evaluasi
MTTR	Rata-rata waktu pemulihan sejak kegagalan hingga fungsi normal	Mengukur kecepatan respons dan perbaikan
MTTD	Rata-rata waktu diagnosis penyebab kegagalan	Mengidentifikasi bottleneck proses *troubleshooting*
Rasio *Preventive-to-Corrective*	Proporsi pekerjaan terencana vs tidak terencana	Mengukur kematangan sistem perawatan

Indikator	Definisi	Manfaat Evaluasi
Repeat Failure Rate	Frekuensi kegagalan berulang pada komponen sama	Mengindikasikan efektivitas akar penyebab teratasi
Total Failure Cost	Biaya langsung dan tidak langsung akibat kegagalan	Mengukur dampak ekonomis kegagalan secara menyeluruh

Rangkuman Bab 6

Bab ini telah menguraikan konsep *corrective maintenance* sebagai strategi perawatan reaktif yang dilaksanakan setelah kegagalan terjadi, mencakup jenis planned dan unplanned *corrective maintenance* yang perlu dibedakan secara jelas. Meskipun bersifat reaktif, *corrective maintenance* tetap menjadi pilihan strategi yang rasional untuk komponen non-kritis, berbiaya rendah, atau berpola kegagalan acak yang sulit diprediksi melalui pendekatan proaktif.

Prosedur *troubleshooting* yang sistematis, mulai dari pengumpulan informasi gejala, penyusunan dan verifikasi hipotesis, hingga dokumentasi hasil, menjadi kunci efisiensi penyelesaian kegagalan. Teknik perbaikan dan penggantian komponen perlu mempertimbangkan berbagai faktor ekonomis dan teknis, disertai kepatuhan ketat terhadap prosedur keselamatan kerja dan validasi hasil perbaikan sebelum peralatan dikembalikan ke operasi penuh.

Evaluasi tindakan *corrective maintenance* melalui indikator MTTR, analisis biaya total kegagalan, dan analisis kegagalan berulang menjadi bagian penting dari siklus pembelajaran organisasi. Umpan balik hasil evaluasi perlu diintegrasikan kembali ke dalam keseluruhan sistem manajemen perawatan, sehingga *corrective maintenance* berkontribusi pada penyempurnaan strategi perawatan secara berkelanjutan, bukan sekadar aktivitas pemadam kebakaran yang berdiri sendiri.

Pemahaman yang proporsional terhadap *corrective maintenance*, sebagai salah satu dari tiga pilar strategi perawatan

bersama *preventive* dan *predictive maintenance* yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya, menjadi bekal penting bagi pembaca sebelum mempelajari bagaimana ketiga strategi tersebut dianalisis dan diintegrasikan secara sistematis melalui teknik *condition monitoring* dan kerangka kerja *reliability* centered maintenance yang akan diuraikan pada dua bab berikutnya dalam buku ini.

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 6

1. Jelaskan perbedaan antara *planned corrective maintenance* dan *unplanned/emergency maintenance*, serta berikan contoh situasi yang sesuai untuk masing-masing jenis tersebut.
2. Diskusikan kondisi-kondisi di mana strategi *corrective maintenance* justru menjadi pilihan yang lebih rasional secara ekonomis dibandingkan *preventive* atau *predictive maintenance*.
3. Uraikan langkah-langkah sistematis dalam prosedur *troubleshooting* mesin, serta jelaskan manfaat teknik *half-split* dalam mengisolasi lokasi kegagalan pada sistem yang kompleks.
4. Bandingkan pertimbangan yang perlu diperhatikan dalam memilih antara memperbaiki (*repair*) dan mengganti (*replace*) suatu komponen yang mengalami kerusakan.
5. Jelaskan mengapa prosedur *lock out tag out* (LOTO) perlu diterapkan secara konsisten pada setiap pekerjaan *corrective maintenance*, tanpa terkecuali meskipun dalam kondisi darurat.
6. Analisislah bagaimana analisis kegagalan berulang (*repeat failure analysis*) dapat membantu organisasi mengidentifikasi kebutuhan untuk beralih dari strategi corrective menuju strategi perawatan yang lebih proaktif.
7. Diskusikan bagaimana hasil evaluasi *corrective maintenance* dapat diintegrasikan kembali ke dalam siklus manajemen perawatan secara keseluruhan untuk mendukung penyempurnaan berkelanjutan.

8. Jelaskan konsep jebakan reaktif (*reactive trap*) dan uraikan langkah-langkah strategis yang dapat ditempuh organisasi untuk keluar dari siklus tersebut menuju budaya perawatan yang lebih proaktif.

9. Diskusikan bagaimana tantangan logistik pada peralatan berlokasi terpencil dapat memengaruhi kecepatan pemulihan kegagalan, serta strategi apa yang dapat diterapkan untuk mengatasi tantangan tersebut.



BAB 7
ANALISIS DAN DIAGNOSTIK KONDISI MESIN

7.1 Analisis Getaran (*Vibration Analysis*)

Analisis getaran merupakan salah satu teknik diagnostik yang paling mapan dan banyak diterapkan dalam pemantauan kondisi mesin berputar, mengingat hampir seluruh komponen berputar seperti motor, pompa, kompresor, dan turbin menghasilkan pola getaran yang dapat merefleksikan kondisi mekanis internalnya secara akurat. Prinsip dasar analisis getaran didasarkan pada pemahaman bahwa setiap komponen mekanis memiliki karakteristik getaran normal pada kondisi baik, dan penyimpangan dari karakteristik tersebut, baik dalam hal amplitudo maupun pola frekuensi, mengindikasikan adanya anomali mekanis yang perlu diinvestigasi lebih lanjut oleh teknisi perawatan.

Pengukuran getaran dilaksanakan menggunakan sensor akselerometer yang dipasang pada titik-titik pengukuran strategis di sekitar bantalan atau titik dukung utama mesin, yang kemudian menghasilkan data getaran dalam domain waktu yang selanjutnya diolah melalui transformasi Fourier untuk memperoleh representasi spektrum frekuensi. Setiap mekanisme kegagalan mekanis menghasilkan pola frekuensi karakteristik yang berbeda; ketidakseimbangan (*unbalance*) umumnya termanifestasi pada frekuensi satu kali putaran poros (1x RPM), sementara ketidaksejajaran (*misalignment*) sering menghasilkan komponen frekuensi pada kelipatan kedua dan ketiga dari frekuensi putaran, menciptakan pola spektral yang berbeda dan dapat dibedakan oleh analis berpengalaman.

Kerusakan bantalan (*bearing defect*) menghasilkan pola frekuensi yang lebih kompleks dibandingkan ketidakseimbangan atau ketidaksejajaran, mengingat frekuensi karakteristik kerusakan bantalan bergantung pada geometri spesifik bantalan tersebut, mencakup

frekuensi cacat pada cincin luar (*ball pass frequency outer race*), cincin dalam (*ball pass frequency inner race*), elemen bola atau rol (*ball spin frequency*), dan sangkar bantalan (*fundamental train frequency*). Identifikasi pola frekuensi spesifik ini memungkinkan analis tidak hanya mendeteksi keberadaan kerusakan bantalan, tetapi juga mengidentifikasi komponen spesifik dari bantalan yang mengalami kerusakan, memberikan informasi diagnostik yang jauh lebih rinci dibandingkan sekadar mengetahui bahwa terdapat anomali getaran secara umum.

Kerusakan roda gigi (*gear defect*) pada sistem transmisi mekanis juga menghasilkan tanda tangan getaran yang khas, biasanya termanifestasi pada frekuensi kisi roda gigi (*gear mesh frequency*) beserta harmoniknya, serta sideband yang muncul di sekitar frekuensi kisi tersebut akibat modulasi amplitudo maupun modulasi frekuensi yang disebabkan oleh cacat lokal pada gigi tertentu. Analisis mengenai teknik pemantauan getaran berbasis keausan roda gigi menegaskan bahwa perkembangan pola sideband dari waktu ke waktu dapat menjadi indikator progresif tingkat keparahan kerusakan roda gigi, memungkinkan estimasi remaining useful life yang lebih akurat dibandingkan hanya mengandalkan indikator amplitudo getaran keseluruhan semata (Feng dkk., 2023).

Teknik analisis getaran lanjutan, seperti analisis selubung (*envelope analysis* atau *demodulation*), dikembangkan khusus untuk mendeteksi kerusakan dini pada bantalan yang sinyalnya sering kali tenggelam di antara komponen getaran lain yang berfrekuensi lebih dominan, seperti getaran akibat putaran poros itu sendiri. Teknik ini bekerja dengan menyaring sinyal getaran pada rentang frekuensi resonansi tertentu, kemudian mengekstraksi selubung amplitudo sinyal tersebut untuk mengungkapkan pola periodik yang berkaitan dengan benturan berulang akibat cacat pada elemen bantalan, sehingga gejala kerusakan dini dapat dideteksi jauh sebelum terlihat pada spektrum getaran konvensional.

Interpretasi hasil analisis getaran menuntut kombinasi antara pengetahuan teoritis mengenai mekanisme kegagalan dengan pengalaman praktis dalam menginterpretasikan pola spektral aktual,

mengingat kondisi lapangan sering kali menghasilkan sinyal getaran yang kompleks akibat superposisi berbagai sumber getaran secara bersamaan. Standar internasional mengenai batas keparahan getaran, seperti yang diterbitkan oleh organisasi standardisasi internasional, memberikan panduan kuantitatif mengenai tingkat keparahan getaran yang dapat diterima berdasarkan kategori mesin dan kondisi pemasangannya, meskipun interpretasi kontekstual tetap diperlukan mengingat karakteristik setiap mesin dapat sedikit berbeda tergantung pada desain dan kondisi operasi spesifiknya.

Perkembangan teknologi sensor nirkabel dan komputasi tepi (*edge computing*) telah memungkinkan pemantauan getaran kontinu diterapkan secara lebih luas dan ekonomis pada berbagai peralatan, dibandingkan era sebelumnya yang mengandalkan pengukuran periodik menggunakan alat ukur genggam yang memerlukan kunjungan teknisi secara manual ke lokasi mesin. Kajian mengenai pemantauan getaran berdaya rendah untuk keperluan *predictive maintenance* pada era Industri 4.0 menunjukkan bahwa integrasi jaringan saraf tiruan pada perangkat tepi memungkinkan pemrosesan data getaran secara langsung di lokasi sensor, mengurangi kebutuhan transmisi data mentah dalam volume besar ke pusat pengolahan data secara terus-menerus.

Analisis getaran, meskipun sangat efektif untuk mendeteksi kegagalan mekanis pada komponen berputar, memiliki keterbatasan dalam mendeteksi jenis kegagalan lain seperti degradasi kimiawi pelumas atau anomali termal pada sambungan listrik, sehingga perlu dikombinasikan dengan teknik *condition monitoring* lain seperti termografi dan analisis pelumas untuk memperoleh gambaran diagnostik yang lebih komprehensif, sebagaimana akan dibahas pada subbab-subbab berikutnya dalam bab ini.

Penentuan lokasi dan orientasi pemasangan sensor getaran yang tepat menjadi aspek praktis yang sangat memengaruhi kualitas data yang diperoleh, mengingat sensor yang dipasang pada lokasi yang tidak optimal dapat menghasilkan sinyal yang teredam atau tidak representatif terhadap kondisi aktual komponen yang dipantau. Praktik umum menempatkan sensor sedekat mungkin dengan bantalan pada arah radial dan aksial, mengingat kedua arah tersebut paling sensitif

terhadap sebagian besar mekanisme kegagalan mekanis, meskipun beberapa aplikasi khusus mungkin memerlukan konfigurasi pemasangan sensor tambahan untuk menangkap mode getaran spesifik yang relevan dengan karakteristik desain mesin yang bersangkutan.

Analisis getaran pada mesin dengan kecepatan putaran variabel (*variable speed machine*) menghadapi tantangan tambahan dibandingkan mesin dengan kecepatan konstan, mengingat frekuensi karakteristik kegagalan akan bergeser mengikuti perubahan kecepatan putaran, sehingga analisis spektrum frekuensi konvensional pada satu titik waktu tertentu tidak selalu memadai. Teknik analisis order tracking, yang menormalkan sumbu frekuensi terhadap kecepatan putaran aktual alih-alih frekuensi absolut, dikembangkan khusus untuk mengatasi tantangan ini, memungkinkan identifikasi pola kegagalan yang konsisten meskipun mesin beroperasi pada berbagai kecepatan putaran yang berbeda-beda sepanjang siklus operasinya.

Klasifikasi tingkat keparahan getaran menjadi kategori seperti baik, cukup, tidak memuaskan, dan tidak dapat diterima, sebagaimana diatur dalam berbagai standar internasional, memberikan kerangka acuan praktis bagi teknisi lapangan dalam menentukan prioritas tindak lanjut tanpa harus melakukan analisis spektral mendalam untuk setiap pengukuran rutin. Meskipun demikian, klasifikasi berbasis amplitudo keseluruhan (*overall vibration level*) semacam ini perlu dilengkapi dengan analisis spektral yang lebih rinci ketika terdeteksi tren peningkatan atau ketika nilai yang terukur mendekati ambang batas kategori yang lebih tinggi, guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme kegagalan spesifik yang mendasari peningkatan amplitudo tersebut.

Analisis getaran torsional (*torsional vibration analysis*), yang berfokus pada osilasi kecepatan sudut poros alih-alih getaran lateral konvensional, menjadi teknik pelengkap penting khususnya pada sistem transmisi daya kompleks seperti kopling fleksibel, gearbox multi-tingkat, dan sistem penggerak dengan variasi beban dinamis yang signifikan. Kegagalan pada komponen elastis kopling atau resonansi torsional yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan kerusakan katastropik pada poros dan roda gigi, sehingga analisis torsional

menjadi pertimbangan penting terutama pada tahap desain maupun commissioning sistem transmisi daya berkapasitas besar.

Kalibrasi berkala terhadap sensor dan instrumen pengukuran getaran menjadi prasyarat yang sering kali terlewatkan namun krusial untuk menjaga keandalan data yang dikumpulkan sepanjang waktu. Sensor yang mengalami drift kalibrasi tanpa terdeteksi dapat menghasilkan data yang menyesatkan, baik berupa alarm palsu akibat pembacaan yang terlalu tinggi, maupun kegagalan yang tidak terdeteksi akibat pembacaan yang terlalu rendah dari kondisi sebenarnya, sehingga program kalibrasi instrumen yang terjadwal dan terdokumentasi menjadi bagian tidak terpisahkan dari keseluruhan program analisis getaran yang andal dan dapat dipercaya.

Penyimpanan dan pengelolaan data getaran historis dalam volume besar menuntut infrastruktur basis data yang memadai, terutama bagi organisasi yang menerapkan pemantauan getaran kontinu pada banyak titik pengukuran secara bersamaan. Strategi kompresi data dan penyimpanan bertingkat (*tiered storage*), yang menyimpan data mentah resolusi tinggi hanya untuk periode waktu tertentu sebelum dikompresi menjadi ringkasan statistik untuk penyimpanan jangka panjang, menjadi pendekatan praktis untuk mengelola volume data yang terus bertambah tanpa mengorbankan kemampuan analisis tren jangka panjang yang tetap memerlukan akses terhadap data historis yang representatif.

Sertifikasi kompetensi analis getaran, yang umumnya mengacu pada standar tingkatan kategori I hingga IV sebagaimana lazim diterapkan pada bidang analisis getaran profesional, menjadi jaminan mutu penting bagi organisasi yang mengandalkan interpretasi spektrum getaran untuk pengambilan keputusan perawatan yang kritis. Analis dengan sertifikasi kategori lebih tinggi umumnya memiliki kompetensi untuk menganalisis kasus kompleks yang melibatkan interaksi berbagai mekanisme kegagalan secara simultan, sementara analis kategori dasar umumnya memadai untuk menangani pengukuran rutin dan identifikasi anomali sederhana yang mengikuti pola frekuensi karakteristik yang telah dikenal secara umum.

Penerapan analisis getaran pada skala armada peralatan sejenis dalam jumlah besar, seperti pada industri dengan ratusan motor listrik atau pompa yang beroperasi secara paralel, menuntut pendekatan prioritisasi yang cermat mengingat keterbatasan waktu dan personel yang tersedia untuk melakukan pengukuran rutin pada seluruh peralatan tersebut. Strategi segmentasi berdasarkan tingkat kekritisan, dikombinasikan dengan penerapan sensor pemantauan kontinu berbiaya rendah pada peralatan paling kritis dan pengukuran periodik manual pada peralatan non-kritis, menjadi pendekatan yang umum diterapkan untuk mengoptimalkan cakupan program analisis getaran pada skala armada peralatan yang besar.

Tabel 7.1 Pola Frekuensi Karakteristik pada Analisis Getaran Mesin Berputar

Mekanisme Kegagalan	Lokasi Frekuensi Karakteristik	Ciri Khas Pola Spektral
Unbalance (ketidakseimbangan)	1x frekuensi putaran (1x RPM)	Amplitudo dominan pada 1x RPM, arah radial
Misalignment (ketidaksejajaran)	1x, 2x, dan 3x RPM	Amplitudo tinggi pada harmonik kedua dan ketiga
Kerusakan bantalan	Frekuensi non-sinkron spesifik geometri bantalan	Pola broadband dengan puncak pada frekuensi cacat spesifik
Kerusakan roda gigi	*Gear mesh frequency* dan *sideband*	Sideband di sekitar frekuensi kisi roda gigi

7.2 Analisis Termografi dan Suhu Operasi

Termografi inframerah merupakan teknik *condition monitoring* non-kontak yang memanfaatkan radiasi inframerah yang dipancarkan oleh setiap objek untuk menghasilkan citra termal yang merepresentasikan distribusi suhu permukaan suatu peralatan. Prinsip dasar termografi memanfaatkan hukum fisika bahwa setiap objek dengan suhu di atas nol absolut memancarkan radiasi elektromagnetik

dalam spektrum inframerah, dengan intensitas yang berkaitan langsung dengan suhu permukaannya, sehingga kamera termal dapat mengonversi radiasi tersebut menjadi citra visual yang menunjukkan variasi suhu pada permukaan objek yang diamati.

Perkembangan teknologi kamera termal dari generasi ke generasi telah menghasilkan peningkatan signifikan pada resolusi spasial dan sensitivitas termal, memungkinkan deteksi perbedaan suhu yang semakin halus pada objek yang semakin kecil dan jauh. Kamera termal genggam modern, yang harganya semakin terjangkau dibandingkan dekade sebelumnya, kini banyak dilengkapi dengan kemampuan penggabungan citra termal dan citra visual biasa (*picture-in-picture*), memudahkan teknisi mengidentifikasi lokasi persis dari anomali termal yang terdeteksi tanpa harus menginterpretasikan citra termal semata yang terkadang sulit dikorelasikan secara visual dengan komponen fisik yang sesungguhnya.

Aplikasi termografi pada perawatan mesin industri mencakup dua kategori utama, yaitu pemantauan sistem kelistrikan dan pemantauan sistem mekanis. Pada sistem kelistrikan, termografi sangat efektif untuk mendeteksi sambungan yang longgar, korosi pada terminal, ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fasa, maupun komponen elektronik yang mengalami stres termal berlebih, mengingat seluruh anomali tersebut umumnya menghasilkan peningkatan suhu lokal akibat peningkatan resistansi listrik atau beban berlebih pada titik yang bermasalah, yang dapat diidentifikasi secara visual melalui perbedaan warna pada citra termal yang dihasilkan.

Pada sistem mekanis, termografi digunakan untuk mendeteksi gesekan berlebih akibat pelumasan yang tidak memadai, ketidaksejajaran komponen, maupun kebocoran pada sistem yang melibatkan fluida bertekanan, seperti kebocoran uap atau kebocoran sistem hidraulik yang menghasilkan pola suhu abnormal di sekitar lokasi kebocoran. Pemantauan suhu bantalan secara khusus menjadi aplikasi umum termografi mekanis, mengingat peningkatan suhu bantalan sering kali menjadi indikator dini kerusakan sebelum gejala getaran yang signifikan mulai terdeteksi, sehingga termografi dapat

menjadi teknik pelengkap yang memberikan peringatan dini tambahan di samping analisis getaran konvensional.

Interpretasi citra termal yang akurat menuntut pemahaman terhadap konsep emisivitas, yaitu kemampuan suatu permukaan material memancarkan radiasi inframerah dibandingkan dengan benda hitam sempurna pada suhu yang sama. Permukaan logam mengilap umumnya memiliki emisivitas rendah dan cenderung memantulkan radiasi dari lingkungan sekitar, sehingga dapat menghasilkan pembacaan suhu yang menyesatkan apabila tidak dikalibrasi dengan tepat, sementara permukaan yang dicat atau dioksidasi umumnya memiliki emisivitas lebih tinggi dan menghasilkan pembacaan suhu yang lebih akurat, sehingga teknisi termografi perlu memahami karakteristik material yang diperiksa untuk melakukan penyesuaian pengaturan emisivitas kamera secara tepat.

Penentuan garis dasar suhu normal (*thermal baseline*) untuk setiap peralatan menjadi prasyarat penting dalam program termografi yang efektif, mengingat interpretasi anomali suhu perlu dibandingkan dengan kondisi normal peralatan tersebut pada beban operasi yang setara, bukan dibandingkan secara acak dengan peralatan lain yang mungkin memiliki karakteristik desain atau beban kerja yang berbeda. Pemantauan tren suhu dari waktu ke waktu terhadap garis dasar yang telah ditetapkan memungkinkan deteksi tren peningkatan suhu secara bertahap yang mengindikasikan degradasi progresif, bahkan sebelum suhu absolut yang terukur melampaui ambang batas kritis yang telah ditetapkan sebagai kriteria alarm.

Program termografi rutin (*thermographic survey*) umumnya dilaksanakan secara berkala pada seluruh panel listrik dan peralatan mekanis kritis dalam suatu fasilitas produksi, dengan interval yang disesuaikan berdasarkan tingkat kekritisan peralatan dan riwayat temuan anomali sebelumnya. Survei termografi rutin ini sering kali mengungkap temuan yang tidak terduga, termasuk masalah yang belum menunjukkan gejala fisik yang dapat diamati secara langsung, sehingga menjadikan termografi sebagai salah satu teknik *condition monitoring* dengan rasio manfaat terhadap biaya yang sangat tinggi, mengingat

peralatan dan waktu yang dibutuhkan relatif terjangkau dibandingkan potensi kerugian yang dapat dicegah.

Integrasi hasil termografi dengan sistem informasi perawatan memungkinkan pelacakan tren suhu jangka panjang dan korelasi dengan data *condition monitoring* lain, seperti data getaran dan analisis pelumas, untuk menghasilkan gambaran diagnostik yang lebih komprehensif mengenai kondisi kesehatan peralatan secara keseluruhan. Pendekatan multi-parameter semacam ini, sebagaimana telah disinggung pada bab sebelumnya, membantu mengurangi risiko kesalahan diagnosis yang mungkin terjadi apabila keputusan perawatan hanya didasarkan pada satu jenis data pemantauan kondisi semata, tanpa mempertimbangkan konteks dari parameter pemantauan lain yang relevan.

Faktor lingkungan pengukuran turut memengaruhi akurasi hasil termografi, termasuk suhu udara sekitar, kelembaban, kecepatan angin pada pengukuran di area terbuka, serta jarak dan sudut pengambilan citra terhadap objek yang diperiksa. Pengukuran termografi yang dilaksanakan pada kondisi lingkungan yang tidak konsisten, misalnya dibandingkan antara pengukuran pada musim kemarau dan musim hujan tanpa kompensasi yang tepat, berpotensi menghasilkan interpretasi tren yang menyesatkan, sehingga teknisi termografi perlu mendokumentasikan kondisi lingkungan pengukuran secara konsisten sebagai bagian dari metadata setiap hasil pengukuran yang direkam.

Sertifikasi kompetensi teknisi termografi, yang umumnya mengacu pada standar tingkatan level 1 hingga level 3 sebagaimana lazim diterapkan pada berbagai teknik uji tak merusak (*non-destructive testing*), menjadi jaminan mutu penting bagi organisasi yang mengandalkan hasil interpretasi termografi untuk pengambilan keputusan perawatan yang kritis. Teknisi bersertifikasi level yang lebih tinggi umumnya memiliki kompetensi untuk menginterpretasikan pola termal yang lebih kompleks dan menyusun prosedur pengukuran yang lebih canggih, dibandingkan teknisi level dasar yang umumnya hanya melaksanakan pengukuran rutin mengikuti prosedur yang telah ditetapkan sebelumnya oleh analis yang lebih senior.

Kombinasi termografi dengan teknologi drone atau kendaraan udara tanpa awak semakin banyak diterapkan untuk inspeksi termal pada peralatan yang berlokasi sulit dijangkau, seperti infrastruktur ketinggian, saluran transmisi listrik, atau instalasi di area terbuka yang luas. Pendekatan ini memungkinkan survei termografi dilaksanakan secara lebih cepat dan aman, tanpa risiko keselamatan yang terkait dengan akses manual ke lokasi yang sulit dijangkau, sekaligus memungkinkan cakupan inspeksi yang lebih luas dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan pendekatan inspeksi manual konvensional yang membutuhkan akses fisik langsung ke setiap titik pengukuran.

Termografi kuantitatif (*quantitative thermography*), yang menghitung selisih suhu absolut antara komponen yang diperiksa dengan komponen pembanding pada beban operasi yang setara, umumnya menghasilkan interpretasi yang lebih andal dibandingkan termografi kualitatif yang hanya mengandalkan inspeksi visual pola warna semata. Standar klasifikasi keparahan berdasarkan selisih suhu, misalnya kategori perhatian, serius, dan kritis berdasarkan rentang selisih suhu tertentu di atas komponen pembanding, memberikan panduan kuantitatif yang membantu teknisi menentukan prioritas tindak lanjut secara lebih objektif dibandingkan penilaian visual subjektif semata.

Integrasi termografi dengan pemantauan beban listrik secara simultan memberikan konteks tambahan yang penting bagi interpretasi hasil, mengingat suhu komponen kelistrikan secara alami akan meningkat seiring dengan peningkatan beban yang ditanggungnya. Anomali suhu yang terdeteksi pada beban operasi rendah memiliki tingkat urgensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan anomali serupa yang hanya muncul pada kondisi beban puncak, sehingga pencatatan kondisi beban pada saat pengukuran termografi dilaksanakan menjadi informasi kontekstual yang tidak boleh diabaikan dalam interpretasi hasil pengukuran.

Program termografi yang matang juga mempertimbangkan integrasi hasil temuan ke dalam sistem perintah kerja CMMS secara otomatis, di mana setiap anomali yang melampaui ambang batas tertentu langsung menghasilkan perintah kerja tindak lanjut dengan

tingkat prioritas yang sesuai. Otomatisasi alur kerja semacam ini mengurangi risiko temuan termografi yang terlewat atau tertunda penanganannya akibat proses administratif manual, sekaligus mempercepat siklus dari deteksi anomali hingga pelaksanaan tindakan korektif yang diperlukan untuk mencegah perkembangan kerusakan lebih lanjut pada komponen yang teridentifikasi bermasalah.

Pelaporan hasil survei termografi idealnya disajikan dalam format yang mudah dipahami oleh berbagai tingkat pemangku kepentingan, mencakup citra termal asli, citra visual pembanding, data suhu kuantitatif, serta rekomendasi tindak lanjut yang jelas dan spesifik. Laporan yang komprehensif namun tetap ringkas dan actionable membantu memastikan temuan termografi benar-benar ditindaklanjuti oleh tim pelaksana di lapangan, alih-alih hanya menjadi arsip dokumentasi yang jarang dirujuk kembali setelah survei selesai dilaksanakan.

7.3 Analisis Pelumas dan Kondisi Komponen

Analisis pelumas merupakan teknik *condition monitoring* yang memanfaatkan pemeriksaan laboratorium terhadap sampel pelumas yang diambil dari peralatan untuk mengungkapkan informasi mengenai kondisi pelumas itu sendiri maupun kondisi komponen mekanis yang dilumasinya. Prinsip dasar analisis ini didasarkan pada pemahaman bahwa pelumas yang bersirkulasi dalam suatu sistem mekanis akan membawa jejak partikel hasil keausan komponen, kontaminan dari lingkungan sekitar, serta produk degradasi kimiawi pelumas itu sendiri, sehingga pemeriksaan terhadap sampel pelumas dapat mengungkapkan informasi berharga mengenai kondisi internal sistem tanpa perlu melakukan pembongkaran fisik terhadap peralatan.

Prosedur pengambilan sampel pelumas yang benar menjadi prasyarat mendasar bagi validitas seluruh hasil analisis yang diperoleh, mengingat kesalahan pada tahap pengambilan sampel, seperti pengambilan dari titik yang tidak representatif atau kontaminasi dari wadah sampel yang tidak bersih, dapat menghasilkan kesimpulan yang menyesatkan meskipun analisis laboratorium selanjutnya dilaksanakan dengan sangat akurat. Pelatihan formal bagi personel yang bertugas

mengambil sampel pelumas, mencakup teknik pengambilan yang konsisten dan penggunaan peralatan sampling yang tepat, menjadi investasi kecil namun berdampak besar terhadap keandalan keseluruhan program analisis pelumas suatu organisasi.

Sejarah perkembangan analisis pelumas sebagai teknik *condition monitoring* formal dimulai pada industri penerbangan dan militer sebelum meluas ke sektor industri umum, seiring dengan semakin terjangkaunya biaya pengujian laboratorium dan semakin disadarinya nilai ekonomis dari deteksi dini kerusakan komponen melalui rute non-invasif ini. Perkembangan ini sejalan dengan tren umum *condition monitoring* yang telah dibahas pada subbab-subbab sebelumnya, di mana teknologi yang sebelumnya hanya terjangkau oleh industri dengan anggaran besar kini semakin dapat diakses oleh industri berskala menengah melalui penurunan biaya pengujian dan peningkatan efisiensi proses laboratorium modern.

Parameter utama yang umum diperiksa dalam analisis pelumas mencakup viskositas, yang mengindikasikan apakah pelumas masih memiliki sifat pelumasan yang sesuai spesifikasi atau telah mengalami degradasi akibat oksidasi maupun kontaminasi; kandungan air, yang dapat mempercepat korosi dan menurunkan efektivitas pelumasan apabila melebihi ambang batas tertentu; serta tingkat total acid number (TAN) yang mengindikasikan tingkat oksidasi pelumas akibat paparan suhu tinggi dan oksigen dalam jangka waktu panjang selama masa pakai pelumas tersebut.

Analisis partikel keausan (*wear debris analysis*) menjadi komponen paling informatif dari analisis pelumas untuk keperluan diagnostik kondisi komponen, mengingat jenis, ukuran, bentuk, dan konsentrasi partikel logam yang ditemukan dalam sampel pelumas dapat mengindikasikan mekanisme keausan spesifik yang sedang terjadi pada komponen internal. Partikel berbentuk serpihan besar umumnya mengindikasikan keausan kelelahan pada permukaan bantalan, sementara partikel halus dalam konsentrasi tinggi lebih mengindikasikan keausan abrasif akibat kontaminasi partikel keras dalam sistem pelumasan, sehingga jenis partikel yang teridentifikasi

memberikan petunjuk diagnostik yang spesifik mengenai mekanisme kegagalan yang perlu diinvestigasi lebih lanjut.

Spektroskopi emisi atom (*atomic emission spectroscopy*) merupakan teknik laboratorium yang umum digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi berbagai unsur logam dalam sampel pelumas, memungkinkan identifikasi komponen spesifik yang mengalami keausan berdasarkan komposisi unsur logam penyusun komponen tersebut. Sebagai contoh, peningkatan konsentrasi unsur besi dapat mengindikasikan keausan pada komponen baja seperti roda gigi atau ring bantalan, sementara peningkatan konsentrasi unsur tembaga dapat mengindikasikan keausan pada komponen kuningan atau perunggu seperti bushing atau sangkar bantalan pada beberapa desain tertentu.

Penentuan interval pengambilan sampel dan analisis pelumas perlu disesuaikan dengan tingkat kekritisan peralatan dan volume pelumas yang digunakan, dengan peralatan kritis bervolume pelumas besar seperti turbin dan gearbox industri umumnya dianalisis lebih sering dibandingkan peralatan dengan volume pelumas kecil yang lebih sering diganti secara keseluruhan. Praktik pengambilan sampel yang konsisten, dari lokasi dan kondisi operasi yang sama setiap kalinya, menjadi prasyarat penting untuk memastikan hasil analisis dapat dibandingkan secara valid dari waktu ke waktu, mengingat variasi lokasi dan kondisi pengambilan sampel dapat menghasilkan bias yang menyesatkan interpretasi tren.

Interpretasi hasil analisis pelumas idealnya tidak hanya berfokus pada nilai absolut setiap parameter, tetapi juga mempertimbangkan tren perubahan dari waktu ke waktu, mengingat laju perubahan yang cepat pada suatu parameter, meskipun nilai absolutnya masih berada dalam batas normal, dapat menjadi indikator dini masalah yang berkembang dan memerlukan investigasi lebih lanjut. Pendekatan berbasis tren ini sejalan dengan filosofi *predictive maintenance* secara umum, yang menekankan pentingnya memantau laju perubahan kondisi, bukan hanya kondisi sesaat pada satu titik waktu tertentu saja.

Analisis pelumas juga memberikan manfaat tambahan berupa optimalisasi interval penggantian pelumas itu sendiri, mengingat

pendekatan konvensional yang mengganti pelumas berdasarkan interval waktu tetap sering kali tidak mencerminkan kondisi aktual pelumas, yang dapat bervariasi tergantung pada kondisi operasi dan lingkungan penggunaannya. Penggantian pelumas berdasarkan hasil analisis kondisi aktual (*condition-based oil change*) memungkinkan organisasi memperpanjang interval penggantian pada kondisi operasi ringan, sekaligus mempercepat penggantian pada kondisi operasi berat yang mempercepat degradasi pelumas, sehingga menghasilkan efisiensi biaya sekaligus perlindungan komponen yang lebih optimal dibandingkan pendekatan interval tetap yang seragam.

Penetapan batas alarm untuk setiap parameter analisis pelumas idealnya mengacu pada kombinasi antara rekomendasi umum dari produsen pelumas dan peralatan, standar industri yang berlaku, serta data historis spesifik dari populasi peralatan sejenis yang dimiliki organisasi. Batas alarm yang terlalu generik tanpa penyesuaian terhadap konteks operasi spesifik berisiko menghasilkan interpretasi yang kurang akurat, mengingat kondisi operasi yang berbeda, seperti suhu ambien atau beban kerja, dapat memengaruhi laju degradasi pelumas secara normal tanpa mengindikasikan adanya masalah mendasar pada komponen yang dilumasi.

Analisis pelumas pada sistem hidraulik memiliki beberapa pertimbangan khusus dibandingkan sistem pelumasan konvensional, mengingat fluida hidraulik tidak hanya berfungsi sebagai pelumas, tetapi juga sebagai media transmisi tenaga yang menuntut tingkat kebersihan partikel yang sangat ketat untuk menjaga presisi kerja katup dan aktuator hidraulik. Standar kebersihan fluida hidraulik, yang umumnya dinyatakan dalam kode kelas kebersihan partikel internasional, menjadi parameter kritis tambahan yang perlu dipantau secara ketat, mengingat kontaminasi partikel sekecil apapun dapat menyebabkan keausan dini pada komponen presisi tinggi seperti pompa dan katup proporsional pada sistem hidraulik modern.

Pengembangan sensor pemantauan pelumas daring (*online oil sensor*) yang terpasang permanen pada sistem pelumasan memungkinkan pemantauan kondisi pelumas secara kontinu tanpa perlu pengambilan sampel manual secara berkala, sehingga

mempercepat deteksi anomali dan mengurangi ketergantungan pada jadwal pengambilan sampel periodik yang mungkin melewatkan perubahan kondisi yang terjadi secara cepat di antara interval pengambilan sampel. Meskipun investasi awal sensor daring lebih tinggi dibandingkan analisis laboratorium konvensional, teknologi ini semakin banyak diadopsi pada peralatan kritis bernilai tinggi yang membutuhkan tingkat pemantauan kontinu untuk mendukung strategi *predictive maintenance* yang lebih responsif.

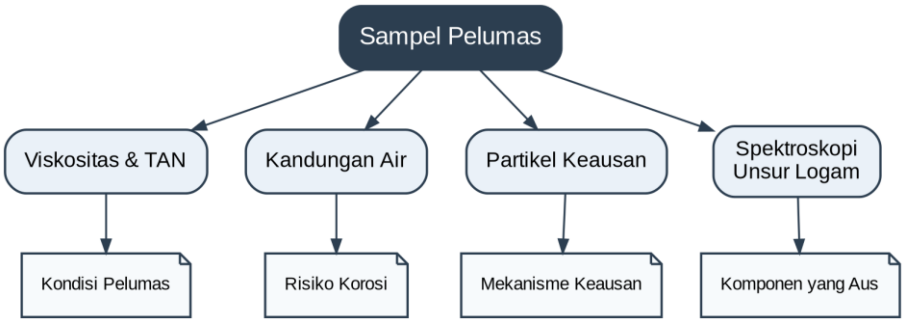
Pemilihan laboratorium analisis pelumas yang tersertifikasi dan konsisten menjadi pertimbangan penting bagi organisasi yang mengandalkan pihak eksternal untuk pengujian sampel, mengingat variasi metodologi pengujian antar-laboratorium dapat menghasilkan hasil yang tidak sepenuhnya dapat dibandingkan dari waktu ke waktu apabila organisasi berpindah-pindah penyedia jasa analisis. Konsistensi penggunaan satu laboratorium yang sama dengan metodologi pengujian yang terstandardisasi menjadi praktik yang direkomendasikan untuk menjaga validitas perbandingan tren data pelumas dalam jangka panjang.

Interpretasi hasil analisis pelumas idealnya dilakukan oleh analis yang memahami konteks spesifik peralatan yang dianalisis, bukan sekadar membandingkan angka hasil pengujian terhadap ambang batas generik tanpa mempertimbangkan riwayat dan karakteristik operasi peralatan tersebut. Kolaborasi antara laboratorium analisis pelumas dengan tim perawatan internal organisasi, melalui diskusi rutin mengenai tren dan anomali yang teridentifikasi, dapat menghasilkan interpretasi yang jauh lebih kontekstual dan actionable dibandingkan laporan analisis yang hanya berisi angka-angka tanpa rekomendasi tindak lanjut yang jelas dan spesifik.

Program manajemen pelumas yang komprehensif juga mencakup aspek pengelolaan penyimpanan dan penanganan pelumas sebelum digunakan, termasuk pelabelan yang jelas untuk mencegah kesalahan penggunaan jenis pelumas yang tidak sesuai spesifikasi pada peralatan tertentu, kondisi penyimpanan yang terlindung dari kontaminasi debu dan kelembaban, serta rotasi stok untuk memastikan pelumas yang disimpan dalam waktu lama tidak digunakan setelah

melewati batas masa simpan yang direkomendasikan oleh produsen, sebagaimana prinsip serupa yang telah dibahas pada konteks penyimpanan suku cadang di bab mengenai manajemen perawatan mesin.

Gambar 7.1 Informasi Diagnostik dari Analisis Pelumas



Analisis pelumas menghasilkan berbagai jenis informasi diagnostik yang saling melengkapi, mulai dari kondisi pelumas itu sendiri hingga identifikasi komponen spesifik yang mengalami keausan di dalam sistem.

7.4 Interpretasi Data Monitoring Mesin

Interpretasi data monitoring mesin merupakan tahap krusial yang menjembatani antara pengumpulan data mentah dari berbagai teknik *condition monitoring* dengan pengambilan keputusan perawatan yang tepat. Volume data yang dihasilkan dari berbagai sensor pemantauan kondisi modern dapat sangat besar, sehingga interpretasi yang efektif menuntut kombinasi antara keahlian analis manusia dengan dukungan sistem analitik otomatis yang mampu memproses dan menyaring data dalam volume besar untuk menyoroti anomali yang benar-benar memerlukan perhatian, dari data yang masih berada dalam rentang variasi normal operasi peralatan.

Penetapan ambang batas alarm (*alarm threshold*) menjadi elemen penting dalam interpretasi data monitoring, yang perlu ditetapkan secara cermat untuk menyeimbangkan antara sensitivitas deteksi dini dengan risiko alarm palsu yang berlebihan. Ambang batas yang terlalu ketat menghasilkan banyak alarm palsu yang dapat

menurunkan kepercayaan operator terhadap sistem pemantauan, fenomena yang dikenal sebagai *alarm fatigue*, sementara ambang batas yang terlalu longgar berisiko melewatkan tanda-tanda awal kegagalan yang seharusnya dapat dideteksi lebih dini, sehingga penentuan ambang batas yang optimal memerlukan kalibrasi berkelanjutan berdasarkan pengalaman aktual dan karakteristik spesifik setiap peralatan.

Pendekatan multi-parameter dalam interpretasi data monitoring, yang mengombinasikan data dari berbagai teknik *condition monitoring* seperti getaran, termografi, dan analisis pelumas secara simultan, terbukti memberikan akurasi diagnostik yang lebih tinggi dibandingkan mengandalkan satu jenis parameter tunggal. Korelasi antara berbagai parameter pemantauan dapat membantu memvalidasi atau mengeliminasi hipotesis diagnostik tertentu; sebagai contoh, peningkatan suhu bantalan yang terdeteksi melalui termografi dan disertai dengan peningkatan amplitudo getaran pada frekuensi karakteristik bantalan memberikan tingkat keyakinan diagnostik yang jauh lebih tinggi dibandingkan hanya mengandalkan salah satu indikator tersebut secara terpisah.

Visualisasi data monitoring melalui dasbor (*dashboard*) yang informatif menjadi elemen penting dalam mendukung interpretasi yang efektif oleh berbagai pemangku kepentingan, mulai dari teknisi lapangan yang membutuhkan informasi teknis rinci, hingga manajemen yang membutuhkan ringkasan kondisi kesehatan peralatan secara keseluruhan dalam format yang mudah dipahami. Penggunaan indikator warna sederhana, seperti sistem hijau-kuning-merah untuk menunjukkan status kondisi peralatan, memungkinkan pemahaman cepat mengenai prioritas tindakan yang diperlukan, tanpa mengharuskan seluruh pengguna sistem memahami detail teknis di balik setiap parameter pemantauan yang mendasarinya.

Analisis tren jangka panjang terhadap data monitoring, dibandingkan hanya menganalisis data pada satu titik waktu tertentu, memberikan wawasan yang jauh lebih berharga mengenai laju degradasi peralatan dan estimasi remaining useful life yang lebih akurat. Pendekatan analisis tren ini menuntut penyimpanan data historis dalam jangka waktu yang cukup panjang, serta kemampuan sistem

analitik untuk mengidentifikasi pola perubahan yang signifikan secara statistik, dibedakan dari fluktuasi acak yang normal terjadi akibat variasi kondisi operasi sehari-hari yang tidak selalu mengindikasikan adanya masalah mendasar pada peralatan.

Pemanfaatan kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin dalam interpretasi data monitoring semakin berkembang, memungkinkan sistem mengenali pola kompleks yang sulit diidentifikasi melalui aturan ambang batas sederhana, termasuk interaksi non-linear antar-parameter yang mengindikasikan mode kegagalan tertentu. Meskipun demikian, keterlibatan analis manusia yang berpengalaman tetap penting dalam memvalidasi rekomendasi yang dihasilkan oleh sistem otomatis tersebut, terutama untuk keputusan-keputusan kritis yang berdampak signifikan terhadap keselamatan atau kelangsungan produksi, mengingat model analitik secanggih apapun tetap berpotensi menghasilkan kesalahan interpretasi pada kondisi yang belum pernah terwakili dalam data pelatihannya.

Komunikasi hasil interpretasi data monitoring kepada tim pelaksana perawatan di lapangan perlu dilakukan dengan bahasa yang jelas dan actionable, mencakup tidak hanya deskripsi anomali yang terdeteksi, tetapi juga rekomendasi tindakan spesifik yang perlu dilaksanakan beserta tingkat urgensinya. Laporan analisis yang terlalu teknis dan sulit dipahami oleh teknisi pelaksana di lapangan berisiko tidak ditindaklanjuti secara tepat waktu, sehingga keterampilan komunikasi teknis menjadi kompetensi penting yang perlu dimiliki oleh analis *condition monitoring*, di samping keahlian teknis analisis data itu sendiri.

Integrasi data monitoring dari berbagai sumber ke dalam satu platform terpadu, yang sering disebut sebagai *asset performance management* (APM), memungkinkan organisasi memperoleh gambaran kesehatan keseluruhan armada peralatan secara terpusat, alih-alih menganalisis data setiap peralatan secara terisolasi pada sistem yang terpisah-pisah. Platform APM modern umumnya juga menyediakan kemampuan analitik prediktif bawaan, memungkinkan organisasi dengan kompetensi analitik internal terbatas tetap dapat memanfaatkan manfaat analisis data lanjutan tanpa harus membangun kapabilitas

pemrograman dan analisis statistik yang kompleks secara mandiri dari awal.

Validasi silang (*cross-validation*) antara hasil interpretasi data monitoring dengan temuan inspeksi fisik aktual, ketika peralatan akhirnya dibongkar untuk perawatan terjadwal atau perbaikan, menjadi praktik penting untuk terus menyempurnakan akurasi model interpretasi dari waktu ke waktu. Setiap kali prediksi berdasarkan data monitoring terbukti sesuai atau tidak sesuai dengan kondisi aktual yang ditemukan, informasi tersebut menjadi umpan balik berharga untuk mengkalibrasi ulang ambang batas alarm maupun model analitik yang digunakan, sehingga tingkat akurasi interpretasi data monitoring terus meningkat seiring bertambahnya pengalaman organisasi dalam menerapkan pendekatan ini.

Tantangan interpretasi data monitoring pada organisasi dengan sumber daya analitik terbatas dapat diatasi melalui pendekatan bertahap, dimulai dari penerapan aturan ambang batas sederhana pada parameter-parameter kunci yang paling relevan bagi peralatan kritis, sebelum secara bertahap mengembangkan kapabilitas analitik yang lebih canggih seiring dengan bertambahnya pengalaman dan volume data yang terkumpul. Pendekatan bertahap ini memungkinkan organisasi mulai memperoleh manfaat *condition monitoring* secara relatif cepat, tanpa harus menunggu hingga seluruh infrastruktur analitik canggih tersedia sepenuhnya sebelum dapat mulai memanfaatkan data pemantauan kondisi yang telah dikumpulkan.

Interpretasi data monitoring yang efektif juga menuntut kesadaran terhadap keterbatasan inheren dari setiap teknik pengukuran, mengingat tidak ada satu teknik *condition monitoring* pun yang mampu mendeteksi seluruh jenis kegagalan secara sempurna. Analis yang berpengalaman senantiasa mempertimbangkan kemungkinan mode kegagalan yang berada di luar cakupan sensitivitas teknik pemantauan yang sedang digunakan, sehingga tidak serta-merta menyimpulkan bahwa peralatan dalam kondisi sepenuhnya baik hanya karena satu parameter pemantauan tertentu menunjukkan hasil yang normal, tanpa mempertimbangkan kemungkinan mode kegagalan lain yang mungkin tidak tercakup oleh teknik pemantauan tersebut.

Keterampilan interpretasi data monitoring idealnya diwariskan secara terstruktur dari analis senior kepada analis junior melalui program pendampingan, mengingat sebagian besar keahlian dalam membaca nuansa data *condition monitoring* bersifat tacit dan berkembang seiring pengalaman menangani berbagai kasus nyata. Organisasi yang berhasil membangun jalur regenerasi kompetensi analitik semacam ini akan lebih tahan terhadap risiko kehilangan kapabilitas kritis akibat pergantian personel, dibandingkan organisasi yang menggantungkan seluruh kemampuan interpretasi datanya pada segelintir analis senior tanpa rencana suksesi yang jelas.

Sebagai penutup pembahasan bab ini, analisis dan diagnostik kondisi mesin melalui berbagai teknik *condition monitoring* yang telah diuraikan, mulai dari analisis getaran, termografi, hingga analisis pelumas, memberikan fondasi data yang kaya bagi pengambilan keputusan perawatan yang lebih tepat dan berbasis bukti. Namun demikian, nilai sesungguhnya dari seluruh data tersebut hanya dapat terealisasi apabila diikuti dengan interpretasi yang cermat dan tindak lanjut yang tepat waktu, menegaskan bahwa keberhasilan *predictive maintenance* pada akhirnya bergantung pada perpaduan antara kecanggihan teknologi pemantauan dengan kompetensi analitik dan pengalaman praktis dari sumber daya manusia yang mengoperasikannya.

Tabel 7.2 Korelasi Multi-Parameter untuk Diagnosis Kerusakan Bantalan

Parameter	Indikasi Tunggal	Kombinasi dengan Parameter Lain	Tingkat Keyakinan Diagnostik
Getaran tinggi saja	Kemungkinan *unbalance/misalignment*/bantalan	-	Sedang
Suhu tinggi saja	Kemungkinan pelumasan kurang/gesekan	-	Sedang
Getaran + suhu tinggi bersamaan	Kerusakan bantalan lanjut	Getaran pada frekuensi	Tinggi

Parameter	Indikasi Tunggal	Kombinasi dengan Parameter Lain	Tingkat Keyakinan Diagnostik
		cacat bantalan	
Getaran + partikel logam pelumas	Keausan komponen aktif berlangsung	Jenis partikel sesuai material bantalan	Sangat tinggi

Rangkuman Bab 7

Bab ini telah menguraikan tiga teknik utama analisis dan diagnostik kondisi mesin, yaitu analisis getaran, termografi inframerah, dan analisis pelumas, yang masing-masing memiliki prinsip kerja dan sensitivitas berbeda terhadap jenis kegagalan tertentu. Analisis getaran unggul dalam mendeteksi kegagalan mekanis pada komponen berputar melalui identifikasi pola frekuensi karakteristik, termografi efektif mendeteksi anomali termal pada sistem kelistrikan dan mekanis, sementara analisis pelumas memberikan informasi mendalam mengenai kondisi internal komponen melalui pemeriksaan partikel keausan dan sifat kimiawi pelumas.

Interpretasi data monitoring yang efektif menuntut pendekatan multi-parameter yang mengombinasikan berbagai teknik *condition monitoring* secara simultan, didukung oleh penetapan ambang batas alarm yang tepat, visualisasi data yang informatif, dan analisis tren jangka panjang. Pemanfaatan kecerdasan buatan semakin memperkaya kemampuan interpretasi data, namun keterlibatan analis manusia yang berpengalaman tetap penting dalam memvalidasi rekomendasi dan mengambil keputusan akhir, terutama untuk kasus-kasus kritis yang berdampak signifikan terhadap keselamatan dan produksi.

Keberhasilan program analisis dan diagnostik kondisi mesin pada akhirnya ditentukan oleh integrasi yang baik antara ketiga teknik

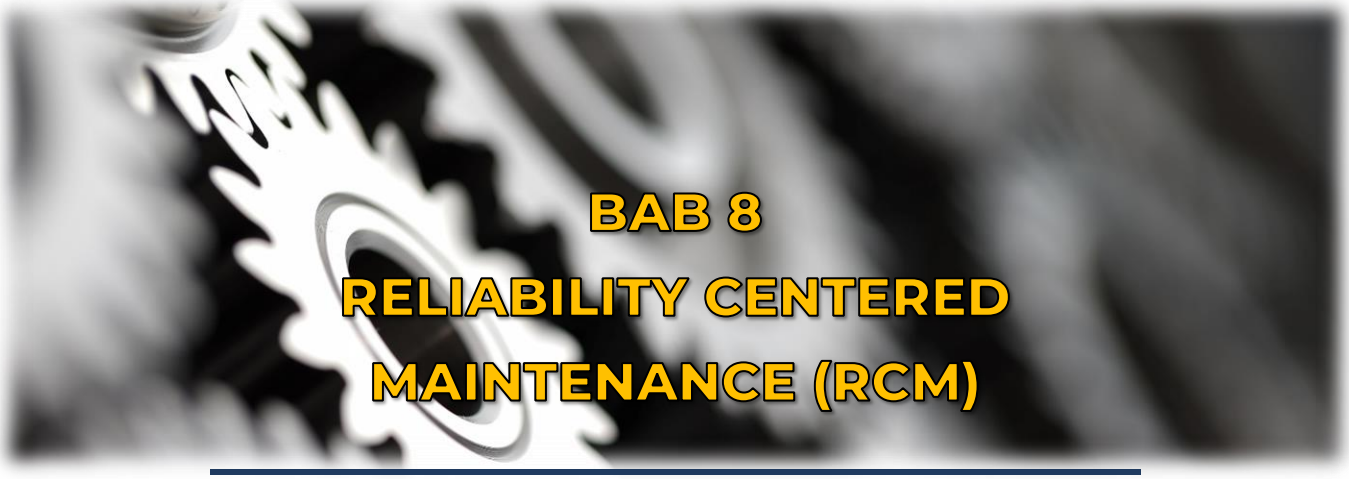
yang telah dibahas, didukung infrastruktur pengumpulan data yang andal, serta kompetensi sumber daya manusia yang mumpuni dalam menerjemahkan data menjadi keputusan perawatan yang tepat sasaran, sebagaimana akan semakin ditegaskan relevansinya pada pembahasan mengenai *reliability* centered maintenance di bab berikutnya, yang mengintegrasikan seluruh teknik diagnostik ini ke dalam kerangka pengambilan keputusan perawatan yang lebih sistematis dan menyeluruh.

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 7

1. Jelaskan bagaimana pola frekuensi karakteristik pada analisis getaran dapat digunakan untuk membedakan antara kegagalan akibat *unbalance, misalignment*, dan kerusakan bantalan.
2. Uraikan prinsip dasar termografi inframerah serta jelaskan mengapa pemahaman terhadap konsep emisivitas penting dalam interpretasi citra termal yang akurat.
3. Diskusikan informasi diagnostik apa saja yang dapat diperoleh dari analisis partikel keausan dalam sampel pelumas, serta bagaimana jenis dan bentuk partikel dapat mengindikasikan mekanisme keausan tertentu.
4. Jelaskan mengapa pendekatan multi-parameter dalam interpretasi data monitoring memberikan akurasi diagnostik yang lebih tinggi dibandingkan mengandalkan satu jenis parameter pemantauan saja.
5. Diskusikan fenomena alarm fatigue dan jelaskan bagaimana penentuan ambang batas alarm yang tepat dapat membantu mengatasi tantangan tersebut.
6. Analisislah mengapa keterlibatan analis manusia tetap penting dalam interpretasi data monitoring, meskipun sistem kecerdasan buatan semakin mampu mengenali pola kompleks secara otomatis.
7. Berikan contoh skenario di mana kombinasi analisis getaran dan termografi dapat memberikan diagnosis yang lebih meyakinkan dibandingkan menggunakan salah satu teknik tersebut secara terpisah.

8. Jelaskan bagaimana teknik order tracking mengatasi tantangan analisis getaran pada mesin dengan kecepatan putaran variabel, dibandingkan dengan analisis spektrum frekuensi konvensional.

9. Diskusikan mengapa validasi silang antara hasil interpretasi data monitoring dengan temuan inspeksi fisik aktual penting dilakukan secara berkelanjutan dalam program *condition monitoring* suatu organisasi.



BAB 8
RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)

8.1 Konsep dan Prinsip RCM

Reliability centered maintenance (RCM) merupakan kerangka kerja sistematis untuk menentukan strategi perawatan yang paling tepat bagi suatu peralatan, berdasarkan analisis mendalam mengenai fungsi peralatan tersebut, cara peralatan dapat gagal menjalankan fungsinya, serta konsekuensi yang ditimbulkan apabila kegagalan tersebut terjadi. Berbeda dari pendekatan perawatan konvensional yang cenderung menerapkan strategi seragam pada seluruh peralatan, RCM menekankan bahwa strategi perawatan yang optimal perlu disesuaikan secara spesifik berdasarkan karakteristik fungsi dan konsekuensi kegagalan masing-masing komponen, sehingga alokasi sumber daya perawatan dapat dioptimalkan secara lebih rasional.

RCM pertama kali dikembangkan dan diterapkan secara luas pada industri penerbangan sejak dekade 1960-an, sebagai respons terhadap kebutuhan untuk mengelola keandalan armada pesawat terbang yang semakin kompleks secara lebih sistematis dibandingkan pendekatan perawatan berbasis jadwal tetap yang konvensional. Tinjauan literatur komprehensif mengenai keadaan praktik RCM saat ini menunjukkan bahwa metode ini telah berkembang penerapannya jauh melampaui industri penerbangan, mencakup berbagai sektor industri lain seperti manufaktur, pembangkit energi, hingga infrastruktur sipil, meskipun tingkat adopsinya masih bervariasi antar-sektor tergantung pada kompleksitas dan kekritisan sistem yang dikelola (Geisbush & Ariaratnam, 2023).

Konteks historis kemunculan RCM di industri penerbangan menarik untuk dicermati, mengingat metode ini lahir dari temuan mengejutkan bahwa penambahan frekuensi perawatan preventif pada

pesawat terbang tidak selalu berkorelasi dengan penurunan tingkat kegagalan, bahkan pada sejumlah kasus penambahan intensitas perawatan preventif justru meningkatkan risiko kegagalan akibat gangguan yang ditimbulkan oleh tindakan perawatan itu sendiri. Temuan inilah yang mendorong pengembangan pendekatan yang lebih selektif dan berbasis analisis konsekuensi, yang kemudian dikenal sebagai RCM dan terbukti secara signifikan meningkatkan keandalan sekaligus menurunkan biaya perawatan pada industri penerbangan komersial di masa berikutnya.

Prinsip fundamental RCM dapat diringkas melalui tujuh pertanyaan mendasar yang perlu dijawab secara sistematis untuk setiap sistem yang dianalisis, yaitu apa fungsi dan standar kinerja yang dipersyaratkan dari sistem tersebut, bagaimana sistem tersebut dapat gagal menjalankan fungsinya, apa penyebab dari setiap kegagalan fungsional tersebut, apa yang terjadi ketika masing-masing kegagalan tersebut muncul, mengapa kegagalan tersebut menjadi penting atau konsekuensinya, apa yang dapat dilakukan untuk memprediksi atau mencegah masing-masing kegagalan tersebut, dan apa yang perlu dilakukan apabila tidak ditemukan tindakan proaktif yang sesuai untuk mencegah kegagalan tersebut.

RCM secara eksplisit mengakui bahwa tidak seluruh kegagalan perlu atau dapat dicegah melalui tindakan proaktif, dan bahwa strategi *run to failure* atau membiarkan peralatan beroperasi hingga gagal dapat menjadi keputusan yang tepat pada kondisi tertentu, khususnya untuk komponen dengan konsekuensi kegagalan yang minimal dan biaya penggantian yang rendah. Prinsip ini membedakan RCM secara mendasar dari filosofi perawatan konvensional yang cenderung menganggap bahwa lebih banyak perawatan selalu lebih baik, padahal kenyataannya perawatan yang berlebihan pada komponen yang tidak memerlukannya justru dapat memboroskan sumber daya organisasi tanpa memberikan manfaat keandalan yang sepadan.

Kajian mengenai keandalan dan pemeliharaan berbasis risiko menegaskan bahwa RCM pada dasarnya merupakan metodologi yang menggabungkan analisis keandalan teknis dengan penilaian konsekuensi risiko secara terintegrasi, sehingga keputusan strategi

perawatan yang dihasilkan mencerminkan keseimbangan optimal antara upaya pencegahan kegagalan dengan biaya yang perlu dikeluarkan untuk melaksanakan upaya tersebut (Melani dkk., 2023). Pendekatan berbasis risiko ini menjadikan RCM sebagai kerangka kerja yang secara inheren berorientasi pada efisiensi biaya, bukan sekadar berupaya memaksimalkan keandalan tanpa mempertimbangkan konsekuensi ekonomisnya.

Penerapan RCM menuntut komitmen sumber daya yang signifikan pada tahap awal, mengingat proses analisis fungsi dan kegagalan sistem secara menyeluruh memerlukan waktu dan keahlian yang cukup besar, terutama untuk sistem yang kompleks dengan banyak komponen dan interaksi fungsional. Oleh karena itu, penerapan RCM secara penuh umumnya diprioritaskan pada sistem-sistem yang paling kritis terhadap keselamatan, lingkungan, atau produksi, sementara sistem dengan tingkat kekritisan lebih rendah dapat dikelola menggunakan pendekatan yang lebih sederhana namun tetap mengadopsi prinsip-prinsip dasar RCM secara proporsional sesuai dengan kompleksitas dan risiko yang dihadapi.

Beberapa varian metodologi RCM telah dikembangkan sejak konsep aslinya diperkenalkan, termasuk RCM II yang menekankan lebih kuat pada aspek keselamatan dan lingkungan, serta pendekatan streamlined RCM yang menyederhanakan proses analisis untuk mempercepat implementasi pada sistem dengan tingkat kekritisan menengah. Kajian mengenai pendekatan mission *reliability*-centered maintenance berbasis jaringan aliran stokastik kualitas menunjukkan perkembangan lebih lanjut dari konsep RCM yang mengintegrasikan analisis keandalan misi produksi secara lebih holistik pada sistem manufaktur multi-status yang kompleks, memperluas cakupan aplikasi RCM melampaui analisis keandalan komponen individual semata (Yang dkk., 2022).

RCM juga perlu dibedakan secara konseptual dari sekadar penerapan FMEA semata, meskipun kedua metodologi tersebut sering digunakan secara bersamaan dan saling melengkapi. FMEA pada dasarnya merupakan salah satu alat analisis yang digunakan di dalam proses RCM untuk mengidentifikasi mode kegagalan dan menilai

tingkat keparahannya, sementara RCM merupakan kerangka kerja yang lebih luas yang mencakup keseluruhan proses mulai dari analisis fungsi hingga penentuan strategi perawatan final. Pemahaman terhadap perbedaan cakupan ini penting agar organisasi tidak keliru menganggap bahwa pelaksanaan FMEA semata sudah setara dengan penerapan RCM secara utuh dan komprehensif.

Standar internasional mengenai keandalan sistem, seperti yang diterbitkan oleh komisi elektroteknik internasional, memberikan kerangka acuan formal mengenai metodologi RCM sebagai pendekatan standar untuk meningkatkan efektivitas perawatan dan menyediakan mekanisme pengelolaan perawatan dengan tingkat kendali dan kesadaran yang tinggi. Kepatuhan terhadap standar internasional semacam ini menjadi semakin penting bagi organisasi yang beroperasi pada industri dengan tuntutan regulasi ketat, seperti industri penerbangan, energi nuklir, maupun industri proses berisiko tinggi lainnya, di mana bukti penerapan metodologi perawatan yang terstandardisasi sering kali menjadi persyaratan kepatuhan yang wajib dipenuhi.

Prinsip RCM juga menekankan pentingnya pendekatan berbasis bukti (*evidence-based*) dalam pengambilan keputusan perawatan, alih-alih mengandalkan asumsi atau kebiasaan turun-temurun yang belum tentu relevan dengan konteks operasi aktual peralatan yang dianalisis. Pendekatan ini menuntut organisasi untuk secara aktif mengumpulkan dan menganalisis data kegagalan, konsultasi dengan berbagai pemangku kepentingan yang relevan, serta bersedia merevisi asumsi awal apabila bukti yang terkumpul menunjukkan hasil yang berbeda dari ekspektasi semula, mencerminkan budaya perbaikan berkelanjutan yang menjadi ciri khas organisasi dengan kematangan manajemen perawatan yang tinggi.

RCM juga memberikan kontribusi penting terhadap penyusunan dokumentasi keselamatan (*safety case*) pada industri dengan risiko tinggi, mengingat proses analisis fungsi dan konsekuensi kegagalan yang sistematis menghasilkan justifikasi terdokumentasi mengenai mengapa suatu strategi perawatan tertentu dianggap memadai untuk mengendalikan risiko pada tingkat yang dapat diterima. Dokumentasi

semacam ini menjadi bukti penting bagi auditor keselamatan maupun regulator, sekaligus menjadi rujukan internal bagi organisasi ketika perlu menjelaskan dasar pengambilan keputusan strategi perawatan kepada pemangku kepentingan yang mempertanyakan kecukupan program perawatan yang diterapkan.

Penerapan RCM secara konsisten dalam jangka panjang juga berkontribusi terhadap pembentukan basis pengetahuan keandalan (*reliability knowledge base*) organisasi yang semakin kaya seiring waktu, mencakup pemahaman mendalam mengenai karakteristik kegagalan setiap jenis peralatan yang dimiliki. Basis pengetahuan semacam ini menjadi aset strategis yang bernilai tinggi, tidak hanya untuk keperluan operasional sehari-hari, tetapi juga untuk mendukung keputusan desain peralatan baru, evaluasi kelayakan investasi, maupun negosiasi dengan pemasok peralatan mengenai spesifikasi keandalan yang dipersyaratkan pada pengadaan peralatan di masa mendatang.

Perbandingan RCM dengan pendekatan manajemen keandalan lain, seperti *total productive maintenance* (TPM) yang akan dibahas pada bagian lanjutan buku ini, menunjukkan bahwa kedua kerangka kerja tersebut sesungguhnya saling melengkapi alih-alih saling menggantikan. RCM lebih menekankan pada analisis teknis mendalam untuk menentukan strategi perawatan optimal berdasarkan konsekuensi kegagalan, sementara TPM lebih menekankan pada aspek keterlibatan seluruh elemen organisasi, termasuk operator lini produksi, dalam menjaga keandalan peralatan sehari-hari, sehingga organisasi yang matang idealnya mengintegrasikan kedua pendekatan tersebut secara sinergis dalam kerangka manajemen perawatan yang menyeluruh.

Penerapan RCM juga memberikan manfaat tidak langsung berupa peningkatan pemahaman lintas fungsi mengenai keterkaitan antara desain, operasi, dan perawatan suatu sistem, mengingat proses analisis yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan secara alami mendorong pertukaran perspektif yang mungkin sebelumnya jarang terjadi secara terstruktur. Insinyur desain yang berpartisipasi dalam analisis RCM sering kali memperoleh wawasan berharga mengenai tantangan operasional aktual yang dihadapi di lapangan, yang dapat menjadi masukan bagi penyempurnaan desain peralatan generasi

berikutnya, sehingga manfaat RCM meluas melampaui sekadar penentuan strategi perawatan untuk peralatan yang sudah ada saat ini.

Keterbatasan RCM juga perlu dipahami secara jujur oleh organisasi yang mempertimbangkan penerapannya, termasuk kebutuhan investasi waktu dan sumber daya yang signifikan pada tahap awal, ketergantungan pada kualitas dan kelengkapan data historis yang tersedia, serta risiko bahwa analisis yang terlalu birokratis dapat kehilangan fokus pada tujuan praktisnya apabila tidak dikelola dengan baik. Kesadaran akan keterbatasan ini penting agar ekspektasi terhadap RCM tetap realistis, dan organisasi dapat mengambil langkah mitigasi yang tepat, seperti memulai dari skala kecil dan terukur, alih-alih berupaya menerapkan RCM secara menyeluruh pada seluruh peralatan sekaligus tanpa persiapan yang memadai.

Tabel 8.1 Tujuh Pertanyaan Fundamental dalam Metodologi RCM

No.	Pertanyaan RCM	Tujuan Analisis
1	Apa fungsi dan standar kinerja sistem?	Mendefinisikan fungsi utama dan sekunder
2	Bagaimana sistem dapat gagal menjalankan fungsinya?	Mengidentifikasi kegagalan fungsional
3	Apa penyebab setiap kegagalan fungsional?	Mengidentifikasi mode kegagalan
4	Apa yang terjadi saat kegagalan muncul?	Mendeskripsikan efek kegagalan
5	Mengapa kegagalan tersebut penting?	Menilai konsekuensi kegagalan
6	Tindakan proaktif apa yang dapat dilakukan?	Menentukan strategi perawatan
7	Apa yang dilakukan jika tidak ada tindakan proaktif yang sesuai?	Menentukan default action (*run to failure/redesign*)

8.2 Analisis Fungsi dan Kegagalan Sistem

Analisis fungsi merupakan tahap awal dan fondasi dari keseluruhan proses RCM, yang bertujuan mendefinisikan secara jelas dan terukur apa yang diharapkan dari suatu sistem atau komponen dalam konteks operasinya saat ini. Fungsi yang didefinisikan perlu mencakup tidak hanya fungsi utama (*primary function*) yang menjadi alasan utama keberadaan sistem tersebut, tetapi juga fungsi sekunder (*secondary function*) seperti fungsi keselamatan, fungsi kontrol, fungsi penampilan, maupun fungsi kenyamanan yang mungkin tidak menjadi tujuan utama namun tetap penting untuk dipertimbangkan dalam analisis kegagalan secara menyeluruh.

Konteks operasi menjadi elemen penting yang perlu disertakan dalam setiap pernyataan fungsi, mengingat standar kinerja yang dipersyaratkan dari suatu sistem dapat berbeda secara signifikan tergantung pada kondisi operasi spesifiknya. Sebagai ilustrasi, standar kinerja suatu sistem pendingin pada kondisi operasi musim panas dengan beban puncak akan berbeda dari standar kinerja yang dipersyaratkan pada kondisi operasi normal, sehingga analisis fungsi RCM yang cermat perlu mengidentifikasi skenario operasi kritis yang paling menuntut, guna memastikan strategi perawatan yang dihasilkan cukup memadai untuk mengakomodasi kondisi operasi paling ekstrem yang mungkin dihadapi sistem tersebut.

Standar kinerja yang menyertai setiap definisi fungsi perlu dinyatakan secara kuantitatif dan spesifik, mengingat pernyataan fungsi yang terlalu umum akan menyulitkan identifikasi kegagalan fungsional secara tepat pada tahap selanjutnya. Sebagai contoh, fungsi suatu pompa tidak cukup dinyatakan sebagai memompa fluida semata, melainkan perlu dinyatakan secara lebih spesifik seperti memompa fluida dengan laju alir tertentu pada tekanan tertentu, sehingga kegagalan fungsional dapat didefinisikan secara jelas ketika kinerja aktual pompa tersebut turun di bawah standar yang telah ditetapkan, baik secara total maupun sebagian.

Kegagalan fungsional (*functional failure*) didefinisikan sebagai ketidakmampuan suatu sistem menjalankan fungsinya sesuai standar

kinerja yang telah ditetapkan, yang dapat bersifat kegagalan total di mana sistem sepenuhnya tidak dapat menjalankan fungsinya, maupun kegagalan sebagian di mana sistem masih dapat berfungsi namun di bawah standar kinerja yang dipersyaratkan. Identifikasi seluruh kemungkinan kegagalan fungsional untuk setiap fungsi yang telah didefinisikan menjadi langkah penting sebelum analisis dapat berlanjut pada identifikasi mode kegagalan yang menjadi penyebab dari masing-masing kegagalan fungsional tersebut.

Mode kegagalan (*failure mode*) merujuk pada mekanisme spesifik yang menyebabkan terjadinya suatu kegagalan fungsional, yang dapat diidentifikasi melalui analisis mendalam terhadap desain teknis sistem, riwayat kegagalan historis, pengalaman operator dan teknisi, maupun literatur teknis dan standar industri yang relevan. Satu kegagalan fungsional dapat disebabkan oleh beberapa mode kegagalan yang berbeda, sehingga analisis RCM perlu mengidentifikasi seluruh mode kegagalan yang secara realistis mungkin terjadi, tanpa berlebihan mencantumkan mode kegagalan yang secara praktis sangat tidak mungkin terjadi pada konteks operasi spesifik sistem yang dianalisis.

Analisis efek kegagalan (*failure effect analysis*) menguraikan apa yang sesungguhnya terjadi ketika suatu mode kegagalan tertentu muncul, mencakup bukti kegagalan yang dapat diamati, dampak terhadap keselamatan dan lingkungan, dampak terhadap produksi, serta tindakan perbaikan yang diperlukan untuk memulihkan fungsi sistem. Deskripsi efek kegagalan yang rinci dan akurat menjadi dasar penting bagi tahap selanjutnya, yaitu penilaian konsekuensi kegagalan, yang akan menentukan kategori strategi perawatan yang paling tepat untuk mode kegagalan tersebut.

Penilaian konsekuensi kegagalan dalam RCM umumnya dikategorikan ke dalam empat kelompok utama, yaitu konsekuensi kegagalan tersembunyi (*hidden failure*) yang tidak langsung terlihat oleh operator dalam kondisi operasi normal, konsekuensi terhadap keselamatan dan lingkungan, konsekuensi operasional yang berdampak pada kemampuan produksi, serta konsekuensi non-operasional yang hanya berdampak pada biaya perbaikan tanpa memengaruhi keselamatan maupun produksi secara langsung. Kategorisasi ini

menjadi dasar penting bagi penentuan strategi perawatan yang tepat, mengingat kegagalan tersembunyi dan kegagalan dengan konsekuensi keselamatan memerlukan perhatian dan prioritas yang jauh lebih tinggi dibandingkan kegagalan dengan konsekuensi non-operasional semata.

Kegagalan tersembunyi memerlukan perhatian khusus dalam analisis RCM, mengingat sistem proteksi atau cadangan yang dirancang untuk mengantisipasi kegagalan fungsi utama, seperti katup pengaman atau sistem alarm, tidak akan diketahui telah gagal berfungsi hingga benar-benar dibutuhkan pada saat terjadi kegagalan fungsi utama yang seharusnya diantisipasinya. Strategi perawatan untuk kegagalan tersembunyi umumnya menekankan pentingnya inspeksi fungsional berkala untuk memverifikasi bahwa sistem proteksi tersebut masih berfungsi sebagaimana mestinya, mengingat tanpa verifikasi tersebut, organisasi dapat memiliki keyakinan palsu terhadap tingkat keselamatan yang sesungguhnya tidak terjamin akibat kegagalan tersembunyi pada sistem proteksinya.

Batas sistem (*system boundary*) yang jelas perlu ditetapkan sebelum analisis fungsi dan kegagalan dilaksanakan, mengingat penetapan batas yang tidak tepat dapat menyebabkan analisis menjadi terlalu luas dan sulit dikelola, ataukah terlalu sempit sehingga mengabaikan interaksi penting dengan sistem lain yang saling berkaitan. Penetapan batas sistem yang tepat umumnya mempertimbangkan titik-titik antarmuka fisik yang jelas, seperti titik masuk dan keluar material, energi, atau sinyal kendali, sehingga cakupan analisis dapat didefinisikan secara presisi tanpa ambiguitas mengenai komponen mana yang termasuk dan tidak termasuk dalam lingkup analisis RCM yang dilaksanakan.

Diagram blok fungsional (*functional block diagram*) sering digunakan sebagai alat bantu visual dalam tahap analisis fungsi, memetakan aliran material, energi, dan informasi antar-subsistem dalam suatu sistem yang dianalisis. Representasi visual semacam ini membantu tim RCM memahami keterkaitan fungsional antar-komponen secara lebih jelas, sekaligus memudahkan identifikasi titik-titik kritis di mana kegagalan pada satu subsistem berpotensi merambat memengaruhi subsistem lain yang terhubung dengannya, sehingga

analisis kegagalan dapat mempertimbangkan efek sistemik, bukan hanya efek lokal pada komponen yang mengalami kegagalan secara langsung.

Prioritisasi sistem dan komponen yang akan dianalisis menggunakan RCM perlu mempertimbangkan tingkat kekritisan relatif masing-masing terhadap keseluruhan operasi, mengingat keterbatasan sumber daya organisasi umumnya tidak memungkinkan penerapan analisis RCM penuh pada seluruh peralatan sekaligus. Pendekatan yang umum diterapkan adalah memulai analisis dari sistem dengan riwayat kegagalan yang paling sering terjadi, konsekuensi kegagalan paling signifikan terhadap keselamatan atau produksi, atau sistem yang baru diinstal dan belum memiliki program perawatan yang mapan, sehingga manfaat analisis RCM dapat direalisasikan secara bertahap dimulai dari area yang memberikan dampak paling signifikan.

Kualitas hasil analisis fungsi dan kegagalan sangat bergantung pada partisipasi aktif dan keterusterangan seluruh anggota tim RCM dalam mengungkapkan pengetahuan dan pengalaman mereka, termasuk kesediaan mengakui keterbatasan pemahaman terhadap aspek tertentu dari sistem yang dianalisis. Fasilitator RCM yang berpengalaman perlu menciptakan lingkungan diskusi yang terbuka dan tidak menghakimi, di mana anggota tim merasa nyaman menyampaikan observasi atau kekhawatiran mereka, sekalipun observasi tersebut mungkin bertentangan dengan asumsi desain formal atau pendapat anggota tim lain yang memiliki posisi hierarkis lebih tinggi dalam organisasi.

Dokumentasi hasil analisis fungsi dan kegagalan idealnya disusun dalam format yang terstruktur dan dapat ditelusuri, biasanya dalam bentuk lembar kerja RCM (*RCM worksheet*) yang mencantumkan secara sistematis setiap fungsi, kegagalan fungsional, mode kegagalan, efek kegagalan, dan penilaian konsekuensi yang telah dianalisis. Format terstruktur semacam ini tidak hanya memudahkan proses analisis itu sendiri, tetapi juga menjadi dokumentasi yang dapat ditinjau ulang dan diaudit oleh pihak lain di kemudian hari, termasuk untuk keperluan verifikasi kepatuhan terhadap regulasi keselamatan yang berlaku pada industri tertentu.

Penggunaan terminologi yang konsisten dan terstandardisasi sepanjang proses analisis fungsi dan kegagalan menjadi hal penting yang sering kali kurang mendapat perhatian, mengingat perbedaan interpretasi istilah antar-anggota tim dapat menimbulkan ambiguitas dalam dokumentasi hasil analisis. Penyusunan kamus istilah (*glossary*) khusus RCM yang disepakati bersama sejak awal proyek analisis, mencakup definisi baku untuk istilah seperti kegagalan fungsional, mode kegagalan, dan konsekuensi tersembunyi, membantu memastikan seluruh anggota tim memiliki pemahaman yang seragam sepanjang proses analisis, sehingga mengurangi risiko kesalahpahaman yang dapat memengaruhi kualitas hasil akhir analisis RCM yang dilaksanakan.

Tabel 8.2 Contoh Lembar Kerja Analisis Fungsi dan Kegagalan RCM

Fungsi	Kegagalan Fungsional	Mode Kegagalan	Kategori Konsekuensi
Memompa fluida pada laju dan tekanan tertentu	Tidak mampu memompa sama sekali	Kerusakan impeller, motor terbakar	Operasional (produksi terhenti)
Memompa fluida pada laju dan tekanan tertentu	Laju alir di bawah standar	Keausan seal, kavitasi	Non-operasional (penurunan efisiensi)
Memberikan sinyal alarm saat tekanan berlebih	Alarm tidak berbunyi saat dibutuhkan	Sensor tekanan gagal, kabel putus	Tersembunyi (*hidden failure*)
Menahan beban struktural tanpa deformasi	Terjadi deformasi/retak struktural	Kelelahan material, korosi	Keselamatan/lingkungan

8.3 Penentuan Strategi Perawatan Berbasis RCM

Setelah analisis fungsi, kegagalan fungsional, mode kegagalan, dan konsekuensi kegagalan diselesaikan, tahap selanjutnya dalam RCM

adalah menentukan strategi perawatan yang paling tepat untuk setiap mode kegagalan yang telah diidentifikasi. Proses penentuan strategi ini mengikuti kerangka pengambilan keputusan yang logis, di mana pertama-tama dipertimbangkan apakah tindakan pencegahan berbasis kondisi (*condition-based task*) dapat diterapkan, yaitu apabila terdapat gejala yang dapat dideteksi sebelum kegagalan fungsional benar-benar terjadi, sejalan dengan prinsip *predictive maintenance* yang telah dibahas pada bab sebelumnya.

Kriteria kelayakan suatu tindakan proaktif dalam kerangka RCM tidak hanya mempertimbangkan kemungkinan teknis semata, tetapi juga kelayakan ekonomisnya, yaitu apakah biaya pelaksanaan tindakan tersebut sepadan dengan manfaat pengurangan risiko yang diperoleh. Suatu tindakan proaktif dapat saja memungkinkan secara teknis untuk dilaksanakan, namun tidak layak secara ekonomis apabila biaya pelaksanaannya melebihi estimasi biaya konsekuensi kegagalan yang berupaya dicegahnya, sehingga evaluasi kelayakan dalam RCM senantiasa mempertimbangkan kedua dimensi tersebut secara simultan sebelum suatu tindakan proaktif direkomendasikan sebagai strategi final.

Apabila tindakan berbasis kondisi tidak memungkinkan, langkah selanjutnya adalah mempertimbangkan tindakan pencegahan berbasis waktu (*time-based task*), seperti penggantian atau overhaul terjadwal, yang sesuai diterapkan pada komponen dengan pola kegagalan yang berkaitan erat dengan usia pemakaian, sebagaimana telah dibahas pada bab mengenai *preventive maintenance*. Kelayakan tindakan berbasis waktu perlu dievaluasi berdasarkan ketersediaan data statistik yang memadai mengenai pola kegagalan komponen tersebut, mengingat penerapan tindakan berbasis waktu pada komponen dengan pola kegagalan acak tidak akan memberikan manfaat pengurangan risiko yang signifikan.

Untuk kegagalan tersembunyi, strategi yang dipertimbangkan adalah tindakan pencarian kegagalan (*failure-finding task*), yaitu inspeksi berkala yang secara khusus bertujuan memverifikasi fungsi sistem proteksi atau cadangan yang normalnya tidak aktif, sehingga kegagalan tersembunyi dapat terdeteksi sebelum sistem tersebut benar-

benar dibutuhkan pada saat kegagalan fungsi utama terjadi. Interval tindakan pencarian kegagalan perlu ditentukan dengan mempertimbangkan probabilitas kegagalan ganda, yaitu probabilitas terjadinya kegagalan fungsi utama bersamaan dengan kegagalan tersembunyi pada sistem proteksinya, yang idealnya dijaga pada tingkat yang sangat rendah untuk sistem dengan konsekuensi keselamatan yang signifikan.

Apabila tidak ditemukan tindakan proaktif yang layak secara teknis maupun ekonomis untuk mencegah suatu mode kegagalan tertentu, RCM mengarahkan pada dua pilihan alternatif, yaitu membiarkan komponen beroperasi hingga gagal (*run to failure*) apabila konsekuensinya dapat diterima, atau melakukan modifikasi desain (*redesign*) apabila konsekuensi kegagalan tersebut tidak dapat diterima namun tidak ada tindakan perawatan yang efektif untuk mencegahnya. Keputusan redesign umumnya diperlukan untuk kegagalan dengan konsekuensi keselamatan atau lingkungan yang serius, di mana strategi run to failure tidak dapat diterima namun tindakan perawatan konvensional tidak mampu memberikan tingkat perlindungan yang memadai.

Analisis mengenai penerapan RCM menggunakan *failure mode and effect analysis* menegaskan bahwa proses penentuan strategi perawatan dalam RCM pada dasarnya merupakan proses optimasi multi-kriteria yang mempertimbangkan keseimbangan antara efektivitas teknis, kelayakan ekonomis, dan konsekuensi kegagalan secara simultan, bukan sekadar memilih strategi perawatan dengan biaya termurah atau strategi yang paling konservatif dari sisi keandalan teknis semata. Pendekatan holistik semacam ini menjadikan RCM sebagai metodologi yang secara inheren menghasilkan program perawatan yang lebih terarah dan efisien dibandingkan pendekatan perawatan tradisional yang cenderung menerapkan strategi seragam tanpa diferensiasi berdasarkan karakteristik risiko spesifik masing-masing komponen.

Hasil akhir dari proses penentuan strategi RCM adalah suatu program perawatan terdokumentasi yang mencantumkan, untuk setiap komponen kritis yang dianalisis, strategi perawatan yang telah

ditentukan beserta interval dan justifikasi teknisnya. Dokumentasi ini menjadi rujukan penting bagi penyusunan jadwal perawatan operasional sehari-hari, sekaligus menjadi basis pengetahuan yang dapat ditinjau ulang secara berkala seiring dengan bertambahnya data kegagalan aktual atau perubahan konteks operasi yang mungkin memengaruhi validitas asumsi-asumsi yang mendasari analisis RCM awal.

Penerapan RCM juga perlu diikuti dengan mekanisme peninjauan ulang berkala (*living program*), mengingat analisis RCM yang telah disusun bukanlah dokumen statis yang berlaku selamanya, melainkan perlu terus diperbarui seiring dengan akumulasi pengalaman operasional, perubahan desain peralatan, atau perubahan konteks operasi yang dapat memengaruhi validitas kesimpulan analisis sebelumnya. Organisasi yang memperlakukan RCM sebagai program hidup yang terus berkembang akan memperoleh manfaat jangka panjang yang jauh lebih besar dibandingkan organisasi yang hanya melaksanakan analisis RCM sekali kemudian mengabaikannya tanpa peninjauan ulang lebih lanjut.

Penentuan interval untuk tindakan berbasis kondisi maupun berbasis waktu dalam kerangka RCM perlu mempertimbangkan konsep *P-F interval*, yaitu selang waktu antara titik ketika suatu kegagalan mulai dapat dideteksi (*potential failure*, P) hingga titik ketika kegagalan fungsional benar-benar terjadi (*functional failure*, F). Interval pemantauan atau inspeksi yang ditetapkan idealnya secara signifikan lebih pendek dibandingkan P-F interval yang teridentifikasi untuk suatu mode kegagalan tertentu, guna memastikan tersedia cukup waktu bagi tim perawatan untuk merencanakan dan melaksanakan tindakan perbaikan sebelum kegagalan fungsional benar-benar terjadi pada peralatan yang bersangkutan.

Pertimbangan biaya siklus hidup (*life cycle cost*) menjadi dimensi penting tambahan dalam penentuan strategi RCM, khususnya ketika membandingkan opsi antara mempertahankan strategi perawatan yang lebih intensif pada peralatan lama dengan mempertimbangkan penggantian peralatan secara menyeluruh. Analisis RCM yang komprehensif idealnya tidak hanya menghasilkan rekomendasi strategi

perawatan untuk peralatan yang ada saat ini, tetapi juga dapat memberikan masukan berharga bagi keputusan investasi jangka panjang mengenai kelayakan mempertahankan, memodifikasi, atau mengganti peralatan tersebut secara keseluruhan berdasarkan proyeksi biaya perawatan di masa mendatang.

Keterkaitan antara hasil RCM dengan perencanaan suku cadang dan sumber daya manusia, sebagaimana telah dibahas pada bab mengenai manajemen perawatan mesin, menjadi aspek implementasi yang penting untuk dipastikan konsistensinya. Strategi perawatan yang dihasilkan dari analisis RCM perlu diterjemahkan menjadi kebutuhan suku cadang spesifik dan kompetensi personel yang diperlukan untuk melaksanakan setiap tindakan yang direkomendasikan, sehingga rekomendasi RCM yang telah disusun dengan cermat tidak berakhir menjadi dokumen yang tidak dapat dilaksanakan secara praktis akibat ketidaksesuaian dengan kapasitas sumber daya aktual yang dimiliki organisasi.

Sensitivitas hasil analisis RCM terhadap perubahan asumsi input, seperti perkiraan probabilitas kegagalan atau estimasi biaya konsekuensi, perlu diuji melalui analisis sensitivitas sederhana sebelum strategi final ditetapkan, terutama untuk keputusan dengan implikasi biaya atau risiko yang signifikan. Analisis sensitivitas semacam ini membantu tim RCM mengidentifikasi asumsi mana yang paling kritis terhadap kesimpulan akhir, sehingga upaya validasi data dapat difokuskan pada asumsi-asumsi tersebut, alih-alih menghabiskan waktu yang setara untuk memvalidasi seluruh asumsi tanpa mempertimbangkan tingkat pengaruhnya terhadap hasil akhir analisis.

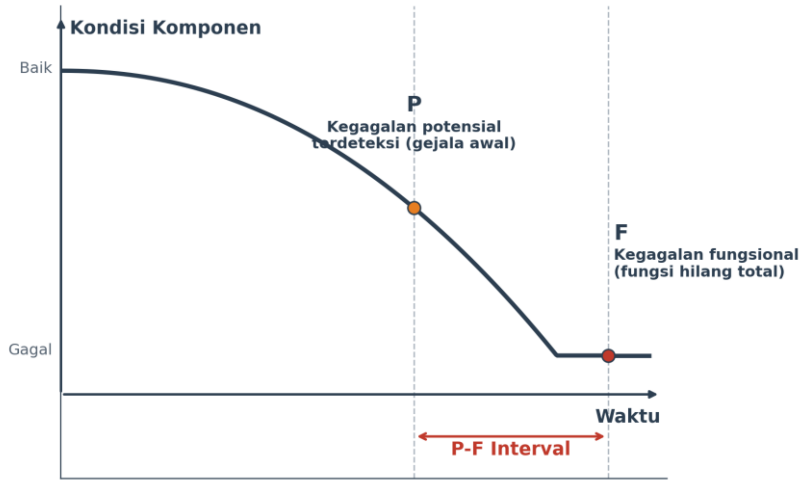
Penentuan strategi RCM juga perlu mengakomodasi kemungkinan penerapan kombinasi beberapa jenis tindakan sekaligus untuk satu mode kegagalan yang sama, misalnya menggabungkan inspeksi berbasis kondisi dengan penggantian berbasis waktu sebagai cadangan apabila kondisi tidak terpantau tepat waktu akibat kendala operasional tertentu. Pendekatan kombinasi semacam ini memberikan lapisan perlindungan tambahan (*defense in depth*) khususnya untuk mode kegagalan dengan konsekuensi yang sangat serius, di mana keandalan pada satu jenis tindakan pencegahan saja dianggap belum

cukup memadai untuk mengelola risiko pada tingkat yang dapat diterima oleh organisasi.

Peninjauan strategi RCM oleh pihak kedua yang tidak terlibat langsung dalam analisis awal (*independent review*) menjadi praktik penjaminan mutu yang bernilai, khususnya untuk sistem dengan konsekuensi kegagalan yang sangat kritis. Peninjau independen dapat mengidentifikasi bias atau kelalaian yang mungkin terlewat oleh tim analisis asli, yang mungkin telah terlalu dekat dengan detail teknis sistem sehingga kehilangan perspektif menyeluruh, sehingga proses peninjauan independen ini menjadi lapisan validasi tambahan sebelum strategi RCM final diadopsi sebagai kebijakan resmi perawatan organisasi.

Komunikasi hasil penentuan strategi RCM kepada seluruh personel yang akan melaksanakan tindakan perawatan menjadi tahap akhir yang tidak kalah penting dari proses analisis itu sendiri, mengingat strategi yang telah disusun dengan cermat tidak akan memberikan manfaat apabila tidak dipahami dan dilaksanakan dengan benar oleh teknisi di lapangan. Sesi sosialisasi yang menjelaskan tidak hanya apa yang perlu dilakukan, tetapi juga mengapa strategi tersebut dipilih berdasarkan analisis konsekuensi kegagalan, membantu membangun pemahaman dan komitmen personel pelaksana terhadap pentingnya kepatuhan pada rekomendasi RCM yang telah ditetapkan.

Gambar 8.1 Konsep P-F Interval dalam Penentuan Strategi RCM



P-F interval menggambarkan selang waktu antara terdeteksinya gejala awal kegagalan (P) hingga kegagalan fungsional benar-benar terjadi (F). Interval inspeksi atau pemantauan kondisi perlu ditetapkan secara signifikan lebih pendek dari P-F interval untuk menjamin tersedianya waktu yang cukup bagi tindakan perbaikan.

8.4 Implementasi RCM pada Sistem Industri

Implementasi RCM pada suatu organisasi menuntut komitmen manajemen puncak yang kuat, mengingat proses analisis yang komprehensif memerlukan alokasi waktu dan sumber daya manusia yang signifikan dari berbagai fungsi dalam organisasi, termasuk teknisi perawatan, operator produksi, insinyur desain, dan spesialis keselamatan kerja. Tanpa dukungan manajemen yang memadai, program RCM berisiko terhenti di tengah jalan atau dilaksanakan secara terburu-buru tanpa kedalaman analisis yang memadai, sehingga hasil yang diperoleh tidak benar-benar mencerminkan potensi manfaat penuh dari metodologi RCM yang sesungguhnya.

Studi percontohan (*pilot project*) pada satu sistem yang representatif namun tidak terlalu kompleks menjadi pendekatan yang bijaksana bagi organisasi yang baru pertama kali menerapkan RCM, mengingat pengalaman dari proyek percontohan tersebut memberikan pembelajaran berharga mengenai tantangan praktis penerapan metodologi ini dalam konteks spesifik organisasi, sebelum diperluas ke sistem-sistem lain yang lebih kompleks. Keberhasilan proyek percontohan, yang idealnya didokumentasikan dan dikomunikasikan secara luas dalam organisasi, juga berfungsi sebagai bukti konkret yang dapat meyakinkan pemangku kepentingan yang masih ragu mengenai manfaat nyata dari investasi waktu dan sumber daya pada metodologi RCM.

Penyusunan rencana implementasi RCM idealnya mencakup penetapan tonggak pencapaian (*milestone*) yang jelas dan realistis, mengingat proses analisis RCM yang mendalam pada satu sistem kompleks dapat memakan waktu beberapa minggu hingga beberapa bulan tergantung pada tingkat kompleksitas sistem yang dianalisis. Perencanaan waktu yang realistis, disertai komunikasi ekspektasi yang

jelas kepada seluruh pemangku kepentingan mengenai durasi dan sumber daya yang dibutuhkan, membantu mencegah kekecewaan atau tekanan yang tidak perlu terhadap tim RCM untuk menyelesaikan analisis secara terburu-buru dengan mengorbankan kedalaman dan kualitas hasil analisis yang dihasilkan.

Pembentukan tim RCM yang tepat menjadi faktor kunci keberhasilan implementasi, dengan komposisi tim idealnya mencakup fasilitator yang memahami metodologi RCM secara mendalam, teknisi dan operator yang memiliki pengalaman praktis langsung dengan peralatan yang dianalisis, serta insinyur yang memahami aspek desain teknis sistem. Keterlibatan operator dan teknisi lapangan dalam tim RCM sangat penting, mengingat mereka sering kali memiliki pengetahuan tacit mengenai karakteristik kegagalan aktual peralatan yang tidak selalu terdokumentasi secara formal, namun sangat berharga untuk memvalidasi dan memperkaya hasil analisis RCM yang dilaksanakan.

Studi kasus penerapan RCM pada berbagai sistem industri di Indonesia menunjukkan variasi pendekatan implementasi yang disesuaikan dengan konteks spesifik masing-masing perusahaan, mulai dari penerapan pada mesin punch hidrolik untuk komponen tower jaringan, mesin kapal, hingga sistem perawatan pada industri pengolahan kelapa sawit dan tekstil. Keberagaman studi kasus ini menegaskan bahwa RCM merupakan metodologi yang cukup fleksibel untuk diterapkan pada berbagai jenis industri dan skala perusahaan, meskipun kedalaman dan formalitas penerapannya perlu disesuaikan dengan kapasitas sumber daya dan tingkat kekritisan sistem yang dimiliki oleh masing-masing organisasi.

Tantangan umum yang dihadapi dalam implementasi RCM mencakup keterbatasan data historis kegagalan yang memadai untuk mendukung analisis kuantitatif, resistensi terhadap perubahan dari personel yang telah terbiasa dengan pendekatan perawatan konvensional, serta persepsi bahwa RCM merupakan metodologi yang terlalu rumit dan memakan waktu untuk diterapkan secara penuh pada seluruh peralatan dalam suatu fasilitas produksi. Mengatasi tantangan-tantangan ini memerlukan strategi implementasi bertahap, dimulai dari

sistem yang paling kritis dan bernilai tinggi, disertai dengan program sosialisasi dan pelatihan yang memadai untuk membangun pemahaman dan dukungan dari seluruh pemangku kepentingan yang terlibat.

Integrasi RCM dengan sistem informasi manajemen perawatan (CMMS) yang telah dibahas pada bab sebelumnya menjadi praktik yang semakin umum diterapkan, memungkinkan hasil analisis RCM diterjemahkan langsung menjadi jadwal *preventive maintenance* yang terkelola secara sistematis dalam sistem informasi tersebut. Integrasi ini memastikan bahwa rekomendasi strategi perawatan yang dihasilkan dari analisis RCM yang mendalam benar-benar diterjemahkan menjadi tindakan operasional yang konsisten dilaksanakan, alih-alih hanya menjadi dokumen analisis yang tersimpan tanpa implementasi nyata di lapangan.

Pengukuran manfaat implementasi RCM perlu dilakukan melalui indikator kuantitatif yang jelas, seperti perubahan tingkat keandalan sistem, penurunan biaya perawatan total, penurunan frekuensi kegagalan tak terduga, serta peningkatan indikator keselamatan kerja pada sistem yang telah dianalisis menggunakan metodologi RCM. Studi mengenai penerapan RCM pada perspektif manajemen operasional menunjukkan bahwa organisasi yang berhasil mengatasi tantangan implementasi RCM secara umum memperoleh peningkatan signifikan pada ketersediaan sistem dan efektivitas keseluruhan peralatan, meskipun manfaat tersebut umumnya baru terlihat secara signifikan setelah program RCM dijalankan secara konsisten dalam jangka waktu menengah hingga panjang, bukan manfaat instan yang dapat diperoleh segera setelah analisis awal diselesaikan.

Keberlanjutan program RCM dalam jangka panjang sangat bergantung pada institusionalisasi metodologi ini ke dalam budaya dan proses kerja organisasi secara permanen, bukan sekadar proyek satu kali yang dilaksanakan oleh konsultan eksternal tanpa transfer pengetahuan yang memadai kepada personel internal. Organisasi yang berhasil menginstitusionalisasikan RCM umumnya membentuk fungsi keandalan (*reliability function*) permanen dalam struktur organisasinya, dengan tanggung jawab eksplisit untuk memelihara dan memperbarui

analisis RCM secara berkelanjutan, alih-alih menganggap RCM sebagai proyek yang selesai begitu analisis awal telah diselesaikan.

Pelatihan dan sertifikasi kompetensi RCM bagi personel internal menjadi investasi penting untuk membangun kemandirian organisasi dalam melaksanakan dan memelihara program RCM tanpa harus terus bergantung pada konsultan eksternal. Berbagai lembaga pelatihan internasional maupun nasional menawarkan program sertifikasi RCM yang mencakup pemahaman metodologi, praktik fasilitasi analisis, hingga penerapan pada studi kasus nyata, sehingga organisasi dapat secara bertahap membangun kapabilitas internal untuk memperluas cakupan penerapan RCM ke sistem-sistem lain tanpa selalu bergantung pada bantuan pihak eksternal untuk setiap analisis baru yang perlu dilaksanakan.

Perbandingan biaya dan manfaat penerapan RCM secara menyeluruh perlu mempertimbangkan bahwa manfaat terbesar dari metodologi ini sering kali bukan berasal dari pengurangan biaya perawatan secara langsung, melainkan dari peningkatan keandalan dan ketersediaan sistem yang berdampak pada peningkatan kapasitas produksi dan pengurangan kerugian akibat downtime tak terduga. Perspektif ini penting untuk dikomunikasikan kepada manajemen puncak sejak awal, agar ekspektasi terhadap hasil penerapan RCM tidak semata-mata diukur dari penurunan anggaran perawatan tahunan, melainkan dari peningkatan nilai bisnis secara keseluruhan yang dihasilkan melalui operasi yang lebih andal dan produktif.

Adaptasi metodologi RCM terhadap konteks industri kecil dan menengah di Indonesia memerlukan penyederhanaan proses tanpa mengorbankan prinsip fundamentalnya, mengingat keterbatasan sumber daya dan data historis yang sering dihadapi oleh perusahaan skala tersebut. Pendekatan RCM yang disederhanakan (*simplified RCM*), yang memfokuskan analisis mendalam hanya pada peralatan paling kritis sembari menerapkan pendekatan yang lebih ringkas pada peralatan lainnya, menjadi jalan tengah yang realistis bagi organisasi dengan keterbatasan sumber daya, tanpa sepenuhnya mengabaikan manfaat sistematis yang ditawarkan oleh kerangka kerja RCM secara keseluruhan.

Masa depan penerapan RCM diperkirakan akan semakin terintegrasi dengan teknologi *digital twin* dan analitik prediktif berbasis kecerdasan buatan, memungkinkan pembaruan otomatis terhadap probabilitas kegagalan dan rekomendasi strategi perawatan berdasarkan data operasional aktual secara real-time, alih-alih hanya bergantung pada analisis periodik yang dilakukan secara manual. Perkembangan ini berpotensi mengubah RCM dari proses analisis statis yang dilaksanakan sesekali menjadi sistem pendukung keputusan yang dinamis dan terus diperbarui, meskipun peran penilaian manusia dalam memvalidasi rekomendasi kritis diperkirakan akan tetap relevan dalam jangka waktu yang dapat diperkirakan ke depan.

Keterkaitan RCM dengan indikator kinerja perusahaan secara keseluruhan, termasuk indikator keberlanjutan dan tanggung jawab sosial perusahaan, semakin mendapat perhatian pada praktik industri terkini, mengingat kegagalan peralatan yang tidak terkendali dapat berdampak pada peningkatan konsumsi energi, timbulnya limbah akibat penggantian komponen prematur, maupun risiko insiden lingkungan. Perluasan cakupan pertimbangan RCM untuk turut memasukkan dimensi keberlanjutan ini mencerminkan evolusi metodologi yang semakin holistik, sejalan dengan meningkatnya tuntutan pemangku kepentingan terhadap praktik operasi industri yang bertanggung jawab secara lingkungan dan sosial, tidak hanya berorientasi pada efisiensi ekonomis semata.

Sebagai penutup pembahasan bab ini sekaligus rangkaian pembahasan strategi perawatan *preventive*, *predictive*, dan corrective yang telah diuraikan sepanjang buku ini, RCM menawarkan kerangka kerja integratif yang memungkinkan organisasi menentukan kombinasi optimal dari ketiga strategi tersebut secara sistematis dan berbasis bukti, alih-alih menerapkan salah satu strategi secara seragam pada seluruh peralatan tanpa diferensiasi. Pemahaman mendalam terhadap metodologi RCM, sebagaimana telah diuraikan dalam bab ini, menjadi bekal penting bagi perekayasa perawatan dalam merancang program perawatan yang benar-benar optimal, seimbang antara keandalan, keselamatan, dan efisiensi biaya bagi keberlangsungan operasi industri secara menyeluruh.

Tabel 8.3 Daftar Periksa Tahapan Implementasi RCM pada Organisasi

Tahapan	Aktivitas Kunci	Indikator Keberhasilan
Persiapan	Komitmen manajemen, pembentukan tim, pemilihan sistem prioritas	Piagam proyek disetujui manajemen puncak
Analisis	Analisis fungsi, kegagalan, dan konsekuensi	Lembar kerja RCM terisi lengkap dan tervalidasi
Penentuan Strategi	Pemilihan tindakan proaktif per mode kegagalan	Program perawatan terdokumentasi dengan justifikasi
Implementasi	Integrasi ke CMMS, pelatihan personel pelaksana	Jadwal PM baru berjalan sesuai rekomendasi RCM
Pemeliharaan Program	Peninjauan ulang berkala, pembaruan data	Living program berjalan dengan siklus review rutin

Rangkuman Bab 8

Bab ini telah menguraikan *reliability* centered maintenance (RCM) sebagai kerangka kerja sistematis untuk menentukan strategi perawatan optimal berdasarkan analisis fungsi, kegagalan fungsional, mode kegagalan, dan konsekuensi kegagalan suatu sistem. Tujuh pertanyaan fundamental RCM memandu proses analisis secara terstruktur, mulai dari definisi fungsi hingga penentuan tindakan default apabila tidak ditemukan strategi proaktif yang layak.

Analisis fungsi dan kegagalan sistem menuntut pendefinisian standar kinerja yang kuantitatif dan spesifik, identifikasi kegagalan fungsional dan mode kegagalan secara komprehensif, serta penilaian konsekuensi kegagalan yang dikategorikan ke dalam kegagalan tersembunyi, keselamatan/lingkungan, operasional, dan non-operasional. Penentuan strategi perawatan mengikuti kerangka

pengambilan keputusan logis yang mempertimbangkan tindakan berbasis kondisi, berbasis waktu, pencarian kegagalan, hingga run to failure atau redesign sebagai pilihan terakhir.

Implementasi RCM pada sistem industri menuntut komitmen manajemen, pembentukan tim lintas fungsi yang tepat, serta strategi implementasi bertahap yang dimulai dari sistem paling kritis. Integrasi RCM dengan CMMS dan pengukuran manfaat melalui indikator kuantitatif yang jelas menjadi kunci keberhasilan jangka panjang, menjadikan RCM sebagai kerangka integratif yang menyatukan strategi *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance* secara optimal dan berbasis bukti.

Dengan berakhirnya pembahasan RCM pada bab ini, buku ini telah menguraikan secara komprehensif delapan bab pertama dari rangkaian pembahasan rekayasa perawatan mesin, mulai dari konsep dasar, keandalan dan kegagalan, manajemen perawatan, ketiga strategi utama *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance*, analisis dan diagnostik kondisi mesin, hingga kerangka kerja integratif RCM. Pemahaman menyeluruh terhadap kedelapan bab ini memberikan fondasi yang kokoh bagi pembaca untuk melangkah pada pembahasan lanjutan mengenai *total productive maintenance* (TPM) serta keselamatan dan standar dalam perawatan mesin, yang akan melengkapi gambaran utuh mengenai rekayasa perawatan mesin modern pada edisi penerbitan berikutnya.

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 8

1. Jelaskan tujuh pertanyaan fundamental dalam metodologi RCM, serta uraikan bagaimana ketujuh pertanyaan tersebut membentuk alur analisis yang sistematis.
2. Diskusikan perbedaan antara fungsi utama (*primary function*) dan fungsi sekunder (*secondary function*), serta berikan contoh pada suatu peralatan industri sederhana.
3. Uraikan empat kategori konsekuensi kegagalan dalam RCM, serta jelaskan mengapa kegagalan tersembunyi memerlukan perhatian dan strategi perawatan yang berbeda dari kategori lainnya.

4. Jelaskan kerangka pengambilan keputusan logis dalam menentukan strategi perawatan RCM, mulai dari tindakan berbasis kondisi hingga pilihan *run to failure* atau *redesign*.

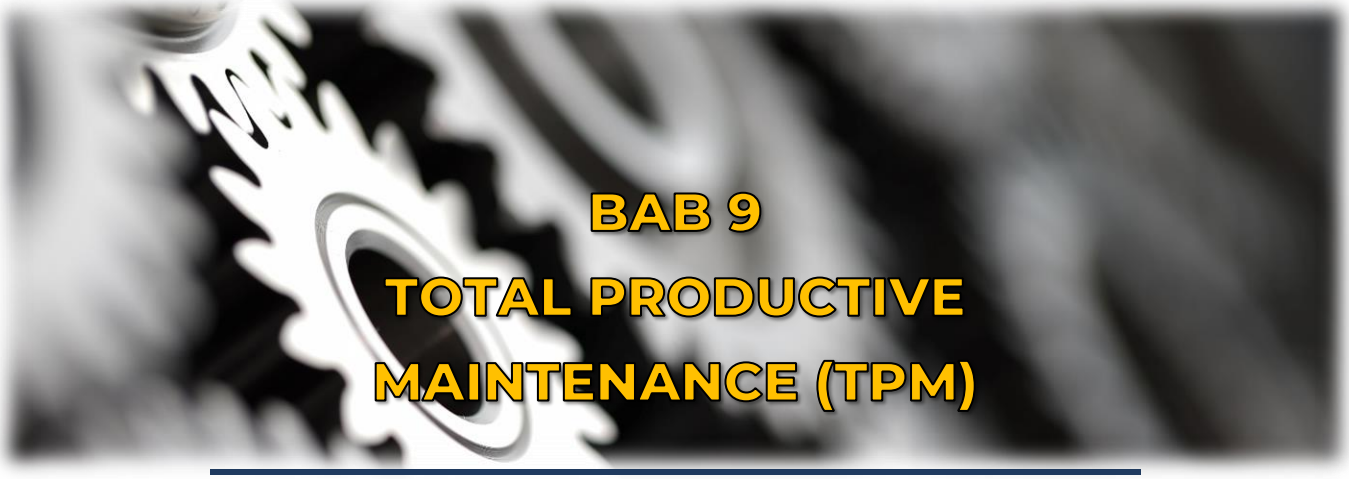
5. Diskusikan mengapa keterlibatan operator dan teknisi lapangan penting dalam tim RCM, meskipun mereka mungkin tidak memiliki latar belakang formal dalam metodologi analisis keandalan.

6. Analisislah tantangan utama yang mungkin dihadapi organisasi dalam mengimplementasikan RCM, serta strategi yang dapat ditempuh untuk mengatasi tantangan tersebut secara bertahap.

7. Jelaskan mengapa RCM perlu diperlakukan sebagai program hidup (*living program*) yang terus ditinjau ulang, alih-alih sebagai analisis yang dilakukan sekali dan berlaku permanen selamanya.

8. Jelaskan konsep P-F interval dan uraikan bagaimana konsep tersebut digunakan untuk menentukan interval inspeksi yang tepat bagi suatu tindakan pencegahan berbasis kondisi.

9. Diskusikan bagaimana RCM dan *total productive maintenance* (TPM) dapat saling melengkapi dalam kerangka manajemen perawatan yang menyeluruh, meskipun keduanya memiliki penekanan yang berbeda.



BAB 9
TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (TPM)

9.1 Konsep dan Pilar TPM

Total productive maintenance (TPM) merupakan pendekatan manajemen perawatan yang berupaya melibatkan seluruh elemen organisasi, mulai dari operator lini produksi hingga manajemen puncak, dalam upaya memaksimalkan efektivitas peralatan produksi secara menyeluruh. Berbeda dari pendekatan perawatan konvensional yang memisahkan tanggung jawab perawatan sepenuhnya pada departemen teknik, TPM menegaskan bahwa keandalan mesin merupakan tanggung jawab bersama seluruh karyawan yang berinteraksi dengan peralatan tersebut, sehingga menciptakan budaya kerja yang secara kolektif berorientasi pada pencegahan kegagalan dan peningkatan produktivitas secara berkelanjutan.

Konsep TPM pertama kali dikembangkan di Jepang oleh Seiichi Nakajima pada akhir dekade 1960-an dan mulai dipopulerkan secara luas melalui *Japan Institute of Plant Maintenance* sejak dekade 1970-an, sebagai pengembangan lebih lanjut dari konsep *preventive maintenance* yang diadopsi dari Amerika Serikat namun disesuaikan dengan filosofi manajemen kualitas total yang berkembang pesat di industri manufaktur Jepang pada masa tersebut. Perkembangan TPM sejak saat itu telah meluas ke berbagai sektor industri di seluruh dunia, dengan kajian terkini menunjukkan bahwa implementasi TPM tetap relevan sebagai kerangka kerja peningkatan produktivitas yang komprehensif pada industri manufaktur modern (Wolska dkk., 2023).

TPM secara tradisional dibangun di atas delapan pilar utama yang saling mendukung satu sama lain, yaitu *autonomous maintenance* (perawatan mandiri oleh operator), *planned maintenance* (perawatan terencana oleh tim teknik), *quality maintenance* (perawatan yang

berorientasi pada pencegahan cacat kualitas), *focused improvement* atau *kaizen* (perbaikan berkelanjutan pada masalah spesifik), *early equipment management* (manajemen peralatan sejak tahap desain), *training and education* (pelatihan dan pendidikan), *safety, health, and environment* (keselamatan, kesehatan, dan lingkungan), serta *TPM in administration* (penerapan prinsip TPM pada fungsi administratif pendukung produksi).

Kedelapan pilar tersebut tidak berdiri secara terpisah, melainkan membentuk suatu sistem yang terintegrasi, di mana keberhasilan pada satu pilar sering kali menjadi prasyarat bagi keberhasilan pilar lainnya. Sebagai contoh, keberhasilan pilar *autonomous maintenance* dalam membangun kepekaan operator terhadap kondisi normal mesin menjadi fondasi penting bagi keberhasilan pilar *quality maintenance*, mengingat operator yang memahami kondisi normal mesinnya akan lebih mudah mendeteksi penyimpangan yang berpotensi menyebabkan cacat produk sebelum cacat tersebut benar-benar terjadi dan memengaruhi kualitas keluaran produksi secara signifikan.

Filosofi dasar TPM berupaya menghilangkan apa yang disebut sebagai enam kerugian besar (*six big losses*) yang menghambat efektivitas peralatan, yaitu kerugian akibat kegagalan peralatan (*breakdown*), kerugian akibat penyetelan dan penyesuaian (*setup and adjustment*), kerugian akibat berhenti sesaat (*minor stoppage*), kerugian akibat penurunan kecepatan (*reduced speed*), kerugian akibat cacat proses (*process defect*), serta kerugian akibat penurunan hasil produksi pada tahap awal (*reduced yield*). Keenam kategori kerugian ini menjadi kerangka analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi area perbaikan prioritas dalam implementasi TPM pada suatu fasilitas produksi.

Penerapan TPM menuntut transformasi budaya organisasi yang bersifat mendasar, bergerak dari pola pikir "saya mengoperasikan, kamu memperbaiki" yang memisahkan tegas peran produksi dan perawatan, menuju pola pikir "kami bersama-sama menjaga peralatan ini" yang menempatkan tanggung jawab keandalan sebagai kepentingan bersama seluruh pihak yang terlibat. Transformasi budaya semacam ini umumnya tidak dapat dicapai secara instan, melainkan memerlukan

proses bertahap yang melibatkan pelatihan, perubahan sistem penghargaan, serta komitmen kepemimpinan yang konsisten selama periode implementasi yang dapat berlangsung selama beberapa tahun.

TPM memiliki keterkaitan konseptual yang erat dengan *reliability centered maintenance* yang telah dibahas pada bab sebelumnya, meskipun keduanya menekankan aspek yang berbeda dalam upaya mencapai keandalan optimal. RCM lebih menitikberatkan pada analisis teknis mendalam untuk menentukan strategi perawatan yang tepat berdasarkan konsekuensi kegagalan, sementara TPM lebih menitikberatkan pada aspek keterlibatan manusia dan budaya organisasi dalam menjalankan strategi perawatan tersebut secara konsisten sehari-hari, sehingga kedua pendekatan ini idealnya diterapkan secara komplementer, bukan dipilih salah satu secara eksklusif oleh suatu organisasi.

Penerapan TPM pada konteks industri Indonesia menghadapi tantangan dan peluang yang khas, mengingat budaya kerja kolektivistik yang umum ditemukan pada masyarakat Indonesia sesungguhnya cukup selaras dengan filosofi TPM yang menekankan kerja sama dan tanggung jawab bersama. Namun demikian, tantangan implementasi tetap ada, terutama terkait dengan kesenjangan tingkat pendidikan dan pelatihan teknis operator di berbagai skala industri, serta kebutuhan investasi waktu yang signifikan pada tahap awal implementasi yang terkadang sulit dijustifikasi secara jangka pendek oleh manajemen yang berorientasi pada hasil kuartalan semata.

Tahapan implementasi TPM secara keseluruhan umumnya mengikuti kerangka waktu yang cukup panjang, terbagi menjadi fase persiapan yang mencakup sosialisasi konsep dan komitmen manajemen, fase pengenalan yang melibatkan pelatihan awal dan pembentukan tim TPM, fase implementasi yang secara bertahap menerapkan pilar-pilar TPM mulai dari *autonomous maintenance*, hingga fase konsolidasi di mana TPM telah menjadi bagian integral dari budaya kerja sehari-hari organisasi. Kajian mengenai implementasi dan penyempurnaan konsep TPM pada berbagai organisasi menegaskan bahwa keseluruhan proses ini umumnya membutuhkan waktu antara tiga hingga lima tahun untuk benar-benar terinternalisasi secara

mendalam, jauh lebih panjang dibandingkan ekspektasi awal banyak organisasi yang berharap memperoleh hasil instan dalam hitungan bulan (Wolska dkk., 2023).

Peran kepemimpinan dalam keberhasilan implementasi TPM tidak dapat dilebih-lebihkan, mengingat perubahan budaya organisasi yang mendasar hanya dapat terwujud apabila manajemen puncak secara konsisten menunjukkan komitmen nyata, bukan sekadar dukungan verbal semata. Komitmen nyata tersebut dapat tercermin melalui alokasi sumber daya yang memadai untuk pelatihan, kesediaan manajemen untuk turun langsung ke lini produksi dan berpartisipasi dalam aktivitas TPM, serta konsistensi dalam mempertahankan prioritas TPM meskipun dihadapkan pada tekanan bisnis jangka pendek yang mungkin menggoda organisasi untuk mengabaikan investasi jangka panjang pada program ini.

Pembentukan struktur organisasi pendukung TPM, seperti komite pengarah TPM (*TPM steering committee*) di tingkat manajemen dan tim pilar (*pillar team*) untuk masing-masing dari kedelapan pilar TPM, membantu memastikan implementasi berjalan secara terkoordinasi dan tidak tumpang tindih antar-inisiatif. Komite pengarah bertanggung jawab menetapkan arah strategis dan mengalokasikan sumber daya, sementara tim pilar bertanggung jawab melaksanakan aktivitas operasional spesifik pada pilar masing-masing, dengan koordinasi rutin antar-tim pilar untuk memastikan sinergi dan menghindari duplikasi upaya dalam pelaksanaan program TPM secara keseluruhan.

Pemilihan lini produksi percontohan (*model line*) untuk implementasi awal TPM menjadi strategi yang umum diterapkan, mengingat penerapan menyeluruh pada seluruh fasilitas produksi sekaligus berisiko kewalahan mengelola kompleksitas perubahan yang terjadi secara bersamaan. Lini percontohan yang dipilih idealnya representatif terhadap karakteristik fasilitas produksi secara keseluruhan, namun tidak terlalu kompleks sehingga pembelajaran dari implementasi awal dapat diperoleh dengan relatif cepat, sebelum keberhasilan tersebut direplikasi secara bertahap ke lini produksi lain

dalam fasilitas yang sama maupun ke fasilitas produksi lain dalam organisasi yang lebih luas.

Penilaian tingkat kematangan TPM (*TPM maturity level*) yang dilaksanakan secara berkala membantu organisasi memahami posisi mereka dalam perjalanan implementasi TPM, mulai dari tahap awal yang masih didominasi aktivitas pembersihan dan inspeksi dasar, hingga tahap lanjut di mana operator telah mencapai kemandirian penuh dan budaya perbaikan berkelanjutan telah mengakar kuat dalam seluruh lapisan organisasi. Penghargaan formal seperti TPM Excellence Award yang diberikan oleh lembaga sertifikasi independen turut menjadi tonggak pencapaian yang dapat memotivasi organisasi untuk terus menyempurnakan implementasi TPM mereka menuju standar kelas dunia yang diakui secara internasional.

Perbedaan mendasar antara implementasi TPM pada industri proses kontinu, seperti industri kimia dan semen, dengan industri manufaktur diskrit, seperti perakitan otomotif dan elektronik, perlu dipahami secara cermat mengingat karakteristik peralatan dan pola operasi yang berbeda menuntut penyesuaian pendekatan implementasi. Pada industri proses kontinu, penekanan *autonomous maintenance* cenderung lebih berfokus pada pemantauan parameter proses dan deteksi dini anomali, sementara pada industri manufaktur diskrit, penekanan lebih besar pada penyetelan cepat dan pengurangan waktu ganti produk, mencerminkan perbedaan sumber kerugian dominan pada masing-masing tipe industri tersebut.

Keterkaitan TPM dengan sistem manajemen mutu yang lebih luas, seperti ISO 9001, semakin banyak diakui oleh organisasi yang menyadari bahwa keandalan peralatan produksi merupakan salah satu prasyarat fundamental bagi konsistensi mutu produk yang dihasilkan. Integrasi TPM ke dalam kerangka sistem manajemen mutu organisasi, alih-alih memperlakukan keduanya sebagai inisiatif terpisah, memungkinkan sinergi sumber daya dan menghindari duplikasi upaya audit dan dokumentasi yang sering kali terjadi ketika kedua sistem dikelola secara independen tanpa koordinasi yang memadai antar-fungsi terkait.

Tabel 9.1 Delapan Pilar *Total Productive Maintenance*

Pilar	Fokus Utama	Pihak yang Bertanggung Jawab
Autonomous maintenance	Inspeksi, pembersihan, pelumasan dasar oleh operator	Operator lini produksi
Planned maintenance	Perawatan terencana berbasis data kegagalan	Tim teknik/perawatan
Quality Maintenance	Pencegahan cacat melalui kondisi mesin optimal	Tim produksi dan mutu
Focused Improvement	Perbaikan berkelanjutan pada kerugian spesifik	Tim lintas fungsi (kaizen team)
Early Equipment Management	Desain peralatan yang mudah dirawat sejak awal	Tim rekayasa/*engineering*
Training and Education	Pengembangan kompetensi seluruh personel	SDM dan supervisor lini
Safety, Health, Environment	*Zero accident* dan kepatuhan lingkungan	Tim K3 dan seluruh karyawan
TPM in Administration	Efisiensi proses pendukung non-produksi	Fungsi administratif/support

9.2 Autonomous Maintenance

Autonomous maintenance atau perawatan mandiri merupakan pilar TPM yang paling banyak mendapat perhatian dalam implementasi praktis, mengingat pilar ini secara langsung mengubah peran operator dari sekadar pengguna mesin menjadi mitra aktif dalam menjaga kondisi mesin tersebut. Melalui *autonomous maintenance*, operator dilatih untuk melaksanakan tugas perawatan dasar seperti pembersihan,

pelumasan, pengencangan baut yang kendur, serta inspeksi visual sederhana, yang sebelumnya sepenuhnya menjadi tanggung jawab teknisi perawatan, sehingga membebaskan kapasitas tim perawatan untuk fokus pada pekerjaan yang lebih kompleks dan bernilai tambah tinggi.

Implementasi *autonomous maintenance* umumnya dilaksanakan melalui tujuh langkah bertahap, dimulai dari pembersihan awal (*initial cleaning*) yang sekaligus berfungsi sebagai inspeksi untuk mengidentifikasi sumber kontaminasi dan area yang sulit dijangkau, dilanjutkan dengan penanganan sumber kontaminasi dan area sulit dijangkau tersebut, penyusunan standar sementara pembersihan dan pelumasan, pelatihan inspeksi umum bagi operator, pelaksanaan inspeksi mandiri secara rutin, standardisasi prosedur kerja secara menyeluruh, hingga tahap akhir berupa manajemen mandiri penuh di mana operator telah sepenuhnya kompeten mengelola perawatan dasar peralatannya secara independen.

Tahap pembersihan awal dalam *autonomous maintenance* memiliki nilai strategis yang sering kali kurang disadari, mengingat proses pembersihan yang menyeluruh pada peralatan yang mungkin telah lama tidak dibersihkan secara mendalam sering kali mengungkap berbagai anomali tersembunyi, seperti kebocoran kecil, baut yang kendur, atau tanda-tanda awal keausan, yang sebelumnya tidak teramati akibat tertutup oleh debu dan kotoran yang menumpuk. Penemuan dan penanganan anomali tersembunyi semacam ini pada tahap awal implementasi *autonomous maintenance* sering kali menghasilkan peningkatan keandalan yang signifikan, bahkan sebelum program mencapai tahap-tahap lanjutan.

Penyusunan daftar periksa (*checklist*) inspeksi mandiri yang jelas dan visual menjadi elemen pendukung penting bagi keberhasilan *autonomous maintenance*, mengingat operator umumnya bukan tenaga teknis terlatih penuh sehingga memerlukan panduan yang mudah dipahami dan diikuti tanpa memerlukan interpretasi teknis yang kompleks. Penggunaan label visual, kode warna, dan standar inspeksi bergambar (*visual standard*) yang menunjukkan kondisi normal versus kondisi abnormal secara langsung, alih-alih hanya instruksi tertulis,

terbukti secara signifikan meningkatkan konsistensi pelaksanaan inspeksi mandiri oleh operator dengan latar belakang teknis yang beragam.

Batas kewenangan yang jelas antara tugas yang boleh dilaksanakan operator secara mandiri dengan tugas yang tetap memerlukan keterlibatan teknisi perawatan profesional perlu ditetapkan secara eksplisit sejak awal implementasi, guna mencegah operator melampaui kompetensi mereka dan berpotensi menimbulkan risiko keselamatan maupun kerusakan tambahan pada peralatan. Batasan ini umumnya mempertimbangkan tingkat risiko keselamatan, kompleksitas teknis pekerjaan, serta persyaratan sertifikasi atau kualifikasi khusus yang mungkin dipersyaratkan untuk jenis pekerjaan tertentu, seperti pekerjaan yang melibatkan sistem kelistrikan bertegangan tinggi.

Keberhasilan jangka panjang *autonomous maintenance* sangat bergantung pada dukungan berkelanjutan dari supervisor lini produksi dan tim perawatan profesional, yang perlu secara konsisten memvalidasi kualitas pelaksanaan inspeksi mandiri operator dan memberikan umpan balik korektif apabila diperlukan. Program yang dibiarkan berjalan tanpa pengawasan dan penguatan berkelanjutan berisiko mengalami kemunduran seiring waktu, di mana operator secara bertahap kembali pada kebiasaan lama tanpa disiplin inspeksi mandiri yang konsisten, sehingga manfaat awal yang telah dicapai perlahan-lahan memudar tanpa mekanisme penguatan yang berkelanjutan.

Autonomous maintenance juga memberikan manfaat tidak langsung berupa peningkatan komunikasi antara operator dan teknisi perawatan, mengingat operator yang telah dilatih untuk memahami kondisi dasar mesinnya mampu mendeskripsikan gejala anomali secara lebih spesifik dan akurat kepada teknisi perawatan ketika diperlukan eskalasi penanganan, dibandingkan operator yang tidak memiliki pemahaman dasar mengenai peralatan yang dioperasikannya. Peningkatan kualitas komunikasi semacam ini pada gilirannya mempercepat proses *troubleshooting* sebagaimana telah dibahas pada bab mengenai *corrective maintenance*, karena teknisi perawatan dapat

memulai investigasi dengan informasi awal yang lebih relevan dan spesifik.

Sistem penghargaan dan pengakuan (*recognition system*) bagi operator yang secara konsisten melaksanakan *autonomous maintenance* dengan baik menjadi elemen pendukung motivasi yang tidak kalah penting dari aspek teknis program itu sendiri. Pengakuan dapat berupa apresiasi non-finansial seperti pengumuman pencapaian pada papan informasi lini produksi, maupun insentif finansial yang dikaitkan dengan indikator kinerja peralatan yang dikelola operator tersebut, sehingga operator merasakan manfaat nyata dari kontribusi mereka terhadap keandalan mesin, bukan sekadar menjalankan tugas tambahan tanpa penghargaan yang sepadan.

Tantangan umum yang dihadapi dalam implementasi *autonomous maintenance* mencakup resistensi awal dari operator yang merasa terbebani dengan tanggung jawab tambahan di luar tugas operasional mereka yang biasa, kekhawatiran teknisi perawatan bahwa peran mereka akan tergantikan, serta keterbatasan waktu yang tersedia bagi operator untuk melaksanakan tugas perawatan mandiri di sela-sela tuntutan produksi yang tinggi. Mengatasi tantangan ini memerlukan komunikasi yang jelas mengenai manfaat program bagi seluruh pihak, termasuk penegasan bahwa *autonomous maintenance* bertujuan memperkaya peran teknisi perawatan menuju pekerjaan yang lebih bernilai tambah, bukan menghilangkan kebutuhan akan keahlian teknis mereka secara keseluruhan.

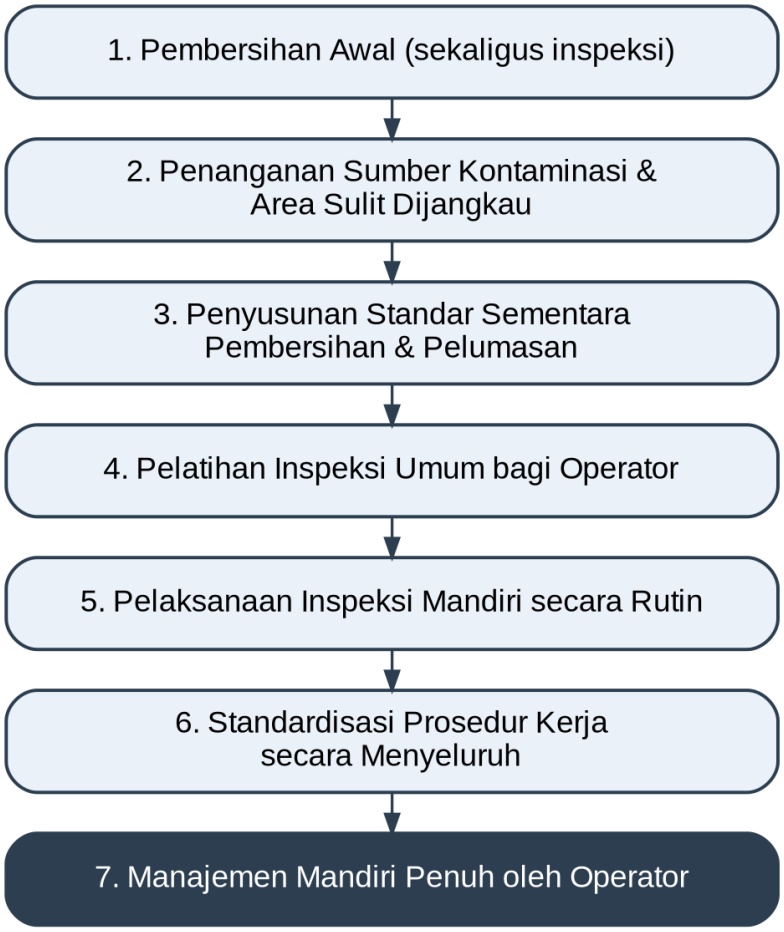
Studi mengenai dampak *autonomous maintenance* pada lini pengemasan industri farmasi juga menegaskan pentingnya penyesuaian kompleksitas tugas perawatan mandiri dengan kapasitas kognitif dan beban kerja operator, mengingat pembebanan tugas yang berlebihan dapat menurunkan kualitas pelaksanaan baik tugas produksi maupun tugas perawatan mandiri itu sendiri. Pendekatan bertahap dalam menambah cakupan tugas *autonomous maintenance*, dimulai dari tugas paling sederhana dan secara progresif diperluas seiring meningkatnya kompetensi dan kenyamanan operator, terbukti menghasilkan tingkat kepatuhan dan kualitas pelaksanaan yang lebih baik dibandingkan

pembebanan tugas yang terlalu banyak sekaligus sejak awal implementasi program.

Standardisasi visual (*visual management*) pada area kerja yang menerapkan *autonomous maintenance* turut memperkuat efektivitas program, melalui penggunaan penanda titik pelumasan, indikator level fluida, serta tanda batas normal dan abnormal pada pengukur tekanan atau suhu yang memungkinkan operator mengenali kondisi tidak normal secara sekilas tanpa memerlukan interpretasi angka yang rumit. Pendekatan manajemen visual semacam ini sejalan dengan prinsip 5S yang lazim diterapkan sebagai fondasi awal program TPM, mencakup pemilahan, penataan, pembersihan, standardisasi, dan pembiasaan, yang secara kolektif menciptakan lingkungan kerja yang mendukung deteksi anomali secara intuitif oleh siapa pun yang mengamatinya.

Integrasi *autonomous maintenance* dengan sistem informasi perawatan digital semakin banyak diterapkan pada organisasi dengan tingkat kematangan TPM yang tinggi, memungkinkan operator mencatat hasil inspeksi mandiri mereka melalui aplikasi seluler yang secara otomatis meneruskan temuan anomali kepada tim perawatan untuk tindak lanjut, tanpa memerlukan pencatatan manual pada formulir kertas yang rentan hilang atau terlambat ditindaklanjuti. Digitalisasi proses *autonomous maintenance* semacam ini juga mempermudah analisis tren temuan inspeksi dari waktu ke waktu, memberikan wawasan tambahan bagi tim perawatan mengenai pola anomali yang mungkin mengindikasikan kebutuhan penyesuaian program perawatan terencana pada peralatan tertentu.

Gambar 9.1 Tujuh Langkah Implementasi *Autonomous Maintenance*



Implementasi *autonomous maintenance* dilaksanakan secara bertahap melalui tujuh langkah, dimulai dari pembersihan dan inspeksi dasar hingga operator mencapai kemandirian penuh dalam mengelola perawatan dasar peralatannya.

9.3 Planned Maintenance dan Continuous Improvement

Pilar *planned maintenance* dalam kerangka TPM merujuk pada perawatan terencana yang dilaksanakan oleh tim teknisi perawatan profesional, sebagai pelengkap dari perawatan dasar yang telah dilaksanakan operator melalui *autonomous maintenance*. Setelah operator mengambil alih tanggung jawab perawatan dasar, kapasitas

tim perawatan profesional yang sebelumnya banyak tersita untuk pekerjaan rutin sederhana dapat dialihkan pada pekerjaan yang lebih kompleks dan bernilai tambah tinggi, seperti analisis kegagalan mendalam, penerapan *predictive maintenance*, dan perbaikan komponen yang memerlukan keahlian teknis spesifik.

Integrasi *planned maintenance* dengan strategi *preventive* dan *predictive maintenance* yang telah dibahas secara mendalam pada bab-bab sebelumnya menjadi kunci keberhasilan pilar ini, mengingat TPM pada dasarnya bukan menggantikan strategi-strategi tersebut, melainkan menyediakan kerangka organisasional dan budaya yang mendukung pelaksanaan strategi-strategi tersebut secara lebih efektif melalui pembagian tanggung jawab yang lebih proporsional antara operator dan teknisi perawatan profesional dalam suatu sistem perawatan yang terintegrasi.

Focused improvement atau yang dalam istilah Jepang disebut *kobetsu kaizen* merupakan pilar TPM yang menekankan perbaikan berkelanjutan melalui tim lintas fungsi yang berfokus menyelesaikan masalah spesifik yang menghambat efektivitas peralatan, biasanya dipilih berdasarkan analisis terhadap enam kerugian besar yang telah disinggung pada subbab sebelumnya. Tim kaizen umumnya terdiri atas perwakilan operator, teknisi perawatan, insinyur proses, dan terkadang personel dari fungsi pendukung lain, yang bekerja sama menganalisis akar masalah dan mengimplementasikan solusi menggunakan berbagai alat analisis seperti diagram sebab-akibat, analisis Pareto, atau metode lima mengapa (*five whys*).

Siklus perbaikan berkelanjutan dalam kerangka TPM umumnya mengikuti pola *plan-do-check-act* (PDCA) yang telah dikenal luas dalam manajemen mutu, di mana tim kaizen merencanakan solusi berdasarkan analisis akar masalah, melaksanakan solusi tersebut dalam skala terbatas atau uji coba, mengevaluasi efektivitas solusi berdasarkan data aktual, dan kemudian menstandardisasi solusi yang terbukti efektif atau melakukan penyesuaian lebih lanjut apabila hasil belum sesuai ekspektasi. Siklus ini kemudian berulang secara berkelanjutan untuk masalah-masalah baru yang teridentifikasi,

menciptakan budaya perbaikan yang tidak pernah benar-benar berhenti pada satu pencapaian tertentu.

Pemilihan proyek kaizen yang tepat menjadi faktor penentu keberhasilan pilar *focused improvement*, dengan kriteria pemilihan yang idealnya mempertimbangkan potensi dampak terhadap OEE, kompleksitas penyelesaian masalah, ketersediaan data pendukung analisis, serta tingkat urgensi dari perspektif bisnis. Organisasi yang memulai program kaizen dengan proyek yang terlalu ambisius dan kompleks berisiko mengalami kegagalan awal yang dapat menurunkan motivasi tim, sehingga strategi memulai dari proyek dengan skala terbatas namun berdampak nyata dan cepat terlihat (*quick win*) umumnya lebih efektif untuk membangun momentum dan kepercayaan diri organisasi terhadap manfaat pendekatan kaizen.

Dokumentasi dan diseminasi hasil proyek kaizen yang berhasil menjadi praktik penting yang sering kali kurang mendapat perhatian, padahal pembelajaran dari satu proyek kaizen pada satu lini produksi sering kali dapat diterapkan pada lini produksi lain dengan karakteristik peralatan serupa. Organisasi yang membangun mekanisme berbagi praktik terbaik (*best practice sharing*) antar-lini atau antar-pabrik dapat mempercepat penyebaran manfaat kaizen secara horizontal, alih-alih setiap unit produksi harus menemukan kembali solusi yang sesungguhnya telah ditemukan dan terbukti efektif di unit lain dalam organisasi yang sama.

Pengukuran dampak kumulatif dari berbagai proyek kaizen yang telah dilaksanakan sepanjang waktu memberikan gambaran mengenai momentum perbaikan berkelanjutan suatu organisasi, yang idealnya dikomunikasikan secara berkala kepada seluruh karyawan untuk memperkuat kesadaran bahwa upaya perbaikan kecil yang konsisten dapat menghasilkan dampak kumulatif yang signifikan terhadap kinerja keseluruhan perusahaan dari waktu ke waktu, sekaligus menjadi sumber motivasi bagi tim untuk terus mengidentifikasi peluang perbaikan baru yang belum tergali sebelumnya.

Keterkaitan antara *planned maintenance* dengan penjadwalan produksi menjadi pertimbangan penting yang perlu dikoordinasikan

secara erat, sebagaimana telah dibahas pada bab mengenai manajemen perawatan mesin, mengingat pelaksanaan pekerjaan perawatan terencana yang optimal dari sudut pandang teknis belum tentu selaras dengan jadwal produksi yang telah ditetapkan. Forum koordinasi rutin antara tim perawatan dan tim produksi, yang menjadi bagian dari struktur TPM secara keseluruhan, membantu menyelaraskan kedua kepentingan tersebut sehingga pekerjaan perawatan terencana dapat dilaksanakan pada waktu yang paling tidak mengganggu pemenuhan target produksi, tanpa mengorbankan keandalan jangka panjang peralatan demi mengejar target produksi jangka pendek semata.

Continuous improvement dalam kerangka TPM juga mencakup evaluasi berkala terhadap efektivitas proses TPM itu sendiri, bukan hanya efektivitas peralatan yang menjadi objek TPM, mengingat proses implementasi TPM sendiri dapat terus disempurnakan seiring bertambahnya pengalaman organisasi. Evaluasi reflektif semacam ini, yang mempertanyakan apakah pendekatan TPM yang diterapkan saat ini masih relevan dan efektif atau memerlukan penyesuaian, mencerminkan tingkat kematangan organisasi dalam menerapkan filosofi perbaikan berkelanjutan tidak hanya pada objek perawatan, tetapi juga pada sistem manajemen perawatan itu sendiri secara menyeluruh.

Peran pilar *early equipment management* menjadi semakin relevan dalam kerangka *planned maintenance* jangka panjang, mengingat keputusan desain pada tahap awal pengadaan peralatan baru memiliki pengaruh yang jauh lebih besar terhadap kemudahan perawatan sepanjang siklus hidup peralatan dibandingkan upaya perbaikan yang dilakukan setelah peralatan tersebut beroperasi. Pelibatan tim perawatan sejak tahap spesifikasi dan pemilihan peralatan baru, dengan mempertimbangkan pengalaman kegagalan dan kesulitan perawatan pada peralatan sejenis yang telah beroperasi sebelumnya, membantu organisasi menghindari pengulangan kesalahan desain yang sama pada investasi peralatan baru di masa mendatang.

Pengukuran efektivitas *planned maintenance* dapat dilakukan melalui indikator seperti tingkat kepatuhan jadwal perawatan terencana, rasio waktu perawatan terencana terhadap waktu perawatan darurat,

serta tren MTBF dan MTTR sebagaimana telah dibahas secara mendalam pada bab-bab sebelumnya dalam buku ini. Integrasi indikator-indikator ini ke dalam dasbor kinerja TPM secara keseluruhan, bersama dengan metrik dari pilar-pilar lain seperti tingkat penyelesaian kaizen dan cakupan *autonomous maintenance*, memberikan gambaran holistik mengenai kemajuan implementasi TPM pada suatu organisasi dari waktu ke waktu.

Pemilihan alat analisis kaizen yang tepat perlu disesuaikan dengan karakteristik masalah yang dihadapi, mengingat diagram sebab-akibat (*fishbone diagram*) lebih sesuai untuk mengeksplorasi berbagai kemungkinan penyebab suatu masalah secara komprehensif, sementara analisis Pareto lebih sesuai untuk memprioritaskan penyebab mana yang paling signifikan berkontribusi terhadap suatu kerugian ketika telah tersedia data kuantitatif yang memadai. Penguasaan berbagai alat analisis ini oleh anggota tim kaizen, disertai kemampuan memilih alat yang tepat sesuai konteks masalah yang dihadapi, menjadi kompetensi penting yang perlu terus dikembangkan melalui pelatihan dan pengalaman praktis dalam menangani berbagai proyek perbaikan berkelanjutan.

Tabel 9.2 Siklus PDCA dalam Proyek *Focused Improvement* (Kaizen)

Tahap	Aktivitas Utama	Contoh Output
Plan	Identifikasi masalah, analisis akar penyebab, rancang solusi	Rencana kaizen dengan target terukur
Do	Implementasi solusi dalam skala terbatas/uji coba	Perubahan proses atau peralatan skala kecil
Check	Evaluasi hasil berdasarkan data aktual	Laporan perbandingan sebelum-sesudah
Act	Standardisasi solusi efektif atau revisi rencana	Prosedur baku baru atau siklus PDCA berikutnya

9.4 Pengukuran Kinerja melalui OEE

Overall equipment effectiveness (OEE) merupakan indikator kunci yang menjadi tulang punggung pengukuran kinerja dalam kerangka TPM, mengukur efektivitas peralatan dari tiga dimensi yang saling berkaitan, yaitu *availability* (ketersediaan), *performance* (kinerja kecepatan), dan *quality* (kualitas keluaran). Nilai OEE dihitung sebagai perkalian dari ketiga komponen tersebut, sehingga kelemahan pada salah satu dimensi akan secara signifikan menurunkan nilai OEE secara keseluruhan, menegaskan pentingnya perbaikan yang seimbang pada ketiga dimensi tersebut, bukan hanya berfokus pada salah satu aspek semata.

Komponen *availability* dalam perhitungan OEE mengukur proporsi waktu operasi aktual dibandingkan dengan waktu operasi yang direncanakan, dengan pengurangan yang disebabkan oleh kegagalan mesin tak terduga maupun waktu henti terencana seperti penyetelan dan pergantian produk. Komponen performance mengukur seberapa dekat kecepatan operasi aktual dengan kecepatan desain maksimal peralatan, memperhitungkan kerugian akibat berhenti sesaat dan penurunan kecepatan operasi. Komponen quality mengukur proporsi produk yang memenuhi standar kualitas tanpa memerlukan pengerjaan ulang, dibandingkan dengan total produk yang dihasilkan selama periode operasi tersebut.

Standar OEE kelas dunia (*world class OEE*) umumnya ditetapkan pada angka 85 persen, yang merupakan hasil perkalian dari target *availability* sebesar 90 persen, performance sebesar 95 persen, dan quality sebesar 99 persen. Meskipun angka 85 persen sering dijadikan acuan umum, penetapan target OEE yang realistis perlu mempertimbangkan karakteristik industri dan jenis peralatan spesifik, mengingat industri dengan proses yang sangat kompleks atau peralatan dengan usia operasi yang sudah lanjut mungkin memiliki batasan praktis yang membuat target 85 persen menjadi kurang realistis untuk dicapai dalam jangka pendek tanpa investasi signifikan pada pembaruan peralatan.

Studi mengenai penerapan pendekatan holistik yang mengintegrasikan OEE untuk peningkatan efisiensi pada industri manufaktur otomotif menunjukkan bahwa organisasi yang secara konsisten memantau dan menganalisis komponen-komponen penyusun OEE secara terpisah mampu mengidentifikasi area perbaikan yang lebih spesifik dan terarah, dibandingkan organisasi yang hanya memantau nilai OEE agregat tanpa memahami kontribusi masing-masing komponen terhadap nilai keseluruhan tersebut (Zehra dkk., 2024).

Pengumpulan data OEE yang akurat menuntut sistem pencatatan yang konsisten dan terpercaya, baik melalui pencatatan manual oleh operator maupun melalui sistem otomatis berbasis sensor yang terintegrasi dengan mesin produksi. Perkembangan teknologi *Internet of Things* telah memungkinkan pengumpulan data OEE secara otomatis dan real-time pada semakin banyak fasilitas produksi, mengurangi ketergantungan pada pencatatan manual yang rentan terhadap kesalahan manusia dan keterlambatan pelaporan, meskipun investasi pada infrastruktur otomasi ini perlu dipertimbangkan secara proporsional dengan skala dan kompleksitas operasi masing-masing perusahaan.

Kajian mengenai prediksi OEE menggunakan pembelajaran mesin pada proses perakitan menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data mampu memberikan estimasi OEE yang akurat bahkan sebelum data aktual periode tersebut sepenuhnya terkumpul, membuka peluang bagi manajemen untuk mengambil tindakan korektif lebih dini apabila tren OEE menunjukkan indikasi penurunan, dibandingkan menunggu laporan OEE final yang biasanya baru tersedia setelah periode produksi berakhir sepenuhnya (Dobra & Jósvai, 2024).

Interpretasi nilai OEE perlu dilakukan secara kontekstual dan tidak semata-mata dibandingkan secara mentah antar-lini produksi yang berbeda karakteristiknya, mengingat perbedaan jenis produk, kompleksitas proses, dan usia peralatan dapat menghasilkan variasi nilai OEE yang wajar tanpa mencerminkan perbedaan kualitas manajemen perawatan yang sesungguhnya. Pendekatan yang lebih tepat adalah membandingkan tren OEE suatu lini produksi terhadap

baseline historisnya sendiri dari waktu ke waktu, sehingga peningkatan atau penurunan yang teramati benar-benar mencerminkan efektivitas program TPM yang diterapkan pada lini tersebut, bukan sekadar perbedaan karakteristik inheren antar-lini yang dibandingkan.

Perluasan konsep OEE menjadi *total effective equipment performance* (TEEP), yang turut memperhitungkan waktu kalender penuh termasuk periode yang memang tidak direncanakan untuk beroperasi, memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai potensi kapasitas yang belum dimanfaatkan secara keseluruhan, dibandingkan OEE yang hanya membandingkan kinerja terhadap waktu operasi yang direncanakan semata. Metrik TEEP sangat berguna bagi organisasi yang mempertimbangkan penambahan shift operasi atau evaluasi kelayakan investasi kapasitas tambahan, karena mengungkapkan seberapa besar potensi produksi yang sesungguhnya tersedia apabila peralatan dioperasikan secara maksimal sepanjang waktu kalender yang ada.

Visualisasi data OEE melalui dasbor real-time yang dapat diakses oleh operator, supervisor, dan manajemen menjadi praktik yang semakin umum diterapkan pada organisasi dengan tingkat kematangan TPM yang tinggi, memungkinkan seluruh pemangku kepentingan memantau kinerja peralatan secara transparan dan segera menyadari ketika terjadi penyimpangan dari target yang telah ditetapkan. Transparansi data semacam ini turut memperkuat budaya akuntabilitas bersama terhadap kinerja peralatan, sejalan dengan filosofi TPM yang menempatkan keandalan sebagai tanggung jawab kolektif, bukan informasi yang hanya diketahui oleh manajemen semata tanpa keterlibatan aktif dari operator dan teknisi di lapangan.

Analisis akar penyebab kerugian OEE melalui dekomposisi terhadap enam kerugian besar yang telah dibahas pada subbab pembuka bab ini memungkinkan tim TPM mengidentifikasi kontributor spesifik terhadap rendahnya nilai OEE pada suatu peralatan, alih-alih hanya mengetahui bahwa nilai OEE rendah tanpa memahami penyebab dominannya. Sebagai ilustrasi, suatu lini produksi dengan *availability* tinggi namun performance rendah mengindikasikan bahwa upaya perbaikan sebaiknya difokuskan pada penyebab berhenti sesaat dan

penurunan kecepatan, alih-alih menginvestasikan sumber daya tambahan pada pencegahan kegagalan besar yang sesungguhnya sudah terkendali dengan baik pada peralatan tersebut.

Benchmark OEE internal antar-peralatan sejenis dalam satu organisasi, meskipun perlu dilakukan secara hati-hati sebagaimana telah ditekankan sebelumnya, tetap dapat memberikan wawasan berharga ketika dua peralatan dengan spesifikasi teknis identik menunjukkan perbedaan OEE yang signifikan, mengindikasikan adanya perbedaan praktik operasional atau perawatan yang dapat dipelajari dari peralatan berkinerja lebih baik untuk diterapkan pada peralatan yang berkinerja lebih rendah. Pendekatan pembelajaran internal semacam ini sering kali menghasilkan perbaikan yang lebih cepat dan berbiaya rendah dibandingkan mencari solusi dari sumber eksternal, mengingat solusi tersebut telah terbukti efektif dalam konteks operasional organisasi yang sama persis.

Keterbatasan metrik OEE juga perlu dipahami secara kritis, mengingat OEE pada dasarnya hanya mengukur efektivitas peralatan dari perspektif waktu operasi yang telah dijadwalkan, tanpa memperhitungkan apakah jadwal produksi itu sendiri telah dioptimalkan secara memadai sesuai permintaan pasar aktual. Suatu peralatan dapat mencapai nilai OEE tinggi namun tetap menghasilkan pemborosan apabila dijadwalkan memproduksi barang yang tidak sesuai kebutuhan pasar, sehingga OEE idealnya digunakan bersamaan dengan metrik bisnis lain yang lebih luas, bukan dipandang sebagai satu-satunya indikator keberhasilan operasional perusahaan secara keseluruhan.

Sebagai penutup pembahasan bab ini, TPM menawarkan kerangka kerja komprehensif yang mengintegrasikan aspek teknis, manusia, dan budaya organisasi dalam upaya memaksimalkan efektivitas peralatan produksi secara berkelanjutan. Keberhasilan penerapan TPM, sebagaimana telah diuraikan melalui pilar *autonomous maintenance*, *planned maintenance*, continuous improvement, dan pengukuran kinerja melalui OEE, pada akhirnya bergantung pada komitmen jangka panjang seluruh elemen organisasi untuk menjadikan

keandalan peralatan sebagai tanggung jawab bersama, bukan sekadar tanggung jawab eksklusif departemen perawatan semata.

Tabel 9.3 Komponen Perhitungan *Overall equipment effectiveness* (OEE)

Komponen	Definisi	Contoh Kerugian yang Diperhitungkan
Availability	Waktu operasi aktual / waktu operasi terencana	Kegagalan mesin, setup, pergantian produk
Performance	Kecepatan aktual / kecepatan desain maksimal	Berhenti sesaat, penurunan kecepatan
Quality	Produk baik / total produk dihasilkan	Cacat produksi, produk memerlukan pengerjaan ulang
OEE	*Availability* x *Performance* x *Quality*	Gabungan seluruh kerugian di atas

Rangkuman Bab 9

Bab ini telah menguraikan *total productive maintenance* (TPM) sebagai pendekatan manajemen perawatan yang melibatkan seluruh elemen organisasi melalui delapan pilar utama, dengan *autonomous maintenance* dan *planned maintenance* sebagai dua pilar yang paling mendasar dalam mengubah pembagian tanggung jawab perawatan antara operator dan teknisi perawatan profesional. Filosofi TPM berupaya menghilangkan enam kerugian besar yang menghambat efektivitas peralatan melalui transformasi budaya kerja yang menempatkan keandalan mesin sebagai tanggung jawab bersama.

Autonomous maintenance dilaksanakan melalui tujuh langkah bertahap yang dimulai dari pembersihan awal hingga manajemen mandiri penuh oleh operator, sementara focused improvement melalui siklus PDCA mendorong perbaikan berkelanjutan pada masalah-masalah spesifik yang teridentifikasi. *Overall equipment effectiveness* (OEE) menjadi indikator kunci yang mengukur efektivitas peralatan

dari dimensi *availability*, *performance*, dan *quality*, dengan standar kelas dunia pada angka 85 persen sebagai acuan umum yang perlu disesuaikan dengan konteks spesifik masing-masing industri.

Keberhasilan TPM pada akhirnya ditentukan oleh komitmen jangka panjang organisasi dalam membangun budaya kerja kolektif yang berorientasi pada keandalan, didukung oleh integrasi yang harmonis dengan strategi *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance* serta kerangka kerja RCM yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya, menjadikan TPM sebagai penyempurna sekaligus pengikat dari keseluruhan strategi perawatan yang telah diuraikan sepanjang buku ini.

Pembaca yang berupaya menerapkan TPM di organisasinya perlu menyadari bahwa keberhasilan program ini menuntut kesabaran dan konsistensi, mengingat perubahan budaya kerja yang mendasar tidak dapat dicapai dalam hitungan bulan, melainkan memerlukan komitmen bertahun-tahun yang didukung oleh kepemimpinan yang konsisten, struktur organisasi pendukung yang jelas, serta sistem pengukuran kinerja yang mampu menangkap kemajuan secara objektif dari waktu ke waktu.

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 9

1. Jelaskan delapan pilar TPM beserta fokus utama masing-masing pilar, serta bagaimana keterkaitan antar-pilar tersebut membentuk suatu sistem yang terintegrasi.
2. Uraikan tujuh langkah implementasi *autonomous maintenance*, serta jelaskan mengapa tahap pembersihan awal memiliki nilai strategis yang sering kali kurang disadari oleh organisasi.
3. Diskusikan bagaimana *autonomous maintenance* dapat membebaskan kapasitas tim perawatan profesional untuk fokus pada pekerjaan yang lebih kompleks, dan kaitannya dengan pilar *planned maintenance*.

4. Jelaskan konsep enam kerugian besar (*six big losses*) dalam kerangka TPM, serta bagaimana konsep tersebut digunakan sebagai dasar pemilihan proyek *focused improvement*.

5. Uraikan tiga komponen penyusun OEE beserta cara perhitungannya, dan jelaskan mengapa perbaikan yang seimbang pada ketiga komponen tersebut lebih penting dibandingkan fokus pada satu komponen saja.

6. Diskusikan mengapa interpretasi nilai OEE perlu dilakukan secara kontekstual dan tidak semata-mata dibandingkan secara mentah antar-lini produksi yang berbeda karakteristiknya.

7. Analisislah bagaimana TPM dan *reliability centered maintenance* (RCM) dapat diterapkan secara komplementer dalam suatu organisasi, dengan menjelaskan penekanan berbeda dari masing-masing pendekatan.

8. Jelaskan perbedaan antara OEE dan TEEP (*total effective equipment performance*), serta konteks apa yang membuat metrik TEEP lebih relevan digunakan dibandingkan OEE.

9. Diskusikan tantangan umum yang dihadapi organisasi dalam implementasi *autonomous maintenance*, serta strategi yang dapat ditempuh untuk mengatasi resistensi awal dari operator dan teknisi perawatan.

BAB 10
KESELAMATAN DAN STANDAR DALAM PERAWATAN MESIN

10.1 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) dalam *Maintenance*

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) merupakan aspek fundamental yang tidak dapat dipisahkan dari pelaksanaan seluruh aktivitas perawatan mesin, mengingat pekerjaan perawatan sering kali melibatkan interaksi langsung dengan sumber energi berbahaya, komponen bergerak, ketinggian, ruang terbatas, maupun bahan kimia yang berpotensi menimbulkan cedera serius apabila tidak dikelola dengan prosedur yang tepat. Di Indonesia, kewajiban penyelenggaraan K3 diatur secara tegas melalui Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja, yang menjadi landasan hukum utama bagi seluruh regulasi turunan mengenai keselamatan kerja di berbagai sektor industri, termasuk pada aktivitas perawatan mesin.

Statistik kecelakaan kerja di berbagai negara secara konsisten menunjukkan bahwa aktivitas perawatan dan perbaikan mesin merupakan salah satu kategori pekerjaan dengan tingkat risiko kecelakaan kerja yang relatif tinggi, mengingat sifat pekerjaan yang sering kali menuntut interaksi langsung dengan mesin dalam kondisi tidak sepenuhnya beroperasi normal, di mana perilaku mesin dapat menjadi kurang dapat diprediksi dibandingkan kondisi operasi normal yang telah dipahami dengan baik oleh operator. Kesadaran terhadap risiko spesifik ini perlu menjadi bagian integral dari budaya kerja setiap personel yang terlibat dalam aktivitas perawatan mesin.

Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) mewajibkan perusahaan dengan kriteria tertentu untuk menerapkan sistem manajemen K3 secara terstruktur, mencakup penetapan kebijakan K3, perencanaan, pelaksanaan, pemantauan dan evaluasi,

serta peninjauan dan peningkatan kinerja K3 secara berkelanjutan. Penerapan SMK3 yang efektif menuntut integrasi yang erat antara fungsi K3 dengan fungsi perawatan mesin, mengingat banyak elemen SMK3 yang secara langsung bersinggungan dengan aktivitas perawatan, seperti identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan pengendalian risiko pada peralatan produksi.

Identifikasi bahaya (*hazard identification*) menjadi langkah awal yang krusial sebelum pelaksanaan setiap pekerjaan perawatan, mencakup identifikasi sumber energi berbahaya yang perlu diisolasi, potensi jatuh dari ketinggian, risiko terjepit atau tertimpa komponen bergerak, paparan bahan kimia atau zat berbahaya, serta risiko ergonomis akibat postur kerja yang tidak sesuai. Prosedur analisis keselamatan kerja (*job safety analysis*) yang dilaksanakan secara sistematis sebelum memulai pekerjaan perawatan tertentu membantu mengidentifikasi bahaya spesifik yang terkait dengan pekerjaan tersebut, sekaligus menentukan tindakan pengendalian yang perlu diterapkan sebelum pekerjaan dilaksanakan.

Hierarki pengendalian risiko (*hierarchy of controls*) memberikan kerangka sistematis untuk menentukan prioritas tindakan pengendalian bahaya, dimulai dari eliminasi bahaya secara total apabila memungkinkan, substitusi dengan alternatif yang lebih aman, pengendalian rekayasa teknis seperti pemasangan pengaman mekanis, pengendalian administratif seperti prosedur kerja dan pelatihan, hingga penggunaan alat pelindung diri sebagai lapisan pertahanan terakhir. Prinsip hierarki ini menegaskan bahwa alat pelindung diri, meskipun penting, seharusnya bukan menjadi satu-satunya andalan pengendalian risiko, melainkan pelengkap dari tindakan pengendalian yang lebih fundamental pada tingkat sumber bahaya itu sendiri.

Alat pelindung diri (APD) yang sesuai dengan jenis pekerjaan perawatan yang dilaksanakan perlu disediakan dan digunakan secara konsisten, mencakup helm keselamatan, sepatu keselamatan, sarung tangan yang sesuai dengan jenis bahaya, kacamata atau pelindung wajah, alat pelindung pendengaran pada area bertingkat kebisingan tinggi, hingga alat pelindung pernapasan pada pekerjaan yang berpotensi menghasilkan debu atau uap berbahaya. Pemilihan APD

yang tepat perlu mempertimbangkan karakteristik spesifik bahaya yang dihadapi, mengingat penggunaan APD yang tidak sesuai dapat memberikan rasa aman yang keliru tanpa perlindungan yang sesungguhnya memadai terhadap bahaya aktual yang dihadapi.

Budaya keselamatan (*safety culture*) yang matang pada suatu organisasi perawatan tercermin dari sejauh mana seluruh personel, tanpa memandang jenjang jabatan, secara konsisten mengutamakan keselamatan dalam setiap pengambilan keputusan kerja, termasuk kesediaan untuk menghentikan pekerjaan (*stop work authority*) apabila teridentifikasi kondisi yang tidak aman, tanpa rasa takut terhadap konsekuensi negatif akibat keputusan tersebut. Organisasi dengan budaya keselamatan yang matang umumnya menunjukkan tingkat insiden kerja yang jauh lebih rendah dibandingkan organisasi yang hanya memenuhi persyaratan K3 secara formal tanpa benar-benar menginternalisasi nilai keselamatan ke dalam perilaku kerja sehari-hari seluruh karyawannya.

Pelaporan nyaris celaka (*near miss reporting*) menjadi instrumen penting dalam membangun budaya keselamatan proaktif, mendorong pekerja melaporkan kejadian yang berpotensi menimbulkan cedera meskipun pada akhirnya tidak menyebabkan cedera aktual, tanpa rasa khawatir akan disalahkan atau menerima sanksi. Organisasi yang berhasil membangun budaya pelaporan nyaris celaka yang terbuka umumnya memperoleh data berharga mengenai potensi bahaya tersembunyi sebelum bahaya tersebut benar-benar menyebabkan kecelakaan serius, menjadikan pelaporan nyaris celaka sebagai mekanisme deteksi dini yang setara pentingnya dengan mekanisme deteksi dini kegagalan mesin yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya dalam buku ini.

Ergonomi dalam pekerjaan perawatan mesin menjadi aspek K3 yang sering kali kurang mendapat perhatian dibandingkan risiko keselamatan akut seperti tersengat listrik atau terjepit komponen bergerak, padahal risiko cedera kumulatif akibat postur kerja yang buruk, pengangkatan beban berlebih, atau gerakan berulang dalam jangka panjang dapat menimbulkan gangguan muskuloskeletal yang serius bagi teknisi perawatan. Perancangan area kerja dan prosedur

perawatan yang mempertimbangkan prinsip ergonomi sejak awal, termasuk penyediaan alat bantu angkat untuk komponen berat, dapat secara signifikan mengurangi risiko cedera kumulatif jangka panjang yang sering kali tidak disadari hingga menimbulkan dampak serius pada kesehatan teknisi di kemudian hari.

Program kesehatan kerja (*occupational health*) yang melengkapi aspek keselamatan kerja mencakup pemeriksaan kesehatan berkala bagi teknisi perawatan, khususnya yang terpapar risiko kesehatan spesifik seperti kebisingan tinggi, getaran, debu, atau bahan kimia tertentu, guna mendeteksi dini gangguan kesehatan akibat paparan tersebut sebelum berkembang menjadi kondisi yang lebih serius dan sulit dipulihkan. Integrasi program kesehatan kerja dengan program K3 secara keseluruhan menegaskan bahwa perlindungan terhadap teknisi perawatan tidak hanya berfokus pada pencegahan cedera akut, tetapi juga pencegahan dampak kesehatan jangka panjang akibat paparan berulang terhadap berbagai risiko yang melekat pada pekerjaan perawatan mesin.

Pelatihan K3 yang berkelanjutan dan relevan dengan risiko spesifik yang dihadapi teknisi perawatan menjadi elemen fundamental dalam membangun kompetensi keselamatan kerja yang mumpuni, mencakup tidak hanya pelatihan dasar K3 umum yang diwajibkan bagi seluruh karyawan, tetapi juga pelatihan khusus sesuai dengan jenis pekerjaan perawatan yang dilaksanakan, seperti pelatihan bekerja di ketinggian, pelatihan ruang terbatas, atau pelatihan penanganan bahan kimia berbahaya. Penyegaran pelatihan secara berkala, bukan hanya sekali pada saat awal bekerja, penting untuk memastikan pengetahuan dan keterampilan keselamatan kerja tetap terjaga dan mengikuti perkembangan praktik terbaik yang terus berkembang seiring waktu.

Investigasi kecelakaan kerja yang menyeluruh dan tidak bersifat menghakimi (*non-punitive investigation*) menjadi pendekatan yang semakin banyak diadopsi oleh organisasi dengan budaya keselamatan matang, berfokus pada identifikasi akar penyebab sistemik yang memungkinkan kecelakaan terjadi, alih-alih semata-mata mencari pihak yang dapat dipersalahkan. Pendekatan investigasi yang konstruktif semacam ini mendorong keterbukaan pelaporan dan pembelajaran

organisasi yang lebih efektif, sejalan dengan prinsip investigasi kegagalan mesin yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya, di mana fokus pada pembelajaran sistemik menghasilkan pencegahan yang lebih efektif dibandingkan pendekatan yang berorientasi pada pencarian kesalahan individual semata.

Tabel 10.1 Hierarki Pengendalian Risiko dalam Aktivitas Perawatan Mesin

Tingkat	Jenis Pengendalian	Contoh Penerapan
1 (tertinggi)	Eliminasi	Menghilangkan sepenuhnya sumber bahaya dari proses kerja
2	Substitusi	Mengganti bahan/metode dengan yang lebih aman
3	Pengendalian Rekayasa	Pemasangan pengaman mesin, ventilasi, interlock
4	Pengendalian Administratif	Prosedur kerja aman, pelatihan, rotasi kerja
5 (terendah)	Alat Pelindung Diri (APD)	Helm, sarung tangan, kacamata, respirator

10.2 *Lock Out Tag Out* (LOTO) dan Pengendalian Risiko

Lock out tag out (LOTO) merupakan prosedur keselamatan kerja yang dirancang khusus untuk memastikan bahwa mesin atau peralatan yang sedang menjalani perawatan atau perbaikan benar-benar terisolasi dari seluruh sumber energi berbahaya, sehingga tidak dapat teraktivasi secara tidak sengaja selama pekerjaan berlangsung. Prosedur ini menjadi salah satu pengendalian keselamatan paling fundamental dalam aktivitas perawatan mesin, mengingat pelepasan energi berbahaya secara tiba-tiba selama pekerjaan perawatan merupakan salah satu penyebab utama kecelakaan kerja fatal di lingkungan industri manufaktur di seluruh dunia.

Jenis energi yang perlu dikendalikan melalui prosedur LOTO mencakup energi listrik, energi mekanik dari komponen bergerak atau tersimpan seperti pegas terkompresi, energi hidraulik dan pneumatik dari sistem bertekanan, energi termal dari permukaan panas atau dingin ekstrem, energi kimia dari bahan reaktif, serta energi potensial gravitasi dari komponen yang berada pada posisi terangkat. Setiap jenis energi tersebut memerlukan metode isolasi yang spesifik dan sesuai dengan karakteristiknya, sehingga identifikasi menyeluruh terhadap seluruh sumber energi pada suatu peralatan menjadi langkah awal yang tidak boleh dilewatkan sebelum prosedur LOTO dilaksanakan.

Prosedur LOTO standar umumnya mencakup beberapa tahapan sistematis, dimulai dari persiapan dan perencanaan yang mengidentifikasi seluruh sumber energi dan metode isolasinya, pemberitahuan kepada seluruh pihak yang terdampak mengenai pekerjaan yang akan dilaksanakan, mematikan peralatan melalui prosedur normal, mengisolasi seluruh sumber energi melalui perangkat penguncian fisik, melepaskan atau menetralkan energi yang tersimpan, memasang kunci dan label peringatan (*lock and tag*) pada setiap titik isolasi, hingga verifikasi bahwa isolasi energi telah benar-benar efektif melalui pengujian yang aman sebelum pekerjaan dimulai.

Verifikasi isolasi energi (*try*) sebelum memulai pekerjaan, yang sering disebut sebagai tahap tambahan dalam prosedur LOTOTO (*lock out, tag out, try out*), menjadi langkah krusial yang tidak boleh diabaikan, mengingat kegagalan perangkat isolasi atau kesalahan dalam identifikasi sumber energi dapat menyebabkan mesin tetap berenergi meskipun prosedur lockout telah dilaksanakan secara formal. Kajian mengenai penerapan program LOTOTO pada industri semen menegaskan bahwa tahap verifikasi try out menjadi pembeda penting antara prosedur LOTO yang sekadar formalitas administratif dengan prosedur yang benar-benar memberikan jaminan keselamatan yang efektif bagi pekerja perawatan.

Penggunaan kunci pribadi (*personal lock*) yang hanya dapat dibuka oleh individu yang memasangnya sendiri merupakan prinsip fundamental dalam LOTO, memastikan bahwa tidak ada pihak lain, termasuk supervisor, yang dapat membuka isolasi energi tanpa

sepengetahuan dan persetujuan dari personel yang sedang melaksanakan pekerjaan pada peralatan tersebut. Pada pekerjaan yang melibatkan beberapa personel atau beberapa tim secara bersamaan, prosedur *group lockout* dengan menggunakan kotak kunci bersama (*lockbox*) memungkinkan setiap individu memasang kunci pribadinya masing-masing, memastikan peralatan hanya dapat diaktifkan kembali setelah seluruh personel yang terlibat telah menyelesaikan pekerjaannya dan melepas kunci masing-masing.

Kajian mengenai tantangan prosedural dalam adopsi sistem LOTO pada berbagai pabrik menunjukkan bahwa kepatuhan terhadap prosedur LOTO sering kali dipengaruhi oleh faktor tekanan waktu produksi, di mana pekerja terkadang tergoda untuk melewati atau mempersingkat langkah-langkah LOTO demi mempercepat penyelesaian pekerjaan perbaikan, terutama pada situasi darurat dengan tekanan tinggi untuk segera memulihkan produksi (Singh dkk., 2022). Temuan ini menegaskan pentingnya penanaman budaya yang menempatkan keselamatan di atas kecepatan penyelesaian pekerjaan, tanpa kompromi terhadap prosedur keselamatan dasar meskipun dalam kondisi tekanan produksi yang tinggi.

Pelatihan dan sertifikasi kompetensi LOTO bagi seluruh personel yang berwenang melaksanakan isolasi energi menjadi prasyarat penting bagi efektivitas program ini, mencakup pemahaman mendalam mengenai jenis-jenis energi berbahaya, prosedur isolasi yang benar untuk setiap jenis peralatan, serta konsekuensi serius dari kegagalan mematuhi prosedur tersebut. Studi mengenai efektivitas simulasi prosedur LOTO dalam meningkatkan pemahaman keselamatan kerja pada pekerja perawatan menunjukkan bahwa pelatihan berbasis simulasi praktis, dibandingkan hanya pelatihan teoretis di kelas, secara signifikan meningkatkan retensi pemahaman dan konsistensi penerapan prosedur LOTO oleh pekerja di lapangan.

Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 38 Tahun 2016 tentang Pesawat Tenaga dan Produksi serta Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 11 Tahun 2023 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Ruang Terbatas menjadi rujukan regulasi nasional yang relevan dengan penerapan prosedur pengendalian energi

berbahaya di Indonesia, melengkapi standar internasional seperti OSHA 29 CFR 1910.147 yang banyak dijadikan acuan teknis oleh perusahaan multinasional maupun perusahaan nasional yang menerapkan standar keselamatan kerja kelas dunia pada operasi mereka.

Pengelolaan perangkat LOTO secara fisik, mencakup gembok pribadi, label peringatan, serta kotak kunci bersama, memerlukan sistem administrasi yang tertib untuk memastikan ketersediaan perangkat yang memadai bagi seluruh personel yang berwenang, sekaligus mencegah penyalahgunaan atau kehilangan perangkat yang dapat mengganggu efektivitas program secara keseluruhan. Praktik terbaik mencakup penugasan gembok pribadi bernomor seri unik bagi setiap personel yang telah menerima pelatihan LOTO, sehingga setiap penggunaan perangkat dapat ditelusuri kembali kepada individu yang bertanggung jawab, memperkuat akuntabilitas personal dalam pelaksanaan prosedur ini.

Penanganan situasi khusus dalam LOTO, seperti pekerjaan yang melibatkan kontraktor eksternal atau situasi darurat yang memerlukan pengalihan tanggung jawab isolasi energi antar-shift kerja, memerlukan prosedur tambahan yang jelas untuk memastikan kesinambungan perlindungan keselamatan tidak terputus. Prosedur serah terima LOTO antar-shift, yang mendokumentasikan status isolasi energi secara rinci dan memerlukan verifikasi ulang oleh personel shift berikutnya sebelum melanjutkan pekerjaan, menjadi praktik penting untuk mencegah kesalahpahaman yang dapat timbul akibat pergantian personel di tengah pelaksanaan suatu pekerjaan perawatan yang belum sepenuhnya selesai.

Pengendalian energi berbahaya pada sistem yang kompleks dan saling terhubung, seperti sistem perpipaan proses pada industri kimia atau petrokimia, sering kali memerlukan analisis mendalam terhadap seluruh titik isolasi yang diperlukan untuk sepenuhnya mengisolasi suatu segmen sistem dari sistem lain yang tetap beroperasi. Diagram isolasi energi (*isolation diagram*) yang disusun sebelumnya untuk setiap peralatan atau sistem kritis, mencantumkan seluruh titik isolasi yang diperlukan beserta urutan pelaksanaannya, menjadi alat bantu

penting bagi personel yang melaksanakan LOTO pada sistem kompleks, mengurangi risiko titik isolasi yang terlewat akibat kompleksitas sistem yang sulit diingat secara manual oleh personel pelaksana.

Audit kepatuhan LOTO secara berkala, sebagaimana akan dibahas lebih lanjut pada subbab mengenai audit dan evaluasi sistem perawatan, menjadi mekanisme penting untuk memastikan bahwa prosedur yang telah ditetapkan benar-benar dilaksanakan secara konsisten di lapangan, bukan hanya terdokumentasi dengan baik namun tidak sepenuhnya dipatuhi dalam praktik sehari-hari. Observasi langsung pelaksanaan LOTO oleh supervisor atau tim K3 secara tidak terjadwal (*unannounced observation*) sering kali mengungkap kesenjangan antara prosedur yang tertulis dengan praktik aktual yang terjadi, memberikan masukan berharga bagi penyempurnaan program LOTO organisasi secara berkelanjutan.

Konsekuensi hukum dan finansial akibat ketidakpatuhan terhadap prosedur LOTO dapat sangat signifikan, mencakup sanksi administratif dari otoritas ketenagakerjaan, tuntutan hukum dari pekerja yang mengalami cedera, hingga kerugian reputasional yang berdampak pada hubungan dengan pelanggan dan mitra bisnis. Kesadaran terhadap konsekuensi serius ini perlu dikomunikasikan secara jelas kepada seluruh personel, bukan untuk menimbulkan rasa takut yang berlebihan, melainkan untuk membangun pemahaman yang tepat mengenai betapa pentingnya kepatuhan terhadap prosedur keselamatan dasar ini bagi keberlangsungan bisnis dan kesejahteraan seluruh pekerja yang terlibat.

Pembelajaran dari insiden LOTO yang terjadi di industri lain, baik melalui laporan investigasi kecelakaan yang dipublikasikan maupun forum berbagi pengalaman antar-perusahaan, memberikan wawasan berharga mengenai skenario kegagalan yang mungkin belum pernah dialami secara langsung oleh suatu organisasi, namun tetap berpotensi terjadi apabila kondisi serupa muncul di lingkungan kerja mereka. Diseminasi pembelajaran semacam ini melalui briefing keselamatan rutin membantu memperkuat kewaspadaan personel terhadap berbagai skenario risiko LOTO yang mungkin belum

sepenuhnya diantisipasi dalam prosedur standar yang berlaku di organisasi tersebut.

Gambar 10.1 Alur Prosedur LOTOTO (*Lock Out, Tag Out, Try Out*)



Prosedur LOTOTO menambahkan tahap verifikasi (*try*) setelah *lock* dan *tag,* memastikan isolasi energi benar-benar efektif sebelum pekerjaan perawatan dimulai, bukan sekadar formalitas administratif belaka.

10.3 Standar dan Regulasi Perawatan Mesin

Standar dan regulasi dalam bidang perawatan mesin memberikan kerangka acuan yang membantu organisasi memastikan praktik perawatan yang diterapkan telah memenuhi kaidah keteknikan yang teruji, sekaligus memenuhi kewajiban hukum yang berlaku pada yurisdiksi tempat organisasi tersebut beroperasi. Standar-standar ini dapat dikelompokkan menjadi standar internasional yang bersifat sukarela namun banyak diadopsi sebagai praktik terbaik, serta regulasi nasional yang bersifat wajib dipatuhi sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku di masing-masing negara.

ISO 55000:2024 mengenai manajemen aset memberikan kerangka acuan mendasar mengenai kosakata, gambaran umum, dan prinsip manajemen aset yang dapat diterapkan pada berbagai jenis organisasi dan skala usaha, menekankan bahwa manajemen aset yang efektif memerlukan keselarasan antara tujuan organisasi dengan strategi pengelolaan aset fisik, termasuk peralatan produksi yang menjadi fokus pembahasan sepanjang buku ini. Standar ini menempatkan fungsi perawatan sebagai salah satu elemen kunci dalam siklus hidup aset secara keseluruhan, bukan sebagai fungsi yang berdiri sendiri dan terpisah dari strategi bisnis organisasi secara umum.

ISO 14224:2016 mengenai pengumpulan dan pertukaran data keandalan dan perawatan peralatan pada industri minyak, petrokimia, dan gas alam memberikan panduan rinci mengenai taksonomi aset dan struktur data yang perlu dikumpulkan untuk mendukung analisis keandalan yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya dalam buku ini. Standar ini, meskipun awalnya dikembangkan khusus untuk industri migas, prinsip-prinsip taksonomi dan strukturisasi data yang ditawarkannya banyak diadaptasi oleh berbagai sektor industri lain yang memiliki kebutuhan serupa dalam mengelola data kegagalan dan perawatan peralatan secara sistematis.

Standar Eropa EN 13306 mengenai terminologi perawatan memberikan definisi baku bagi berbagai istilah teknis dalam bidang perawatan mesin, membantu menciptakan kesamaan pemahaman lintas organisasi dan lintas negara mengenai konsep-konsep fundamental seperti *preventive maintenance*, *corrective maintenance*, dan berbagai istilah lain yang telah digunakan secara konsisten sepanjang buku ini.

Kesamaan terminologi semacam ini menjadi penting terutama bagi organisasi multinasional yang perlu memastikan konsistensi praktik perawatan di berbagai lokasi operasi mereka yang tersebar di berbagai negara dengan latar belakang bahasa dan budaya yang berbeda-beda.

SAE JA1011, yang awalnya dikembangkan oleh industri penerbangan komersial, menjadi standar acuan bagi kriteria yang perlu dipenuhi oleh suatu proses *reliability* centered maintenance agar dapat disebut memenuhi standar RCM yang sesungguhnya, sebagaimana telah dibahas secara mendalam pada bab tersendiri dalam buku ini. Standar ini penting untuk membedakan penerapan RCM yang benar-benar mengikuti metodologi sistematis sesuai kaidah yang telah teruji, dengan pendekatan yang hanya mengklaim menerapkan RCM namun sesungguhnya tidak memenuhi kriteria metodologis yang dipersyaratkan.

Di Indonesia, regulasi mengenai perawatan mesin dan peralatan produksi tersebar pada berbagai peraturan perundang-undangan sektoral, mencakup peraturan mengenai pesawat tenaga dan produksi, peraturan mengenai bejana tekan dan pesawat uap, hingga peraturan khusus pada sektor tertentu seperti pertambangan dan energi yang memiliki persyaratan keselamatan spesifik terkait perawatan peralatan operasionalnya. Kepatuhan terhadap keseluruhan regulasi sektoral yang relevan menuntut organisasi memiliki pemahaman komprehensif mengenai lanskap regulasi yang berlaku pada sektor industri spesifik tempat mereka beroperasi, yang idealnya dikelola melalui fungsi kepatuhan (*compliance*) yang terintegrasi dengan fungsi perawatan mesin secara keseluruhan.

Sertifikasi kompetensi tenaga teknik yang melaksanakan pekerjaan perawatan pada peralatan tertentu, seperti operator pesawat angkat angkut, teknisi bejana tekan, atau ahli K3 spesialis, menjadi persyaratan yang diwajibkan oleh regulasi ketenagakerjaan di Indonesia untuk jenis pekerjaan tertentu yang memiliki tingkat risiko tinggi. Kepatuhan terhadap persyaratan sertifikasi ini tidak hanya menjadi kewajiban hukum semata, tetapi juga menjadi jaminan mutu bahwa personel yang melaksanakan pekerjaan perawatan memiliki kompetensi

minimum yang dipersyaratkan untuk menjamin keselamatan pelaksanaan pekerjaan tersebut.

Harmonisasi antara standar internasional dan regulasi nasional menjadi tantangan tersendiri bagi perusahaan multinasional yang beroperasi di Indonesia, mengingat standar internasional yang diterapkan oleh perusahaan induk terkadang perlu disesuaikan dengan persyaratan regulasi nasional yang mungkin memiliki penekanan atau persyaratan teknis yang sedikit berbeda. Pendekatan yang umum diterapkan adalah mengadopsi standar yang lebih ketat di antara keduanya untuk setiap aspek tertentu, sehingga organisasi memenuhi persyaratan minimum regulasi nasional sekaligus mempertahankan konsistensi dengan standar korporat global yang mungkin menetapkan persyaratan lebih tinggi pada aspek-aspek tertentu.

Pembaruan berkelanjutan terhadap pemahaman organisasi mengenai perubahan standar dan regulasi menjadi tanggung jawab yang perlu dikelola secara aktif, mengingat standar internasional maupun regulasi nasional dapat mengalami revisi dari waktu ke waktu seiring dengan perkembangan pemahaman keteknikan dan perubahan kondisi industri. Penunjukan personel atau fungsi khusus yang bertanggung jawab memantau perkembangan standar dan regulasi yang relevan, serta mendiseminasikan perubahan tersebut kepada seluruh pihak terkait dalam organisasi, membantu memastikan praktik perawatan yang diterapkan senantiasa selaras dengan persyaratan terkini yang berlaku.

Dokumentasi kepatuhan terhadap standar dan regulasi yang berlaku menjadi bukti penting yang perlu dipelihara secara sistematis, mencakup sertifikat kompetensi personel, laporan inspeksi peralatan wajib periksa, hasil kalibrasi instrumen, hingga catatan pelatihan K3 yang telah dilaksanakan. Kelengkapan dokumentasi ini tidak hanya penting untuk keperluan audit internal maupun eksternal sebagaimana akan dibahas pada subbab berikutnya, tetapi juga menjadi perlindungan hukum bagi organisasi apabila suatu saat menghadapi investigasi terkait insiden kecelakaan kerja atau sengketa hukum lain yang berkaitan dengan kepatuhan terhadap standar keselamatan dan perawatan peralatan.

Partisipasi aktif dalam forum dan asosiasi profesi bidang keandalan dan perawatan, baik pada tingkat nasional maupun internasional, memberikan manfaat tambahan berupa akses terhadap perkembangan terkini standar dan praktik terbaik industri, sekaligus kesempatan berjejaring dengan praktisi lain yang menghadapi tantangan serupa. Keterlibatan dalam forum semacam ini juga membuka peluang bagi organisasi untuk memberikan masukan pada proses pengembangan standar baru, memastikan standar yang dihasilkan benar-benar mempertimbangkan realitas operasional industri, bukan hanya disusun dari perspektif teoretis semata tanpa mempertimbangkan tantangan implementasi praktis di lapangan.

Penerapan standar dan regulasi perawatan mesin pada akhirnya perlu dipahami bukan sebagai beban kepatuhan administratif semata, melainkan sebagai kerangka acuan yang mengkristalkan pengalaman kolektif industri secara luas mengenai praktik yang teruji efektif dan aman. Organisasi yang memandang kepatuhan standar sebagai investasi dalam kualitas dan keandalan jangka panjang, alih-alih sekadar kewajiban yang harus dipenuhi secara minimal, umumnya memperoleh manfaat yang jauh lebih besar dari penerapan standar tersebut dibandingkan organisasi yang hanya berorientasi pada pemenuhan persyaratan minimum untuk menghindari sanksi semata.

Tabel 10.2 Ringkasan Standar dan Regulasi Kunci dalam Perawatan Mesin

Standar/Regulasi	Cakupan Utama	Sifat
ISO 55000:2024	Kosakata, gambaran umum, prinsip manajemen aset	Internasional, sukarela
ISO 14224:2016	Taksonomi dan data keandalan/perawatan peralatan	Internasional, sukarela (sektor migas)
EN 13306	Terminologi baku bidang perawatan	Regional Eropa, banyak diadopsi global
SAE JA1011	Kriteria proses RCM yang sah secara metodologis	Internasional, sukarela

Standar/Regulasi	Cakupan Utama	Sifat
UU No. 1/1970 & PP No. 50/2012	Kewajiban K3 dan SMK3 di tempat kerja	Nasional Indonesia, wajib
Permenaker No. 38/2016 & No. 11/2023	Pesawat tenaga produksi; K3 ruang terbatas	Nasional Indonesia, wajib

10.4 Audit dan Evaluasi Sistem Perawatan

Audit sistem perawatan merupakan proses evaluasi sistematis yang bertujuan menilai sejauh mana praktik perawatan yang diterapkan suatu organisasi telah memenuhi standar, regulasi, dan praktik terbaik yang berlaku, sekaligus mengidentifikasi peluang perbaikan untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi keseluruhan sistem perawatan. Audit dapat dilaksanakan secara internal oleh tim organisasi sendiri, maupun secara eksternal oleh pihak independen, dengan masing-masing pendekatan memiliki kelebihan dan keterbatasan yang perlu dipertimbangkan sesuai dengan tujuan spesifik audit yang dilaksanakan.

Ruang lingkup audit sistem perawatan yang komprehensif idealnya mencakup evaluasi terhadap kebijakan dan strategi perawatan yang diterapkan, kesesuaian struktur organisasi dan kompetensi sumber daya manusia sebagaimana telah dibahas pada bab mengenai manajemen perawatan mesin, efektivitas sistem informasi dan dokumentasi perawatan, kepatuhan terhadap prosedur keselamatan kerja termasuk LOTO yang telah dibahas pada subbab sebelumnya, hingga evaluasi terhadap indikator kinerja kunci seperti MTBF, MTTR, dan OEE yang telah dibahas pada berbagai bab sepanjang buku ini.

Audit kepatuhan LOTO menjadi salah satu fokus khusus yang perlu mendapat perhatian dalam audit sistem perawatan secara keseluruhan, mengingat konsekuensi serius yang dapat timbul akibat ketidakpatuhan terhadap prosedur ini. Audit semacam ini umumnya mencakup observasi langsung pelaksanaan LOTO di lapangan, wawancara dengan personel pelaksana mengenai pemahaman prosedur, tinjauan terhadap dokumentasi pelatihan dan sertifikasi personel, serta

pemeriksaan terhadap kondisi fisik perangkat isolasi dan penguncian yang tersedia di fasilitas produksi.

Penilaian tingkat kematangan (*maturity assessment*) sistem manajemen perawatan menjadi pendekatan yang semakin banyak diterapkan dalam audit modern, mengklasifikasikan organisasi ke dalam tingkatan kematangan tertentu berdasarkan sejauh mana praktik perawatan mereka telah bergerak dari pendekatan reaktif menuju pendekatan proaktif dan optimalisasi berkelanjutan, sebagaimana konsep serupa yang telah disinggung pada bab mengenai *corrective maintenance*. Model penilaian kematangan semacam ini memberikan peta jalan yang jelas bagi organisasi mengenai tahapan pengembangan sistem perawatan mereka selanjutnya, alih-alih hanya memberikan daftar temuan ketidaksesuaian tanpa arah perbaikan yang jelas.

Temuan audit perlu didokumentasikan secara jelas beserta rekomendasi tindakan korektif yang spesifik, terukur, dan memiliki batas waktu penyelesaian yang jelas, mengingat audit yang hanya menghasilkan daftar temuan tanpa rencana tindak lanjut yang konkret cenderung tidak memberikan dampak perbaikan yang nyata bagi organisasi. Sistem pelacakan tindak lanjut audit (*audit action tracking*) yang terintegrasi dengan sistem informasi perawatan memungkinkan organisasi memantau progres penyelesaian setiap temuan audit secara sistematis, memastikan akuntabilitas yang jelas bagi setiap pihak yang bertanggung jawab menyelesaikan tindakan korektif yang telah disepakati.

Frekuensi pelaksanaan audit sistem perawatan perlu disesuaikan dengan tingkat kekritisan dan kompleksitas operasi organisasi, dengan audit komprehensif tahunan umumnya dilengkapi dengan audit terfokus yang lebih sering dilaksanakan pada area-area berisiko tinggi seperti kepatuhan LOTO atau kondisi peralatan kritis tertentu. Organisasi dengan tingkat kematangan perawatan yang tinggi umumnya juga menerapkan mekanisme audit mandiri (*self-assessment*) yang dilaksanakan secara berkala oleh tim internal sebagai pelengkap audit formal, membangun budaya evaluasi diri yang berkelanjutan alih-alih hanya bergantung pada audit eksternal yang dilaksanakan secara periodik.

Keterlibatan pihak eksternal independen dalam audit sistem perawatan, baik melalui badan sertifikasi maupun konsultan spesialis, memberikan perspektif objektif tambahan yang dapat mengungkap kelemahan sistemik yang mungkin tidak disadari oleh tim internal yang telah terlalu terbiasa dengan praktik yang berjalan sehari-hari. Sertifikasi eksternal terhadap sistem manajemen perawatan, misalnya berdasarkan standar ISO 55001 yang telah disinggung pada subbab sebelumnya, juga memberikan nilai tambah reputasional bagi organisasi di mata pelanggan, mitra bisnis, maupun regulator, sebagai bukti bahwa sistem manajemen aset dan perawatan yang diterapkan telah memenuhi standar internasional yang teruji.

Evaluasi biaya dan manfaat dari pelaksanaan audit sistem perawatan itu sendiri perlu dipertimbangkan secara proporsional, mengingat audit yang terlalu sering atau terlalu mendalam dapat menimbulkan beban administratif yang signifikan bagi organisasi tanpa memberikan nilai tambah yang sepadan, sementara audit yang terlalu jarang berisiko membiarkan kelemahan sistem perawatan berlangsung dalam waktu lama tanpa terdeteksi. Penentuan frekuensi dan kedalaman audit yang optimal idealnya didasarkan pada penilaian risiko yang mempertimbangkan konsekuensi potensial dari kegagalan sistem perawatan terhadap keselamatan, produksi, dan reputasi organisasi secara keseluruhan.

Pelibatan seluruh lapisan organisasi dalam proses audit dan evaluasi, bukan hanya manajemen dan auditor, memperkuat efektivitas mekanisme evaluasi secara keseluruhan, mengingat operator dan teknisi lapangan sering kali memiliki wawasan langsung mengenai kesenjangan antara prosedur formal dengan praktik aktual yang mungkin tidak terlihat oleh auditor yang hanya meninjau dokumentasi tanpa observasi lapangan yang mendalam. Mekanisme umpan balik dua arah, di mana temuan audit dikomunikasikan kembali kepada personel lapangan disertai kesempatan memberikan masukan mengenai kelayakan rekomendasi yang diusulkan, menghasilkan rencana tindak lanjut yang lebih realistis dan lebih besar kemungkinan keberhasilan implementasinya.

Integrasi hasil audit sistem perawatan dengan siklus perencanaan strategis organisasi secara keseluruhan memastikan bahwa temuan dan rekomendasi audit benar-benar memengaruhi keputusan alokasi sumber daya pada tingkat korporat, bukan hanya menjadi dokumen teknis yang tersimpan pada tingkat operasional semata. Organisasi dengan tingkat kematangan tinggi umumnya menyajikan ringkasan hasil audit sistem perawatan kepada manajemen puncak secara berkala, disertai implikasi bisnis dari temuan tersebut, sehingga investasi pada penyempurnaan sistem perawatan mendapatkan dukungan yang sepadan dengan kontribusinya terhadap keberlangsungan dan daya saing organisasi secara keseluruhan.

Pemanfaatan teknologi digital dalam pelaksanaan audit, seperti aplikasi audit berbasis tablet yang memungkinkan auditor mendokumentasikan temuan secara langsung disertai foto dan lokasi GPS, semakin banyak diadopsi untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi proses audit dibandingkan pencatatan manual berbasis kertas. Digitalisasi proses audit juga memudahkan analisis tren temuan dari waktu ke waktu dan antar-lokasi, memungkinkan organisasi dengan banyak fasilitas produksi mengidentifikasi pola masalah sistemik yang mungkin terjadi secara konsisten di berbagai lokasi, sehingga solusi yang dikembangkan dapat diterapkan secara terpusat alih-alih ditangani secara terpisah pada masing-masing lokasi tanpa koordinasi yang memadai.

Sebagai penutup pembahasan bab ini, keselamatan dan standar dalam perawatan mesin bukan sekadar aspek pelengkap yang ditambahkan setelah strategi perawatan teknis disusun, melainkan dimensi yang perlu terintegrasi sejak awal dalam keseluruhan sistem manajemen perawatan, sebagaimana telah ditekankan melalui pembahasan K3, prosedur LOTO, standar dan regulasi, hingga mekanisme audit dan evaluasi yang telah diuraikan. Organisasi yang berhasil mengintegrasikan aspek keselamatan dan kepatuhan standar secara harmonis dengan strategi perawatan teknis yang telah dibahas sepanjang buku ini akan memperoleh sistem perawatan yang tidak hanya efektif dan efisien, tetapi juga aman dan berkelanjutan bagi seluruh pemangku kepentingan yang terlibat.

Tabel 10.3 Contoh Ruang Lingkup Audit Sistem Perawatan Komprehensif

Area Audit	Aspek yang Dievaluasi	Sumber Bukti
Kebijakan & Strategi	Kejelasan tujuan, keselarasan dengan bisnis	Dokumen kebijakan, wawancara manajemen
Organisasi & SDM	Struktur, kompetensi, kecukupan personel	Struktur organisasi, sertifikat pelatihan
Sistem Informasi	Kelengkapan data, penggunaan CMMS	Log sistem, sampel data perintah kerja
Keselamatan Kerja	Kepatuhan LOTO, APD, prosedur K3	Observasi lapangan, catatan insiden
Kinerja Teknis	MTBF, MTTR, OEE, rasio PM:CM	Laporan kinerja, data historis

Rangkuman Bab 10

Bab ini telah menguraikan aspek keselamatan dan standar yang tidak terpisahkan dari pelaksanaan seluruh aktivitas perawatan mesin. Keselamatan dan kesehatan kerja (K3), yang diatur melalui UU No. 1 Tahun 1970 dan PP No. 50 Tahun 2012 tentang SMK3, menuntut penerapan hierarki pengendalian risiko secara konsisten, mulai dari eliminasi bahaya hingga penggunaan alat pelindung diri sebagai lapisan pertahanan terakhir.

Prosedur lock out tag out (LOTO), dengan tambahan tahap verifikasi (try out) menjadi LOTOTO, merupakan pengendalian fundamental untuk mencegah pelepasan energi berbahaya secara tidak sengaja selama pekerjaan perawatan. Standar internasional seperti ISO 55000, ISO 14224, EN 13306, dan SAE JA1011, dilengkapi dengan regulasi nasional Indonesia, memberikan kerangka acuan bagi praktik perawatan yang memenuhi kaidah teknis dan kewajiban hukum yang berlaku.

Audit dan evaluasi sistem perawatan secara berkala, mencakup kepatuhan LOTO, penilaian tingkat kematangan manajemen perawatan,

hingga pelacakan tindak lanjut temuan audit, menjadi mekanisme penting untuk memastikan sistem perawatan terus disempurnakan dari waktu ke waktu, menegaskan bahwa keselamatan dan kepatuhan standar merupakan dimensi yang terintegrasi, bukan pelengkap terpisah, dari keseluruhan sistem manajemen perawatan mesin yang telah dibahas sepanjang buku ini.

Bab ini sekaligus menutup rangkaian pembahasan sepuluh bab yang telah menguraikan keseluruhan aspek teknis dan manajerial rekayasa perawatan mesin, dari konsep dasar hingga keselamatan dan kepatuhan standar, sebelum buku ini diakhiri dengan bab penutup yang merangkum benang merah keseluruhan pembahasan dan memberikan refleksi bagi pembaca dalam menerapkan pengetahuan yang telah diperoleh pada konteks organisasi masing-masing.

Latihan dan Pertanyaan Diskusi Bab 10

1. Jelaskan hierarki pengendalian risiko dan berikan contoh penerapan masing-masing tingkatan pada konteks aktivitas perawatan mesin di suatu pabrik.
2. Uraikan jenis-jenis energi berbahaya yang perlu dikendalikan melalui prosedur LOTO, serta jelaskan mengapa setiap jenis energi memerlukan metode isolasi yang berbeda.
3. Jelaskan perbedaan antara prosedur LOTO konvensional dengan LOTOTO, serta mengapa tahap verifikasi (*try out*) menjadi pembeda penting bagi efektivitas keselamatan kerja yang sesungguhnya.
4. Diskusikan mengapa tekanan waktu produksi sering menjadi faktor yang mendorong pekerja melewati atau mempersingkat prosedur LOTO, serta strategi apa yang dapat diterapkan organisasi untuk mengatasi tantangan ini.
5. Sebutkan minimal tiga standar internasional yang relevan dengan bidang perawatan mesin, serta jelaskan kontribusi masing-masing standar tersebut terhadap praktik perawatan yang baik.

6. Uraikan ruang lingkup yang idealnya dicakup dalam audit sistem perawatan yang komprehensif, serta jelaskan pentingnya sistem pelacakan tindak lanjut audit bagi efektivitas keseluruhan proses audit.

7. Analisislah bagaimana budaya keselamatan (*safety culture*) yang matang dapat memengaruhi tingkat kepatuhan terhadap prosedur K3 dan LOTO, dibandingkan organisasi yang hanya memenuhi persyaratan K3 secara formal semata.

8. Jelaskan pentingnya pelaporan nyaris celaka (*near miss reporting*) dalam membangun budaya keselamatan proaktif, serta bagaimana organisasi dapat mendorong pelaporan yang terbuka tanpa rasa takut disalahkan.

9. Diskusikan bagaimana penilaian tingkat kematangan (*maturity assessment*) sistem manajemen perawatan dapat memberikan peta jalan pengembangan yang lebih bermanfaat dibandingkan audit yang hanya menghasilkan daftar temuan ketidaksesuaian.

10.



BAB 11
PENUTUP

Buku referensi ini telah menguraikan secara komprehensif berbagai aspek rekayasa perawatan mesin, dimulai dari konsep dasar dan ruang lingkup disiplin ini pada Bab 1, dilanjutkan dengan pemahaman mendalam mengenai keandalan dan pola kegagalan mesin pada Bab 2, kerangka manajerial dalam mengelola fungsi perawatan pada Bab 3, hingga penerapan teknis tiga strategi perawatan utama, yaitu *preventive maintenance* pada Bab 4, *predictive maintenance* pada Bab 5, dan *corrective maintenance* pada Bab 6. Pembahasan kemudian diperkaya dengan teknik analisis dan diagnostik kondisi mesin pada Bab 7, kerangka kerja integratif *reliability* centered maintenance pada Bab 8, pendekatan *total productive maintenance* yang melibatkan seluruh elemen organisasi pada Bab 9, hingga aspek keselamatan dan standar yang menaungi keseluruhan praktik perawatan pada Bab 10.

Benang merah yang menghubungkan kesebelas bab dalam buku ini adalah pemahaman bahwa rekayasa perawatan mesin bukanlah sekadar kumpulan teknik dan prosedur teknis yang berdiri sendiri-sendiri, melainkan suatu disiplin ilmu yang terintegrasi, di mana pemahaman mendalam mengenai keandalan dan pola kegagalan menjadi fondasi bagi penentuan strategi perawatan yang tepat, yang kemudian dilaksanakan melalui kombinasi optimal antara *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance* sebagaimana diarahkan oleh kerangka kerja *reliability* centered maintenance, didukung oleh budaya organisasi yang kolektif melalui *total productive maintenance*, serta senantiasa dijalankan dalam koridor keselamatan kerja dan kepatuhan standar yang ketat.

Perkembangan teknologi digital, mulai dari sensor nirkabel berbiaya rendah, komputasi awan, hingga kecerdasan buatan yang telah dibahas pada berbagai bab dalam buku ini, terus mengubah lanskap praktik rekayasa perawatan mesin secara fundamental, mendorong

pergeseran dari pendekatan yang bersifat reaktif menuju pendekatan yang semakin proaktif dan berbasis data. Meskipun demikian, sebagaimana ditekankan berulang kali sepanjang buku ini, keberhasilan penerapan teknologi secanggih apapun pada akhirnya tetap bergantung pada fondasi manajerial yang solid, kompetensi sumber daya manusia yang mumpuni, serta budaya organisasi yang benar-benar menghargai keandalan dan keselamatan sebagai nilai inti, bukan sekadar formalitas administratif belaka.

Penerapan berbagai konsep, metode, dan strategi yang telah diuraikan dalam buku ini perlu disesuaikan secara kontekstual dengan karakteristik spesifik masing-masing organisasi, mempertimbangkan skala usaha, tingkat kekritisan peralatan, ketersediaan sumber daya, serta konteks industri dan regulasi yang berlaku. Tidak terdapat satu formula tunggal yang secara universal optimal bagi seluruh organisasi, sehingga kemampuan mengadaptasi prinsip-prinsip fundamental yang telah dibahas ke dalam konteks operasional yang unik pada masing-masing organisasi menjadi keterampilan penting yang perlu terus diasah oleh setiap perekayasa perawatan sepanjang perjalanan profesionalnya.

Bagi pembaca yang berkecimpung di dunia akademik, buku ini diharapkan dapat menjadi rujukan yang memperkaya materi perkuliahan pada mata kuliah terkait keandalan, manajemen perawatan, dan rekayasa keselamatan, sekaligus mendorong penelitian lebih lanjut mengenai penerapan berbagai konsep yang telah dibahas dalam konteks industri Indonesia yang memiliki karakteristik unik tersendiri. Bagi pembaca yang berkecimpung di dunia industri, baik sebagai teknisi, insinyur, maupun manajer perawatan, buku ini diharapkan dapat menjadi panduan praktis yang membantu mereka merancang dan menyempurnakan sistem perawatan di organisasi masing-masing, dengan tetap mempertimbangkan bahwa penerapan di lapangan senantiasa menuntut penyesuaian terhadap kondisi dan keterbatasan yang dihadapi secara nyata.

Penulis berharap buku referensi ini dapat memberikan kontribusi yang bermakna bagi pengembangan keilmuan rekayasa perawatan mesin di Indonesia, baik sebagai bahan rujukan akademik

bagi mahasiswa dan pengajar di perguruan tinggi, maupun sebagai panduan praktis bagi praktisi industri yang berupaya menyempurnakan sistem perawatan di organisasi mereka masing-masing. Bidang rekayasa perawatan mesin akan terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi dan perubahan lanskap industri, sehingga pembelajaran berkelanjutan dan keterbukaan terhadap perkembangan pengetahuan baru menjadi sikap yang perlu terus dipelihara oleh setiap pembaca yang berkecimpung dalam bidang ini.

Perjalanan menuju keunggulan dalam rekayasa perawatan mesin bukanlah tujuan akhir yang dapat dicapai dan dianggap selesai pada suatu titik tertentu, melainkan proses berkelanjutan yang menuntut komitmen jangka panjang, pembelajaran terus-menerus, dan kesediaan beradaptasi terhadap perkembangan teknologi maupun perubahan kebutuhan bisnis yang senantiasa dinamis. Organisasi maupun individu yang berhasil dalam bidang ini bukanlah mereka yang menganggap telah mencapai kesempurnaan, melainkan mereka yang terus-menerus mempertanyakan dan menyempurnakan praktik yang telah diterapkan, sejalan dengan filosofi perbaikan berkelanjutan yang telah ditekankan berulang kali sepanjang buku ini.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pembaca yang telah menyertai perjalanan pembahasan sepanjang sebelas bab dalam buku ini, mulai dari konsep dasar hingga aspek keselamatan dan standar yang menaungi keseluruhan praktik rekayasa perawatan mesin. Semoga pemahaman yang diperoleh dari buku ini dapat diterapkan secara nyata dalam mendukung keandalan, keselamatan, dan produktivitas industri, sekaligus menjadi bekal berharga bagi pembaca dalam mengembangkan karier dan kontribusi mereka pada bidang rekayasa perawatan mesin di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

Akbar, M. R., & Widiasih, W. (2022). Analisis perawatan mesin bubut dengan metode *preventive maintenance* guna menghindari kerusakan secara mendadak dan untuk menghitung biaya perawatan. Jurnal SENOPATI: Sustainability, Ergonomics, Optimization, and Application of Industrial Engineering, 4(1), 32-45.

Al-Duais, F. S., Mohamed, A., Jawa, T. M., & Sayed-Ahmed, N. (2022). Optimal periods of conducting *preventive maintenance* to reduce expected downtime and its impact on improving *reliability*. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022.

Ali, A., & Abdelhadi, A. (2022). Condition-based monitoring and maintenance: State of the art review. Applied Sciences, 12(2), 688. https://doi.org/10.3390/app12020688

Amalia, W., Pangestu, A., & Oktavia, N. (2023). Pengelompokan persediaan spare parts menggunakan analisis FSN di PT. XYZ. Jurnal Teknik Industri Terintegrasi.

Arrahman, M. R., dkk. (2021). *Reliability*, *availability*, dan *maintainability* (RAM) analisis untuk evaluasi performa mesin pembangkit listrik. Power Generation Journal.

Aulia, L., Abdurahman, K., Saripah, S., Yositamibar, H., Gunawan, Z., & Setiawati, D. L. (2026). Tinjauan literatur mengenai maintenance dan *reliability* dalam manajemen operasional. RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 4(4), 12040-12047.

Aulia, R. A., & Widjajati, E. P. (2021). Analisis kebijakan perawatan mesin secara corrective dan *preventive* dengan metode RCM di CV XYZ. JUMINTEN: Jurnal Manajemen Industri dan Teknologi.

Biswas, J. (2024). *Total productive maintenance*: An in-depth review with a focus on *overall equipment effectiveness* measurement. International Journal of Research in Industrial Engineering, 13(4), 376-383. https://doi.org/10.22105/riej.2024.453380.1436

Chen, Y., Li, Z., & Wu, H. (2021). Influence of inlet configuration on the hydraulic performance and *reliability* of centrifugal slurry pumps. Engineering Failure Analysis, 122, 105254. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105254

Dobra, P., & Jósvai, J. (2024). Prediction of *overall equipment effectiveness* in assembly processes using machine learning. Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering, 74, 57-64. https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0026

Fauziyah, N., Firmansyah, H., & Wulandari, E. (2022). Analisis perawatan preventif mesin molding dengan metode *reliability* centered maintenance. Jurnal Rekayasa Sistem Industri.

Feng, K., Ji, J. C., Ni, Q., & Beer, M. (2023). A review of vibration-based gear wear monitoring and prediction techniques. Mechanical Systems and Signal Processing, 182, 109605.

Geisbush, J., & Ariaratnam, S. T. (2023). *Reliability* centered maintenance (RCM): Literature review of current industry state of practice. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 29(2), 313-337. https://doi.org/10.1108/JQME-02-2021-0018

International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of *reliability* and maintenance data for equipment. ISO.

International Organization for Standardization. (2024). ISO 55000:2024 Asset management — Vocabulary, overview and principles. ISO.

Kulshrestha, N., Agrawal, S., & Shree, D. (2024). Spare parts management in industry 4.0 era: a literature review. Journal of

Quality in Maintenance Engineering, 30(1), 248-283. https://doi.org/10.1108/JQME-04-2023-0037

Lee, K. L., Teong, C. X., Alzoubi, H. M., Alshurideh, M. T., Khatib, M. E., & Al-Gharaibeh, S. M. (2024). Digital supply chain transformation: The role of smart technologies on *operational* performance in manufacturing industry. International Journal of Engineering Business Management, 16. https://doi.org/10.1177/18479790241234986

Liew, C. F., Prakash, J., & Ong, K. S. (2024). Equipment cost efficiency: A comprehensive metric for evaluating *operational* and financial performance in manufacturing. Manufacturing Letters, 39, 16-19. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.12.002

Lin, T., Song, L., Cui, L., & Wang, H. (2024). Advancing RUL prediction in mechanical systems: A hybrid deep learning approach utilizing non-full lifecycle data. Advanced Engineering Informatics, 61, 102524. https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102524

Melani, A. H. de A., Michalski, M. A. de C., et al. (2023). *Reliability* and risk centered maintenance: A novel method for supporting maintenance management. Applied Sciences, 13(19), 10605. https://doi.org/10.3390/app131910605

Molęda, M., Małysiak-Mrozek, B., & Sunderam, V. (2023). From corrective to *predictive maintenance*—a review of maintenance approaches for the power industry. Sensors, 23(13), 5970. https://doi.org/10.3390/s23135970

Nasution, M., Bakhori, A., & Novarika, W. (2021). Manfaat perlunya manajemen perawatan untuk bengkel maupun industri. Buletin Utama Teknik, 16(3), 248-252.

Nauli Siregar, C. T., Kindangen, P., & Debbie Palandeng, I. (2022). Evaluation of maintenance on production machinery and equipment at PT. Multi Nabati Sulawesi Bitung City. Jurnal EMBA, 10(3), 428-437.

Nugroho, T., Wulandari, R., & Sari, D. (2021). Efektivitas simulasi prosedur LOTO dalam meningkatkan pemahaman keselamatan kerja pada pekerja maintenance. Jurnal Teknik Industri dan Sistem Informasi, 12(1), 45-52.

Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2023 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Ruang Terbatas.

Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2016 tentang Pesawat Tenaga dan Produksi.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja.

Prihadianto, B. D., dkk. (2023). Perhitungan persediaan fast moving spareparts dengan metode min-max stock di PT Armada Hada Graha. Jurnal Infotekmesin, 14(2).

Purba, T., & Marikena, N. (2021). Analysis of forklift maintenance productivity using the method of application of *total productive maintenance* (TPM) at PT. XYZ. IESM Journal, 2(1).

Rachmayanti, I., & Prasetyawan, Y. (2021). Perancangan kebijakan perawatan menggunakan metode RCM II untuk meningkatkan nilai *overall equipment effectiveness* mesin filling R-24 A (Studi kasus PT X). Jurnal Teknik ITS, 9(2), 264-271. https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i2.55469

Rahman, A. (2026). Integrasi analisis *reliability* dan *availability* dalam penentuan interval perawatan optimal excavator. Jurnal Teknologi Terpadu (JTT).

Rahmawati, D., & Nugroho, H. (2022). Implementasi *preventive maintenance* berbasis *Fault Tree Analysis* untuk meningkatkan *reliability* mesin produksi. Jurnal Rekayasa dan Sistem Industri, 14(2), 97-106.

Ramadhan, I., & Widiasih, W. (2023). Analisis penggantian dan perawatan pada papermachine bagian wire dan dryer

menggunakan metode *reliability* centered maintenance dan age replacement pada PT. X. Jurnal Tekstil: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Bidang Tekstil dan Manajemen Industri, 6(1), 1-14. https://doi.org/10.59432/jute.v6i1.60

Ramadhani, A. A., & Nugroho, S. (2022). Pengendalian persediaan sparepart mesin produksi pada PT Semen Gresik pabrik Rembang menggunakan metode EOQ dan POQ. Prosiding Seminar Nasional Teknik Industri.

Rojek, I., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Piechowski, M., & Mikołajewski, D. (2023). An artificial intelligence approach for improving maintenance to supervise machine failures and support their repair. Applied Sciences, 13(8), 4971. https://doi.org/10.3390/app13084971

Romanssini, M., de Aguirre, P. C. C., Compassi-Severo, L., & Girardi, A. G. (2023). A review on vibration monitoring techniques for *predictive maintenance* of rotating machinery. Eng, 4(3), 1797-1817. https://doi.org/10.3390/eng4030102

Rosati, R., Romeo, L., Cecchini, G., Tonetto, F., Viti, P., Mancini, A., & Frontoni, E. (2023). From knowledge-based to big data analytic model: A novel IoT and machine learning based decision support system for PdM in Industry 4.0. Journal of Intelligent Manufacturing, 34(1), 107-121. https://doi.org/10.1007/s10845-022-01960-x

Saferi, R., & Wanda, O. D. (2023). Analisis kerusakan bantalan induced draft fan di PT. Semen Padang dengan menggunakan metode RCM. Jurnal Teknik Mesin, 13(1).

Sagne, M., & Niang, M. F. (2022). Maintenance strategies and spare parts inventory management for use of reconditioned items. Engineering, 14, 360-370. https://doi.org/10.4236/eng.2022.148028

Setiawan, B., & Nugroho, F. (2022). Analisis *reliability* sistem menggunakan metode *Fault Tree Analysis* pada proses produksi industri. Jurnal Teknologi.

Simanungkalit, R. M. (2023). Analisis penerapan sistem perawatan menggunakan *reliability* centered maintenance (RCM) untuk meningkatkan keandalan mesin. Jurnal Teknik Industri, 24(2), 101-110.

Singh, V., Patel, R., & Kumar, M. (2022). Procedural challenges in LOTO system adoption: A multi-factory analysis. Journal of Industrial Engineering and Management, 15(2), 273-289. https://doi.org/10.3926/jiem.3715

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja.

Waluyo, A. A., & Widyaningrum, D. (2023). Perbaikan sistem perawatan mesin forming dengan metode FMECA dan RCM berdasarkan analisis OEE pada PT XYZ. Jurnal Sistem dan Manajemen Industri, 8(4), 7281-7290.

Weeks, D. J., & Leite, F. (2022). Minimising facility *corrective maintenance*: Benchmarking preventative-to-*corrective maintenance* ratios using maintenance data and building age in dormitories. Journal of Management in Engineering, 38, 04021086.

Wolska, M., Gorewoda, T., Roszak, M., & Gajda, L. (2023). Implementation and improvement of the *total productive maintenance* concept in an organization. Encyclopedia, 3(4), 1537-1564. https://doi.org/10.3390/encyclopedia3040110

Wood, J. B., Mazhar, M. I., & Howard, I. (2023). An investigation into bearing fault diagnostics for condition-based maintenance using band-pass filtering and wavelet decomposition analysis of vibration signals. Journal of Physics: Conference Series, 2467, 012017.

Yang, X., He, Y., Zhou, D., & Zheng, X. (2022). Mission *reliability*-centered maintenance approach based on quality stochastic flow network for multistate manufacturing systems. Eksploatacja i Niezawodność, 24(3), 455-467. https://doi.org/10.17531/ein.2022.3.7

Zehra, K., Mirjat, N., Shaikh, S., Harijan, K., Kumar, L., & El Haj Assad, M. (2024). Optimizing auto manufacturing: A holistic approach integrating *overall equipment effectiveness* for enhanced efficiency and sustainability. Sustainability, 16, 2973. https://doi.org/10.3390/su16072973

GLOSARIUM

Autonomous maintenance	Perawatan mandiri yang dilaksanakan oleh operator lini produksi, mencakup pembersihan, pelumasan, dan inspeksi dasar peralatan yang mereka operasikan sehari-hari.
Availability	Proporsi waktu suatu peralatan berada dalam kondisi siap beroperasi dibandingkan total waktu yang direncanakan untuk beroperasi.
Bathtub Curve	Model yang menggambarkan tiga fase laju kegagalan komponen sepanjang siklus hidupnya, yaitu *infant mortality, random failure*, dan *wear-out failure*.
CMMS	Sistem informasi berbasis komputer untuk mengelola data aset, perintah kerja, inventori suku cadang, dan penjadwalan perawatan.
Condition monitoring	Proses pengamatan berkelanjutan terhadap parameter operasional dan fisik suatu peralatan untuk mendeteksi tanda-tanda awal kegagalan.
Corrective maintenance	Tindakan perawatan yang dilaksanakan setelah suatu peralatan mengalami kegagalan atau penurunan performa di bawah standar yang dipersyaratkan.
Failure Mode	Mekanisme spesifik yang menyebabkan terjadinya suatu kegagalan fungsional pada komponen atau sistem.

Fault Tree Analysis	Metode analisis kegagalan deduktif yang menyusun diagram pohon logika menghubungkan kejadian kegagalan puncak dengan berbagai kejadian dasar penyebabnya.
FMEA	Metode analisis kegagalan induktif yang mengidentifikasi seluruh kemungkinan mode kegagalan komponen beserta dampaknya terhadap sistem, diberi peringkat berdasarkan tingkat keparahan, frekuensi, dan kemudahan deteksi.
Focused Improvement	Pilar TPM yang menekankan perbaikan berkelanjutan melalui tim lintas fungsi yang menyelesaikan masalah spesifik penghambat efektivitas peralatan.
***Lock Out Tag Out* (LOTO)**	Prosedur keselamatan kerja untuk mengisolasi seluruh sumber energi berbahaya pada peralatan yang sedang menjalani perawatan, guna mencegah aktivasi tidak sengaja.
Maintainability	Kemudahan suatu sistem untuk dikembalikan ke kondisi operasionalnya setelah mengalami kegagalan, umumnya diukur melalui mean time to repair (MTTR).
OEE	Indikator kunci yang mengukur efektivitas peralatan dari tiga dimensi: *availability*, performance, dan quality.
P-F Interval	Selang waktu antara terdeteksinya gejala awal kegagalan potensial (P) hingga kegagalan fungsional benar-benar terjadi (F).

Planned maintenance	Perawatan terencana yang dilaksanakan oleh tim teknisi perawatan profesional berdasarkan jadwal dan analisis data kegagalan.
Predictive maintenance	Strategi perawatan yang mendasarkan keputusan tindakannya pada kondisi aktual peralatan, dipantau melalui berbagai teknik pengukuran dan analisis data.
Preventive maintenance	Strategi perawatan yang dilaksanakan secara terjadwal berdasarkan interval waktu atau penggunaan tertentu untuk mencegah kegagalan sebelum terjadi.
Reliability	Probabilitas suatu komponen atau sistem menjalankan fungsi yang dipersyaratkan dalam kondisi operasi tertentu selama periode waktu yang ditentukan.
Root Cause Analysis	Proses sistematis untuk mengidentifikasi akar penyebab suatu kegagalan guna mencegah terulangnya kejadian serupa di masa mendatang.
Run to Failure	Strategi membiarkan komponen beroperasi hingga gagal tanpa tindakan pencegahan proaktif, umumnya diterapkan pada komponen non-kritis berbiaya rendah.
Six Big Losses	Enam kerugian besar yang menghambat efektivitas peralatan dalam kerangka TPM: kegagalan peralatan, penyetelan, berhenti sesaat, penurunan kecepatan, cacat proses, dan penurunan hasil produksi awal.

Troubleshooting	Proses sistematis untuk mengidentifikasi penyebab suatu gejala kerusakan atau kegagalan mesin sebelum tindakan perbaikan yang tepat dilaksanakan.
Wrench Time	Proporsi waktu kerja produktif teknisi yang benar-benar digunakan untuk mengerjakan tugas perawatan, dibandingkan waktu yang terbuang untuk aktivitas non-produktif.

INDEKS

A

analisis, 1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 17, 18, 21, 23, 25, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 47, 48, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 67, 72, 73, 78, 83, 87, 88, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 101, 105, 106, 121, 122, 124, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 137, 139, 140, 141, 142, 143, 145, 146, 148, 149, 150, 151, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 178, 179, 186, 188, 189, 191, 200, 206, 209, 216, 221, 225, 228, 230, 234, 235
availability, 25, 34, 35, 36, 37, 38, 58, 59, 60, 105, 192, 194, 197, 225, 228, 234

B

bathtub curve, 39, 60

C

condition monitoring, 94, 95, 96, 102, 127, 131, 134, 136, 137, 139, 140, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 151
corrective maintenance, 1, 2, 3, 6, 22, 29, 57, 74, 103, 104, 106, 107, 108, 117, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 175, 184, 197, 209, 214, 221, 230, 242

G

getaran, 10, 18, 22, 40, 43, 47, 49, 67, 82, 92, 94, 95, 96, 101, 110, 113, 114, 117, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 137, 145, 148, 149, 150, 151, 202

I

inspeksi, 5, 6, 7, 10, 14, 17, 19, 22, 36, 38, 40, 43, 77, 82, 83, 84, 95, 114, 138, 147, 151, 161, 164, 166, 167, 169, 176, 181, 183, 184, 186, 187, 211, 233
investasi, 8, 10, 12, 14, 17, 23, 26, 28, 30, 31, 35, 38, 51, 65, 68, 82, 86, 87, 91, 92, 99, 100, 101, 104, 114, 119, 140, 143, 157, 158, 167, 169, 172, 179, 180, 190, 192, 193, 194, 212, 216

K

kaizen, 178, 182, 188, 189, 191
keandalan, i, 1, 2, 3, 6, 7, 8, 13, 14, 15, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 47, 56, 58, 59, 65, 73, 74, 78, 80, 85, 87, 92, 99, 100, 101, 105, 113, 117, 118, 124, 133, 140, 153, 154, 155, 156, 157, 165, 167, 171, 172,173, 175, 176, 177, 178, 179, 181, 183, 185, 190, 194, 196, 197, 209, 212, 221, 222, 223, 230, 242
komponen, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 17, 20, 22, 23, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 60, 67, 68, 71, 77, 78, 79, 82, 83, 86, 87, 88, 91, 92, 94, 95, 96, 97, 101, 104, 105, 106, 107, 109, 110, 111, 113, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 125, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 135, 138, 139, 140, 141, 142, 144, 149, 153, 154, 155, 159, 161, 162, 164, 165, 170, 173, 188, 192, 193, 198, 199, 200, 201, 204, 233, 234, 235

M

maintainability, 25, 34, 35, 36, 37, 58, 59, 225
mesin, i, ii, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 64, 65, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74,78, 80, 82, 83, 88, 92, 93,

94, 96, 97, 98, 101, 102, 105, 109, 110, 116, 121, 127, 129, 131, 132, 135, 144, 146, 148, 149, 151, 167, 170, 175, 177, 178, 182, 185, 190, 192, 193, 196, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 209, 210, 212, 213, 216, 217, 218, 221, 222, 223, 225, 226, 228, 229, 230, 236, 242

O

organisasi, 1, 2, 6, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 25, 27, 28, 30, 31, 38, 44, 51, 53, 55, 56, 58, 59, 60, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 72, 74, 75, 76, 80, 81, 85, 86, 93, 98, 99, 100, 101, 104, 105, 106, 107, 108, 110, 112, 113, 114, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 131, 133, 137, 140, 142, 143, 146, 147, 148, 151, 154, 156, 157, 158, 161, 162, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 186, 189, 190, 191, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 201, 202, 207, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 221, 222, 223

P

pelumas, 46, 48, 51, 55, 83, 84, 88, 94, 101, 131, 137, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 148, 149, 150
perawatan, i, ii, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 58, 59, 60, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73,74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 85, 86, 87, 89, 91, 92, 94, 97, 99, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 133, 135, 137, 143, 144, 146, 147, 148, 150, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159,160, 161, 162, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 190, 193, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 221, 222, 223, 225, 226, 227, 228, 230, 233, 234, 235, 236, 242
preventive maintenance, 1, 2, 6, 17, 20, 22, 30, 34, 72, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89, 91, 93, 100, 101, 104, 106, 123, 164, 171, 177, 209, 221, 225, 228
produksi, i, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 33, 34, 35, 36, 39, 41, 44, 45, 47, 52, 54, 56, 59, 60, 61, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 73, 74, 75, 77, 78, 80, 82, 84, 87, 92, 94, 95, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 112, 113, 117, 118, 121, 122, 125, 136, 146, 149, 155, 157, 160, 162, 163, 169, 170, 172, 177, 178, 180, 181, 182, 184, 185, 189, 193, 194, 195, 196, 198, 200, 205, 209, 210, 213, 214, 215, 216, 218, 228, 229, 233, 235
produktivitas, i, 13, 17, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 64, 74, 75, 177, 223, 242

R

regulasi, 2, 7, 13, 20, 119, 156, 162, 199, 205, 209, 210, 211, 212, 213, 216, 217, 222

S

sistem, i, 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 57, 59, 60, 64, 65, 67, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 86, 89, 92, 93, 94, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 104, 105, 106, 110, 111, 112, 116, 117, 119, 120, 121, 122, 123, 125, 126, 127, 130, 132, 135, 137, 138, 139, 140, 142, 144, 145, 146, 149, 150, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 164, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 178, 179, 181, 184, 186, 188, 190, 193, 197, 199, 204, 205, 206, 207, 213, 214, 215, 216, 217, 219, 222, 223, 229, 230, 233, 234, 235, 242
standar, 1, 2, 3, 7, 13, 14, 20, 21, 34, 35, 46, 49, 56, 71, 72, 80, 81, 88, 103, 116, 119, 123, 132, 133, 137, 142, 154, 156, 158, 159, 160, 163, 174, 175, 181, 183, 192, 197, 204, 206, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 215, 216, 217, 218, 221, 223, 233

T

troubleshooting, 105, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 121, 125, 126, 127, 184, 239

BIOGRAFI PENULIS



Fardinal, SST., MPdT.

Lahir di Padang, 18 Maret 1983. Lulus D4 Teknik K3 di PPNS ITS Surabaya tahun 2006, S2 Pendidikan Teknik Mesin tahun 2017. Saat ini sebagai Dosen di Politeknik Negeri Padang. Mata Kuliah yang diampu Pneumatik dan Hidrolik, K3 dan Standar Internasional, K3 Standar Mutu,. Memiliki Sertifikasi Keahlian Bidang K3 dan Asesor Kompetensi Untuk Skema *Automation Maintenance Junior Engineer*.



Ir. Adriansyah, ST, MT

Lahir di Padang, 9 November 1964. Lulus S2 di Program Studi Maintenance Teknik mesin ISTN tahun 2010 dan mendapat gelar Profesi Insinyur di Politeknik Negeri Batam pada tahun 2023. Dari tahun 1997 sampai sekarang jadi dosen tetap di Jurusan Mesin Prodi D3 Tenik Mesin di Politeknik Negeri padang. Mata kuliah yang diampu: Praktek Labor Mesin, Praktek Labor Listrik dan Getaran Mekanis.



Rivanol Chadry ST, MT

Lahir Di Padang, 15 Desember 1969. Lulus S2 Di Jurusan Tenik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia tahun 2007. Saat ini sebagai Dosen di Politeknik Negeri Padang Program Studi D3 Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin dengan mengampu matakuliah Teori Perawatan Dasar dan Praktikum Perawatan Dan perbaikan Mesin Mesin Industri 1 dan 2.

Ir. Menhendry, Dipl. Ing. HTL, M.Eng



Lahir di Bukittinggi 4 April 1966. Lulus S2 dari University of South Australia tahun 2007. Saat ini bekerja sebagai Dosen pada Politeknik Negeri Padang, pada Jurusan Teknik Mesin.



Rakiman, ST., MT

Lahir di Sidomulyo, 2 Mei 1965. Lulus S2 di Program Studi Teknik Mesin-Sistem Manufaktur Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2007. Saat ini sebagai Dosen di Politeknik Negeri Padang pada Program Studi D3 Teknik Mesin.



Rina, S.Pd., M.T

Lahir di Padang, 29 April 1986. Lulus S2 di Program Studi Rekayasa Konversi Energi Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2014. Saat ini bekerja sebagai dosen di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Padang.

REKAYASA PERAWATAN MESIN

Pendekatan Preventive, Predictive, dan Corrective Maintenance

Buku "Rekayasa Perawatan Mesin: Pendekatan Preventive, Predictive, dan Corrective maintenance" hadir sebagai rujukan komprehensif bagi mahasiswa, akademisi, dan praktisi industri yang ingin memahami secara mendalam bagaimana keandalan dan produktivitas mesin industri dijaga melalui pengelolaan perawatan yang sistematis. Melalui sebelas bab yang tersusun runtut, buku ini mengantarkan pembaca mulai dari konsep dasar dan keandalan mesin, manajemen perawatan, hingga tiga strategi utama perawatan modern: preventive, predictive, dan corrective maintenance. Setiap bab dilengkapi dengan tabel, diagram visual, rangkuman, dan soal latihan untuk memperdalam pemahaman, sehingga buku ini diharapkan menjadi jembatan antara teori keandalan mesin dan praktik nyata di lapangan, membekali pembaca dengan kerangka berpikir yang kokoh untuk merancang, menerapkan, dan menyempurnakan sistem perawatan mesin di berbagai sektor industri, khususnya dalam konteks industri nasional Indonesia.

PT MEDIA PENERBIT INDONESIA

mediapenerbitindonesia.com
+6281362150605
Penerbit Idn
@pt.mediapenerbitidn

ISBN 978-634-316-101-1