

Modul Kuliah

Pemeliharaan Mesin Industri: Konsep, Strategi, dan Keandalan Sistem

Mata Kuliah Teknik Pemeliharaan Mesin

Penyusun:

Indra Feriadi

Angga Sateria

Program Studi Teknik Perawatan dan Perbaikan Mesin

Jurusan Rekayasa Mesin

Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

2025

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya modul **Pemeliharaan Mesin Industri: Konsep, Strategi, dan Keandalan Sistem** ini dapat disusun dan disajikan sebagai salah satu bahan ajar mata kuliah **Teknik Pemeliharaan Mesin** pada Program Studi D3 Teknik Perawatan dan Perbaikan Mesin di Jurusan Rekayasa Mesin Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung.

Modul ini disusun sebagai upaya mendukung pencapaian capaian pembelajaran lulusan yang menekankan penguasaan kompetensi teknis, kemampuan analitis, serta keterampilan praktis dalam bidang pemeliharaan dan perbaikan mesin industri. Dalam konteks pendidikan vokasi, penguasaan konsep pemeliharaan mesin tidak hanya bersifat teoritis, tetapi harus mampu diaplikasikan secara nyata dalam menganalisis kondisi mesin, mengidentifikasi potensi kerusakan, serta menentukan strategi pemeliharaan yang tepat dan efisien.

Materi dalam modul ini dirancang secara sistematis dan bertahap, mencakup konsep dasar pemeliharaan mesin, strategi dan jenis pemeliharaan, analisis keandalan dan ketersediaan mesin, hingga indikator kinerja pemeliharaan yang digunakan secara luas di industri. Penyajian materi dilengkapi dengan contoh kasus, latihan soal, dan pendekatan analitis yang relevan dengan kebutuhan dunia kerja, sehingga diharapkan mampu menjembatani kesenjangan antara teori di kelas dan praktik di lapangan.

Kami berharap modul ini dapat menjadi pedoman pembelajaran yang efektif bagi mahasiswa, serta menjadi referensi bagi dosen dalam melaksanakan proses pembelajaran yang terstruktur, kontekstual, dan berorientasi pada peningkatan kompetensi lulusan. Kritik dan saran yang konstruktif sangat kami harapkan demi penyempurnaan modul ini di masa mendatang.

Akhir kata, semoga modul ini dapat memberikan manfaat yang optimal dan berkontribusi nyata dalam mencetak tenaga ahli madya yang profesional, kompeten, dan siap menghadapi tantangan industri modern.

Sungailiat, September 2025
Ketua Program Studi
D3 Teknik Perawatan dan
Perbaikan Mesin

DAFTAR ISI

Sampul	i
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iii
Modul 1: Konsep Pemeliharaan dalam Industri Modern	1
1.1 Evolusi Peran Pemeliharaan Mesin	1
1.2 Tujuan dan Manfaat Pemeliharaan Mesin	1
1.3 Pemeliharaan Mesin dalam Kerangka Industri 4.0	2
1.4 Kategori dan Strategi Pemeliharaan	3
Latihan	6
Daftar Pustaka	8
Modul 2: Konsep RAM (Reliability, Availability, Maintainability)	9
2.1 Keandalan Mesin (Reliability)	9
2.2 Ketersediaan Mesin (Availability)	11
2.3 Kemudahan Pemeliharaan (Maintainability)	12
2.4 Keterkaitan dan Aplikasi Praktis Konsep RAM	13
2.5 Perkembangan Implementasi Konsep RAM dalam Era Industri 4.0	14
Latihan	16
Daftar Pustaka	16
Modul 3: Indikator Kinerja Pemeliharaan Mesin: MTBF, MTTR, OEE	18
3.1 Mean Time Between Failures (MTBF)	18
3.2 Mean Time To Repair (MTTR)	19
3.3 Overall Equipment Effectiveness (OEE)	21
3.4 Six Big Losses dalam Sistem Produksi	23
3.5 Hubungan Simbiosis antara MTBF, MTTR, dan OEE	26
Latihan	27
Daftar Pustaka	29
Modul 4: Dampak Pemeliharaan Terhadap Keselamatan dan Biaya	30
4.1 Dampak terhadap Keselamatan Kerja	30
4.2 Dampak terhadap Biaya	31
4.3 Titik Temu: Keselamatan dan Biaya sebagai Dua Sisi Mata Uang yang Sama	32
Latihan	33
Daftar Pustaka	33
Modul 5: Mini-Case: Analisis Kerugian Downtime Akibat Planned VS Unplanned Maintenance	34
5.1 Latar Belakang Kasus	34
5.2 Analisis Insiden dan Perhitungan Kerugian	34
5.3 Analisis Perbandingan dan Akar Masalah	35
5.4 Rekomendasi Solusi Berbasis Bukti	36
Latihan	37
Daftar Pustaka	38
Lampiran	39
Kunci Jawaban Latihan	39

Modul 1

Konsep Pemeliharaan dalam Industri Modern

Capaian Pembelajaran:

Setelah mengikuti Modul ini, mahasiswa mampu menjelaskan konsep perkembangan pemeliharaan industri modern, mengelompokkan kategori strategi pemeliharaan, serta mengaplikasikan prinsip dasar pemilihan strategi pemeliharaan berdasarkan kritikalitas aset secara sistematis dan tepat.

1.1 Evolusi Peran Pemeliharaan: Dari Fungsi Biaya ke Strategi Keunggulan Kompetitif

Dalam konteks industri modern, pemeliharaan (*maintenance*) telah mengalami evolusi paradigma yang signifikan. Awalnya, pemeliharaan dipandang sebagai fungsi pendukung yang bersifat reaktif—suatu "keharusan" yang hanya dijalankan ketika mesin mengalami kerusakan (Dhillon, 2006). Konsep ini, yang dikenal sebagai pemeliharaan korektif (*Corrective Maintenance*), menjadikan pemeliharaan sebagai pusat biaya (*cost center*) yang tidak memberikan nilai tambah secara langsung.

Seiring dengan meningkatnya kompleksitas sistem produksi dan tuntutan kompetisi global, pandangan ini berubah total. Pemeliharaan kini dipahami sebagai fungsi strategis yang integral bagi keberlangsungan operasi dan penciptaan nilai tambah (Wireman, 2010). Menurut Nakajima (1988) dalam konsep *Total Productive Maintenance* (TPM), tujuan pemeliharaan adalah memaksimalkan efektivitas peralatan dengan menghilangkan enam kerugian besar (*six big losses*), yaitu: kerusakan mesin, pengaturan (*set-up*) dan penyetelan (*adjustment*), menganggur (*idling*) dan penghentian kecil (*minor stoppages*), penurunan kecepatan operasi, cacat proses, dan kerugian hasil pada saat *start-up*.

Dalam era Revolusi Industri 4.0, konsep pemeliharaan semakin terintegrasi dengan teknologi digital. Lee et al. (2014) memperkenalkan konsep *Cyber-Physical Systems* (CPS), di mana aset fisik terhubung secara konstan dengan dunia digital melalui sensor dan *Internet of Things* (IoT). Dalam sistem ini, pemeliharaan berevolusi menjadi layanan yang cerdas dan prediktif, yang mampu beroperasi secara semi-otonom dan mengambil keputusan berdasarkan analisis data secara *real-time*. Pemeliharaan tidak lagi hanya tentang memperbaiki mesin, tetapi tentang memastikan ketersediaan, keandalan, dan keberlanjutan seluruh sistem produksi.

Evolusi pemeliharaan di atas menunjukkan bahwa fungsi ini telah bertransformasi dari aktivitas reaktif yang berorientasi biaya menjadi komponen strategis yang berperan penting dalam menciptakan produktivitas, efisiensi, dan daya saing industri melalui penerapan prinsip manajemen modern dan teknologi digital.

1.2 Tujuan dan Manfaat Pemeliharaan Modern

Penerapan konsep pemeliharaan modern bertujuan untuk mencapai beberapa sasaran strategis (Mobley, 2002):

1. Meningkatkan keandalan dan ketersediaan (*Availability*).
Keandalan mesin yang tinggi mengurangi frekuensi kegagalan, sementara ketersediaan yang tinggi memastikan mesin siap beroperasi ketika dibutuhkan. Kombinasi keduanya secara langsung meningkatkan kapasitas produksi.
2. Meminimalkan biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost*).
Biaya kepemilikan suatu aset tidak hanya meliputi harga beli, tetapi juga biaya operasi dan pemeliharaan selama masa pakainya. Pemeliharaan yang proaktif dapat secara signifikan mengurangi biaya operasional jangka panjang, jauh melampaui investasi awalnya.
3. Menjamin kualitas produk.
Peralatan yang berkinerja optimal dan terkonsumsi dengan baik akan menghasilkan produk dengan spesifikasi yang konsisten dan tingkat cacat yang minimal (Nakajima, 1988).
4. Meningkatkan keselamatan kerja dan kepatuhan lingkungan.
Peralatan yang terpelihara dengan baik mengurangi risiko kecelakaan kerja yang disebabkan oleh kegagalan fungsi. Selain itu, pemeliharaan yang baik juga memastikan peralatan pengendali polusi berfungsi dengan optimal, sehingga mematuhi regulasi lingkungan.
5. Mendukung Keberlanjutan (*Sustainability*).
Dengan memperpanjang umur aset dan mengoptimalkan konsumsi energi (misalnya, dengan menjaga motor listrik dan sistem pneumatik tetap efisien), pemeliharaan berkontribusi langsung pada prinsip-prinsip ekonomi sirkular dan operasi yang ramah lingkungan.

Tujuan pemeliharaan modern secara keseluruhan adalah memastikan aset industri beroperasi secara andal, efisien, aman, dan berkelanjutan melalui pendekatan proaktif yang mengoptimalkan seluruh siklus hidup peralatan. Pemeliharaan tidak hanya berfokus pada pencegahan kegagalan untuk meningkatkan keandalan dan ketersediaan, tetapi juga mengurangi biaya jangka panjang melalui pengelolaan *life cycle cost* yang efektif. Selain itu, kinerja peralatan yang optimal mendukung konsistensi kualitas produk, meningkatkan keselamatan kerja, memastikan kepatuhan terhadap standar lingkungan, serta memperpanjang umur aset dan mengurangi konsumsi energi, sehingga selaras dengan tujuan keberlanjutan industri modern.

1.3 Pemeliharaan dalam Kerangka Industri 4.0

Integrasi teknologi digital telah melahirkan konsep "*Smart Maintenance*" atau Pemeliharaan Cerdas. Konsep ini dibangun di atas beberapa pilar teknologi (Dalzochio et al., 2020):

- Internet of Things (IoT) dan Sensor: Sensor yang tertanam pada peralatan mengumpulkan data secara terus-menerus mengenai kondisi mesin, seperti getaran, suhu, arus listrik, dan tekanan.

- Big Data dan Analytics: Data dalam volume besar (big data) dari sensor dianalisis menggunakan algoritma machine learning dan artificial intelligence (AI) untuk mengidentifikasi pola, anomali, dan tren yang mengindikasikan potensi kegagalan.
- Komputasi Awan (Cloud Computing): Memungkinkan penyimpanan dan pemrosesan data secara terpusat, fleksibel, dan dapat diakses dari mana saja, memfasilitasi kolaborasi dan monitoring dari jarak jauh.
- Digital Twin: Model virtual dari aset fisik yang disinkronkan dengan data real-time. Digital twin memungkinkan simulasi, pengujian, dan pemantauan kinerja aset tanpa perlu mengganggu operasi fisik, sehingga perencanaan pemeliharaan dapat menjadi lebih akurat.

Dengan kerangka ini, pemeliharaan berubah dari kegiatan yang berbasis jadwal (*time-based*) menjadi berbasis kondisi yang sesungguhnya (*condition-based*), dan akhirnya menjadi prediktif dan preskriptif, yang akan dibahas lebih detail pada subbab berikutnya.

1.4 Kategori Pemeliharaan (CM, PM, PdM, Proactive)

Dalam praktiknya, strategi pemeliharaan dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis berdasarkan waktu dan pendekatan intervensinya. Pemahaman terhadap setiap kategori ini sangat penting untuk merancang strategi pemeliharaan yang efektif dan efisien.

1.4.1 Pemeliharaan Korektif (*Corrective Maintenance - CM*)

Pemeliharaan Korektif atau pemeliharaan reaktif adalah bentuk pemeliharaan paling dasar, di mana tindakan perbaikan dilakukan setelah suatu kegagalan atau kerusakan terjadi (Mobley, 2002).

Karakteristik:	▪ Bersifat reaktif ("<i>run-to-failure</i>"). ▪ Tidak ada perencanaan sebelumnya. ▪ Biaya perbaikan seringkali tinggi karena kerusakan mungkin sudah parah. ▪ Menyebabkan downtime produksi yang tidak terencana dan berdampak pada hilangnya pendapatan.
Kapan Digunakan:	CM dapat diterapkan secara sengaja untuk komponen non-kritis yang: ▪ Biaya penggantian rendah. ▪ Kegagalannya tidak mengganggu keselamatan atau proses produksi secara signifikan. ▪ Biaya untuk menerapkan strategi pemeliharaan lainnya lebih tinggi daripada biaya perbaikannya.
Kelebihan:	Tidak memerlukan investasi awal dalam perencanaan dan monitoring.
Kekurangan:	Risiko <i>downtime</i> yang lama, biaya perbaikan tak terduga yang tinggi, dan potensi dampak keselamatan yang serius.

1.4.2 Pemeliharaan Preventif (Preventive Maintenance - PM)

Pemeliharaan pencegahan atau *Preventive Maintenance* (PM) adalah pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal dan rutin untuk mencegah terjadinya kegagalan yang tidak diinginkan (Dhillon, 2006). PM didasarkan pada waktu operasi atau siklus penggunaan, bukan pada kondisi aktual peralatan.

Karakteristik:	▪ Bersifat proaktif dan terencana. ▪ Dijadwalkan berdasarkan waktu (<i>time-based</i>) atau penggunaan (<i>usage-based</i>), misalnya setiap 1000 jam operasi atau setiap bulan. ▪ Aktivitasnya meliputi inspeksi, pembersihan, pelumasan, penyetelan, dan penggantian komponen secara rutin.
Kapan Digunakan:	Ideal untuk komponen yang memiliki pola keausan yang dapat diprediksi dan umur pakainya diketahui dengan baik, seperti belt, filter, atau oli.
Kelebihan:	▪ Mengurangi kemungkinan kegagalan tak terduga. ▪ Memperpanjang umur aset. ▪ Memungkinkan perencanaan downtime yang lebih baik.
Kekurangan:	▪ Potensi <i>over-maintenance</i>: mengganti komponen yang sebenarnya masih bisa berfungsi dengan baik. ▪ Tidak dapat mencegah kegagalan acak (<i>random failures</i>) yang tidak terkait waktu. ▪ Biaya tenaga kerja dan suku cadang yang tetap tinggi.

1.4.3 Pemeliharaan Prediktif (*Predictive Maintenance* - PdM)

Pemeliharaan Prediktif adalah pendekatan yang menggunakan data kondisi operasional peralatan untuk memprediksi kapan kegagalan mungkin terjadi, sehingga pemeliharaan dapat dilakukan tepat sebelum kegagalan tersebut terjadi (Selcuk, 2016). PdM merupakan inti dari pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance*).

Karakteristik:	▪ Berbasis kondisi (<i>condition-based</i>) aktual peralatan. ▪ Mengandalkan teknologi monitoring dan analisis data, seperti: → Analisis Getaran (<i>Vibration Analysis</i>): Untuk mendeteksi ketidakseimbangan, misalignment, dan kerusakan bantalan. → Termografi (<i>Thermography</i>): Untuk mengidentifikasi titik panas yang mengindikasikan masalah elektrik atau mekanik. → Analisis Ultrasonik: Untuk mendeteksi kebocoran udara atau bushing yang aus. → Analisis Oil: Untuk memeriksa kontaminasi dan partikel logam pada pelumas.
Kapan Digunakan:	Sangat efektif untuk aset-aset kritis yang mahal, yang kegagalannya dapat menyebabkan dampak finansial atau keselamatan yang besar.

Kelebihan (Dalzochio et al., 2020):	▪ Meminimalkan <i>downtime</i> karena perbaikan dapat direncanakan dengan tepat. ▪ Mengurangi biaya suku cadang dan tenaga kerja dengan menghindari penggantian yang tidak perlu. ▪ Meningkatkan keselamatan dan keandalan.
Kekurangan:	▪ Membutuhkan investasi awal yang signifikan untuk peralatan monitoring, perangkat lunak, dan pelatihan personel. ▪ Membutuhkan keahlian khusus untuk menganalisis dan menginterpretasikan data.

1.4.4 Pemeliharaan Proaktif (Proactive Maintenance)

Pemeliharaan Proaktif melampaui konsep prediktif. Fokusnya bukan hanya pada pemantauan kondisi, tetapi pada identifikasi dan penghilangan akar penyebab kegagalan, sehingga mencegahnya terulang kembali (Mobley, 2002). Ini adalah pendekatan holistik yang menggabungkan analisis kegagalan dengan perbaikan desain dan prosedur operasi.

Karakteristik:	▪ Berfokus pada akar penyakit (root cause analysis - RCA). ▪ Mengintegrasikan pemeliharaan dengan desain engineering, penyimpanan suku cadang, dan pelatihan operator. ▪ Aktivitas kuncinya meliputi: → Analisis Getaran (<i>Vibration Analysis</i>): Untuk mendeteksi ketidakseimbangan, misalignment, dan kerusakan bantalan. → Termografi (<i>Thermography</i>): Untuk mengidentifikasi titik panas yang mengindikasikan masalah elektrik atau mekanik. → Analisis Ultrasonik: Untuk mendeteksi kebocoran udara atau bushing yang aus. → Analisis Oil: Untuk memeriksa kontaminasi dan partikel logam pada pelumas.
Kapan Digunakan:	Sebagai filosofi yang diterapkan secara menyeluruh dalam organisasi, terutama untuk mengatasi masalah kegagalan berulang pada aset-aset kritis.
Kelebihan :	▪ Menghilangkan masalah kegagalan secara permanen. ▪ Secara dramatis meningkatkan <i>Mean Time Between Failures</i> (MTBF). ▪ Menghasilkan penghematan biaya jangka panjang yang sangat besar.
Kekurangan:	▪ Membutuhkan komitmen budaya organisasi yang kuat dan kolaborasi antar departemen (engineering, operasi, pemeliharaan). ▪ Prosesnya membutuhkan waktu dan tidak selalu memberikan solusi instan.

1.4.5 Perbandingan dan Pemilihan Strategi

Tidak ada satu strategi pemeliharaan yang terbaik untuk semua situasi. Pendekatan yang paling efektif adalah dengan menerapkan kombinasi dari semua kategori di atas, yang disesuaikan dengan kritikalitas aset. Model *Maintenance Decision Matrix* sering digunakan, di mana aset diklasifikasikan berdasarkan dampak kegagalannya terhadap produksi, keselamatan, dan biaya.

Sebagai contoh:

- Aset Kritis (dampak kegagalan tinggi): Diterapkan strategi PdM dan *Proactive Maintenance*.
- Aset Semi-Kritis: Diterapkan PM yang dioptimalkan berdasarkan data dari PdM.
- Aset Non-Kritis: Dapat diterapkan CM yang terkelola dengan baik.

Dengan memilih strategi yang tepat untuk setiap aset, organisasi dapat mengoptimalkan alokasi sumber daya, meminimalkan total biaya pemeliharaan, dan memaksimalkan keandalan operasional secara keseluruhan.

LATIHAN

I. Pilihan Ganda (10 Soal)

Pilih jawaban yang paling tepat.

1. Pada tahap awal perkembangan industri, pemeliharaan dipandang sebagai aktivitas reaktif yang dikenal sebagai:
 - A. Preventive Maintenance
 - B. Predictive Maintenance
 - C. Corrective Maintenance
 - D. Proactive Maintenance
2. Pemeliharaan disebut sebagai cost center karena:
 - A. Selalu meningkatkan umur mesin
 - B. Tidak menghasilkan nilai tambah langsung
 - C. Membutuhkan IoT dan sensor
 - D. Menghilangkan akar penyebab masalah
3. Tujuan utama TPM menurut Nakajima adalah:
 - A. Menurunkan biaya investasi awal
 - B. Memaksimalkan efektivitas peralatan
 - C. Menghilangkan jadwal pemeliharaan
 - D. Mengurangi tenaga kerja
4. Enam kerugian besar (six big losses) digunakan untuk mengukur:
 - A. Kualitas operator
 - B. Efektivitas peralatan
 - C. Konsumsi listrik
 - D. Kecepatan logistik
5. IoT dalam pemeliharaan berfungsi untuk:
 - A. Menghapus kebutuhan sensor

- B. Mengurangi suku cadang
 - C. Mengumpulkan data kondisi real-time
 - D. Menggantikan semua teknisi
6. Pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan interval waktu tertentu disebut:
- A. Corrective Maintenance
 - B. Preventive Maintenance
 - C. Predictive Maintenance
 - D. Proactive Maintenance
7. Analisis getaran digunakan terutama dalam strategi:
- A. CM
 - B. PM
 - C. PdM
 - D. Redesign Engineering
8. Pemeliharaan yang bertujuan menghilangkan akar penyebab kegagalan adalah:
- A. CM
 - B. PM
 - C. PdM
 - D. Proactive Maintenance
9. Digital Twin berfungsi sebagai:
- A. Model virtual aset fisik untuk simulasi dan pemantauan
 - B. Pengganti teknisi lapangan
 - C. Sensor fisik yang ditanam di mesin
 - D. Sistem pelumasan otomatis
10. Strategi pemeliharaan harus dipilih berdasarkan:
- A. Warna mesin
 - B. Umur operator
 - C. Kritis tidaknya suatu aset
 - D. Lokasi pabrik

II. Isian Singkat (5 Soal)

Jawablah secara singkat dan jelas.

- 11. Jelaskan secara singkat apa yang dimaksud dengan pemeliharaan korektif.
- 12. Sebutkan dua manfaat utama pemeliharaan modern.
- 13. Apa fungsi utama *big data analytics* dalam pemeliharaan Industri 4.0?
- 14. Berikan contoh parameter kondisi yang dapat dipantau dalam pemeliharaan prediktif.
- 15. Mengapa pemeliharaan preventif berpotensi menyebabkan *over-maintenance*?

DAFTAR PUSTAKA

1. Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., & Barbosa, J. (2020). Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges. *Computers in Industry*, 123, 103298.
2. Dhillon, B. S. (2006). *Maintenance Engineering Handbook*. CRC Press.
3. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2014). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
4. Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
5. Nakajima, S. (1988). *Introduction to Total Productive Maintenance (TPM)*. Productivity Press.
6. Selcuk, S. (2016). Predictive maintenance, its implementation and latest trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(5), 1550-1560.
7. Wireman, T. (2010). *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.

Modul 2

Konsep RAM - Reliability, Availability, Maintainability

Capaian pembelajaran:

1. Mahasiswa mampu menjelaskan konsep dasar Reliability, Availability, dan Maintainability pada sistem pemeliharaan aset industri.
2. Mahasiswa mampu menghitung metrik dasar RAM (MTBF, MTTR, Availability) dari data sederhana.
3. Mahasiswa mampu menganalisis keterkaitan antarparameter RAM pada suatu aset sederhana berbasis data kasus.

Konsep RAM—*Reliability* (Keandalan), *Availability* (Ketersediaan), dan *Maintainability* (Kemudahan Pemeliharaan) —merupakan fondasi kuantitatif dan filosofis dari teknik manajemen pemeliharaan modern. Ketiga parameter ini saling terkait erat dan membentuk suatu kerangka kerja sistematis untuk mengevaluasi, merancang, dan meningkatkan kinerja aset fisik sepanjang siklus hidupnya. Dalam lingkungan industri yang kompetitif, pemahaman dan pengoptimalan RAM bukan lagi sekadar tugas teknik, melainkan suatu keharusan strategis untuk mencapai keunggulan operasional (Ebeling, 2019).

2.1 Keandalan (*Reliability*)

Definisi dan Makna

Keandalan atau *Reliability* didefinisikan secara probabilistik sebagai "kemungkinan suatu komponen, peralatan, atau sistem untuk menjalankan fungsi yang diinginkan, dalam kondisi operasi tertentu, untuk periode waktu tertentu" (Dhillon, 2006). Intinya, keandalan menjawab pertanyaan: "Seberapa besar kemungkinan aset ini tidak gagal selama saya mengoperasikannya?" Keandalan adalah karakteristik inherent yang dirancang ke dalam suatu aset, tetapi sangat dipengaruhi oleh praktik operasi dan pemeliharaan selama masa pakainya.

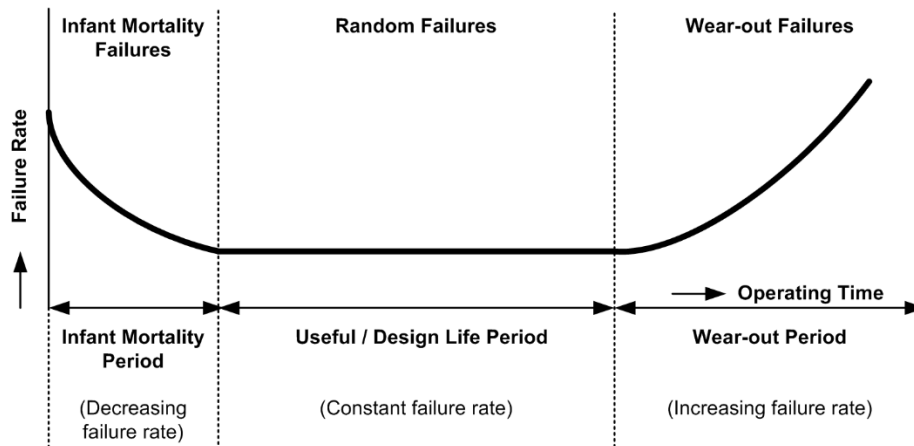
Ukuran dan Metrik Kunci

1. *Probability of Survival/Reliability Function* $[R(t)]$: Fungsi matematis yang menyatakan probabilitas bahwa suatu item akan berfungsi tanpa kegagalan hingga waktu tertentu (t). Nilainya berkisar antara 1 (pasti berfungsi) dan 0 (pasti gagal).
2. *Failure Rate* (λ)/Tingkat Kegagalan: Jumlah kegagalan per unit waktu. Untuk banyak komponen elektronik dan mekanik, tingkat kegagalan mengikuti kurva yang dikenal sebagai "*Bathtub Curve*" (lihat Gambar 1).
3. *Mean Time Between Failures* (MTBF): Rata-rata waktu beroperasi di antara dua kegagalan yang terjadi. MTBF adalah kebalikan dari *failure rate* (λ) untuk sistem yang dapat diperbaiki. $MTBF = 1/\lambda$.

4. *Mean Time To Failure (MTTF)*: Rata-rata waktu operasi hingga terjadi kegagalan pertama kali, umumnya digunakan untuk item yang tidak dapat diperbaiki (*non-repairable*).

Kurva Bak Mandi (*The Bathtub Curve*)

Kurva bak mandi (Gambar 1) menggambarkan pola tingkat kegagalan tipikal suatu produk atau komponen sepanjang hidupnya (Ebeling, 2019).



Gambar 1. Kurva Bak Mandi

- **Perioda Kegagalan Awal (*Infant Mortality/Early Failure Period*):** Tingkat kegagalan tinggi di awal karena cacat manufaktur, kesalahan instalasi, atau masalah kualitas. Strategi *burn-in* atau *commissioning* yang ketat dapat mengurangi perioda ini.
- **Perioda Kegagalan Acak (*Useful Life/Random Failure Period*):** Tingkat kegagalan rendah dan relatif konstan. Kegagalan terjadi secara acak dan tak terduga, seringkali karena beban berlebih, kesalahan operasi, atau faktor eksternal. Rentang hidup ini adalah target utama operasi.
- **Perioda Keausan (*Wear-Out Failure Period*):** Tingkat kegagalan meningkat secara signifikan karena keausan, fatigue, korosi, atau degradasi material. Pemeliharaan preventif dan penggantian terencana sangat kritis pada fase ini.

Faktor yang Mempengaruhi Keandalan

Keandalan dipengaruhi oleh rangkaian keputusan dan tindakan yang kompleks (Smith & Hinchcliffe, 2004):

- **Desain (*Inherent Reliability*):** Pemilihan material, faktor keamanan (*safety factor*), redundansi, dan derating.
- **Manufaktur dan Kontrol Kualitas:** Konsistensi proses produksi dan inspeksi akhir.
- **Prosedur Instalasi dan Komisioning:** Mengikuti panduan pabrikan dengan ketat untuk menghindari *infant mortality*.
- **Kondisi Operasi:** Beban, kecepatan, lingkungan (suhu, debu, korosif), dan kepatuhan operator terhadap SOP.
- **Strategi dan Kualitas Pemeliharaan:** Pemeliharaan yang tepat waktu dan berkualitas mencegah transisi prematur ke fase *wear-out*.

2.2 Ketersediaan (*Availability*)

Definisi dan Makna

Ketersediaan atau *Availability* adalah ukuran seberapa sering suatu aset siap dan dapat dioperasikan untuk menghasilkan output ketika dibutuhkan. Ini adalah metrik yang paling langsung terlihat oleh manajemen produksi, karena menggambarkan proporsi waktu di mana aset dapat menghasilkan pendapatan (Mobley, 2002). Secara sederhana, ketersediaan menjawab pertanyaan: "Ketika saya membutuhkannya, apakah mesin ini siap jalan?"

Tingkatan dan Perhitungan Ketersediaan

Terdapat beberapa definisi ketersediaan, dengan cakupan yang berbeda-beda (Ebeling, 2019):

1. *Inherent Availability* (A_i):

Hanya mempertimbangkan waktu aktif perbaikan (*active repair time*). Mengabaikan waktu administrasi, logistik, dan pemeliharaan preventif.

Rumus:

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

MTTR (*Mean Time To Repair*) adalah rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan (lihat *Maintainability*).

2. *Achieved Availability* (A_a):

Lebih realistis, karena memasukkan waktu untuk semua jenis pemeliharaan (*corrective* dan *preventive*).

Rumus:

$$A_a = \frac{MTBM}{(MTBM + MMT)}$$

MTBM (*Mean Time Between Maintenance*) adalah rata-rata waktu antara semua aktivitas pemeliharaan.

MMT (*Mean Maintenance Time*) adalah rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk semua aktivitas pemeliharaan.

3. *Operational Availability* (A_o):

Metrik yang paling komprehensif dan mencerminkan realitas di lapangan. Memasukkan SEMUA waktu henti, termasuk waktu perbaikan, pemeliharaan preventif, waktu administrasi, logistik, dan waktu tunggu suku cadang.

Rumus:

$$A_o = \frac{Uptime}{(Uptime + Downtime)}$$

Ini adalah ukuran favorit untuk menghitung *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), di mana *Availability* (dalam OEE) = Waktu Operasi Terjadwal / Waktu Rencana Produksi.

Faktor yang Mempengaruhi Ketersediaan

Ketersediaan merupakan fungsi dari dua konsep sebelumnya:

- $Availability = f(Reliability, Maintainability)$

Reliability yang tinggi (MTBF panjang) mengurangi frekuensi kegagalan, sehingga mengurangi frekuensi *downtime*.

- *Maintainability* yang tinggi (MTTR pendek) mempersingkat durasi setiap kejadian *downtime* ketika kegagalan terjadi.

Selain itu, faktor pendukung seperti manajemen suku cadang, keahlian teknisi, dan efisiensi proses administratif sangat mempengaruhi, terutama *Operational Availability* (Wireman, 2010).

2.3 Kemudahan Pemeliharaan (*Maintainability*)

Definisi dan Makna

Kemudahan Pemeliharaan atau *Maintainability* adalah karakteristik desain dan instalasi suatu aset yang memungkinkannya untuk dicegah, diinspeksi, didiagnosis, diperbaiki, atau dikembalikan ke kondisi operasional tertentu dengan lebih mudah, cepat, aman, dan ekonomis (Dhillon, 2006). Sederhananya, *maintainability* menjawab: "Jika rusak, seberapa cepat dan mudah memperbaikinya?" Tidak seperti *reliability* yang ingin mencegah kegagalan, *maintainability* menerima bahwa kegagalan akan terjadi dan berfokus pada meminimalkan dampaknya.

Ukuran dan Prinsip Kunci

1. *Mean Time To Repair* (MTTR): Metrik utama *maintainability*. Rata-rata waktu dari saat kegagalan terdeteksi hingga saat aset kembali beroperasi penuh, termasuk waktu diagnosis, perbaikan, pengujian, dan penyetelan.
2. *Median Time To Repair*: Waktu perbaikan yang memiliki probabilitas 50% untuk terlampaui.
3. *Maximum Time To Repair*: Waktu perbaikan maksimum yang ditoleransi untuk suatu tugas tertentu.

Prinsip Desain untuk *Maintainability* yang Baik (Blanchard et al., 1995):

- Aksesibilitas (*Accessibility*): Komponen yang mudah gagal atau perlu diinspeksi harus mudah diakses tanpa perlu membongkar bagian lain.
- Modularitas dan Standardisasi: Penggunaan modul yang dapat diganti dengan cepat (*plug-and-play*) dan komponen standar mengurangi waktu diagnosis dan perbaikan.
- Diagnostik yang Mudah: Penyertaan built-in test equipment (BITE), port diagnostik, dan indikator visual/audible untuk mempermudah identifikasi masalah.
- Keselamatan: Desain harus memungkinkan perawatan dan perbaikan dengan risiko cedera minimal (penguncian energi/LOTO, guard yang mudah dilepas).
- Pelatihan dan Dokumentasi: Ketersediaan manual perbaikan yang jelas, diagram yang lengkap, dan prosedur yang terdokumentasi.

Faktor yang Mempengaruhi *Maintainability*

- Desain Awal (*Inherent Maintainability*): Prinsip-prinsip di atas diterapkan sejak fase rekayasa.
- Ketersediaan dan Kualitas Suku Cadang: Inventaris yang terkelola dengan baik dan rantai pasok yang responsif.
- Keterampilan dan Pelatihan Teknisi: Kompetensi personel pemeliharaan secara langsung mempengaruhi MTTR.
- Alat dan Peralatan Uji: Ketersediaan alat yang tepat dan alat bantu diagnostik canggih.

- Organisasi dan Manajemen: Struktur kerja yang efisien, prosedur kerja yang aman, dan komunikasi yang baik.

2.4 Keterkaitan dan Aplikasi Praktis Konsep RAM

Ketiga konsep ini tidak berdiri sendiri, melainkan membentuk sebuah persamaan yang saling terkait. Tujuan akhir dari rekayasa dan manajemen pemeliharaan adalah memaksimalkan Ketersediaan Operasional (Ao). Hubungannya dapat dilihat secara intuitif:

- Meningkatkan *Reliability* (memperpanjang MTBF) berarti mesin gagal lebih jarang.
- Meningkatkan *Maintainability* (memperpendek MTTR) berarti ketika mesin gagal, ia bisa diperbaiki lebih cepat.
- Kombinasi dari gagal lebih jarang dan diperbaiki lebih cepat secara langsung menghasilkan Ketersediaan yang lebih tinggi.

Aplikasi dalam Siklus Hidup Aset (*Asset Lifecycle*):

1. Fase Perancangan dan Pembelian: Spesifikasi RAM (misal: MTBF > 10.000 jam, MTTR < 2 jam) harus menjadi bagian dari kriteria pengadaan. Analisis RAM digunakan untuk membandingkan penawaran vendor dan memprediksi biaya siklus hidup (Mobley, 2002).
2. Fase Operasi dan Pemeliharaan:
 - Penentuan Strategi Pemeliharaan: Analisis RAM membantu mengklasifikasikan aset berdasarkan kritikalitas. Aset dengan dampak availability tinggi memerlukan strategi proaktif (PdM, PM) untuk menjaga reliability dan memiliki desain maintainability yang baik.
 - Analisis Akar Penyebab (RCA): Ketika kegagalan terjadi, pendekatan RAM memandu investigasi: Apakah masalah reliability (komponen cacat)? Atau masalah maintainability (perbaikan lama karena akses sulit)? (Smith & Hinchcliffe, 2004).
 - Perbaikan dan Modifikasi: Setiap usulan modifikasi aset harus dievaluasi dampaknya terhadap ketiga aspek RAM. Misalnya, menambah pelindung (*guard*) dapat meningkatkan keamanan tetapi mengurangi maintainability jika menyulitkan akses inspeksi.
3. Peningkatan Berkelanjutan: Data historis MTBF dan MTTR adalah masukan berharga untuk program *reliability engineering* dan *lean maintenance*, membantu mengidentifikasi pola kegagalan dan *bottleneck* dalam proses perbaikan.

Contoh Studi Kasus Sederhana:

Sebuah pompa sentrifugal memiliki MTBF = 720 jam dan MTTR = 8 jam.

- *Inherent Availability* (A_i)

$$A_i = \frac{720}{(720 + 8)} = 0,989 \text{ atau } 98,9\%$$

Artinya, berdasarkan karakteristik teknisnya saja, pompa tersedia 98.9% dari waktu.

Jika investasi dalam pelatihan dan alat khusus dapat mengurangi MTTR menjadi 4 jam, maka:

- A_i (baru)

$$A_i = \frac{720}{(720 + 4)} = 0,994 \text{ atau } 99,4\%$$

Peningkatan *maintainability* yang tampaknya kecil (4 jam) meningkatkan *availability* sebesar 0.5%, yang bisa berarti produksi tambahan yang signifikan dalam setahun.

Konteks Modern: RAM dan Industri 4.0

Dalam paradigma Industri 4.0, konsep RAM mengalami peningkatan daya dan presisi (Lee et al., 2015):

- *Reliability*: Big data dari sensor memungkinkan pemodelan *reliability* yang lebih dinamis dan spesifik berdasarkan kondisi operasi aktual, bukan hanya asumsi statis. *Digital Twin* dapat mensimulasikan stres dan keausan untuk memprediksi *failure rate* dengan lebih akurat.
- *Availability*: *Operational Availability* dapat dipantau secara *real-time* dan diprediksi menggunakan algoritma, memungkinkan penjadwalan produksi yang lebih fleksibel dan responsif.
- *Maintainability*: *Augmented Reality* (AR) dapat menuntun teknisi melalui langkah-langkah perbaikan yang kompleks, mengurangi MTTR dan kesalahan. Spare parts dapat dipesan secara otomatis oleh sistem berdasarkan prediksi kegagalan.

Konsep RAM memberikan bahasa dan alat kuantitatif yang penting untuk menerjemahkan tujuan operasional yang luas—seperti maksimisasi output dan minimisasi biaya—menjadi kriteria teknik yang dapat diukur, dianalisis, dan ditingkatkan. Memahami interaksi antara *Reliability*, *Availability*, dan *Maintainability* memungkinkan organisasi untuk membuat keputusan yang seimbang, baik dalam investasi desain baru, pemilihan strategi pemeliharaan, maupun alokasi sumber daya perbaikan. Dalam lanskap industri yang semakin kompleks, penguasaan analisis dan penerapan prinsip-prinsip RAM merupakan kompetensi inti untuk membangun sistem produksi yang tangguh, efisien, dan kompetitif.

2.5 Perkembangan Implementasi Konsep RAM dalam Era Industri 4.0

Implementasi konsep RAM telah mengalami transformasi paradigmatik dengan hadirnya teknologi digital Industri 4.0. Pendekatan statis dan historis dalam menganalisis *Reliability*, *Availability*, dan *Maintainability* kini berkembang menjadi pendekatan yang dinamis, prediktif, dan terintegrasi secara *real-time*. Integrasi sensor, Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), dan Digital Twin memungkinkan pendekatan yang lebih cerdas dan proaktif terhadap manajemen aset.

Smart Reliability: Dari Statistik Historis ke Prediksi Berbasis Kondisi

Dalam implementasi tradisional, keandalan (*Reliability*) dimodelkan berdasarkan data kegagalan historis yang seringkali terbatas dan asumsi distribusi statis seperti Weibull. Era baru mengusung konsep *Smart Reliability* atau *Dynamic Reliability*, di mana tingkat

kegagalan (λ) tidak lagi dianggap konstan selama useful life, tetapi berfluktuasi berdasarkan kondisi operasi aktual peralatan (Sahal et al., 2020).

- Sensor dan IoT memungkinkan pemantauan terus-menerus terhadap health indicators seperti getaran, suhu, tekanan, dan arus listrik. Anomali pada data ini dapat mengindikasikan degradasi yang mempercepat failure rate sebelum kegagalan aktual terjadi.
- *Machine Learning* (ML) dan AI digunakan untuk menganalisis data sensor guna mengidentifikasi pola kompleks yang mengarah pada kegagalan. Algoritma seperti Random Forest, Support Vector Machines, dan Deep Learning Neural Networks dapat memprediksi Remaining Useful Life (RUL) suatu komponen dengan akurasi yang semakin tinggi (Selcuk, 2016). Prediksi RUL ini memungkinkan pergantian komponen tepat waktu, menggeser pemeliharaan dari jadwal tetap (time-based) ke kondisi sesungguhnya (*condition-based*), sehingga secara langsung meningkatkan reliability dengan mencegah kegagalan tak terduga.

Dynamic Availability: Optimasi Berdasarkan Data Real-Time

Ketersediaan dalam konteks modern bergeser dari metrik pasif *post-mortem* menjadi parameter aktif yang dapat dioptimasi dan diprediksi. Konsep *Operational Availability* (Ao) kini dapat dihitung dan diproyeksikan secara *real-time*.

- Integrasi Sistem: Data *uptime/downtime* terintegrasi otomatis dari sistem kontrol mesin (SCADA/PLC) ke dalam sistem *Enterprise Asset Management* (EAM) atau *Computerized Maintenance Management System* (CMMS). Ini menghilangkan kesalahan pencatatan manual dan memberikan gambaran ketersediaan yang akurat.
- Penjadwalan Pemeliharaan yang Preskriptif: Dengan informasi prediktif dari analisis RUL, perencanaan pemeliharaan dapat dioptimalkan untuk meminimalkan dampak terhadap *availability*. Sistem AI dapat menyarankan jadwal perawatan pada jendela waktu yang paling tidak mengganggu produksi, misalnya saat permintaan rendah atau persediaan mencukupi, sehingga memaksimalkan *availability operasional* (Dalzochio et al., 2020).
- Analisis Jejaring Ketersediaan (*Availability Network Analysis*): Pada sistem produksi yang kompleks, kegagalan satu mesin mempengaruhi keseluruhan lini. Simulasi berbasis *Digital Twin* dapat memodelkan efek domino dari kegagalan terhadap *availability* sistem secara keseluruhan, memungkinkan perencanaan kontinjensi dan investasi yang lebih tepat sasaran.

Konvergensi RAM: Analisis Data Terpadu dan Digital Twin

Perkembangan paling signifikan adalah konvergensi ketiga aspek RAM dalam sebuah platform analitik terpadu. *Digital Twin* berfungsi sebagai wadah konvergensi ini.

- Model RAM Dinamis: *Digital Twin* yang diumpan dengan data sensor *real-time* tidak hanya merepresentasikan geometri aset, tetapi juga model keandalannya-nya (misalnya, degradasi bantalan berdasarkan data getaran), status ketersediaanya, dan prosedur kemudahan pemeliharaannya (manual digital interaktif). Hal ini memungkinkan analisis holistik, seperti mensimulasikan bagaimana peningkatan

kemampurawatannya (misalnya, penambahan akses panel) akan mempengaruhi availability dan biaya siklus hidup.

- Optimasi Multi-objek: Algoritma canggih dapat digunakan untuk mencari titik optimal di antara ketiga tujuan yang kadang saling tarik-menarik. Contohnya, meningkatkan keandalan dengan penggantian komponen lebih awal mungkin mengurangi availability karena frekuensi henti yang lebih tinggi. Analisis berbasis data dapat menemukan strategi yang menyeimbangkan keandalan, ketersediaan, dan biaya kemudahan pemeliharaan secara keseluruhan (Tiddens et al., 2015).

LATIHAN

Jawablah secara singkat dan jelas.

1. Jelaskan secara singkat apa yang dimaksud dengan Reliability dalam konteks pemeliharaan aset.
2. MTBF merupakan salah satu parameter kunci dalam Reliability. Apa rumus dasar untuk menghitung MTBF dari data jumlah kegagalan dan total waktu operasi?
3. Jika suatu mesin memiliki MTTR = 2 jam dan MTBF = 50 jam, hitung nilai Availability inheren (A_i).
4. Sebutkan hubungan langsung antara MTTR dan Availability.
5. Berikan satu contoh kondisi pada aset industri yang menunjukkan keterkaitan antara Reliability dan Maintainability.

DAFTAR PUSTAKA

1. Blanchard, B. S., Verma, D., & Peterson, E. L. (1995). *Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management*. John Wiley & Sons.
2. Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC Press.
3. Ebeling, C. E. (2019). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering* (3rd ed.). Waveland Press.
4. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
5. Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
6. Smith, D. J., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
7. Wireman, T. (2010). *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.
8. Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., & Barbosa, J. (2020). Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges. *Computers in Industry*, 123, 103298.

9. Sahal, R., Breslin, J. G., & Ali, M. I. (2020). Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 138-151.
10. Selcuk, S. (2016). Predictive maintenance, its implementation and latest trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(5), 1550-1560.
11. Tiddens, W. W., Braaksma, A. J. J., & Tinga, T. (2015). The adoption of prognostic technologies in maintenance decision-making: A multiple case study. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 108143.

Modul 3

Indikator Kinerja Pemeliharaan Mesin: MTBF, MTTR, OEE

Setelah menyelesaikan Modul 3, mahasiswa mampu menganalisis performa pemeliharaan mesin melalui perhitungan dan interpretasi indikator kinerja utama (MTBF, MTTR, OEE) serta mengidentifikasi sumber-sumber inefisiensi berbasis *Six Big Losses* untuk menentukan prioritas peningkatan kinerja yang terukur.

Pengukuran kinerja pemeliharaan merupakan aspek kritis dalam manajemen aset modern. Tanpa indikator yang terukur dan relevan, mustahil untuk mengevaluasi efektivitas strategi pemeliharaan, mengidentifikasi area perbaikan, atau mendemonstrasikan nilai investasi pemeliharaan kepada manajemen puncak (Wireman, 2010). Indikator kinerja utama (*Key Performance Indicators/KPIs*) berfungsi sebagai "*dashboard*" yang memberikan wawasan kuantitatif tentang kesehatan aset dan efisiensi fungsi pemeliharaan. Di antara banyak metrik yang tersedia, *Mean Time Between Failures* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), dan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) menonjol sebagai tiga pilar fundamental yang saling melengkapi. MTBF dan MTTR merupakan inti dari analisis keandalan teknis (*Reliability* dan *Maintainability*), sementara OEE berfungsi sebagai metrik holistik yang mengukur kontribusi pemeliharaan terhadap kinerja operasional dan produktivitas bisnis secara menyeluruh (Muchiri & Pintelon, 2008).

3.1 Mean Time Between Failures (MTBF)

Definisi dan Signifikansi

Mean Time Between Failures (MTBF) adalah rata-rata waktu operasi yang diharapkan antara dua kegagalan yang terjadi pada suatu aset yang dapat diperbaiki (*repairable asset*). MTBF adalah ukuran langsung dari *Reliability* atau keandalan aset. Nilai MTBF yang tinggi menunjukkan bahwa aset dapat beroperasi untuk periode yang panjang tanpa mengalami kegagalan, yang mencerminkan desain yang baik, kondisi operasi yang sesuai, dan efektivitas program pemeliharaan preventif dan prediktif (Ebeling, 2019).

Rumus dan Perhitungan

MTBF dihitung dengan membagi total waktu operasi suatu aset dengan jumlah kegagalan yang terjadi dalam periode observasi yang sama.

Rumus:

$$MTBF = \frac{\text{Total waktu operasi}}{\text{Jumlah kegagalan}}$$

- Total Waktu Operasi (*Uptime*): Merupakan selisih antara total waktu yang tersedia (misalnya, 720 jam dalam sebulan) dan total waktu henti (*downtime*) karena kegagalan.

- Jumlah Kegagalan: Setiap kejadian yang menyebabkan aset berhenti berfungsi sesuai dengan yang diharapkan, memerlukan intervensi untuk mengembalikannya ke kondisi operasional.

Contoh Perhitungan:

Sebuah mesin injeksi plastik dijadwalkan beroperasi 24 jam/hari selama 30 hari (720 jam). Dalam satu bulan, mesin mengalami 4 kali kegagalan, dengan total waktu henti untuk perbaikan adalah 12 jam.

- Total Waktu Operasi = 720 jam - 12 jam = 708 jam
- Jumlah Kegagalan = 4
- MTBF = 708 jam / 4 = 177 jam

$$MTBF = \frac{708 \text{ jam}}{4} = 177 \text{ jam}$$

Ini berarti, rata-rata, mesin tersebut beroperasi selama 177 jam sebelum mengalami kegagalan berikutnya.

Interpretasi dan Aplikasi

- *Benchmarking*: MTBF digunakan untuk membandingkan kinerja keandalan aset yang sejenis dalam satu pabrik atau antar pabrik, serta terhadap standar industri.
- *Perencanaan Pemeliharaan*: MTBF membantu dalam menentukan interval yang optimal untuk pemeliharaan preventif. Jika MTBF suatu komponen konsisten di angka 500 jam, maka interval penggantian dapat diatur di bawah angka tersebut, misalnya 400 jam, untuk mencegah kegagalan dalam operasi.
- *Analisis Akar Penyebab*: Penurunan trend MTBF dari waktu ke waktu adalah sinyal awal adanya masalah, seperti keausan yang dipercepat, kesalahan operasi, atau degradasi material, yang memerlukan investigasi *Root Cause Analysis* (RCA).
- *Estimasi Biaya*: MTBF berkaitan erat dengan biaya pemeliharaan. MTBF yang rendah berarti lebih banyak kegagalan, yang mengakibatkan biaya perbaikan, suku cadang, dan downtime yang lebih tinggi.

Keterbatasan dan Perhatian

1. Bukan Ukuran Umur Pakai: MTBF bukan prediksi umur pakai suatu komponen. Nilai MTBF 200 jam tidak berarti komponen akan bertahan pasti 200 jam.
2. Bergantung pada Definisi "Kegagalan": Konsistensi dalam mendefinisikan dan mencatat kegagalan sangat penting. Tanpa definisi yang jelas, data MTBF bisa menyesatkan.
3. Rata-rata yang Menyembunyikan Variasi: MTBF adalah nilai rata-rata yang dapat menyembunyikan variasi ekstrem (misalnya, beberapa kegagalan terjadi dalam waktu singkat, diikuti periode operasi yang sangat panjang).

3.2 Mean Time To Repair (MTTR)

Definisi dan Signifikansi

Mean Time To Repair (MTTR) adalah rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki suatu aset setelah kegagalan terjadi dan mengembalikannya ke kondisi operasional penuh. MTTR adalah ukuran langsung dari *Maintainability* atau kemudahan pemeliharaan. Nilai

MTTR yang rendah mencerminkan efisiensi tim pemeliharaan, ketersediaan suku cadang, kejelasan dokumentasi teknis, dan desain aset yang mudah dirawat (Mobley, 2002).

Rumus dan Komponen Waktu

MTTR dihitung dengan membagi total waktu yang dihabiskan untuk perbaikan dengan jumlah perbaikan yang dilakukan.

Rumus:

$$MTTR = \frac{\text{Total Waktu Perbaikan}}{\text{Jumlah Perbaikan}}$$

Waktu perbaikan (*repair time*) biasanya mencakup beberapa fase:

1. Waktu Deteksi dan Pelaporan: Dari saat kegagalan terjadi hingga diketahui oleh tim pemeliharaan.
2. Waktu Respons: Waktu yang dibutuhkan teknisi untuk tiba di lokasi dengan alat dan informasi yang diperlukan.
3. Waktu Diagnosa: Waktu untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan.
4. Waktu Perolehan Suku Cadang: Waktu menunggu jika suku cadang tidak tersedia.
5. Waktu Perbaikan Aktif: Waktu aktual untuk mengganti, menyetel, atau memperbaiki komponen.
6. Waktu Pengujian dan Komisioning: Waktu untuk memastikan perbaikan berhasil dan mesin siap beroperasi.

Contoh Perhitungan:

Dari contoh mesin sebelumnya dengan 4 kegagalan dan total downtime perbaikan 12 jam.

- Total Waktu Perbaikan = 12 jam
- Jumlah Perbaikan = 4
- MTTR

$$MTTR = \frac{12 \text{ jam}}{4} = 3 \text{ jam}$$

Ini berarti, rata-rata, setiap kegagalan membutuhkan waktu 3 jam untuk diperbaiki.

Interpretasi dan Strategi Perbaikan

- Fokus pada Efisiensi Proses: MTTR yang tinggi mengindikasikan inefisiensi dalam proses pemeliharaan, seperti prosedur diagnosis yang lambat, manajemen suku cadang yang buruk, atau kurangnya pelatihan teknisi.
- Dasar untuk Improvement: Memecah MTTR ke dalam komponennya (seperti di atas) membantu mengidentifikasi area untuk perbaikan spesifik, misalnya dengan menyimpan suku cadang kritis di lokasi (*strategic spares*) atau menggunakan panduan perbaikan standar (*Standard Repair Procedures/SRPs*).
- Peran Teknologi: Implementasi *Computerized Maintenance Management System (CMMS)*, penggunaan *Augmented Reality* untuk panduan perbaikan, dan sistem *telematics* untuk diagnosis jarak jauh telah terbukti secara signifikan mengurangi MTTR (Wrobel et al., 2021).

3.3 Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Definisi dan Signifikansi Filosofis

Overall Equipment Effectiveness (OEE) adalah metrik standar dunia yang mengukur seberapa efektif suatu peralatan atau lini produksi dimanfaatkan. Berbeda dengan MTBF dan MTTR yang berfokus pada aspek teknis pemeliharaan, OEE mengukur produktivitas dari perspektif bisnis yang lebih luas. OEE pertama kali dipopulerkan sebagai bagian dari *Total Productive Maintenance* (TPM) dengan tujuan menghilangkan "enam kerugian besar" (*Six Big Losses*) dalam produksi (Nakajima, 1988). OEE menjawab pertanyaan mendasar: "Dari waktu yang tersedia, berapa persen waktu yang benar-benar dihabiskan untuk memproduksi barang yang baik, pada kecepatan ideal?"

Rumus dan Tiga Komponen Utama

OEE dihitung dengan mengalikan tiga faktor independen: Availability (A), Performance (P), dan Quality (Q).

$$\text{Rumus: OEE} = \text{Availability (\%)} \times \text{Performance (\%)} \times \text{Quality (\%)}$$

1. Availability (Ketersediaan)

Mengukur persentase waktu operasi terjadwal yang tersedia untuk produksi setelah dikurangi semua waktu henti (downtime). Ini adalah area di mana pemeliharaan memiliki dampak paling langsung.

Rumus:

$$\text{Availability} = \frac{\text{Operating Time}}{\text{Planned Production Time}} \times 100\%$$

Kehilangan (*Losses*) yang Mempengaruhi:

- Kerusakan Peralatan (*Equipment Failure*): Ditangani oleh MTBF/MTTR.
- Setup dan Adjustment: Waktu persiapan dan penyetelan.

Contoh:

Waktu produksi terjadwal 8 jam (480 menit). Ada downtime karena kerusakan mesin selama 47 menit dan waktu setup selama 30 menit. Operating Time = 480 - (47+30) = 403 menit.

$$\text{Availability} = \frac{403}{480} \times 100\% = 83,96\%$$

2. Performance (Kinerja)

Mengukur seberapa cepat peralatan beroperasi dibandingkan dengan kecepatan maksimum atau idealnya selama waktu operasi (Operating Time).

Rumus:

$$\text{Performance} = \frac{\text{Ideal Cycle Time} \times \text{Total Jumlah Produksi}}{\text{Operating Time}} \times 100\%$$

Atau (jika target berdasarkan kecepatan ideal)

$$\text{Performance} = \frac{\text{Jumlah Produksi Aktual}}{\text{Target Produksi}} \times 100\%$$

Kehilangan (*Losses*) yang Mempengaruhi:

- Kecepatan Kecil (*Minor Stoppages*): Henti singkat (<5 menit).
- Pengurangan Kecepatan (*Reduced Speed*): Mesin berjalan di bawah kecepatan desain.

Contoh:

Ideal Cycle Time = 1 menit/pcs. Dalam 403 menit Operating Time, dihasilkan 350 pcs. Target produksi ideal = 403 pcs.

$$\text{Performance} = \frac{350}{403} \times 100\% = 86,85\%$$

3. *Quality* (Kualitas)

Mengukur persentase produk yang memenuhi spesifikasi kualitas (produk baik) dari total jumlah produk yang diproduksi.

Rumus:

$$\text{Quality} = \frac{\text{Jumlah Produk Baik}}{\text{Total Jumlah Produksi}} \times 100\%$$

Kehilangan (*Losses*) yang Mempengaruhi:

- Cacat Proses (*Process Defects*): Produk cacat yang dibuat selama produksi stabil.
- Produk Cacat Start-up (*Start-up Defects*): Produk cacat yang dihasilkan selama periode pemanasan, setup, atau start-up awal.

Contoh:

Total produksi 350 pcs, terdapat 14 pcs cacat. Produk Baik = 336 pcs.

$$\text{Quality} = \frac{336}{350} \times 100\% = 96,00\%$$

Perhitungan OEE Akhir:

$$\begin{aligned} \text{OEE} &= 83,96\% \times 86,85\% \times 96,00\% \\ &= 0,8396 \times 0,8685 \times 0,9600 \\ &= 0,70 \text{ atau } 70,0\% \end{aligned}$$

Interpretasi dan Benchmarking

- Standar Kelas Dunia (*World Class*): OEE sebesar 85% sering dianggap sebagai standar kelas dunia. Namun, target realistis sangat bergantung pada kompleksitas proses dan industri.
- Alat Diagnosa yang Kuat: Kekuatan sebenarnya dari OEE terletak pada kemampuannya mengurai angka akhir menjadi tiga komponen dan enam kerugian besar. Ini memungkinkan identifikasi akar masalah yang tepat: apakah penyebab rendahnya OEE adalah masalah pemeliharaan (*Availability* rendah), masalah operasional (*Performance* rendah), atau masalah proses (*Quality* rendah).
- Kontribusi Pemeliharaan terhadap OEE: Departemen pemeliharaan berkontribusi langsung terhadap peningkatan *Availability* (melalui peningkatan MTBF dan pengurangan MTTR) dan secara tidak langsung terhadap *Performance* (dengan mencegah *minor stoppages* dan menjaga kecepatan mesin) serta *Quality* (dengan memastikan akurasi dan konsistensi mesin).

3.4 Enam Kerugian Besar (*Six Big Losses*) dalam Produksi

Konsep "Enam Kerugian Besar" (*Six Big Losses*) diperkenalkan oleh Seiichi Nakajima sebagai inti filosofis dari *Total Productive Maintenance* (TPM) dan merupakan fondasi analitis untuk menghitung dan meningkatkan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE). Keenam kerugian ini mewakili semua sumber inefisiensi yang mencuri waktu, kapasitas, dan kualitas dari peralatan produksi. Dengan mengidentifikasi, mengukur, dan secara sistematis menghilangkan kerugian-kerugian ini, organisasi dapat secara langsung meningkatkan tiga komponen OEE: Availability, Performance, dan Quality (Nakajima, 1988). Pemahaman mendalam terhadap *Six Big Losses* adalah langkah pertama dari perjalanan menuju produktivitas kelas dunia.

Berikut adalah penjelasan rinci untuk masing-masing dari enam kerugian besar, dikelompokkan berdasarkan komponen OEE yang mereka pengaruhi.

3.4.1 Kerugian yang Mengurangi AVAILABILITY (Waktu Mesin Tersedia)

Kerugian ini menyebabkan mesin berhenti beroperasi secara tak terencana atau terencana, sehingga mengurangi waktu produktif yang tersedia.

1. Kerusakan Peralatan (Equipment Breakdown / Failures)

Definisi	Kehilangan waktu akibat kegagalan fungsional atau kerusakan yang mengharuskan peralatan dihentikan untuk perbaikan. Ini adalah bentuk kerugian yang paling terlihat dan seringkali paling merusak.
Contoh	Motor terbakar, bearing macet, conveyor putus, kegagalan sistem hidrolik, kerusakan sensor kritis.
Penyebab Umum	Keausan, kelelahan material (fatigue), pemeliharaan yang tidak memadai (reaktif), kontaminasi, kesalahan operasi, desain yang lemah.
Strategi Pengurangan (Terkait Pemeliharaan)	▪ Fokus pada peningkatan Reliability melalui pemeliharaan prediktif (PdM) untuk mendeteksi gejala awal. ▪ Implementasi pemeliharaan preventif (PM) yang terencana berdasarkan kondisi atau waktu. ▪ Melakukan analisis akar penyebab (RCA) untuk kegagalan berulang. ▪ Meningkatkan keterampilan teknisi dan ketersediaan suku cadang kritis untuk mempercepat perbaikan (memperpendek MTTR).

2. Setup dan Adjustment (Setup and Adjustment)

Definisi	Kehilangan waktu yang terjadi selama pergantian produk (changeover), dari produksi produk A terakhir yang baik hingga produk B pertama yang baik. Ini termasuk waktu untuk menyetel ulang (adjustment) dan trial-run.
Contoh	Mengganti mold pada mesin injeksi, mengganti ukuran packaging, mengkalibrasi ulang sensor, membersihkan saluran untuk pergantian warna pada extruder.

Penyebab Umum	Metode setup yang tidak terstandarisasi, alat bantu (jigs & fixtures) yang tidak optimal, kurangnya pelatihan operator, perencanaan produksi yang tidak efisien.
Strategi Pengurangan (Terkait Metode)	▪ Menerapkan prinsip <i>Single-Minute Exchange of Die</i> (SMED) untuk mengkonversi elemen setup internal (harus dilakukan saat mesin berhenti) menjadi setup external (dapat disiapkan saat mesin masih berjalan). ▪ Membuat prosedur kerja standar (<i>Standard Work Procedure</i>) untuk <i>changeover</i>. ▪ Menggunakan desain peralatan yang memudahkan pergantian cepat (<i>quick-release mechanisms</i>).

3.4.2 Kerugian yang Mengurangi PERFORMANCE (Kecepatan Operasi)

Kerugian ini menyebabkan mesin beroperasi di bawah kecepatan maksimum atau desainnya, meskipun secara teknis sedang berjalan.

3. Henti Kecil dan Idling (Minor Stops and Idling)

Definisi	Henti singkat (biasanya kurang dari 5 menit) yang tidak memerlukan perbaikan besar, di mana mesin berhenti secara otomatis dan dapat di-restart dengan tindakan sederhana. Idling mengacu pada kondisi di mana mesin berjalan tetapi tidak melakukan pekerjaan produktif (misalnya, sensor tersumbat sementara).
Contoh	Material macet di chute, sensor foto-elektrik salah baca, pembersihan ringan pada alat, adanya benda asing, kesalahan pada sistem penanganan material.
Penyebab Umum	Kondisi operasi yang tidak stabil, kualitas material masuk yang buruk, kekurangan pelumasan ringan, desain material handling yang buruk, pembersihan yang tidak terjadwal.
Strategi Pengurangan	▪ Autonomous Maintenance (Jishu Hozen): Melibatkan operator untuk melakukan pembersihan, inspeksi, dan penyetelan dasar untuk mencegah deteriorasi. ▪ Meningkatkan kondisi dasar peralatan (Fundamental Condition). ▪ Menerapkan alat bantu visual (visual management) untuk mendeteksi anomali dengan cepat.

4. Pengurangan Kecepatan (*Reduced Speed / Slow Cycles*)

Definisi	Kehilangan akibat peralatan beroperasi di bawah kecepatan desain atau siklus idealnya. Mesin berjalan, tetapi lebih lambat dari yang seharusnya.
Contoh	Mesin berjalan 10% lebih lambat dari spesifikasi karena kekhawatiran akan stabilitas, keausan komponen, program

Penyebab Umum	mesin yang tidak optimal, atau faktor lingkungan (suhu, kelembaban). Keausan mekanis, kurangnya pemeliharaan berkala (seperti pelumasan), pengaturan parameter yang konservatif, ketidaktahuan tentang standar kecepatan optimal, penumpukan kotoran.
Strategi Pengurangan	- Menetapkan dan mendokumentasikan kecepatan siklus standar (<i>Standard Cycle Time</i>). - Melakukan analisis dan optimasi proses secara berkala. - Memastikan pemeliharaan preventif dilakukan untuk menjaga efisiensi mekanis dan elektrik peralatan.

3.4.3 Kerugian yang Mengurangi QUALITY (Kualitas Output)

Kerugian ini menghasilkan produk yang tidak memenuhi spesifikasi, baik yang dapat diperbaiki (rework) maupun yang harus dibuang (scrap).

5. Cacat dalam Proses dan Rework (Process Defects and Rework)

Definisi	Kehilangan akibat produk cacat yang dihasilkan selama proses produksi stabil (setelah masa start-up). Ini termasuk biaya material, tenaga, dan waktu untuk memperbaiki (rework) atau membuang (scrap) produk tersebut.
Contoh	Dimensi produk di luar toleransi, cetakan tidak sempurna, kesalahan label, kontaminasi, cacat pengecatan.
Penyebab Umum	Kondisi peralatan yang tidak stabil, variasi material, kesalahan operator, alat yang aus, parameter proses yang tidak terkontrol.
Strategi Pengurangan (Terkait dengan Fokus Pemeliharaan)	- Menerapkan pemeliharaan berkualitas (Quality Maintenance) untuk memastikan kondisi peralatan yang optimal untuk menghasilkan kualitas konsisten. - Menggunakan alat statistik (Statistical Process Control/SPC) untuk mengendalikan proses. - Memastikan akurasi dan kalibrasi alat ukur dan kontrol.

6. Cacat Start-up / Yield Loss (Start-up Defects / Yield Loss)

Definisi	Kehilangan akibat produk cacat yang dihasilkan selama periode awal operasi, seperti saat start-up mesin, setelah pergantian produk (changeover), atau setelah pergantian shift.
Contoh	Produk tidak stabil sebelum suhu/tekanan proses tercapai, produk warna campuran selama pergantian warna, material yang terbuang saat penyesuaian mesin.
Penyebab Umum	Prosedur start-up dan changeover yang tidak optimal, waktu pemanasan yang tidak mencukupi, kurangnya standar operasi untuk kondisi transisi.
Strategi Pengurangan	Menstandarisasi dan mengoptimalkan prosedur start-up dan changeover.

(Terkait dengan Fokus Pemeliharaan)	▪ Meningkatkan keterampilan operator dalam menangani kondisi transisi. ▪ Menggunakan teknologi kontrol proses yang lebih canggih untuk mencapai kondisi stabil lebih cepat.
-------------------------------------	--

Six Big Losses lebih dari sekadar daftar masalah, ini adalah sistem klasifikasi yang kuat yang memberikan "peta jalan" menuju keunggulan operasional. Dengan menjadikannya sebagai bahasa bersama bagi departemen produksi, pemeliharaan, dan teknik, organisasi dapat:

1. Mengukur inefisiensi dengan presisi.
2. Mendiagnosa akar penyebab yang spesifik.
3. Memprioritaskan proyek perbaikan berdasarkan dampaknya yang terukur.
4. Mengalokasikan sumber daya secara efektif ke area yang paling membutuhkan.

Penghapusan Six Big Losses secara berkelanjutan adalah esensi dari perjalanan TPM dan merupakan prasyarat untuk mencapai OEE kelas dunia serta operasi yang ramping (lean), efisien, dan kompetitif.

3.5 Hubungan Simbiosis antara MTBF, MTTR, dan OEE

Ketiga indikator ini membentuk hubungan sebab-akibat yang kuat dalam kerangka peningkatan berkelanjutan:

1. MTBF & MTTR → Availability → OEE: Upaya untuk meningkatkan Reliability (MTBF ↑) dan Maintainability (MTTR ↓) secara langsung akan meningkatkan Availability. Peningkatan Availability, dengan asumsi Performance dan Quality tetap, akan langsung mendongkrak nilai OEE. Sebagai contoh, program pemeliharaan prediktif yang sukses akan memperpanjang MTBF (lebih jarang rusak) dan mungkin juga mempersingkat MTTR (karena perbaikan lebih terencana), sehingga meningkatkan Availability dan akhirnya OEE.
2. OEE sebagai Pemersatu: OEE memberikan konteks bisnis bagi MTBF dan MTTR. MTBF yang tampak "baik" untuk suatu mesin mungkin tidak memadai jika mesin tersebut adalah bottleneck dalam lini produksi yang menuntut Availability sangat tinggi. OEE membantu memprioritaskan investasi pemeliharaan pada aset yang dampaknya terhadap produktivitas keseluruhan paling besar.
3. Analisis Terintegrasi: Data MTBF, MTTR, dan OEE harus dianalisis bersama-sama. Misalnya, penurunan OEE yang disebabkan oleh rendahnya Availability dapat ditelusuri lebih lanjut: apakah karena MTBF yang turun (sering rusak) atau MTTR yang naik (lama perbaikan)? Diagnosa ini akan mengarah pada tindakan korektif yang spesifik dan terukur.

3.6 Contoh Aplikasi dan Studi Kasus

Sebuah studi pada lini pengemasan di industri FMCG (*Fast-Moving Consumer Goods*) menunjukkan bagaimana analisis indikator ini mendorong perbaikan. OEE lini tersebut stagnan di 65%. Analisis rinci menunjukkan:

- *Availability* rendah (75%): Ditelusuri lebih lanjut, MTBF mesin filler sangat rendah (50 jam) dan MTTR-nya tinggi (2 jam).

- *Investigated Action*: Tim melakukan RCA dan menemukan bahwa kegagalan sering disebabkan oleh keausan seal karena getaran berlebih. Tindakan proaktif diambil: modifikasi untuk mengurangi getaran (meningkatkan *inherent reliability*) dan menyimpan seal sebagai suku cadang kritis atau *strategic spare part* (meningkatkan *maintainability*).
- Hasil: Setelah 3 bulan, MTBF filler meningkat menjadi 120 jam dan MTTR turun menjadi 1 jam. *Availability* lini meningkat menjadi 88%. Dengan *Performance* dan *Quality* yang relatif stabil, OEE lini naik menjadi 78%, menghasilkan peningkatan produktivitas dan pengembalian investasi yang jelas.

Kesimpulan

MTBF, MTTR, dan OEE adalah trio indikator kinerja yang tak terpisahkan dalam manajemen pemeliharaan modern. MTBF dan MTTR memberikan fondasi teknis untuk memahami dan meningkatkan keandalan serta kemudahan perawatan aset. Sementara itu, OEE berfungsi sebagai jembatan yang menghubungkan kinerja teknis pemeliharaan dengan hasil bisnis yang nyata, yaitu produktivitas dan profitabilitas. Pengukuran yang konsisten, pelaporan yang transparan, dan analisis yang mendalam terhadap ketiga indikator ini memungkinkan organisasi untuk beralih dari pemeliharaan yang reaktif ke pemeliharaan yang strategis dan berbasis data, yang pada akhirnya menciptakan keunggulan kompetitif yang berkelanjutan.

LATIHAN

A. Soal Pilihan Ganda (10 Soal)

Pilih satu jawaban yang paling tepat.

1. MTBF digunakan untuk mengukur aspek apa dalam kinerja peralatan?
 - A. Maintainability
 - B. Reliability
 - C. Quality Rate
 - D. Performance Rate
2. Suatu mesin beroperasi 600 jam dan mengalami 3 kegagalan. Total downtime adalah 15 jam. MTBF mesin adalah:
 - A. 200 jam
 - B. 180 jam
 - C. 195jam
 - D. 160 jam
3. MTTR menggambarkan:
 - A. Rata-rata waktu perbaikan setiap kali kegagalan
 - B. Rata-rata waktu operasi antar kegagalan
 - C. Rata-rata waktu siklus mesin
 - D. Rata-rata waktu produksi efektif
4. Indikator OEE terdiri dari tiga komponen utama, yaitu:
 - A. Availability, Reliability, Quality
 - B. Availability, Performance, Quality

- C. MTBF, MTTR, OEE
 - D. Failure Rate, Usage Rate, Defect Rate
5. Berikut merupakan kehilangan yang mengurangi Performance dalam OEE:
- A. Equipment Breakdown
 - B. Setup and Adjustment
 - C. Process Defects
 - D. Minor Stops dan Reduced Speed
6. Jika Planned Production Time = 480 menit dan Operating Time = 420 menit, maka Availability adalah:
- A. 87.5%
 - B. 90%
 - C. 93.5%
 - D. 95%
7. Yang termasuk kerugian kualitas (Quality Loss) adalah:
- A. Changeover losses
 - B. Process defects dan Start-up losses
 - C. Reduced speed
 - D. Minor stops
8. Hubungan antara MTBF dan OEE terutama mempengaruhi komponen:
- A. Quality
 - B. Performance
 - C. Availability
 - D. Semua komponen sama besar
9. Berikut ini yang paling tepat menggambarkan hubungan MTTR terhadap kinerja mesin:
- A. MTTR yang tinggi meningkatkan Availability
 - B. MTTR yang rendah menurunkan kecepatan mesin
 - C. MTTR yang rendah meningkatkan Availability
 - D. MTTR tidak berpengaruh terhadap OEE
10. Jika OEE rendah dan diketahui Availability rendah, analisis awal yang paling logis adalah:
- A. Kapasitas operator kurang
 - B. Kecepatan mesin terlalu tinggi
 - C. Material tidak sesuai standar
 - D. MTBF terlalu rendah atau MTTR terlalu tinggi

B. SOAL ISIAN SINGKAT (5 Soal)

Jawablah secara ringkas namun tepat.

1. Tuliskan rumus dasar MTBF.
2. Sebutkan dua komponen waktu yang termasuk dalam perhitungan MTTR.
3. Sebutkan tiga komponen utama OEE.
4. Tuliskan dua contoh kerugian yang termasuk dalam Six Big Losses kategori Performance.
5. Sebuah mesin memproduksi 300 unit, di mana 12 unit cacat. Hitung Quality Rate.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ebeling, C. E. (2019). An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering (3rd ed.). Waveland Press.
2. Mobley, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
3. Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, 46(13), 3517-3535.
4. Nakajima, S. (1988). Introduction to Total Productive Maintenance (TPM). Productivity Press.
5. Wireman, T. (2010). Developing Performance Indicators for Managing Maintenance (2nd ed.). Industrial Press.

Modul 4

Dampak Pemeliharaan Terhadap Keselamatan dan Biaya

Capaian Pembelajaran:

Mahasiswa mampu menjelaskan konsep dampak pemeliharaan terhadap keselamatan kerja dan biaya operasional, serta mampu menganalisis hubungan antara strategi pemeliharaan dengan risiko keselamatan dan pengendalian biaya siklus hidup aset.

Pemeliharaan yang efektif bukan hanya tentang menjaga mesin tetap berjalan, tetapi merupakan fungsi strategis yang secara langsung berdampak pada dua pilar fundamental bisnis industri: keselamatan manusia (*people*) dan keberlanjutan finansial (*profit*). Dampaknya bersifat simbiosis; pemeliharaan yang buruk membahayakan keselamatan sekaligus membebani keuangan, sementara pemeliharaan yang unggul menciptakan lingkungan kerja yang aman dan mengoptimalkan biaya siklus hidup aset.

4.1 Dampak terhadap Keselamatan Kerja

Pemeliharaan berperan sebagai garis pertahanan pertama dalam mencegah kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja. Hubungannya bersifat langsung dan kausal.

1. Pencegahan Kegagalan Peralatan yang Membahayakan

- Kerusakan Mekanis: Komponen yang aus atau rusak—seperti sabuk penggerak (*belt*) yang putus, rantai yang lepas, atau rem yang gagal—dapat berubah menjadi proyektil atau menyebabkan gerakan mesin yang tidak terkendali, yang berpotensi menyebabkan luka serius atau fatal.
- Kegagalan Sistem Pengaman (*Safety Devices*): Pemeliharaan rutin terhadap *safety interlock*, pelindung mesin (*machine guards*), sensor area, dan sistem penghenti darurat (*emergency stop*) sangat penting. Perangkat ini adalah pertahanan terakhir bagi operator. Jika tidak diuji dan dipelihara dengan baik, fungsinya akan gagal saat dibutuhkan (Dhillon, 2006).
- Kebocoran dan Pelepasan Energi: Kebocoran fluida bertekanan (hidrolik, pneumatik), uap panas, atau gas berbahaya seringkali disebabkan oleh fitting yang longgar, seal yang rusak, atau selang yang aus. Pemeliharaan proaktif mencegah insiden seperti ini yang dapat menyebabkan luka bakar, keracunan, atau kebakaran.

2. Penjaminan Integritas Sistem Kritis

- Sistem Kelistrikan: Pemeliharaan termal (*thermographic inspection*) pada panel listrik dan sambungan dapat mendeteksi titik panas (*hot spots*) yang mengindikasikan longgar atau kelebihan beban, yang berpotensi menyebabkan kebakaran listrik. Pemeriksaan grounding dan insulation juga penting untuk mencegah sengatan listrik.

- Sistem Pengendalian Polusi dan Ventilasi: Pemeliharaan pada alat pengendali debu (*dust collector*), *scrubber*, dan sistem ventilasi lokal (*Local Exhaust Ventilation/LEV*) memastikan mereka beroperasi pada efisiensi desain, melindungi pekerja dari paparan bahan kimia berbahaya dan partikulat yang dapat menyebabkan penyakit pernapasan kronis.

3. Dampak Tidak Langsung terhadap Budaya Keselamatan

- Prosedur Kerja yang Aman: Pemeliharaan yang terencana memungkinkan dilakukannya Lockout-Tagout (LOTO) yang benar, yaitu prosedur isolasi sumber energi sebelum perbaikan. Pemeliharaan darurat yang terburu-buru sering mengabaikan LOTO, meningkatkan risiko tersengat listrik atau mesin hidup tiba-tiba (*unexpected energization*).
- Kondisi Tempat Kerja: Pemeliharaan rumah tangga (*housekeeping*) yang baik—seperti membersihkan tumpahan minyak, membersihkan limbah produksi, dan menjaga akses jalan yang jelas—secara langsung mencegah insiden seperti terpeleset, tersandung, dan jatuh (*slip, trip, and fall*).

Studi oleh lembaga keselamatan seperti OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) secara konsisten menunjukkan bahwa proporsi signifikan dari kecelakaan industri yang parah dapat ditelusuri kembali ke kurangnya pemeliharaan atau pemeliharaan yang tidak memadai. Oleh karena itu, investasi dalam pemeliharaan adalah investasi langsung dalam keselamatan manusia dan kepatuhan regulasi.

4.2 Dampak terhadap Biaya

Pemeliharaan seringkali dianggap sebagai sumber biaya (*cost center*), bukan sebagai fungsi yang menciptakan nilai atau kontribusi finansial bagi perusahaan. Namun, perspektif yang lebih strategis melihatnya sebagai sebagai fungsi yang menjaga dan mempertahankan nilai aset agar tetap memberikan manfaat ekonomi secara optimal (*value preserver*), serta pengendali biaya siklus hidup yang utama. Dampaknya terhadap biaya dapat dikelompokkan menjadi biaya langsung (*direct cost*) dan tidak langsung (*indirect cost*), serta biaya yang dihindarkan (*avoided costs*).

1. Biaya Langsung Pemeliharaan

Biaya ini terdiri dari:

- Biaya Tenaga Kerja: Gaji dan tunjangan untuk teknisi pemeliharaan.
- Biaya Suku Cadang dan Material: Pengeluaran untuk suku cadang, oli, pelumas, dan bahan habis pakai lainnya.
- Biaya Kontrak dan Jasa Outsourcing: Biaya untuk layanan kontraktor spesialis atau dukungan dari OEM (*Original Equipment Manufacturer*).

Biaya-biaya ini terlihat jelas dalam anggaran dan sering menjadi fokus untuk dikurangi. Namun, memotongnya secara sembarangan justru akan meningkatkan biaya tidak langsung yang jauh lebih besar.

2. Biaya Tidak Langsung (Konsekuensi dari Pemeliharaan yang Buruk)

Ini adalah area di mana pemeliharaan yang efektif memberikan penghematan terbesar (Moble, 2002).

- Biaya Downtime Produksi (Lost Production): Ini adalah biaya terbesar. Ketika mesin kritis berhenti, pendapatan dari penjualan yang hilang bisa mencapai ribuan hingga ratusan ribu dolar per jam. Biaya ini jauh melampaui biaya perbaikan itu sendiri.
- Biaya Kualitas (Quality Costs): Peralatan yang tidak terpelihara menghasilkan produk cacat, mengakibatkan biaya kerusakan (scrap), biaya perbaikan (rework), dan potensi biaya garansi (warranty claims) serta kerusakan reputasi merek.
- Biaya Energi yang Terbuang: Peralatan dengan kondisi buruk (motor listrik dengan bearing aus, sistem pneumatik dengan kebocoran, heat exchanger yang kotor) mengonsumsi lebih banyak energi untuk melakukan pekerjaan yang sama. Pemeliharaan yang baik dapat mengurangi konsumsi energi hingga 5-15% (Tran et al., 2021).
- Biaya Denda dan Hukum: Kegagalan memelihara peralatan pengendali polusi atau melanggar prosedur keselamatan dapat mengakibatkan denda regulator yang besar dan biaya hukum.

3. Pengoptimalan Biaya Siklus Hidup.

Pemilihan strategi pemeliharaan yang tepat menentukan profil biaya total aset. Kurva klasik berikut mengilustrasikan trade-off ini:

- Pemeliharaan Reaktif (Run-to-Failure): Biaya pemeliharaan langsungnya rendah, tetapi biaya tidak langsung (downtime, perbaikan darurat, kerusakan sekunder) sangat tinggi. Total biaya siklus hidupnya adalah yang tertinggi.
- Pemeliharaan Preventif Terjadwal: Biaya pemeliharaan langsung meningkat karena aktivitas yang terencana, namun biaya tidak langsung turun secara signifikan. Total biaya siklus hidup biasanya lebih rendah daripada pendekatan reaktif.
- Pemeliharaan Berbasis Kondisi/Prediktif: Memerlukan investasi awal dalam teknologi monitoring (sensor, analisis data). Biaya pemeliharaan langsung bisa lebih tinggi dari preventif, namun biaya tidak langsung ditekan ke level terendah karena downtime yang diminimalkan dan penggantian suku cadang yang tepat waktu, menghasilkan total biaya siklus hidup yang paling optimal (lihat Gambar Kurva Biaya Siklus Hidup).

4. Penciptaan Nilai melalui Peningkatan Aset.

Pemeliharaan yang baik memperpanjang umur teknis dan ekonomis aset, menunda kebutuhan investasi modal (Capital Expenditure/CAPEX) yang besar untuk penggantian. Selain itu, data dari pemeliharaan prediktif memberikan wawasan berharga untuk perbaikan desain (design-out maintenance) pada generasi aset berikutnya, menciptakan siklus peningkatan yang terus-menerus.

4.3 Titik Temu: Keselamatan dan Biaya sebagai Dua Sisi Mata Uang yang Sama

Hubungan antara keselamatan dan biaya dalam konteks pemeliharaan bukanlah hubungan yang terpisah, melainkan sangat erat:

- Sebuah Kecelakaan adalah Biaya yang Sangat Tinggi: Suatu insiden keselamatan tidak hanya menyebabkan penderitaan manusia, tetapi juga membawa beban finansial yang masif, termasuk biaya pengobatan, kompensasi, denda, peningkatan premi asuransi, investigasi, dan hilangnya produktivitas akibat penurunan moral kerja.

- Pemeliharaan yang Mencegah Kecelakaan = Penghematan Biaya yang Besar: Investasi dalam pemeliharaan sistem pengaman (safety systems) dan pencegahan kegagalan kritis adalah salah satu Return on Investment (ROI) tertinggi yang dapat dilakukan perusahaan, karena mencegah potensi kerugian finansial yang katastropik.
- Budaya "Safety First" Mendorong Efisiensi: Lingkungan kerja yang aman biasanya juga lebih teratur, tertib, dan efisien. Prosedur pemeliharaan yang aman (seperti LOTO) meskipun membutuhkan waktu ekstra, sebenarnya mencegah kesalahan dan kecelakaan yang akan menyebabkan downtime yang jauh lebih lama.

Kesimpulan

Dampak pemeliharaan terhadap keselamatan dan biaya bersifat mendalam dan saling terkait. Pemeliharaan bukanlah beban biaya yang harus diminimalkan, melainkan lever strategis untuk memitigasi risiko dan mengoptimalkan kinerja keuangan. Organisasi yang memandang pemeliharaan melalui lensa ini—sebagai investasi dalam proteksi manusia dan aset—akan mencapai hasil yang unggul: lingkungan kerja yang bebas insiden, biaya operasional total yang lebih rendah, keandalan produksi yang tinggi, dan pada akhirnya, keunggulan kompetitif yang berkelanjutan. Oleh karena itu, mengintegrasikan tujuan keselamatan dan pengendalian biaya ke dalam strategi dan praktik pemeliharaan bukanlah sebuah pilihan, melainkan suatu keharusan bagi industri modern.

LATIHAN

Soal Jawaban Singkat

1. Jelaskan mengapa pemeliharaan terhadap perangkat keselamatan (safety devices) seperti interlock dan emergency stop dianggap sebagai pertahanan terakhir bagi operator.
2. Sebutkan dua contoh biaya tidak langsung yang muncul akibat pemeliharaan yang buruk.
3. Mengapa pemeliharaan prediktif dianggap memberikan total biaya siklus hidup aset yang paling optimal?
4. Jelaskan hubungan antara budaya "Safety First" dan peningkatan efisiensi operasi dalam konteks pemeliharaan.
5. Mengapa kecelakaan industri yang terkait dengan kurangnya pemeliharaan seringkali menimbulkan biaya yang jauh lebih tinggi dibandingkan biaya pemeliharaan itu sendiri?

DAFTAR PUSTAKA

1. Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC Press.
2. Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
3. Tran, T. A., Røstum, R., & Albright, S. (2021). Integrating maintenance management into a circular economy-based business model: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128997.

Modul 5

Mini-Case: Analisis Kerugian Downtime Akibat Planned VS Unplanned Maintenance

Setelah menyelesaikan Modul ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Mengidentifikasi dan mendeskripsikan perbedaan mendasar antara *planned downtime* dan *unplanned downtime* beserta karakteristik, penyebab, serta dampak operasionalnya dalam sebuah konteks kasus industri nyata yang disederhanakan (C3 – Penerapan/Analisis).
2. Melakukan perhitungan kuantitatif sederhana untuk mengestimasi kerugian finansial langsung (kehilangan produksi, biaya perbaikan) akibat *downtime* dengan menggunakan data produksi, kapasitas, dan biaya standar yang diberikan dalam studi kasus (C3 – Penerapan).

5.1 Latar Belakang Kasus

PT Sinar Jaya adalah sebuah perusahaan pengolahan makanan yang mengoperasikan lini pengisian dan pengemasan minuman otomatis. Lini ini merupakan bottleneck utama dengan kapasitas desain 10.000 botol per jam. Manajemen sedang menganalisis data downtime bulan Oktober 2023 untuk mengevaluasi efektivitas strategi pemeliharaan dan mengukur dampak finansialnya.

Data yang dikumpulkan dari sistem CMMS (*Computerized Maintenance Management System*) dan produksi menunjukkan dua kejadian downtime utama:

1. Unplanned Downtime: Kegagalan konveyor utama akibat motor penggerak yang rusak.
2. Planned Downtime: Aktivitas pemeliharaan preventif (PM) terjadwal pada sistem pneumatik pengisi (filler head).

5.2 Analisis Insiden dan Perhitungan Kerugian

a) Insiden 1: Unplanned Downtime (Kegagalan Motor Konveyor)

- Durasi: Mesin berhenti total selama 8 jam. Waktu ini mencakup 1 jam untuk diagnosis, 4 jam menunggu suku cadang motor khusus tiba dari vendor, 2 jam perbaikan, dan 1 jam pengujian dan start-up.
- Akibat Langsung:
 - Kehilangan Produksi: $8 \text{ jam} \times 10.000 \text{ botol/jam} = 80.000 \text{ botol}$.
 - Nilai Kehilangan Penjualan: $80.000 \text{ botol} \times \text{Rp } 5.000 \text{ (margin kontribusi per botol)} = \text{Rp } 400.000.000$.
 - Biaya Perbaikan Darurat: Motor baru + tenaga kerja lembur = Rp 85.000.000.
- Akibat Tidak Langsung:
 - Kerusakan sekunder pada rantai konveyor akibat hentian mendadak (Rp 15.000.000).

- Pemborosan bahan baku dalam proses (Rp 10.000.000).
- Gangguan pada jadwal pengiriman ke pelanggan utama, berpotensi menimbulkan penalti dan hilangnya kepercayaan (brand damage).
- Total Estimasi Kerugian Unplanned Downtime: Rp 400.000.000 + Rp 85.000.000 + Rp 25.000.000 = Rp 510.000.000.

b) Insiden 2: Planned Downtime (Pemeliharaan Preventif Filler Head)

- Durasi: Mesin dihentikan sesuai jadwal selama 4 jam pada akhir shift.
- Aktivitas: Pemeriksaan, pembersihan, penggantian seal, dan kalibrasi nozzle.
- Biaya Langsung:
 - Kehilangan Produksi: 4 jam x 10.000 botol/jam = 40.000 botol.
 - Nilai Kehilangan Penjualan: 40.000 botol x Rp 5.000 = Rp 200.000.000.
 - Biaya Pemeliharaan Terjadwal: Suku cadang rutin + tenaga kerja reguler = Rp 12.000.000.
- "Keuntungan" yang Diperoleh (*Avoided Costs*):
 Aktivitas ini mencegah potensi unplanned downtime pada filler head yang, berdasarkan data historis, dapat berlangsung 12 jam dan menyebabkan kerusakan lebih parah. Perkiraan kerugian yang dihindari adalah Rp 750.000.000 (berdasarkan perhitungan serupa Insiden 1).

Total Biaya Langsung Planned Downtime: Rp 200.000.000 + Rp 12.000.000 = Rp 212.000.000.

Nilai Bersih (Net Value): Rp 212.000.000 - Rp 750.000.000 (kerugian yang dihindari) = "Penghematan" Rp 538.000.000.

5.3 Analisis Perbandingan dan Akar Masalah

Parameter	Unplanned Downtime (Motor)	Planned Downtime (PM Filler)
Sifat	Reaktif, Darurat, Tidak Terduga	Proaktif, Terjadwal, Terkontrol
Durasi Efektif	8 jam (3 jam untuk diagnosis & tunggu suku cadang)	4 jam (semua untuk pekerjaan produktif)
Kerugian per Jam	Rp 63,75 juta/jam (Rp 510 jt / 8 jam)	Rp 53 juta/jam (Rp 212 jt / 4 jam) <i>hanya biaya langsung</i>
Rasio Biaya Perbaikan vs Kehilangan Produksi	1 : 4.7 (Rp 85 jt : Rp 400 jt)	1 : 16.7 (Rp 12 jt : Rp 200 jt)
Dampak Operasional	Tinggi (mengacaukan rencana, menyebabkan stres, kualitas mungkin turun)	Rendah (tertuangkan dalam rencana produksi, dapat diantisipasi)
Akar Penyebab	Kegagalan Pemantauan Kondisi: Tidak ada program	Kepatuhan terhadap Jadwal: Dilaksanakan sesuai

	pemantauan getaran (<i>vibration analysis</i>) pada motor. Strategi pemeliharaan bersifat <i>run-to-failure</i> .	rencana untuk mencegah kegagalan fungsional yang lebih mahal.
--	---	---

Akar masalah dari unplanned downtime yang mahal adalah tidak diterapkannya pemeliharaan prediktif (PdM). Padahal, gejala awal seperti peningkatan suhu dan getaran pada motor konveyor sebenarnya dapat terdeteksi berminggu-minggu sebelumnya (Mobley, 2002). Kegagalan untuk berinvestasi dalam teknologi monitoring sederhana (sekitar Rp 50 juta untuk sistem vibration sensor) justru mengakibatkan kerugian lebih dari 10 kali lipat.

5.4 Rekomendasi Solusi Berbasis Bukti

Berdasarkan analisis, rekomendasi untuk PT Sinar Jaya adalah:

1. Implementasi Pemeliharaan Prediktif Dasar: Memasang sensor getaran dan suhu pada motor-motor dan peralatan kritis lainnya. Data dianalisis untuk memprediksi Remaining Useful Life (RUL) dan menjadwalkan intervensi sebelum kegagalan terjadi, mengubah unplanned menjadi planned downtime (Dalzochio et al., 2020).
2. Optimasi Interval Planned Maintenance (PM): Menggunakan data historis dan prediktif untuk meninjau ulang interval PM. Apakah interval 4 jam untuk PM filler sudah optimal? Mungkin dengan kondisi yang lebih baik dari pemantauan, interval dapat diperpanjang menjadi 6 jam, sehingga availability meningkat tanpa meningkatkan risiko kegagalan.
3. Peningkatan Manajemen Suku Cadang Kritis (Critical Spares): Motor penggerak konveyor harus dikategorikan sebagai suku cadang kritis dan tersedia di gudang. Biaya penyimpanan (holding cost) jauh lebih rendah dibandingkan biaya downtime 4 jam menunggu pengiriman.
4. Perhitungan ROI yang Komprehensif: Proposal investasi dalam teknologi PdM harus berdasarkan analisis biaya-manfaat yang jelas, seperti yang ditunjukkan dalam mini-case ini. ROI dihitung dari pengurangan unplanned downtime dan peningkatan OEE, bukan hanya dari penghematan biaya perbaikan (Fabi et al., 2021).

Kesimpulan dan Implikasi

Mini-case ini secara tegas mengilustrasikan perbedaan drastis antara planned dan unplanned downtime:

- Unplanned Downtime adalah "pembunuh" produktivitas dan profitabilitas yang sesungguhnya. Biayanya 3-4 kali lebih tinggi daripada biaya langsung kehilangan produksi, karena efek domino yang ditimbulkannya.
- Planned Downtime, meskipun tetap menimbulkan biaya kehilangan produksi, adalah investasi strategis. Ia berfungsi sebagai alat kontrol untuk mencegah bencana finansial yang jauh lebih besar dari unplanned downtime.

Implikasi bagi manajemen adalah perlunya pergeseran paradigma: anggaran untuk pemeliharaan prediktif dan persediaan suku cadang kritis bukanlah biaya, melainkan

asuransi yang sangat diperlukan untuk melindungi arus pendapatan dan reputasi perusahaan. Dengan merencanakan dan mengelola downtime secara proaktif, perusahaan tidak hanya menghemat uang dalam jangka panjang tetapi juga membangun ketahanan (resilience) dan keandalan (reliability) operasional yang menjadi keunggulan kompetitif di pasar.

LATIHAN

Studi Kasus Sederhana: Mesin Cetak Roti "RotiCepat"

PT RotiCepat memiliki satu lini utama mesin cetak dan pemanggang roti otomatis. Data operasional dan keuangan dasar mesin ini adalah:

- Kapasitas produksi normal: 2.000 bungkus roti per jam.
- Margin kontribusi (keuntungan setelah dikurangi biaya bahan baku, tenaga kerja langsung, dan energi untuk memproduksi): Rp 500 per bungkus.
- Waktu operasi terjadwal per hari: 8 jam (1 shift).

Selama bulan April 2024, terjadi dua insiden penghentian mesin:

Insiden A:

- Deskripsi: Mesin tiba-tiba berhenti pada hari Rabu karena motor pengaduk adonan (mixer motor) mengalami kegagalan (terbakar).
- Aktivitas: Tim pemeliharaan melakukan perbaikan darurat. Mereka membutuhkan waktu 1 jam untuk mendiagnosis, 2 jam untuk mendapatkan penggantian motor baru dari toko di luar kota, dan 3 jam untuk mengganti dan mengujinya.
- Biaya Langsung Perbaikan: Motor baru dan tenaga kerja lembur menghabiskan Rp 8.000.000.

Insiden B:

- Deskripsi: Pada hari Sabtu, mesin dihentikan sesuai jadwal untuk pemeliharaan rutin.
- Aktivitas: Aktivitas yang dilakukan adalah pembersihan rak oven, pengetatan sabuk penggerak (belt), dan penggantian oli pada gearbox. Semua suku cadang yang diganti adalah standar.
- Durasi: Mesin berhenti selama 3 jam.
- Biaya Langsung Pemeliharaan: Suku cadang dan tenaga kerja reguler menghabiskan Rp 1.500.000.

Pertanyaan:

1. Identifikasi dan Deskripsi

- a. Berdasarkan studi kasus di atas, klasifikasikan Insiden A dan Insiden B ke dalam kategori planned downtime atau unplanned downtime.
- b. Jelaskan dua perbedaan utama antara kedua kategori downtime tersebut dengan merujuk pada karakteristik Insiden A dan B. (Contoh karakteristik: sifat kejadian, dampak terhadap perencanaan produksi, biaya perbaikan relatif terhadap kerugian produksi).

2. Perhitungan Kuantitatif

- a. Hitunglah total kerugian akibat kehilangan produksi (dalam Rupiah) untuk masing-masing insiden (Insiden A dan Insiden B).
- b. Hitunglah total kerugian finansial langsung (kehilangan produksi + biaya perbaikan/pemeliharaan) untuk masing-masing insiden.
- c. Berdasarkan perhitungan Anda, insiden manakah yang secara finansial lebih merugikan bagi perusahaan? Berikan alasan singkat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., & Barbosa, J. (2020). Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges. *Computers in Industry*, 123, 103298.
2. Fabi, V., di Girolamo, F., & de Sanctis, I. (2021). A methodology to assess

LAMPIRAN

A. Kunci Jawaban Modul 1

Pilihan Ganda

1. C
2. B
3. B
4. B
5. C
6. B
7. C
8. D
9. A
10. C

Isian Singkat (Jawaban Ringkas)

11. Pemeliharaan setelah terjadi kegagalan; reaktif/run-to-failure.
12. Meningkatkan availability; menurunkan life cycle cost; meningkatkan kualitas; meningkatkan keselamatan.
13. Menganalisis pola/anomali untuk memprediksi potensi kegagalan.
14. Getaran, temperatur, tekanan, arus listrik, kebisingan, dll.
15. Karena komponen diganti berdasarkan jadwal, bukan kondisi aktual sehingga komponen yang masih layak sering diganti sebelum waktunya.

B. Kunci Jawaban Modul 2

1. Reliability adalah probabilitas suatu aset beroperasi tanpa mengalami kegagalan dalam periode waktu tertentu dan pada kondisi operasi yang ditentukan.
2. $MTBF = \text{Total waktu operasi} / \text{Jumlah kegagalan}$.
3. $A_i = MTBF / (MTBF + MTTR)$
 $A_i = 50 / (50 + 2) = 50 / 52 = 0,9615$ atau 96,15%.
4. Semakin besar MTTR, semakin rendah Availability; semakin kecil MTTR, Availability meningkat.
5. Contoh jawaban yang benar:
"Mesin dengan Reliability rendah (sering gagal) tetapi memiliki Maintainability baik (waktu perbaikan cepat) dapat tetap memiliki Availability yang cukup tinggi."

C. Kunci Jawaban Modul 3

Kunci Jawaban Soal Pilihan Ganda Modul 3

1. B
2. C Perhitungan: $Uptime = 600 - 15 = 585$; $MTBF = 585/3 = 195$ jam.
3. A
4. B
5. D
6. A
7. B
8. C

9. C
10. D

Kunci Jawaban Soal Isian Singkat Modul 3

1. MTBF = Total Waktu Operasi (Uptime) / Jumlah Kegagalan.
2. Contoh komponen: waktu deteksi, waktu respons, waktu diagnosis, waktu perolehan suku cadang, waktu perbaikan aktif, waktu pengujian.
3. Availability, Performance, dan Quality.
4. Minor Stops dan Reduced Speed.
5. $Quality = (300 - 12)/300 \times 100\% = 96\%$.

D. Kunci Jawaban Modul 4

1. Karena perangkat keselamatan dirancang untuk menghentikan atau mencegah gerakan mesin berbahaya ketika kondisi abnormal terjadi; jika perangkat ini gagal akibat kurangnya pemeliharaan, operator kehilangan mekanisme proteksi terakhir yang mencegah kecelakaan fatal.
2. 1) Biaya downtime produksi; 2) Biaya kualitas seperti scrap, rework, atau klaim garansi. (Jawaban lain relevan diterima: denda regulator, energi terbuang, biaya hukum.)
3. Karena pemeliharaan prediktif menurunkan downtime tak terencana, memungkinkan penggantian komponen tepat waktu, mengurangi kerusakan sekunder, serta mengoptimalkan penggunaan komponen sehingga biaya tidak langsung dapat ditekan seminimal mungkin.
4. Budaya "Safety First" mendorong lingkungan kerja yang tertib dan disiplin, memastikan prosedur pemeliharaan dilakukan dengan benar (misalnya LOTO), sehingga mengurangi kesalahan, kecelakaan, dan downtime yang berdampak langsung pada peningkatan efisiensi operasi.
5. Karena kecelakaan menimbulkan biaya kompensasi, biaya pengobatan, denda regulator, kerusakan aset, downtime panjang, penurunan moral pekerja, hingga kerugian reputasi, yang secara total jauh melebihi biaya pencegahan melalui pemeliharaan.

Kunci Jawaban Modul 5

1. Identifikasi dan Deskripsi

- a. Klasifikasi:
 - Insiden A adalah Unplanned Downtime.
 - Insiden B adalah Planned Downtime.
- b. Dua Perbedaan Utama (contoh jawaban):
 - 1) Sifat Kejadian: Unplanned downtime (Insiden A) bersifat tidak terduga, darurat, dan reaktif (motor terbakar tiba-tiba). Planned downtime (Insiden B) bersifat terjadwal, terkontrol, dan proaktif (dilakukan sesuai rencana untuk pencegahan).
 - 2) Dampak pada Perencanaan: Unplanned downtime mengacaukan jadwal produksi dan pengiriman yang sudah direncanakan (terjadi di hari kerja Rabu).

Planned downtime telah diperhitungkan dalam jadwal produksi sehingga dampak operasionalnya dapat diantisipasi (dilakukan di hari Sabgu, mungkin saat permintaan rendah).

(Alternatif jawaban lain: Perbedaan dalam rasio biaya perbaikan vs kehilangan produksi, durasi efektif perbaikan, dsb.)

2. Perhitungan Kuantitatif

a. Kerugian Kehilangan Produksi:

- Insiden A: Durasi = $1+2+3 = 6$ jam.
 - Kehilangan Produksi = $6 \text{ jam} \times 2.000 \text{ bungkus/jam} = 12.000 \text{ bungkus}$.
 - Kerugian (Rp) = $12.000 \text{ bungkus} \times \text{Rp } 500/\text{bungkus} = \text{Rp } 6.000.000$.
- Insiden B: Durasi = 3 jam.
 - Kehilangan Produksi = $3 \text{ jam} \times 2.000 \text{ bungkus/jam} = 6.000 \text{ bungkus}$.
 - Kerugian (Rp) = $6.000 \text{ bungkus} \times \text{Rp } 500/\text{bungkus} = \text{Rp } 3.000.000$.

b. Total Kerugian Finansial Langsung:

- Insiden A: $\text{Rp } 6.000.000 + \text{Rp } 8.000.000 = \text{Rp } 14.000.000$.
- Insiden B: $\text{Rp } 3.000.000 + \text{Rp } 1.500.000 = \text{Rp } 4.500.000$.

c. Analisis Singkat:

Insiden A (Unplanned Downtime) secara finansial jauh lebih merugikan (Rp 14 juta vs Rp 4,5 juta).

Alasan: Meskipun durasinya hanya 2x lebih lama (6 jam vs 3 jam), total kerugiannya lebih dari 3x lipat. Hal ini disebabkan oleh tingginya biaya perbaikan darurat (motor baru dan lembur) yang mencapai Rp 8 juta, dibandingkan biaya pemeliharaan terjadwal yang hanya Rp 1,5 juta.

