

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konsep Dasar Pemeliharaan (*Maintenance*)

Menurut (Manzini, 2010), dalam *Maintenance for Industrial System* (2010), *maintenance* adalah aktivitas monitoring dan pemeliharaan alat/fasilitas yang bertujuan untuk memaksimalkan penggunaan dan mengurangi gangguan operasional/lapangan yang tidak direncanakan. Dalam area operasional bisnis, *maintenance* adalah komponen penting yang berkontribusi pada efisiensi produksi dan kelangsungan bisnis. Tanpa *maintenance* yang tepat, peralatan dapat mengalami kerusakan yang tak terduga, yang pada akhirnya akan menghambat proses produksi dan meningkatkan biaya. Oleh karena itu, melakukan *maintenance* secara teratur membantu perusahaan menghindari kerusakan besar yang membutuhkan perbaikan mahal. Peran *maintenance* dalam bisnis tidak hanya terbatas pada menjaga kelancaran produksi, tetapi juga berfungsi untuk memperpanjang usia pakai aset perusahaan.

Selain itu, *maintenance* adalah langkah penting dalam menjaga biaya operasional tetap rendah. Ketika peralatan rusak secara mendadak, perusahaan harus mengeluarkan biaya tambahan untuk perbaikan mendesak, yang sering kali jauh lebih mahal dibandingkan dengan biaya pemeliharaan rutin. Dengan pemeliharaan yang tepat, biaya tersebut dapat ditekan seminimal mungkin.

Secara umum, aktivitas pemeliharaan dibedakan menjadi beberapa kategori:

1. ***Corrective Maintenance (CM)*** – dilakukan setelah kerusakan terjadi.
2. ***Preventive Maintenance (PM)*** – dilakukan secara terjadwal untuk mencegah kegagalan.
3. ***Predictive Maintenance (PdM)*** – berdasarkan kondisi aktual komponen melalui analisis getaran, temperatur, atau pelumasan.
4. ***Proactive Maintenance (PrM)*** – strategi yang menitikberatkan pada langkah-langkah proaktif mencegah kerusakan.

2.2. Engine Caterpillar C32 dan Karakteristik Operasionalnya

Menurut (*Caterpillar Inc., n.d.*). Engine Caterpillar C32 merupakan mesin diesel berkapasitas besar yang dirancang untuk aplikasi berat dengan kebutuhan tenaga tinggi dan operasi berkelanjutan. Secara fungsi, C32 berperan sebagai sumber tenaga utama (*prime mover*) pada berbagai peralatan industri, baik sebagai penggerak mekanis maupun penyedia energi listrik. Mesin ini menggunakan konfigurasi V12 dengan displacement 32,1 liter, sistem *pembakaran high-pressure fuel injection*, serta dilengkapi *Electronic Control Module* (ECM) yang mengatur suplai bahan bakar, waktu pengapian, kontrol emisi, dan proteksi mesin. Sistem *turbocharger* ganda (*twin turbo*) memberikan efisiensi pembakaran yang lebih optimal dan meningkatkan output daya pada beban berat.

Dari sisi spesifikasi, Caterpillar C32 mampu menghasilkan tenaga antara 880 hingga lebih dari 1.200 HP, tergantung aplikasi dan konfigurasi. Mesin ini memiliki torsi besar pada putaran rendah, dilengkapi *aftercooler*, sistem pelumasan bertekanan, pendinginan cairan, serta integrasi sensor elektronik untuk memantau kondisi *engine* secara real-time. Desainnya dibuat untuk mendukung durabilitas tinggi pada lingkungan ekstrem dengan interval pemeliharaan yang panjang.

Secara aplikasi, *engine* C32 banyak digunakan pada sektor pertambangan, khususnya pada dozer, excavator besar, dan *off-highway truck*. Selain itu, mesin ini digunakan pada *marine propulsion*, genset industri, oil & gas, serta peralatan heavy-duty lainnya. Kombinasi tenaga besar, efisiensi bahan bakar, dan kontrol elektronik yang presisi menjadikan C32 salah satu mesin paling populer di industri alat berat dan energi.

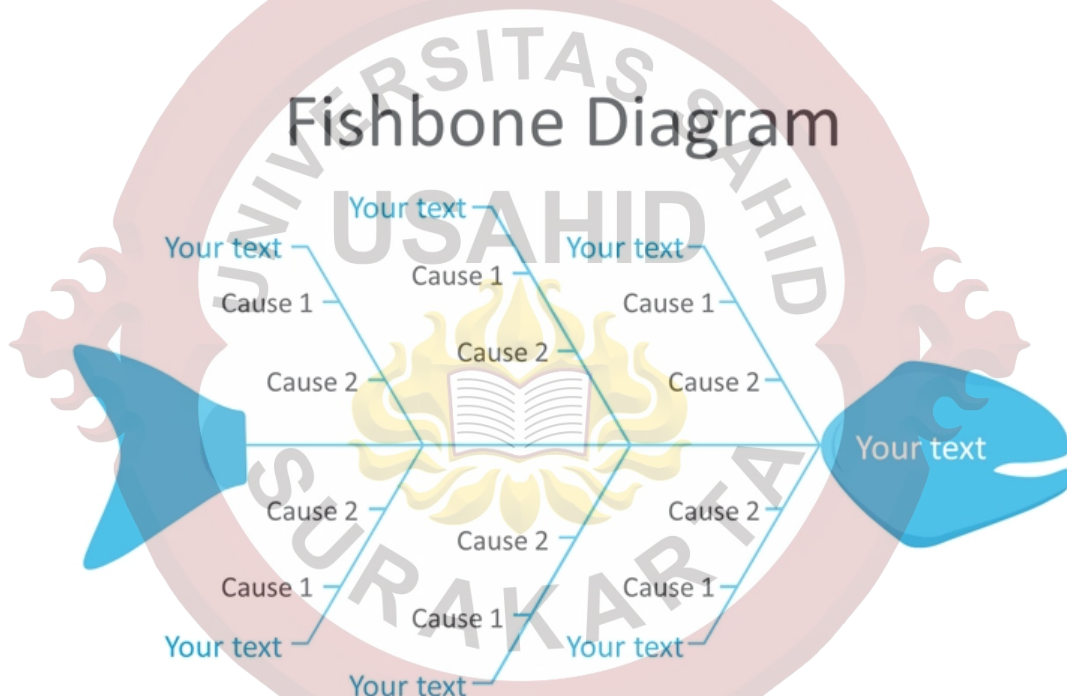
2.3. Mechanical Availability

Menurut (FERLY LIM, 2021) MA (*Mechanical Availability*) adalah angka yang menunjukkan persentase suatu alat untuk beroperasi dengan memperhitungkan kehilangan waktu sebab-sebab mekanis, misalnya repair, perawatan, perbaikan. Biasanya dihitung dalam formula:

$$MA = \frac{\text{Jam Operasi}}{\text{Jam Operasi} + \text{Jam Breakdown}} \times 100\%$$

2.4. *FishBone* Diagram (Cause-and-Effect Analysis)

(Malabay, 2016) *FishBone* Diagram, dikembangkan oleh Kaoru Ishikawa, merupakan alat analisis penyebab masalah secara sistematis berdasarkan kategori utama seperti *Man*, *Machine*, *Method*, *Material*, *Environment*, dan *Measurement*. Dalam konteks pemeliharaan, diagram ini digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) dari kegagalan mesin secara visual dan terstruktur.



Gambar 2. 1 Template *FishBone* Diagram

Sumber: <https://www.templateswise.com/fishbone-diagram-powerpoint-template>

Keunggulan metode ini adalah kemampuannya menyederhanakan kompleksitas masalah teknis menjadi peta sebab-akibat yang mudah dianalisis. *FishBone* bukan alat pengambil keputusan akhir, tetapi tahap awal dalam menentukan variabel dominan.

Penerapan *FishBone* Diagram dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

1. Menentukan masalah utama Tuliskan secara jelas dan spesifik masalah yang akan dianalisis.
2. Menentukan kategori penyebab utama, umumnya terdiri dari enam aspek utama yang dikenal sebagai 6M:
 - *Man* (operator, pelatihan, disiplin kerja)
 - *Machine* (kondisi mesin, usia komponen)
 - *Method* (prosedur kerja, SOP)
 - *Material* (kualitas bahan bakar, oli, pelumas)
 - *Measurement* (akurasi alat ukur, kalibrasi)
 - *Environment* (lingkungan kerja, suhu, debu)
3. Mengidentifikasi penyebab spesifik brainstorming dilakukan untuk menuliskan penyebab-penyebab rinci di setiap cabang.

(Pujiati, 2024) Pada dasarnya bentuk visual dari penelitian *fishbone* tidak harus kaya warna dan membentuk tulang ikan seperti ikan asli. Namun bisa juga dalam bentuk sedikit lebih abstrak, tapi tetap masuk kategori diagram *fishbone*.

Untuk ketentuan faktor 6M sendiri, (Ken Feldman, 2025) Menyatakan bahwa kelengkapan 6M bisa diubah, dihapus, atau diganti sesuai konteks proses yang dianalisis dan temuan aktual.

2.5. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Menurut Stamatis (Sebagaimana dikutip dalam Hanif, 2015), FMEA adalah sebuah teknik rekayasa yang digunakan untuk menetapkan, mengidentifikasi, dan untuk menghilangkan kegagalan yang diketahui, permasalahan, error, dan sejenisnya dari sebuah sistem, desain, proses, dan atau jasa sebelum mencapai konsumen. FMEA pertama kali dikembangkan oleh NASA (National Aeronautics and Space Administration) pada awal tahun 1960-an untuk keperluan program luar angkasa *Apollo*. Tujuannya adalah mencegah terjadinya kegagalan yang dapat membahayakan misi dengan menganalisis potensi kerusakan sistem sebelum terjadi. FMEA merupakan metode sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan memprioritaskan mode kegagalan berdasarkan tiga parameter utama

Tahapan umum pelaksanaan FMEA adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi komponen dan fungsi sistem tentukan komponen utama yang dianalisis.
2. Identifikasi mode kegagalan (*Failure Mode*) catat bagaimana komponen bisa gagal.
3. Menentukan efek kegagalan (*Failure Effect*) jelaskan konsekuensi dari kegagalan tersebut.
4. Menentukan penyebab kegagalan (*Failure Cause*) tentukan akar penyebab teknis.
5. Menilai tingkat risiko (*Severity, Occurrence, Detection*)
 - *Severity* (S): Dampak kegagalan terhadap sistem (1–10).
 - *Occurrence* (O): Frekuensi terjadinya kegagalan (1–10).
 - *Detection* (D): Kemampuan sistem mendeteksi kegagalan sebelum terjadi (1–10).

6. Menghitung *Risk Priority Number* (RPN)

$$RPN = S \times O \times D$$

Semakin tinggi nilai *Risk Priority Number* (RPN), semakin besar prioritas tindakan korektif yang diperlukan.

7. Menentukan tindakan perbaikan (*Recommended Action*). Buat rencana untuk menurunkan nilai S, O, atau D, seperti peningkatan inspeksi, penggantian material, atau perbaikan prosedur kerja.
8. Evaluasi ulang hasil tindakan setelah tindakan diterapkan, lakukan penilaian ulang untuk memastikan risiko menurun sesuai target.

Efek	Kriteria : <i>Severity</i> untuk <i>Failure Mode Effect Analyze</i>	Rangking
Kinerja sistem Berhenti	• Mesin rusak parah • Tidak tersedianya komponen pengganti	10
Kinerja sistem berjalan dengan sangat lambat	• Mesin rusak cukup parah • Tidak tersedianya komponen pengganti	9
Kinerja sistem berjalan dengan lambat	• Mesin rusak cukup parah • Komponen atau <i>spare part</i> tersedia	8
Kinerja Sistem berjalan dengan sedikit tersendat	• Mesin rusak cukup parah • Mesin dapat beroperasi secara manual	7
Kinerja Sistem berjalan cukup lancar	• Mesin rusak ringan • Mesin dapat beroperasi secara manual	6
Kinerja Sistem berjalan lancar	• Mesin rusak ringan • Rusak pada settingan mesin	5
Kinerja Sistem Berjalan dengan perlakuan khusus	• Mesin rusak ringan	4
Kinerja Sistem sedikit terganggu	• Mesin rusak ringan • Menunggu komponen atau <i>spare part</i>	3
Kinerja Sistem tetap berjalan	• Mesin Error • Salah <i>Setting-an</i>	2
Kinerja Sistem tidak terganggu	• Mesin kotor	1

Sumber : (Ramadhan, 2018)

Gambar 2. 2 Kriteria dan skala rangking untuk *Severity*

Rating	<i>Probability of Occurence</i>
10	Lebih besar dari 50% per total jumlah kerusakan mesin
9	36 – 50 % per per total jumlah kerusakan mesin
8	31 – 35 % per total jumlah kerusakan mesin
7	26 – 30 % per total jumlah kerusakan mesin
6	21 – 25 % per total jumlah kerusakan mesin
5	15 – 20 % per total jumlah kerusakan mesin
4	11 – 14 % per total jumlah kerusakan mesin
3	5 – 10 % per total jumlah kerusakan mesin
2	< 5% per total jumlah kerusakan mesin
1	Tidak pernah sama sekali

Sumber : Erwin Nainggolan (Maghfiroh, 2019)

Gambar 2. 3 Kriteria dan skala rangking untuk *Occurence*

Deteksi	Criteria Likelihood of Detection	Rangking
Sepenuhnya tidak pasti	• Alat atau informasi tidak dapat mendeteksi penyebab kerusakan	10
Sangat jarang	• Sangat jarang kemungkinannya alat atau informasi mendeteksi penyebab kerusakan	9
Jarang	• Alat untuk mendeteksi kerusakan mengalami keausan dan di dalam alat tersebut ada komponen yang rusak • Jarang kemungkinannya alat atau informasi untuk mendeteksi penyebab kerusakan	8
Sangat rendah	• Kemampuan alat atau informasi untuk mendeteksi kerusakan sangat rendah	7
Rendah	• Alat atau informasi untuk mendeteksi kerusakan rendah	6
Cukup	• Alat atau informasi untuk mendeteksi kerusakan cukup untuk mendeteksi penyebab kerusakan	5
Cukup tinggi	• Alat atau informasi cukup tinggi kemungkinannya dalam mendeteksi penyebab kerusakan	4
Tinggi	• Alat atau informasi tinggi kemungkinannya dalam mendeteksi penyebab kerusakannya	3
Sangat tinggi	• Alat atau informasi sangat tinggi dapat mendeteksi penyebab kerusakan	2
Hampir pasti	• Operator produksi dalam memberikan laporan kerusakan sama dengan apa yang terjadi di lapangan	1

Sumber : (Ramadhan, 2018)

Gambar 2. 4 Kriteria dan skala rangking untuk Detection

2.6. Reliability Centered Maintenance (RCM)

(Khoiruddin Tansa, 2021) Salah satu tujuan dari *maintenance* adalah untuk memastikan bahwa suatu aset fisik tetap melakukan tugasnya sesuai parameter yang diinginkan oleh penggunanya. Dalam hal ini, *Reliability Centered Maintenance (RCM)* mempunyai peranan penting dalam melakukan *maintenance*. *RCM (Reliability Centered Maintenance)* merupakan sebuah proses atau metode yang digunakan untuk menentukan kebutuhan *maintenance* suatu aset fisik agar tetap bisa melakukan tugasnya. Berikut merupakan tahapan-tahapan dari *maintenance*

strategy *RCM (Reliability Centered Maintenance)*. Konsep *Reliability Centered Maintenance* pertama kali dikembangkan oleh industri penerbangan oleh Nowlan & Heap pada tahun 1978 dan kini menjadi standar emas dalam manajemen keandalan peralatan industri. RCM bertujuan menentukan strategi pemeliharaan paling efektif dengan menjawab tujuh pertanyaan kunci terkait fungsi, mode kegagalan, penyebab, konsekuensi, dan tindakan preventif yang paling sesuai.

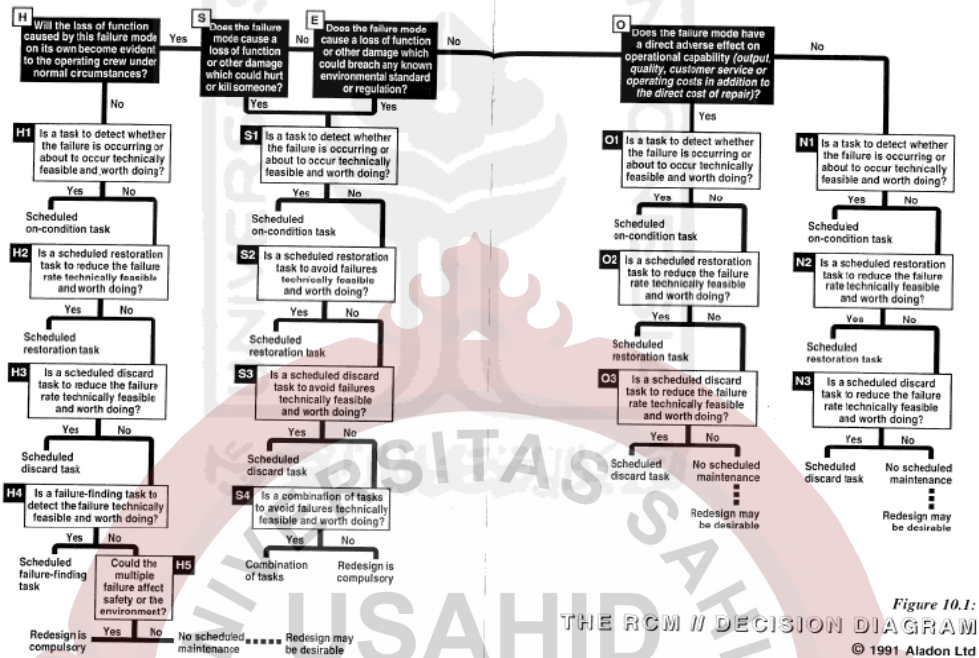
Pertanyaan tersebut diantaranya :

1. Fungsi peralatan itu apa?
2. Apa saja standar performanya?
3. Apa yang membuat fungsi itu gagal? (*Failure Mode*)
4. Apa penyebab kegagalannya?
5. Apa akibat kegagalannya?
6. Bagaimana cara mencegah atau mendeteksinya?
7. Apa tindakan terbaik jika tidak ada perawatan efektif?

Implementasi RCM secara umum mencakup tujuh langkah utama:

1. Menentukan mesin/peralatan mana yang penting untuk dianalisis.
2. Mendefinisikan fungsi mesin/peralatan.
3. Menentukan *functional failure* (kapan mesin dianggap tidak berfungsi)
4. Mengidentifikasi mode kegagalan
5. Mengidentifikasi *Failure Effect* (dampak kegagalan)
6. Mengidentifikasi konsekuensi resiko kegagalan dengan kategori:
 - *Safety consequence*
 - *Environmental consequence*
 - *Operational consequence*
 - *Non-operational consequence*
7. Menetapkan Tindakan Perawatan menggunakan Decision Diagram:
 - *Scheduled on-condition* (berdasarkan kondisi)
 - *Scheduled restoration* (restorasi/overhaul)
 - *Scheduled discard* (ganti berkala)
 - *Failure-finding* (cari apakah sistem proteksi gagal)
 - *Redesign* (ubah desain)

- *Run-to-failure*



Gambar 2. 6 RCM II decision diagram

Worksheet				Task Significance and Evaluation										Default Task	Proposed Task	Can be Done by
Information Reference			Consequences Evaluation				H1	H2	H3							
							S1	S2	S3							
							O1	O2	O3							
F	FF	FM	H	S	O	N	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	1	1	N	N	N	Y	N	N	Y	Y			Do Scheduled Discard task by replacing inlet drain primary superheated pipe. Also by doing finding failure task by checking the material composition by using spectrometer as a predictive maintenance effort	Engineering mechanic		
		2	Y	N	N	N	N	Y	N	Y			Do Scheduled Restoration Task by fixing the inler header drain valve in the secondary superheated by closing leaked plug. Do finding failure buy checking the condition of the valve.	Engineering mechanic		
		3	Y	N	N	N	N	Y	N	Y			Do Scheduled Restoration Task by fixing the inler header drain valve in the final superheated by closing the leaked plug. Do finding failure activity by checking the valve condition.	Engineering mechanic		
		4	Y	N	Y	N	N	Y	N	N			Do scheduled restoration task by cleaning using cathodic protection	Har Mekanik, Engineering		

Gambar 2.5 RCM II Sample Works

2.7. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian relevan yang menjadi dasar teoritis antara lain:

Tabel 2.1 List Penelitian Terdahulu

No	Tahun	Penulis	Judul	Metode	Hasil Utama
1	2021	Supriyanto et al.	<i>Maintenance Performance Evaluation of an RCM Implementation: A Functional Oriented Case Study</i>	RCM+FMEA	FMEA mendukung RCM, menentukan interval & jenis pemeliharaan pompa pendingin
2	2023	DP Ishak	Planning Preventive <i>Maintenance</i> for Press Machines using RCM	RCM+ FMEA	Rencana pemeliharaan berbasis risiko, mengurangi kegagalan mesin press
3	2022	Sulkifli et al.	Machine <i>Maintenance</i> Planning Using RCM	RCM	Pemeliharaan mesin gulungan (<i>mill roll</i>), mengurangi <i>downtime</i>
4	2025	Juniawan Preston	Implementation of FMEA in Main <i>Engine</i> Cooling System Pump	FMEA	Identifikasi mode kegagalan pompa, strategi pemeliharaan diperbaiki
5	2025	Nurizal Deo F	Perancangan Strategi Pemeliharaan <i>Engine</i> C32 Melalui In-tegrasi <i>FishBone</i> Diagram, FMEA, dan RCM Untuk Peningkatan Umur Pakai (Studi Kasus di PT XYZ)	<i>FishBone</i> +FMEA+ RCM	

2.8. Kerangka Berpikir

Berikut kerangka berpikir yang menggambarkan alur logika penelitian mulai dari identifikasi masalah hingga evaluasi hasil sebagai berikut:



Gambar 2.7 Diagram Kerangka Berpikir