

**PERENCANAAN PEMELIHARAAN MESIN KILN V DENGAN METODE
RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM) DAN FAILURE MODE AND
EFFECT ANALYSIS (FMEA)
(STUDI KASUS : PT SEMEN TONASA)**



MAUREEN MIICHELLE YT

D071211061



**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**PERENCANAAN PEMELIHARAAN MESIN KILN V DENGAN METODE
*RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM) DAN FAILURE MODE
AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)*
(STUDI KASUS: PT SEMEN TONASA)**

MAUREEN MICHELLE YT

D071211061



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK INDUSTRI

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2025

SKRIPSI

PERENCANAAN PEMELIHARAAN MESIN KILN V DENGAN METODE *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM) DAN FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)* (STUDI KASUS: PT SEMEN TONASA)

HALAMAN PENGESAHAN

MAUREEN MICHELLE YT

D071211061

Skripsi,

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana pada tanggal bulan tahun dan
dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
Pada

Program Studi Teknik Industri
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Makassar

Mengesahkan:
Pembimbing tugas akhir,



Dr. Ir. Rosmalina Hanafi, M.Eng
NIP. 19660128 199103 2 003

Mengetahui:
Ketua Program Studi,



Ir. Kifayah Amar, ST., M.Sc., Ph.D, IPU
NIP. 19740621 200604 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi berjudul “Perencanaan Pemeliharaan Mesin Kiln V Dengan Metode *Reliability Centered Maintenance* (Rcm) dan *Failure Mode And Effect Analysis* (Fmea) (Studi Kasus: PT Semen Tonasa)” adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing Dr. Ir. Rosmalina Hanafi, MT.Eng. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam daftar pustaka skripsi ini. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 17 September 2025



Maureen Michelle YT
NIM D071211061

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yesus Kristus atas kasih, rahmat, dan penyertaan-Nya yang senantiasa menguatkan penulis dalam setiap langkah hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Tidak lupa penulis juga memohon perantaraan doa dari Bunda Maria yang selalu menjadi teladan dalam kesetiaan dan pengharapan. Berkat anugerah dan penyertaan-Nya, penulis dapat menyusun dan menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Perencanaan Pemeliharaan Mesin Kiln V Dengan Metode Reliability Centered Maintenance (Rcm) Dan Failure Mode And Effect Analysis (FMEA) (Studi Kasus: Pt Semen Tonasa)”**. Penulisan tugas akhir ini dapat berjalan lancar tidak lepas dari bimbingan, dukungan, pengarahan dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karenanya, penulis dengan tidak mengurangi rasa hormat mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yesus Kristus yang senantiasa memberikan kasih, kekuatan, dan penyertaan dalam setiap langkah perjalanan penyelesaian tugas akhir ini. Tanpa anugerah dan berkat-Nya, penulis tidak akan mampu menyelesaikan karya ini dengan baik.
2. Kedua orang tua penulis, bapak, mama dan kakak tercinta yang tidak pernah lelah memberikan dukungan baik secara moril maupun materil. Kasih sayang, perhatian, dan motivasi yang tiada henti menjadi sumber kekuatan penulis dalam menghadapi segala rintangan selama menempuh pendidikan hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
3. Ibu Rosmalina selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan arahan, bimbingan, dan dedikasi yang luar biasa selama proses penyusunan skripsi ini. Ilmu yang beliau berikan merupakan sesuatu yang sangat berharga dan tidak bisa tergantikan dalam hal apapun bagi penulis.
4. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, atas segala bentuk dukungan, doa, serta bantuan yang telah diberikan selama proses pengerjaan tugas akhir ini. Kiranya Tuhan membalas dengan berkat berlipat ganda bagi Bapak, Ibu, dan rekan-rekan sekalian.
5. Terakhir namun tidak kalah penting, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada diri sendiri yang tidak pernah menyerah di tengah berbagai kesulitan dan tantangan. Perjalanan menyelesaikan tugas akhir ini telah mengajarkan banyak hal tentang ketahanan, kesabaran, dan ketekunan. Setiap air mata, keringat, dan pengorbanan yang telah dicurahkan tidak sia-sia hingga sampai pada titik ini.

Semoga karya ilmiah ini dapat memberikan manfaat tidak hanya bagi penulis namun juga bagi pembaca dan perkembangan ilmu pengetahuan di bidang terkait.

Makassar, 17 September 2025

Penulis

ABSTRAK

Maureen Michelle Yohan. T. **Perencanaan Pemeliharaan Mesin Kiln V Dengan Metode *Reliability Centered Maintenance* (Rcm) Dan *Failure Mode And Effect Analysis* (FMEA) (Studi Kasus: Pt Semen Tonasa)** (dibimbing oleh Dr. Ir. Rosmalina Hanafi, M.Eng).

Industri semen memiliki peran strategis dalam mendukung pembangunan infrastruktur dan pertumbuhan ekonomi nasional, sehingga efektivitas dan keandalan proses produksinya harus dijaga secara optimal. Salah satu peralatan utama yang menentukan kontinuitas produksi adalah rotary kiln, di mana komponen kritis seperti tyre dan support roller menjadi penyumbang utama *downtime* di PT Semen Tonasa Unit V. Kondisi ini menuntut strategi pemeliharaan yang lebih terstruktur dan berbasis risiko.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sistem kritis pada mesin kiln berdasarkan data operasional dan *downtime*, menganalisis keandalan komponen kritis melalui pendekatan distribusi *Time To Failure* (TTF) dan *Time To Repair* (TTR), serta merancang strategi pemeliharaan preventif dengan mengintegrasikan *Reliability Centered Maintenance* (RCM), *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), dan *Fault Tree Analysis* (FTA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa komponen tyre mengikuti distribusi TTR normal dengan nilai MTTR 260,98 jam dan distribusi TTF weibull dengan MTTF 7.529,29 jam, dengan reliabilitas 34,3% pada umur rata-rata. Strategi pemeliharaan yang sesuai adalah *Condition Directed Task* (CDT) dengan interval inspeksi 20 hari. Sementara itu, support roller mengikuti distribusi TTR Weibull dengan MTTR 311 jam dan distribusi TTF lognormal dengan MTTF 1.124,3 jam, dengan reliabilitas 31,7%. Komponen ini lebih tepat ditangani dengan *Time Directed Task* (TDT) dengan interval inspeksi 19 hari.

Temuan ini menegaskan bahwa penerapan RCM yang dipadukan dengan FMEA dan FTA mampu memberikan kerangka pemeliharaan berbasis risiko yang lebih efektif. Implementasi strategi ini diharapkan dapat mengurangi *downtime* tak terjadwal, meningkatkan efisiensi operasional, serta menjaga keberlangsungan proses produksi kiln secara berkelanjutan.

Kata kunci: Kiln, *Reliability Centered Maintenance* (RCM), *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Fault Tree Analysis* (FTA).

ABSTRACT

Maureen Michelle Yohan. T. ***Maintenance Planning of Kiln V Using Reliability Centered Maintenance (RCM) and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA): A Case Study at PT Semen Tonasa*** (Supervised by Dr. Ir. Rosmalina Hanafi, M.Eng).

The cement industry plays a strategic role in supporting infrastructure development and national economic growth, making the effectiveness and reliability of its production process essential. One of the key pieces of equipment that determines production continuity is the rotary kiln, where critical components such as the tyre and support roller are the main contributors to downtime at PT Semen Tonasa Unit V. This condition highlights the need for a more structured and risk-based maintenance strategy.

This study aims to identify the critical systems in the kiln based on operational and downtime data, analyze the reliability of these critical components using Time To Failure (TTF) and Time To Repair (TTR) distribution approaches, and design preventive maintenance strategies by integrating Reliability Centered Maintenance (RCM), Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), and Fault Tree Analysis (FTA). The results indicate that the tyre follows a normal distribution for TTR with an MTTR of 260.98 hours, and a Weibull distribution for TTF with an MTTF of 7,529.29 hours, with a reliability of 34.3% at the mean time. The appropriate maintenance strategy is Condition Directed Task (CDT) with a recommended inspection interval of 20 days. Meanwhile, the support roller follows a Weibull distribution for TTR with an MTTR of 311 hours, and a lognormal distribution for TTF with an MTTF of 1,124.3 hours, with a reliability of 31.7%. This component is best managed using a Time Directed Task (TDT) with a 19-day inspection interval. These findings emphasize that the implementation of RCM, complemented with FMEA and FTA, provides a more effective risk-based maintenance framework. The proposed strategy is expected to reduce unplanned downtime, improve operational efficiency, and ensure the sustainability of kiln production processes.

Keywords: Rotary Kiln, Reliability Centered Maintenance (RCM), Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), Fault Tree Analysis (FTA).

DAFTAR ISI

	Halaman
UCAPAN TERIMA KASIH.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Teori.....	2
1.3 Rumusan Masalah	19
1.4 Tujuan Penelitian.....	19
1.5 Batasan Masalah	19
1.6 Manfaat Penelitian	20
BAB II METODE PENELITIAN	21
2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	21
2.2 Sumber Data	21
2.3 Metode Pengumpulan Data	22
2.4 Prosedur Penelitian.....	22
2.5 Diagram Alir Penelitian.....	24
2.6 Kerangka Konseptual.....	25
BAB III HASIL	26
3.1 Gambaran Umum Perusahaan	26
3.2 Proses Poduksi Klinker	27
3.3 Pengumpulan data	28
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN	55
4.1 Kesimpulan	55
4.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA.....	58
LAMPIRAN.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Simbol dalam <i>Fault Tree Analysis</i> (FTA)	11
Tabel 2 Data <i>downtime</i>	28
Tabel 3 Data komponen kiln	32
Tabel 4 <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (FMEA) komponen kritis	35
Tabel 5 <i>Reliability Centered Maintenance</i> (RCM)	37
Tabel 6 Perhitungan TTR dan TTF komponen <i>tyre</i>	38
Tabel 7 Perhitungan TTR dan TTF komponen <i>Support Roller</i>	39
Tabel 8 Hasil analisis keandalan komponen <i>tyre</i> dan <i>support roller</i> pada <i>rotary kiln</i>	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Contoh Flowsheet Kiln CCR	3
Gambar 2 Contoh Diagram Pareto	15
Gambar 3 Lokasi Penelitian	21
Gambar 4 Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 5 Kerangka Konseptual.....	25
Gambar 6 Diagram pareto sistem kritis kiln	33
Gambar 7 <i>Fault Tree Analysis</i> (FTA) mesin kiln	34
Gambar 8 TTR komponen tyre distribusi weibull	40
Gambar 9 TTR komponen tyre distribusi exponential	40
Gambar 10 TTR komponen tyre distribusi lognormal	41
Gambar 11 TTR komponen tyre distribusi normal	41
Gambar 12 TTR komponen <i>support roller</i> distribusi weibull	42
Gambar 13 TTR komponen <i>support roller</i> distribusi exponential	42
Gambar 14 TTR komponen <i>support roller</i> distribusi lognormal	43
Gambar 15 TTR komponen <i>support roller</i> distribusi normal	43
Gambar 16 TTF komponen tyre distribusi weibull	44
Gambar 17 TTF komponen tyre distribusi normal	44
Gambar 18 TTF komponen tyre distribusi exponential	45
Gambar 19 TTF komponen tyre distribusi lognormal	45
Gambar 20 komponen support roller distribusi lognormal	46
Gambar 21 TTF komponen support roller distribusi normal	46
Gambar 22 TTF komponen <i>support roller</i> distribusi exponential	47
Gambar 23 TTF komponen <i>support roller</i> distribusi weibull	47
Gambar 24 <i>Survival plot of reability</i> komponen <i>support tyre</i>	44
Gambar 25 <i>Survival plot of reability</i> komponen <i>support roller</i>	50

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi objek penelitian	61
Lampiran 2 Kuisisioner	64

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri semen memiliki kontribusi penting dalam pembangunan infrastruktur nasional serta pertumbuhan sektor konstruksi. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2024), industri semen menyumbang 5,7% terhadap total Produk Domestik Bruto (PDB) sektor manufaktur Indonesia. Kontribusi ini menandakan bahwa industri semen merupakan komponen vital dalam menopang stabilitas dan pertumbuhan ekonomi jangka panjang. Oleh karena itu, efektivitas dan efisiensi proses produksi di industri ini harus dijaga secara optimal.

Salah satu tahapan utama dalam proses produksi semen adalah pembakaran bahan baku di dalam kiln yang beroperasi secara kontinu pada suhu sangat tinggi, melebihi 1400°C. Mesin kiln berfungsi sebagai pusat dari proses konversi material mentah menjadi klinker, yaitu komponen utama penyusun semen. Efisiensi dan keandalan mesin ini menjadi faktor penentu dalam stabilitas proses produksi secara keseluruhan. Menurut Budiasih dan Nopendri (2023), kiln merupakan salah satu penyebab utama terjadinya *downtime* dalam proses produksi semen, dengan kontribusi signifikan terhadap potensi kerugian operasional. Setiap kejadian gangguan operasional pada unit ini dapat menyebabkan kerugian hingga miliaran rupiah, sehingga pemeliharaan kiln memerlukan perhatian khusus guna menjaga kontinuitas produksi.

Proses pembuatan semen pada skala industri terdiri atas beberapa tahapan utama, dimulai dari penambangan bahan baku (mining), penggilingan bahan mentah (raw mill), pembakaran (burning), pendinginan klinker (clinker cooling), penggilingan akhir (finish mill), hingga tahap pengantongan produk akhir (*packing*). PT Semen Tonasa memiliki empat unit pabrik dengan kapasitas produksi yang bervariasi. Di antara seluruh unit tersebut, Unit V merupakan unit dengan kapasitas produksi terbesar, yaitu mencapai 2,5 juta ton per tahun. Berdasarkan laporan internal perusahaan selama periode 2022–2024, mesin rotary kiln pada Unit V tercatat mengalami total downtime sebesar 1.535,31 jam dengan jumlah kejadian kerusakan mencapai 139 kali. Setiap insiden kerusakan menyebabkan penghentian operasi rata-rata selama 11 jam. Jika dibandingkan dengan waktu operasi ideal tahunan sebesar 8.760 jam, kondisi tersebut menunjukkan kehilangan waktu operasi sebesar 17,5%. Dampak dari downtime ini berpotensi menurunkan tingkat produktivitas tahunan hingga sekitar 438 ribu ton dari kapasitas maksimal.

Saat ini, sistem pemeliharaan yang diterapkan di PT Semen Tonasa mengandalkan dua pendekatan utama, yaitu preventive maintenance (pemeliharaan pencegahan) dan predictive maintenance (pemeliharaan prediktif). *Preventive maintenance* dilakukan berdasarkan interval waktu tertentu sesuai jadwal tetap, sedangkan *predictive maintenance* menggunakan parameter kondisi aktual mesin untuk memprediksi potensi kerusakan. Meskipun strategi tersebut telah membantu mengurangi tingkat kerusakan secara umum, selama periode 2022–2024 gangguan pada kiln masih sering terjadi secara tidak terduga. Komponen yang paling sering mengalami kerusakan adalah support roller, diikuti oleh tyre. Kondisi ini menunjukkan bahwa kedua komponen tersebut

merupakan penyumbang utama *downtime* kiln dan perlu mendapatkan perhatian lebih dalam perencanaan pemeliharaan ke depannya.

Dengan mempertimbangkan peran penting mesin kiln dalam keberlangsungan proses produksi, tingginya risiko *downtime* akibat kerusakan mendadak, serta implikasi biaya yang ditimbulkan, maka dibutuhkan pendekatan pemeliharaan yang lebih terstruktur, komprehensif, dan berbasis risiko. *Reliability Centered Maintenance* (RCM) merupakan pendekatan sistematis dalam merancang strategi pemeliharaan berdasarkan fungsi utama aset, potensi kegagalannya, serta konsekuensi terhadap sistem. RCM menekankan pentingnya *reliability*, keselamatan kerja, efisiensi biaya, dan keberlanjutan operasional sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan. Dalam konteks industri semen yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi dan ketergantungan besar terhadap mesin utama seperti kiln, penerapan RCM sangat relevan untuk mengurangi waktu henti tak terencana serta memperpanjang masa operasional mesin secara optimal (Sulistyo & Muhlis, 2022).

Untuk mendukung penerapan RCM secara lebih komprehensif, perlu dilakukan integrasi dengan teknik analisis risiko seperti *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). FMEA digunakan untuk mengidentifikasi potensi mode kegagalan serta mengevaluasi dampaknya berdasarkan tingkat keparahan, frekuensi kejadian, dan kemampuan deteksi. Hasil analisis ini menghasilkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) yang membantu menentukan prioritas tindakan pemeliharaan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang strategi pemeliharaan yang optimal pada mesin kiln V di PT Semen Tonasa dengan pendekatan *Reliability Centered Maintenance* (RCM) yang dikombinasikan dengan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), untuk mendorong optimalisasi pemeliharaan yang telah diterapkan sebelumnya.

1.2 Teori

1.2.1 Semen

Semen berasal dari bahasa latin, yaitu *caementum*, yang berarti memotong menjadi bagian-bagian kecil yang tidak beraturan. Semen merupakan bahan perekat organik yang mampu menyatukan pecahan-pecahan benda padat menjadi satu kesatuan (barang utuh) yang kompak. Semen juga diartikan sebagai campuran material yang memiliki sifat hidraulis apabila dicampur dengan air dalam jumlah tertentu yang dapat mengikat material lain menjadi suatu massa yang padat. Bahan penyusun semen terdiri dari senyawa kalsium oksida, silika, alumina dan besi oksida (Austin, 1996).

1.2.2 Kiln

Kiln adalah tungku yang dibuat seperti ruangan, tempat membakar material yang memerlukan suhu tinggi. Material yang keluar dari *cyclone* lewat *riser duct* diumpankan ke dalam kiln. Material akan mengalami proses pembakaran menjadi klinker. Karena kalsinasi 91% sudah terjadi pada sebelumnya, maka umpan di dalam kiln akan mengalami kalsinasi lebih lanjut hingga 100% pada *calcining zone* dengan temperatur 900 – 1000°C, kemudian diteruskan melewati *transition zone* dengan suhu sekitar 1000



Dalam sistem produksi klinker pada industri semen, kiln berperan sebagai unit utama yang secara struktural didukung oleh berbagai komponen penunjang, yang masing-masing memiliki fungsi spesifik dalam mendukung kelancaran dan efisiensi operasional kiln tersebut. Adapun komponen-komponen tersebut antara lain meliputi:

1. Roller adalah suatu bagian dari kiln yang berfungsi sebagai tempat dudukan kiln yang digunakan untuk memutar kiln.
2. Tyre adalah suatu bagian dari kiln yang berfungsi sebagai media penghubung antara kiln dengan Roller.
3. Gear ring adalah bagian dari kiln yang digunakan sebagai media untuk memutar kiln yang letaknya di dalam Gear box.
4. Gear Box adalah bagian dari kiln yang berfungsi sebagai pengatur putaran dari motor ke kiln.
5. Burnner adalah bagian dari kiln yang berfungsi sebagai pembakar kalsin, dan juga untuk mencampur bahan bakar dengan udara pada proporsi diantara batas kemampuan menyala, dan juga untuk menjaga kondisi pembakaran yang stabil dan kontinyu.
6. Thruster adalah bagian dari rotary dari kiln yang berfungsi untuk mengatur naik turunnya kiln.

(Sonjaya & Rachmat, 2023)

Dalam proses produksi klinker pada industri semen, kiln terdiri dari beberapa zona dengan fungsi dan karakteristik berbeda yang mendukung kelancaran proses pembakaran. kiln terbagi menjadi empat zona, yaitu:

a. Zona Kalsinasi (suhu 900-1000°C)

Merupakan zona kalsinasi CaCO_3 yang tersisa setelah melewati preheater. Sebagian CaO yang sudah terurai dari proses kalsinasi di dalam *preheater* mulai membentuk campuran C_{12}A_7 dan sebagian CaO dan oksida silika terbentuk yaitu C_2S . Dindingnya dilapisi batu tahan api. Batu tahan api merupakan bantu yang berfungsi sebagai proteksi *shell* kiln terhadap temperatur tinggi agar tidak kontak langsung dengan nyala api atau padatan yang sangat panas, sekaligus dapat memperpanjang umur teknis dari *shell* kiln. Pemilihan kualitas batu tahan api pada masing-masing zona kiln disesuaikan dengan beban panas dan mekanis pada zona tersebut (Ammarullah dkk., 2018).

b. Zona Transisi (suhu 1000-1250°C)

Pada zona ini proporsi CaO akan semakin besar, sebaliknya proporsi CaCO_3 semakin kecil dan habis sempurna pada temperatur bahan sekitar 900°C, pada temperatur tersebut proporsi C_2S semakin meningkat sampai temperatur bahan sekitar 1200°C, sedang oksida besi mulai mengikat campuran oksida kalsium dan oksida alumina membentuk campuran $\text{C}_2(\text{A}, \text{F})$, dengan meningkatnya temperatur maka oksida kalsium (CaO) bergabung dengan kalsium alumina dan $\text{C}_2(\text{A}, \text{F})$ masing-masing membentuk C_3A dan C_4AF . Pembentukan C_3A dan C_4AF terjadi pada temperatur +1000–1200°C.

c. Zona Pembakaran (*burning*) (suhu 1250-1450°C)

Pada daerah ini terjadi pelelehan pada temperatur tinggi (+1200–1350°C) di mana campuran kalsium alumina ferit mengalami fase cair. Bagian CaO yang tidak bereaksi dengan oksida-oksida alumina besi dan silika biasanya dalam bentuk CaO bebas atau *free lime*, banyaknya persentase dibatasi dibawah 1%. Pada temperatur tinggi ini sisa unsur CaO mengikat C_2S untuk membuat campuran C_3S .

d. Zona Pendinginan (*cooling*) (suhu 1450-1300°C)

Pada daerah ini campuran kalsium alumina ferrit dari yang bentuk fisisnya cairan berubah menjadi kristal setelah terjadi pendinginan di dalam *cooler*. Temperatur dalam zona ini sekitar 1350 – 800°C, sehingga material keluar kiln mempunyai suhu +800°C. Dinding zona ini dilapisi dengan batu tahan api.

(Zahidin & Rubianto, 2020)

1.2.3 Klinker

a. Unsur Kimia dalam Klinker

Umumnya terdapat empat kandungan senyawa utama pembentuk klinker yaitu C_3S , C_2S , C_3A dan C_4AF . Keempat komponen tersebut memiliki peranannya masing-masing dalam klinker. Di dalam klinker terdapat kandungan senyawa yaitu diantaranya :

1. Trikalsium Silikat ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$) atau disingkat dengan C_3S .
2. Dikalsium Silikat ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) atau disingkat dengan C_2S .
3. Trikalsium Aluminat ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) atau disingkat dengan C_3A .
4. Tetra Kalsium Aluminat ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) atau disingkat dengan C_4AF .

b. Bahan Baku Klinker

Bahan baku utama klinker terdiri dari:

1. Batu kapur, yang mengandung 50% CaCO_3 atau lebih sering disebut dengan *lime stone*. Batu kapur yang digunakan sebanyak $\pm 81\%$.
2. Tanah liat (*clay*). Tanah liat yang digunakan sebanyak $\pm 9\%$.

Bahan aditif klinker terdiri dari:

3. Pasir besi (Fe_3O_4) atau *Copper Slag* (Fe.SiO_3 , Ca_2Fe , CuO). Pasir besi yang digunakan sebanyak $\pm 1\%$.
4. Pasir silika (SiO_2). Pasir silika digunakan sebanyak $\pm 9\%$.
5. Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Pada penggilingan akhir digunakan gipsum sebanyak 3-5% total pembuatan semen.

c. Sifat Kimia Klinker

Parameter kualitas produk (*Lime Saturation Factor* = LSF, *Hydraulic Modulus* = HM, *Silica Modulus* = SM, *Alumina Modulus* = AM, kehalusan, kadar air dan homogenitas) perlu dikontrol untuk menjaga agar kualitas hasil produk yang diperoleh sesuai dengan target *raw meal* desain yang telah ditetapkan sebelumnya.

1. *Lime Saturation Factor* (LSF)

LSF menunjukkan jumlah maksimum CaO yang diperlukan untuk bereaksi dengan oksida lain sehingga tidak terjadi *free lime* berlebihan di klinker.

2. *Silica Modulus* (SM).

Silica modulus merupakan indikator tingkat kesulitan pembakaran *raw material*. *Silica Ratio* juga memberikan gambaran tentang mutu klinker yang akan dihasilkan dan banyaknya bahan bakar yang dibutuhkan.

3. *Alumina Modulus* (AM)

Nilai AM yang lebih rendah dijumpai pada jenis semen yang tahan terhadap sulfat, sedangkan nilai AM yang lebih tinggi dijumpai pada semen putih.

(Sari, dkk., 2018).

1.2.4 Perawatan

Perawatan merupakan kegiatan yang bertujuan untuk memperbaiki kerusakan sekaligus menjaga serta meningkatkan kinerja mesin. Dalam dunia industri, aktivitas ini memiliki peranan krusial untuk memastikan mesin tetap berfungsi optimal, terutama di era otomasi dan peningkatan kapasitas produksi yang semakin pesat (Islam et al., 2020). Pemeliharaan juga sangat berpengaruh terhadap kelancaran jalannya proses produksi, jumlah output yang dihasilkan, hingga ketepatan waktu distribusi produk kepada konsumen (Rosyidin Akbar & Widiasih, 2022). Oleh karena itu, perawatan menjadi bagian integral dalam aktivitas produksi karena peralatan maupun fasilitas yang digunakan secara terus-menerus memerlukan pemeliharaan agar tetap andal. Aktivitas pemeliharaan tersebut mencakup inspeksi, pengecekan kondisi, pelumasan, perbaikan, serta penggantian komponen. Semua langkah ini ditujukan untuk mempertahankan performa mesin dan mencegah gangguan atau kerusakan yang dapat menghambat proses produksi (Ninny Siregar & Munthe, 2019).

Menurut Duffuaa et al. (1999) dalam Pranowo (2019), sistem pemeliharaan memiliki peran penting dalam mendukung pencapaian tujuan perusahaan, khususnya melalui

peningkatan keuntungan dan kepuasan pelanggan. Tujuan tersebut dapat diwujudkan dengan memastikan nilai fungsi fasilitas produksi tetap optimal melalui upaya seperti:

- a. Mengurangi waktu henti (*downtime*).
- b. Meningkatkan mutu hasil produksi.
- c. Mendorong produktivitas yang lebih tinggi.
- d. Menjamin ketepatan waktu dalam pemenuhan pesanan.

Kegiatan pemeliharaan umumnya dibagi menjadi dua kategori, yaitu perawatan terencana (*planned maintenance*) dan perawatan tidak terencana (*unplanned maintenance*) (Muhaemin & Nugraha, 2022).

1. Perawatan Terencana (*Planned Maintenance*)

Perawatan terencana mencakup kegiatan pemeliharaan yang dijadwalkan secara sistematis untuk mencegah terjadinya kerusakan pada peralatan. Jenis-jenis perawatan terencana meliputi:

- a. *Preventive Maintenance*: Pemeliharaan yang dilakukan secara berkala untuk mencegah kerusakan sebelum terjadi, dengan tujuan menjaga keandalan dan keselamatan operasional peralatan.
- b. *Scheduled Maintenance*: Merupakan bagian dari *preventive maintenance* yang dilakukan pada interval waktu tertentu, seperti mingguan atau bulanan, untuk menjaga kondisi optimal peralatan.
- c. *Predictive Maintenance*: Pemeliharaan yang didasarkan pada kondisi aktual peralatan, menggunakan data dan sensor untuk memprediksi waktu optimal pemeliharaan sebelum kerusakan terjadi.

2. Perawatan Tidak Terencana (*Unplanned Maintenance*)

Perawatan tidak terencana dilakukan sebagai respons terhadap kerusakan atau kegagalan yang tidak terduga. Jenis-jenis perawatan tidak terencana meliputi:

- a. *Emergency Maintenance*: Pemeliharaan darurat yang dilakukan segera setelah terjadinya kerusakan kritis untuk mencegah dampak yang lebih parah.
- b. *Breakdown Maintenance*: Pemeliharaan yang dilakukan setelah peralatan mengalami kerusakan total, biasanya tanpa adanya pemeliharaan sebelumnya.
- c. *Corrective Maintenance*: Pemeliharaan yang dilakukan untuk memperbaiki peralatan yang tidak berfungsi sesuai spesifikasi, sering kali setelah terdeteksi adanya penurunan performa atau kualitas produk.

(Muhaemin & Nugraha, 2022)

Dalam praktik industri, pemeliharaan (*maintenance*) merupakan bagian integral dari sistem manajemen operasional yang bertujuan untuk menjaga performa aset produksi agar tetap optimal, handal, dan aman digunakan. Menurut Sudrajat (2011), pemeliharaan dibedakan ke dalam beberapa jenis berdasarkan metode, tujuan, dan waktu pelaksanaannya. Berikut adalah klasifikasi jenis-jenis pemeliharaan:

a. Pemeliharaan Penggantian (*Replacement Maintenance*)

Pemeliharaan penggantian dilakukan ketika suatu komponen sistem telah menunjukkan penurunan keandalan atau efisiensi akibat usia pakai, korosi, atau penurunan performa karena beban kerja yang tinggi. Dalam konteks ini, penggantian bisa bersifat total (seluruh komponen) atau parsial (bagian tertentu), dengan tujuan utama menjaga keberlanjutan operasi sistem secara menyeluruh. Strategi ini sangat

penting untuk mencegah potensi kerusakan sistemik yang dapat memicu *downtime* besar (Tjahjaningsih & Mustakim, 2019).

b. Pemeliharaan Peluang (*Opportunity Maintenance*)

Pemeliharaan ini dilakukan saat terdapat kesempatan waktu seperti waktu tunggu bahan baku, pergantian shift, atau waktu jeda produksi lainnya. Tujuannya adalah untuk mengoptimalkan produktivitas teknisi dan operator sehingga tidak terjadi pengangguran tenaga kerja. Tindakan pemeliharaan dapat berupa aktivitas sederhana (pembersihan dan pelumasan) hingga yang lebih kompleks seperti inspeksi sistem atau perbaikan fasilitas pendukung (Tjahjaningsih & Mustakim, 2019).

c. Pemeliharaan Perbaikan Besar (*Overhaul Maintenance*)

Overhaul adalah proses pemeliharaan mendalam dan menyeluruh terhadap komponen atau subsistem mesin. Pemeliharaan ini dilakukan secara terjadwal dengan tujuan mengembalikan kondisi mesin ke standar performa teknis yang mendekati kondisi baru. Aktivitas *Overhaul* biasanya mencakup pembongkaran, pengujian individual komponen, penggantian komponen utama, dan *reassembly* (Tjahjaningsih & Mustakim, 2019).

d. Pemeliharaan Pencegahan (*Preventive Maintenance*)

Preventive Maintenance bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan tak terduga melalui tindakan terjadwal. Berdasarkan jenis aktivitasnya, *preventive Maintenance* terbagi menjadi:

a) *Routine Maintenance*:

Tindakan pemeliharaan rutin seperti pelumasan, penggantian oli, pembersihan filter, dan pengecekan tekanan angin yang dilakukan secara harian atau mingguan.

b) *Periodic Maintenance*:

Aktivitas pemeliharaan dilakukan dalam interval waktu tertentu, misalnya bulanan atau triwulan, seperti kalibrasi sensor dan penggantian komponen aus.

c) *Running Maintenance*:

Pemeliharaan dilakukan saat mesin tetap beroperasi, misalnya pengisian pelumas otomatis dan pengawasan suhu saat operasi.

d) *Shutdown Maintenance*:

Pemeliharaan hanya dilakukan saat mesin dihentikan total. Biasanya untuk tindakan yang tidak dapat dilakukan dalam kondisi mesin menyala.

(Tjahjaningsih & Mustakim, 2019)

Preventive Maintenance juga dikategorikan berdasarkan pendekatan waktu dan penggunaan, yaitu:

a) *Time-Based Maintenance* (TBM):

Perawatan dilakukan setelah peralatan digunakan dalam jangka waktu tertentu, terlepas dari kondisinya.

b) *Used-Based Maintenance* (UBM):

Perawatan dilakukan berdasarkan jumlah siklus penggunaan, produksi, atau jam kerja mesin. Pendekatan ini membutuhkan pemahaman distribusi kegagalan atau keandalan komponen.

(Fitriani, & Nugroho, 2021)

e. Modifikasi Desain (*Design Modification*)

Jenis pemeliharaan ini melibatkan perubahan desain sebagian kecil dari sistem atau peralatan untuk meningkatkan efisiensi kerja dan memperpanjang masa pakai. Modifikasi ini seringkali bertujuan untuk mengatasi kelemahan desain awal atau meningkatkan kemampuan sistem menghadapi beban kerja yang lebih tinggi.

(Yuliana & Hanafiah, 2020)

f. Pemeliharaan Korektif (*Corrective Maintenance*)

Corrective Maintenance atau *breakdown maintenance* adalah tindakan pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan. Pemeliharaan ini bersifat reaktif dan memerlukan waktu yang relatif lebih lama karena bergantung pada ketersediaan tenaga kerja, suku cadang, dan waktu diagnosis. Salah satu indikator dalam *corrective maintenance* adalah *Mean Time To Repair* (MTTR), yaitu total waktu rata-rata untuk memperbaiki kerusakan hingga mesin kembali berfungsi.

g. Temuan Kesalahan (*Fault Finding*)

Fault finding adalah proses untuk mendeteksi kerusakan tersembunyi yang belum menimbulkan efek langsung terhadap performa sistem. Biasanya dilakukan saat mesin beroperasi dalam rangka inspeksi menyeluruh. Deteksi dini terhadap kerusakan tersembunyi membantu mencegah kecelakaan dan mengurangi risiko kerusakan total.

h. Pemeliharaan Berbasis Kondisi (*Condition-Based Maintenance/CBM*)

CBM adalah pendekatan pemeliharaan yang menggunakan parameter kondisi aktual seperti suhu, tekanan, getaran, dan kebisingan untuk memprediksi kapan peralatan perlu diperbaiki. Pengukuran dilakukan secara langsung atau menggunakan sensor otomatis (*Internet of Things/IoT*).

i. Pemeliharaan Penghentian (*Shutdown Maintenance*)

Shutdown Maintenance adalah strategi pemeliharaan yang direncanakan secara menyeluruh saat proses produksi dihentikan. Strategi ini digunakan untuk tindakan yang tidak dapat dilakukan saat peralatan beroperasi. Pengelolaan *shutdown maintenance* memerlukan perencanaan sumber daya, waktu, dan material yang sangat matang untuk menghindari pemborosan dan meminimalkan *downtime*.

(Ardiansyah, & Lestari, 2024)

1.2.5 Downtime

Downtime didefinisikan sebagai periode ketika sistem atau komponen tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Tujuan utama pengelolaan *downtime* adalah meminimalkan durasi penghentian operasi sehingga mesin maupun komponen pengganti dapat segera difungsikan kembali tanpa menimbulkan kerusakan lanjutan (Ramadhan & Fitriani, 2025). Sedangkan menurut Kulsum et al. (2018), *downtime* merupakan rentang waktu terhentinya aktivitas produksi yang disebabkan oleh kegiatan pemeliharaan fasilitas. Kondisi ini dapat terjadi baik karena adanya pelaksanaan perawatan yang dilakukan secara berkala maupun akibat kerusakan yang memerlukan tindakan perbaikan.

1.2.6 Reliability Centered Maintenance (RCM)

Reliability Centered Maintenance (RCM) pertama kali dikembangkan dan diterapkan oleh *Federal Aviation Administration* (FAA) pada tahun 1968 dalam rangka program

pemeliharaan pesawat Boeing 747. Selanjutnya, konsep ini disempurnakan dan digunakan pada pengembangan pesawat lain, seperti DC-10, dengan tujuan meningkatkan keselamatan dan keandalan operasional pada biaya yang efisien. Penerapan RCM menjadi tonggak penting dalam pergeseran paradigma dari metode pemeliharaan tradisional menuju pendekatan berbasis analisis keandalan secara sistematis. Seiring perkembangannya, pada awal 1980-an Departemen Pertahanan Amerika Serikat mengadopsi RCM sebagai strategi yang terintegrasi dalam pengembangan sistem persenjataan maupun pemeliharaan pascaproduksi (Brauer & Brauer, 1987).

Reliability Centered Maintenance menurut Moubray (1992) merupakan suatu proses yang digunakan untuk menentukan tindakan perawatan paling efektif guna memastikan setiap aset fisik dapat terus berfungsi sesuai yang diharapkan. Sementara itu, Henly dan Kumamoto (1981), mendefinisikan RCM sebagai pendekatan pemeliharaan yang menggabungkan strategi *preventive maintenace* dan *corective maintenace* untuk memaksimalkan umur dan fungsi aset, sistem atau peralatan dengan biaya minimal.

Menurut Anderson (1990), penerapan RCM berlandaskan pada prinsip-prinsip utama pemeliharaan, diantaranya

- a. RCM berfokus pada pemeliharaan fungsi sistem, bukan hanya memelihara agar peralatan tetap beroperasi, tetapi memelihara fungsi utama dari sistem tersebut tetap terpenuhi.
- b. RCM menitikberatkan pada fungsi keseluruhan sistem, bukan hanya komponen tunggal, dengan mempertimbangkan apakah sistem masih dapat menjalankan fungsi utamanya jika salah satu komponen mengalami kegagalan.
- c. RCM berbasis pada kehandalan, yaitu kemampuan sistem atau peralatan untuk terus beroperasi sesuai dengan fungsinya.
- d. RCM mengutamakan keselamatan (*safety*) baru kemudian untuk masalah ekonomi.
- e. RCM mendefinisikan kegagalan (*failure*) sebagai kondisi yang tidak memuaskan atau tidak memenuhi harapan, diukur berdasarkan kemampuan sistem dalam menjalankan fungsinya sesuai standar performa yang telah ditetapkan.
- f. RCM harus memberikan hasil yang nyata dan terukur, dengan tujuan mengurangi jumlah kegagalan atau paling tidak menurunkan tingkat kerusakan akibat kegagalan tersebut.

(Prabowo & Ihsan, 2023)

1.2.7 Tujuan RCM

Reliability Centered Maintenance (RCM) bertujuan untuk menjadikan kegiatan perawatan lebih efektif dan efisien. RCM membantu dalam mengidentifikasi penyebab dominan dari kegagalan peralatan serta menentukan program pemeliharaan rutin untuk menjaga fungsi-fungsi penting sistem agar tetap handal. Pemeliharaan rutin berperan besar dalam mencegah kegagalan sistem, karena dengan pendekatan ini, potensi penyebab kegagalan dapat diidentifikasi sejak dini dan dampaknya dapat diminimalkan. Secara umum, tujuan dari RCM menurut Ebeling adalah sebagai berikut.

- a. Mengembangkan desain sistem atau peralatan dengan tingkat kemudahan perawatan (*maintainability*) yang tinggi.
- b. Mendapatkan informasi penting untuk melakukan perbaikan terhadap desain awal

yang belum optimal.

- c. Mengembangkan sistem pemeliharaan yang mampu mengembalikan keandalan (*Reliability*) dan keselamatan (*safety*) peralatan seperti kondisi awal sebelum mengalami penurunan performa (*deteriorasi*).
- d. Mewujudkan seluruh tujuan di atas dengan biaya seminimal mungkin, sehingga efisiensi pemeliharaan tetap terjaga.

(Prabowo & Ihsan, 2023)

1.2.8 Komponen RCM

Reliability Centered Maintenance (RCM) terdiri atas lima komponen utama, yaitu *preventive Maintenance*, *breakdown maintenance*, *scheduled maintenance*, *predictive maintenance*, dan *corrective maintenance*. Penjelasan dari masing-masing komponen sebagai berikut:

a. *Preventive Maintenance*

Perawatan pencegahan adalah merupakan perawatan yang dilakukan sebelum terjadi kerusakan pada mesin. Tujuannya untuk mencegah berhentinya mesin secara tiba-tiba dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

b. *Breakdown Maintenance*

Perawatan kerusakan dapat diartikan sebagai kebijakan perawatan dengan cara mesin/peralatan dioperasikan hingga rusak, kemudian baru diperbaiki atau diganti. Dalam artian perawatan dilakukan setelah peralatan mengalami kerusakan total. Mesin tetap dioperasikan hingga rusak, baru kemudian diperbaiki atau diganti.

c. *Scheduled Maintenance*

Perawatan ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan dan perawatannya dilakukan secara periodik dengan rentan waktu tertentu. Penjadwalan ditentukan berdasarkan pada data historis, pengalaman, atau rekomendasi dari produsen mesin. Tujuannya untuk mencegah kerusakan sebelum terjadi.

d. *Predictive maintenance*

Perawatan prediktif dapat diartikan sebagai strategis perawatan dimana pelaksanaannya didasarkan kondisi mesin itu sendiri. Perawatn prediktif disebut juga perawatan (*condition based Maintenance*) atau juga disebut monitoring yang artinya sebagai penentuan kondisi mesin dengan cara memeriksa mesin secara rutin, sehingga dapat diketahui kehandalan mesin serta keselamatan kerja terjamin. Pemeliharaan ini memerlukan data performa mesin, pengujian dan pengawasan secara visual. Analisis dari kondisi mesin selanjutnya akan digunakan untuk membuat perencanaan dan penjadwalan pemeliharaan dalam seblum terjadinya kegagalan.

e. *Corrective Maintenance*

Corrective Maintenance adalah kegiatan pemeliharaan dan perawatan yang dilakukan setelah mesin mengalami kerusakan dan tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Kegiatan ini mencakup semua upaya untuk mengembalikan kondisi mesin dari rusak menjadi dapat beroperasi kembali. Tahapan yang dilakukan meliputi persiapan tenaga kerja, peralatan uji, dan proses perbaikannya sendiri.

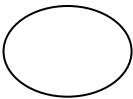
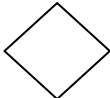
(Kumala, 2022)

1.2.9 Fault Tree Analysis (FTA)

a. Komponen FTA

Menurut Hanif et al (2015), metode *Fault Tree Analysis* adalah suatu teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi resiko yang berperan terhadap terjadinya kegagalan (*failure*) dari suatu sistem. FTA (*Fault Tree Analysis*) merupakan metode analisis masalah dengan pendekatan yang bersifat *top-down*, yaitu diawali dengan asumsi kegagalan dari kejadian puncak (*top event*) kemudian merinci penyebab terjadinya *top event* sampai pada kegagalan dasar (*root cause/basic event*). Sebuah *top event* yang merupakan definisi dari kegagalan suatu sistem (*system failure*) harus ditentukan terlebih dahulu dalam mengkonstruksikan FTA. Beberapa simbol yang biasa digunakan dalam mengkonstruksikan FTA adalah sebagai berikut (Yazera, 2021).

Tabel 1 Simbol dalam *Fault Tree Analysis* (FTA)

Simbol	Keterangan
	Basic Event Dasar inisiasi kesalahan yang tidak membutuhkan pengembangan yang lebih jauh
	Conditioning Eventy Kondisi <i>specific</i> yang dapat diterapkan ke berbagai gerbang logika
	Undevelopment Event Event yang tidak dapat dikembangkan lagi karena informasi tidak tersedia
	Extenal Event Event yang diekspektasikan muncul
	Gerbang AND Kesalahan muncul akibat semua input masalah yang terjadi
	Gerbang OR Kesalahan muncul akibat salah satu input masalah yang terjadi

1.2.10 Prosedur FTA

Fault Tree Analysis menggunakan langkah-langkah terstruktur dalam melakukan analisis pada sistem. Adapun langkah-langkah FTA, yaitu:

a. Mengidentifikasi kejadian/peristiwa terpenting dalam sistem (*top level event*)

Langkah pertama dalam FTA ini merupakan langkah penting karena akan mempengaruhi hasil analisis sistem. Pada tahap ini, dibutuhkan pemahaman tentang sistem dan pengetahuan tentang jenis-jenis kerusakan (*undesired event*) untuk mengidentifikasi akar permasalahan sistem. Pemahaman tentang sistem dilakukan

dengan mempelajari semua informasi tentang sistem dan ruang lingkungnya.

b. Membuat pohon kesalahan

Setelah permasalahan terpenting teridentifikasi, langkah berikutnya adalah menyusun urutan sebab akibat pohon kesalahan. Pada tahap ini, *cause and effect* diagram (Ishikawa) dapat digunakan untuk menganalisis kesalahan dan mengeksplorasi keberadaan kerusakan-kerusakan yang tersembunyi. Pembuatan pohon kesalahan dilakukan dengan menggunakan simbol-simbol Boolean. Standarisasi simbol-simbol tersebut diperlukan untuk komunikasi dan konsistensi pohon kesalahan.

c. Menganalisis pohon kesalahan

Analisis pohon kesalahan diperlukan untuk memperoleh informasi yang jelas dari suatu sistem dan perbaikan-perbaikan apa yang harus dilakukan pada sistem. Tahap-tahap analisis pohon kesalahan dapat dibedakan menjadi 3, yaitu:

1) Menyederhanakan pohon kesalahan.

Tahap pertama analisis pohon kesalahan adalah menyederhanakan pohon kesalahan dengan menghilangkan cabang-cabang yang memiliki kemiripan karakteristik. Tujuan penyederhanaan ini adalah untuk mempermudah dalam melakukan analisis sistem lebih lanjut.

2) Menentukan peluang munculnya kejadian atau peristiwa terpenting dalam sistem (*top level event*)

Setelah pohon kesalahan disederhanakan, tahap berikutnya adalah menentukan peluang kejadian paling penting dalam sistem. Pada langkah ini, peluang semua input dan logika hubungan digunakan sebagai pertimbangan penentuan peluang.

3) Mereview hasil analisis

Review hasil analisis dilakukan untuk mengetahui kemungkinan perbaikan yang dapat dilakukan pada sistem.

Output yang diperoleh setelah melakukan FTA adalah peluang munculnya kejadian terpenting dalam sistem dan memperoleh akar permasalahan sebabnya. Akar permasalahan tersebut kemudian digunakan untuk memperoleh prioritas perbaikan permasalahan yang tepat pada sistem.

(Wahyuni, 2021).

1.2.11 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) merupakan salah satu teknik yang sistematis untuk menganalisa kegagalan. Teknik ini dikembangkan pertama kali sekitar tahun 1950 oleh para *Reliability engineers* yang sedang mempelajari masalah yang ditimbulkan oleh peralatan militer yang mengalami malfungsi.

1. Konsep FMEA

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) adalah sebuah metode yang digunakan untuk mengidentifikasi setiap bentuk kegagalan yang mungkin menyebabkan kegagalan pada setiap aset yang dimiliki oleh perusahaan. Menurut Stamatis (1995), FMEA merupakan sebuah metodologi yang digunakan untuk mengevaluasi kegagalan terjadi dalam sebuah sistem, desain, proses, atau pelayanan. Setiap potensi kegagalan dievaluasi berdasarkan tiga aspek utama, yaitu tingkat keparahan (*severity*), frekuensi *kejadian* (*occurrence*), dan kemampuan *deteksi* (*detection*)

terhadap kegagalan. Tujuan utama metode ini untuk mengidentifikasi risiko dengan nilai prioritas tertinggi dan merencanakan tindakan perbaikan secara tepat dan efektif (Prasetya et al., 2021).

2. Pengertian FMEA

FMEA merupakan salah satu program peningkatan dan pengendalian kualitas yang dapat mencegah terjadi kegagalan dalam suatu produk atau proses. Berikut adalah beberapa definisi FMEA menurut beberapa ahli :

- a. Menurut Chrysler (2008) FMEA merupakan metodologi analisis yang digunakan untuk memastikan masalah potensial pada produk dan proses dipertimbangkan dan dialamatkan secara menyeluruh melalui perbaikan proses.
- b. Menurut McDermott (2009) FMEA merupakan suatu metode yang sistematis dalam mengidentifikasi dan mencegah masalah yang terjadi pada produk dan proses.

(Supiandi et al., 2021)

3. Penerapan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) bertujuan untuk meminimalkan kemungkinan terjadinya permasalahan pada proses maupun produk. Dalam konteks desain dan manufaktur, FMEA berperan penting dalam menekan biaya produksi melalui identifikasi dini terhadap potensi kegagalan, sehingga perbaikan dapat dilakukan sejak tahap pengembangan. Selain memberikan manfaat dalam peningkatan kualitas, metode ini juga relatif mudah diterapkan serta tidak memerlukan biaya yang signifikan. Hasilnya adalah proses menjadi lebih baik karena telah dilakukan tindakan koreksi dan mengurangi serta mengeliminasi kegagalan (McDermott, 2009). Berikut adalah beberapa tujuan dari penerapan FMEA: Mengidentifikasi penyebab kegagalan proses dalam memenuhi kebutuhan pelanggan, memperkirakan risiko penyebab tertentu yang menyebabkan kegagalan, mengevaluasi rencana pengendalian untuk mencegah kegagalan, dan melaksanakan prosedur yang diperlukan untuk memperoleh suatu proses bebas dari kesalahan. (Supiandi et al., 2021)

4. Prosedur FMEA

Dalam Supriyadi (2022), prosedur yang perlu diperhatikan, adalah sebagai berikut.

- a. *Severity* (S)
Severity adalah langkah pertama untuk menganalisa risiko, yaitu menghitung seberapa besar dampak atau intensitas kejadian mempengaruhi hasil akhir proses. Ratingnya yaitu 1 sampai 10.
- b. *Occurrence* (O)
Occurrence adalah sebuah penilaian dengan tingkatan tertentu dimana adanya sebuah sebab kerusakan secara mekanis yang terjadi pada mesin tersebut. Dari angka/tingkatan *occurrence* ini dapat diketahui kemungkinan terdapatnya kerusakan dan tingkat keseringan terjadinya kerusakan mesin.
- c. *Detection* (D)
Detection adalah sebuah penilaian yang juga memiliki tingkatan seperti halnya *severity* dan *occurrence*. Penilaian tingkat *detection* sangat penting dalam menemukan potensi penyebab mekanis yang menimbulkan kerusakan serta tindakan perbaikannya.

d. *Risk Priority Number (RPN)*

RPN adalah hasil dari $S \times O \times D$ dimana akan terdapat angka RPN yang berlainan pada tiap alat yang telah melalui proses analisa sebab akibat kesalahan, pada alat yang memiliki angka RPN tertinggi, tim harus memberikan prioritas pada faktor tersebut untuk melakukan tindakan atau upaya untuk mengurangi angka risiko melalui tindakan perawatan korektif.

1.2.12 Pemilihan Tindakan (*Task Selection*)

Task Selection merupakan tahapan akhir dalam proses *Reliability-Centered Maintenance* (RCM). Pada tahap ini, disusun daftar tindakan yang dianggap paling efektif untuk diterapkan pada setiap mode kegagalan yang telah diidentifikasi, sehingga dapat menjadi dasar dalam penentuan langkah pemeliharaan selanjutnya (Harma et al., 2024). Pemilihan tindakan tersebut umumnya dikelompokkan ke dalam empat kategori utama.

1. *Time Directed* (TD) Suatu tindakan yang bertujuan untuk melakukan pencegahan langsung terhadap sumber kerusakan komponen dengan berdasarkan waktu atau umur komponen.
2. *Condition Directed* (CD) Suatu tindakan yang bertujuan untuk mendeteksi kerusakan dengan cara pemeriksaan alat. Apabila pada pemeriksaan ditemukan gejala kerusakan pada peralatan, maka dilanjutkan dengan perbaikan atau penggantian komponen.
3. *Failure Finding* (FF) Suatu tindakan yang bertujuan untuk menemukan kerusakan pada peralatan yang tersembunyi dengan melakukan pemeriksaan secara berkala.
4. *Run to Failure* (RTF) Suatu tindakan dengan penggunaan komponen tersebut hingga rusak, karena tidak terdapat tindakan yang ekonomis untuk melakukan pencegahan kerusakan. Berikut merupakan road map task selection:

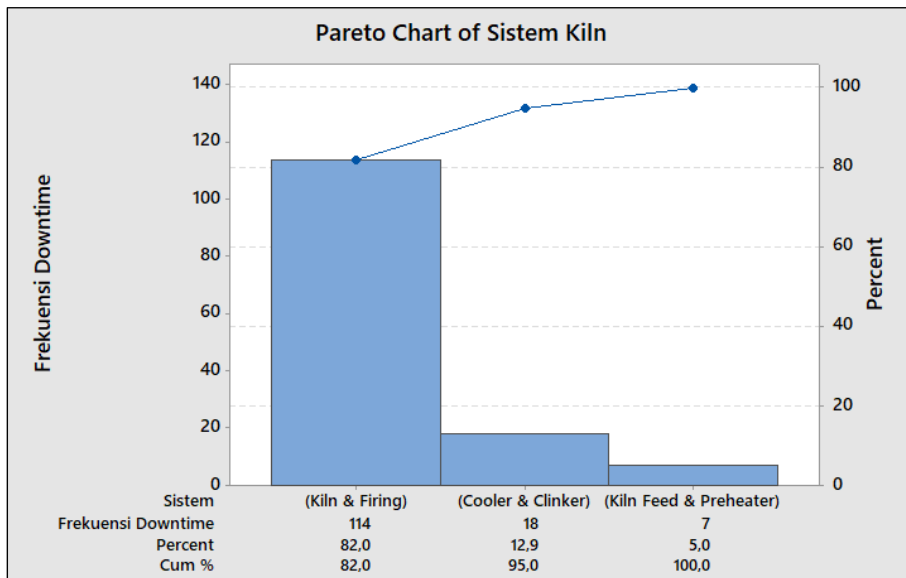
(Harma et al., 2024)

1.2.13 Diagram Pareto

Penurunan produktivitas perusahaan harus menjadi bahan evaluasi terhadap sistem produktivitas perusahaan, dan harus mampu menemukan apa yang menjadi akar penyebab masalah tersebut. Salah satu alat yang dapat digunakan dalam pendekatan ini yaitu dengan diagram pareto. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Vilfredo Pareto (1848–1923) dan kemudian dikembangkan oleh Joseph Juran. Diagram Pareto disajikan dalam bentuk grafik batang yang mengurutkan data berdasarkan frekuensi kejadian, dari yang paling sering muncul di sebelah kiri hingga yang paling jarang di sebelah kanan (Parahita, 2022).

Diagram pareto didasarkan pada prinsip 80/20, yang menyatakan bahwa 80% dari dampak suatu permasalahan biasanya disebabkan oleh 20% penyebab utama. Penerapan prinsip ini membantu dalam proses identifikasi terhadap permasalahan dominan yang perlu segera ditangani. Analisis melalui diagram ini memungkinkan perusahaan untuk menetapkan prioritas perbaikan secara lebih efektif dan efisien. Selain itu, Diagram Pareto juga berperan penting dalam mendukung pengambilan keputusan yang berbasis data serta meningkatkan fokus pada upaya-upaya peningkatan mutu dan keandalan sistem (Oktasari, 2019).

Contoh diagram pareto dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2 Contoh Diagram Pareto

Sumber: Data perusahaan (2025)

1.2.14 Keandalan (*Reability*)

Menurut Ebiling (1997) keandalan (*Reliability*) adalah ukuran kemampuan suatu komponen atau peralatan untuk beroperasi terus menerus tanpa adanya gangguan atau kerusakan. Sedangkan menurut O'Connor & Kleyner (2012) probabilitas keandalan merupakan probabilitas sebuah komponen atau sistem untuk dapat beroperasi sesuai dengan fungsi yang diinginkan untuk suatu periode waktu tertentu ketika digunakan di bawah kondisi operasional tertentu. Keandalan digunakan sebagai salah satu ukuran keberhasilan sistem perawatan serta untuk menentukan jadwal perawatan sebagai langkah pencegahan terjadinya gangguan ataupun kerusakan (Pamungkas et al., 2021).

Menurut Blischke dan Murthy (2000), keandalan dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan apakah suatu fasilitas atau peralatan berfungsi sebagaimana mestinya. Konsep keandalan mencerminkan keberhasilan operasi serta minimnya kejadian kerusakan. Teori keandalan sendiri menggabungkan aspek teknis dari desain sistem dengan pemahaman ilmiah terkait proses kerusakan, yang dianalisis melalui pendekatan multidisipliner berbasis probabilistik, statistik, dan stokastik. *Reliability* merupakan probabilitas suatu sistem akan memberikan performa sesuai dengan fungsi yang dibutuhkan dalam periode waktu tertentu. Nilai *Reliability* suatu sistem biasanya dinyatakan dalam bentuk probabilitas, dengan nilai *R (Reliability)* antara 0-1. Nilai 0 menyatakan kondisi sistem tidak dapat berfungsi. Sedangkan nilai 1 menunjukkan kondisi sistem dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan tanpa terjadi kerusakan (Bastian et al., 2019).

Berikut ini merupakan rumus perhitungan dari *Reliability*:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

keterangan dari rumus diatas:

$f(t)$ = Fungsi kepadatan peluang, probabilitas kegagalan untuk periode tertentu satuannya 0-1.

$R(t)$ = Keandalan (*Reliability*), sistem beroperasi pada waktu t (periode) satuannya 0-1.

$R = 1$ sistem dapat melaksanakan fungsi dengan baik

$R = 0$ sistem tidak dapat melaksanakan fungsi dengan baik

$R = 0,7$ sistem dapat melaksanakan fungsi dengan baik = 70%

1.2.15 Perhitungan *Mean Time to Failure* (MTTF) dan *Mean Time To Repair* (MTTR)

Mean Time To Failure (MTTF) merupakan nilai rata-rata waktu kegagalan yang akan datang dari sebuah sistem (komponen). Untuk sistem yang dapat direparasi, maka MTTF adalah masa kerja suatu komponen saat pertama kali digunakan atau dihidupkan sampai unit tersebut akan rusak kembali atau perlu di periksa kembali. Sedangkan, *Mean Time To Repair* (MTTR) adalah waktu rata-rata untuk waktu pengecekan atau perbaikan saat komponen atau unit tersebut diperiksa sampai komponen atau unit tersebut digunakan atau dihidupkan kembali (Sulistyo & Muhlis, 2022).

Dalam (Lelu & Setiafindari, 2023), rumus yang dapat digunakan dalam menentukan MTTF dan MTTR yaitu sebagai berikut.

a. Distribusi Normal

Menurut Palmer (2006), distribusi normal cocok digunakan untuk memodelkan fenomena keausan pada komponen mesin. Distribusi ini memiliki parameter utama μ yang merepresentasikan nilai tengah (*mean*) dari data, sehingga dapat digunakan untuk menggambarkan kecenderungan rata-rata waktu kegagalan suatu komponen. Selain itu, karena keterkaitannya dengan distribusi lognormal, distribusi normal juga dapat dimanfaatkan untuk menganalisis probabilitas lognormal serta memperkirakan fungsi *reliability* suatu sistem. Hal ini juga sejalan dengan penelitian yang menekankan pentingnya distribusi normal dalam analisis keandalan mesin (Wardana & Abdulrahim, 2024).

$$MTTF = \mu \quad (2)$$

b. Distribusi Lognormal

Menurut Palmer (2006), distribusi lognormal ditentukan oleh dua parameter, yaitu s sebagai parameter bentuk (*shape parameter*) dan $tmed$ sebagai parameter lokasi (*location parameter*) yang merepresentasikan nilai tengah dari distribusi kerusakan. Distribusi ini memiliki fleksibilitas bentuk yang tinggi, sehingga pada banyak kasus data yang sesuai dengan distribusi Weibull juga dapat sesuai dengan distribusi lognormal. Dengan demikian, distribusi lognormal sering digunakan dalam analisis keandalan untuk memperkirakan fungsi *reliability* suatu sistem. Relevansi penggunaan distribusi lognormal dalam konteks pemeliharaan mesin juga didukung oleh penelitian terkini (Wardana & Abdulrahim, 2024).

$$MTTF = Tmed \cdot \exp\left(\frac{s^2}{2}\right) \quad (3)$$

c. Distribusi Eksponensial

Menurut Palmer (2006), distribusi eksponensial digunakan untuk menggambarkan

pola kerusakan dengan laju kegagalan yang konstan, dimana peluang terjadinya kerusakan tidak dipengaruhi oleh umur pakai suatu komponen. Parameter utama yang digunakan adalah λ (*failure rate*), yaitu rata-rata frekuensi kerusakan yang terjadi. Semakin kecil nilai λ , maka umur rata-rata komponen akan semakin panjang (Wardana & Abdulrahim, 2024). Nilai *Mean Time To Failure* (MTTF) pada distribusi eksponensial ditentukan dengan persamaan berikut:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

d. Distribusi Weibull

Menurut Palmer (2006), distribusi Weibull merupakan salah satu distribusi yang paling banyak digunakan dalam analisis waktu kerusakan karena mampu merepresentasikan pola laju kerusakan yang meningkat maupun menurun. Distribusi ini memiliki dua parameter utama, yaitu θ (*scale parameter*) yang menunjukkan ukuran skala atau nilai karakteristik dari data, serta β (*shape parameter*) yang menggambarkan bentuk pola laju kerusakan. Parameter β digunakan untuk menentukan apakah komponen mengalami *infant mortality* ($\beta < 1$), memiliki laju kerusakan konstan ($\beta = 1$), atau mengalami keausan ($\beta > 1$), sedangkan θ digunakan untuk memperkirakan waktu karakteristik dari distribusi kerusakan. Nilai *Mean Time To Failure* (MTTF) pada distribusi Weibull dapat dihitung dengan persamaan:

$$MTTF = \theta \cdot \Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (5)$$

1.2.16 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian ini, dilakukan penelusuran terkait dengan penelitian-penelitian yang terdahulu yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan.

Penelitian yang dilakukan oleh Rima Melati Simanungkalit et al. (2023) berjudul “*Analisis Penerapan Sistem Perawatan dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) pada Cement Mill Type Tube Mill*” berfokus pada pemetaan komponen kritis dalam sistem cement mill. Melalui pendekatan RCM dan FMEA, penelitian ini menemukan bahwa *mill fan* merupakan komponen dengan tingkat keandalan terendah berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) yang tinggi, sehingga disarankan adanya strategi pemeliharaan berbasis *Time Directed* dan *Failure Finding*. Penelitian ini juga menekankan pentingnya penguatan teknis seperti pelatihan, pengelolaan suku cadang, serta penjadwalan ulang perawatan guna menekan potensi *downtime*.

Penelitian yang dilakukan oleh Dian Supriadi et al. (2023) berjudul “FMEA dan Fishbone Analysis untuk Mengetahui Risiko Kerusakan Komponen Flight Control System Penyebab Aircraft Vibration Helikopter Bell-412 TNI AL” menitikberatkan pada analisis risiko kegagalan komponen sistem kendali penerbangan. Melalui *metode Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), penelitian ini berhasil mengidentifikasi sebelas komponen kritis yang berpotensi menyebabkan gangguan getaran pesawat (*aircraft vibration*), dengan prioritas risiko ditentukan berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN). Hasilnya menunjukkan bahwa komponen seperti pivot bearing rubber separation dan rod end pitch link play memiliki nilai RPN tinggi sehingga menuntut prioritas penanganan. Selanjutnya, metode *fishbone analysis* digunakan untuk menelusuri faktor penyebab dari aspek material, proses, peralatan, lingkungan, manajemen, dan sumber daya manusia. Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi FMEA dan *fishbone analysis* mampu

memberikan pemetaan menyeluruh terhadap risiko kegagalan, sekaligus menjadi dasar dalam merumuskan strategi preventif dan korektif untuk meningkatkan kesiapan operasional helikopter.

Penelitian lain oleh Muhammad Rafli Pratama et al. (2022) yang berjudul "*Perencanaan Pemeliharaan Mesin Rotary Feeder dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) di PT Semen Baturaja (Persero) Tbk*" menerapkan kombinasi metode RCM, FMEA, dan *Logic Tree Analysis* (LTA). Penelitian ini menghasilkan perencanaan pemeliharaan untuk mesin rotary feeder dengan menetapkan prioritas komponen kritis berdasarkan nilai RPN. Strategi perawatan dibagi dalam tiga kategori yaitu *Time Directed*, *Condition Directed*, dan *Failure Finding*. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan ini efektif untuk menurunkan potensi kerusakan mendadak dan merancang perawatan berbasis risiko yang disesuaikan dengan karakteristik operasional mesin.

Sementara itu, penelitian oleh Abid Ahmad M. Alfirdaus dan Faisal Ashari (2022) yang berjudul "*Menentukan Penjadwalan Maintenance Mesin Finish Mill dengan Metode FMEA di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk*" memfokuskan analisis pada identifikasi komponen dengan risiko tinggi berdasarkan pendekatan FMEA. Komponen paling kritis ditentukan berdasarkan nilai RPN sebesar 210 yang menunjukkan tingginya tingkat keparahan kerusakan serta rendahnya kemampuan deteksi. Penelitian ini merancang jadwal pemeliharaan preventif secara bertingkat harian, mingguan, dan bulanan—untuk meminimalkan gangguan produksi. Keterkaitan antara ketiga penelitian tersebut dengan studi ini terletak pada penggunaan metode RCM dan FMEA sebagai pendekatan sistematis dalam merancang strategi pemeliharaan berbasis risiko dan keandalan komponen mesin, khususnya dalam konteks industri semen.

Penelitian yang dilakukan oleh Adam Diocta T. Bangun et al. (2024) berjudul "*Analisis Penerapan pada Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Reliability Centered Maintenance (RCM)*" difokuskan pada mesin sterilizer di pabrik kelapa sawit yang mengalami gangguan operasional berulang. Berdasarkan perhitungan nilai *Mean Time To Failure* (MTTF) dan *Risk Priority Number* (RPN), diketahui bahwa komponen exhaust pipe dan valve control memiliki tingkat kerusakan paling tinggi. Penerapan strategi *preventive maintenance* berbasis interval selama 288 jam terbukti mampu menekan biaya kerusakan secara signifikan, dengan efisiensi biaya perawatan yang mencapai 28,12% per bulan. Temuan ini memperkuat posisi metode RCM dan FMEA sebagai alat pengambilan keputusan teknis yang tidak hanya meningkatkan keandalan peralatan, tetapi juga menghasilkan efisiensi biaya nyata dalam konteks pengelolaan pabrik proses.

Studi serupa dilakukan oleh Sulistyono dan Muhlis (2022) yang meneliti strategi pemeliharaan mesin overhead crane di PT KNSS dengan menerapkan metode RCM dan FMEA. Penelitian ini mengidentifikasi komponen kritis berdasarkan nilai RPN tertinggi dan menyusun strategi pemeliharaan yang diklasifikasikan menjadi tiga jenis tugas: *Time Directed*, *Condition Directed*, dan *Failure Finding Task*. Hasil implementasi menunjukkan penurunan jumlah *downtime* dan peningkatan stabilitas operasional mesin secara menyeluruh. Penelitian ini juga menekankan pentingnya integrasi antara data historis kegagalan dan evaluasi periodik dalam perumusan prioritas perawatan berbasis keandalan. Keterkaitan dengan penelitian ini terletak pada penggunaan pendekatan gabungan RCM dan FMEA untuk mendukung pengambilan keputusan teknis dalam

manajemen aset industri, terutama pada peralatan dengan fungsi operasional kritis dan potensi gangguan tinggi.

Berdasarkan uraian kajian pustaka diatas, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini memiliki perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, baik dari segi objek kajian maupun fokus analisis data. Jika pada penelitian terdahulu mayoritas berfokus pada mesin-mesin produksi lain seperti *finish mill*, *cement mill*, *rotary feeder*, dan *sterilizer*, penelitian ini secara khusus mengangkat mesin kiln sebagai objek utama. Mesin kiln merupakan komponen kritis dalam proses produksi klinker yang memiliki karakteristik operasi kontinu dengan risiko kegagalan tinggi. Selain itu, perbedaan lainnya terletak pada pendekatan analitis yang digunakan, di mana penelitian ini mengombinasikan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) secara terintegrasi untuk menyusun strategi pemeliharaan preventif yang berbasis data kegagalan aktual. Pendekatan ini belum banyak diterapkan secara menyeluruh dalam studi sebelumnya, khususnya untuk sistem kiln di industri semen, sehingga penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baru dalam pengembangan sistem pemeliharaan berbasis keandalan di sektor manufaktur berat.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah berdasarkan latar belakang di atas yaitu sebagai berikut.

- a. Bagaimana mengidentifikasi sistem-sistem yang tergolong kritis pada mesin kiln di PT Semen Tonasa V berdasarkan data operasional dan histori *downtime*?
- b. Bagaimana karakteristik keandalan (*Reliability*) komponen kritis mesin produksi berdasarkan hasil analisis distribusi waktu kerusakan dan perbaikan?
- c. Bagaimana merancang strategi pemeliharaan menggunakan metode RCM dan FMEA untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional mesin kiln?

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan dengan rumusan masalah yang ada, maka tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut.

- a. Mengidentifikasi sistem kritis pada mesin kiln di PT Semen Tonasa V berdasarkan data operasional dan data *downtime*.
- b. Menganalisis keandalan komponen kritis menggunakan metode distribusi *Time To Failure* (TTF) dan *Time To Repair* (TTR).
- c. Merancang strategi pemeliharaan menggunakan metode RCM dan FMEA guna meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional mesin.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

- a. Data yang digunakan untuk identifikasi kegagalan dan kerusakan mesin diperoleh dari catatan riwayat pemeliharaan (*maintenance record*), yang terbatas pada jenis tindakan *unplanned maintenance* selama periode tahun 2022 hingga 2024.
- b. Objek penelitian dibatasi pada mesin kiln yang beroperasi di Unit Pabrik V PT Semen Tonasa, Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan.

- c. Jenis tindakan perawatan yang diusulkan dalam penelitian ini tidak mencakup keputusan teknis terkait apakah komponen akan dibongkar, diperbaiki, atau diganti seluruhnya.
- d. Aspek biaya instalasi dan pelaksanaan tindakan perawatan belum dijadikan sebagai variabel dalam penilaian prioritas atau keputusan akhir pemeliharaan.
- e. Penelitian ini tidak mencakup analisis komparatif antara sistem pemeliharaan yang saat ini diterapkan oleh perusahaan dan sistem pemeliharaan yang diusulkan berdasarkan hasil penelitian.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yang dapat dirasakan oleh pihak terkait antara lain sebagai berikut.

- a. Bagi mahasiswa
 - 1) Mahasiswa dapat menerapkan ilmu yang telah diperoleh di bangku kuliah secara praktik.
 - 2) Mahasiswa dapat mengembangkan pengetahuan dan keterampilan terhadap topik yang diambil.
 - 3) Mahasiswa dapat mengetahui secara lebih mendalam gambaran tentang kondisi nyata dunia kerja sehingga dapat mempersiapkan diri lebih matang.
 - 4) Melatih kemampuan analisis kuantitatif, interpretasi pola data, dan pengambilan keputusan berbasis hasil peramalan.
 - 5) Menambah referensi atau literatur bagi mahasiswa lain yang tertarik dengan topik yang sama atau yang sedang melakukan penelitian serupa.
- b. Bagi Universitas
 - 1) Menjadi salah satu kontribusi karya ilmiah yang dapat memperkaya referensi penelitian di bidang teknik industri.
 - 2) Dapat digunakan sebagai bahan ajar atau contoh implementasi metode *time series* dalam mata kuliah terkait.
 - 3) Meningkatkan relevansi penelitian mahasiswa terhadap kebutuhan industri nyata.
- c. Bagi perusahaan (PT Semen Tonasa)
 - 1) Sebagai acuan dalam menyusun perencanaan *maintenance* berbasis metode *Reliability Centered Maintenance* secara terstruktur.
 - 2) Dapat dijadikan pembanding terhadap metode internal yang telah digunakan perusahaan.
 - 3) Hasil analisa dan penelitian yang dilakukan dapat menjadi bahan masukan bagi perusahaan untuk menentukan kebijakan perusahaan dimasa mendatang.
 - 4) Memberikan rekomendasi tindakan pemeliharaan yang tepat untuk mengatasi kegagalan tak terduga (*unplanned maintenance*).