

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Perawatan

Perawatan (*maintenance*) merupakan kegiatan yang dilakukan untuk menjaga agar mesin atau peralatan tetap dapat beroperasi dengan baik sesuai dengan fungsinya. Tujuan utama kegiatan perawatan untuk mempertahankan kondisi mesin agar selalu siap digunakan dalam proses produksi. Tujuan dari kegiatan perawatan, menjaga kemampuan produksi agar dapat memenuhi kebutuhan sesuai dengan rencana produksi yang telah ditetapkan. Selain itu, perawatan bertujuan menjaga kualitas produk agar tetap sesuai dengan standar yang telah ditentukan sehingga proses produksi dapat berjalan dengan lancar tanpa gangguan (Silvia et al., 2024)

Dalam dunia industri manufaktur, *maintenance* mempunyai peranan yang sangat penting. Hal ini disebabkan karena kerusakan mesin yang terjadi saat proses produksi dapat menyebabkan terhentinya proses produksi, menurunkan produktivitas, serta meningkatkan biaya *maintenance*. Salah satu permasalahan yang sering terjadi adalah kerusakan mesin yang tidak dapat diprediksi waktu terjadinya, sehingga proses produksi dapat terhenti secara tiba-tiba. Kondisi tersebut menyebabkan perusahaan perlu menggunakan jasa pihak lain untuk melakukan *test performance*, yang membutuhkan waktu relatif lama (Fahri et al., 2025)

Perawatan juga bertujuan untuk menjamin keselamatan kerja dengan menghindari kegiatan perawatan yang dapat membahayakan para pekerja. Selain itu, perawatan

membantu meningkatkan kerja sama antara bagian perawatan dengan bagian lain dalam perusahaan untuk mencapai tujuan perusahaan yaitu memperoleh keuntungan yang optimal dengan biaya yang minimum.

2.2 Jenis - Jenis Perawatan

2.2.1 Perawatan Pencegahan (*Preventive Maintenance*)

Preventive maintenance merupakan serangkaian tindakan perawatan yang dilakukan secara terjadwal sebelum terjadi kerusakan atau kegagalan pada sistem maupun peralatan. *Preventive maintenance* bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan mesin sehingga proses produksi dapat berjalan dengan lancar. Tujuan utama preventive maintenance, meningkatkan ketersediaan mesin, memperpanjang umur operasional peralatan, serta mengoptimalkan kinerja mesin atau sistem produksi.

Preventive maintenance meliputi beberapa jenis perawatan seperti routine maintenance yaitu perawatan yang dilakukan secara rutin seperti pembersihan, pelumasan dan pengecekan kondisi mesin. *Periodic maintenance* merupakan perawatan yang dilakukan dalam jangka waktu tertentu sesuai jadwal yang telah ditentukan, serta *emergency maintenance* merupakan perbaikan yang dilakukan secara mendesak agar proses produksi tidak terhenti terlalu lama.

2.2.2 Perawatan Perbaikan (*Corrective Maintenance*)

Corrective maintenance merupakan tindakan perbaikan yang dilakukan setelah terjadinya kerusakan pada mesin atau peralatan. Strategi ini umumnya diterapkan pada lingkungan produksi dengan tingkat risiko kegagalan yang relatif rendah atau ketika dampak downtime masih dapat

ditoleransi. Namun demikian, berbagai kajian menunjukkan bahwa pendekatan ini memiliki kelemahan utama berupa ketidakpastian waktu kerusakan dan potensi gangguan operasional yang bersifat tidak terencana (Aulia et al., 2026)

Corrective maintenance cenderung dianggap kurang efisien karena dapat menurunkan tingkat ketersediaan mesin serta mengganggu pencapaian target produksi, maka dari itu *corrective maintenance* sering digunakan sebagai pelengkap ketika kegagalan tidak dapat diprediksi melalui analisis sebelumnya.

2.2.3 Perawatan Prediktif (Predictive Maintenance)

Predictive Maintenance merupakan pendekatan pemeliharaan preventif yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi proses manufaktur dengan cara memperpanjang umur peralatan serta memastikan pengelolaan operasi yang berkelanjutan. Metode ini memungkinkan pengurangan downtime dan jumlah penghentian mesin yang tidak perlu, serta menurunkan biaya perbaikan melalui tindakan perawatan berdasarkan prediksi kerusakan yang mungkin terjadi (Hafidhoh dkk., 2024).

Strategi *predictive maintenance* yang cerdas saat ini mulai banyak diterapkan oleh perusahaan manufaktur. Penerapan ini dilakukan dengan cara mengevaluasi sisa umur pakai (*remaining useful life*) komponen yang berpotensi mengalami kegagalan serta memungkinkan pemantauan kondisi peralatan secara jarak jauh dan real-time. Untuk menjaga agar peralatan dapat beroperasi dengan baik, diperlukan proses deteksi dan diagnosis terhadap potensi kerusakan. *Predictive maintenance* merupakan pemeliharaan yang di arahkan untuk pencegahan terjadinya kerusakan dengan cara memeriksa mesin tersebut dengan

selang waktu teratur, pelaksanaan reparasi di lakukan selanjutnya jika ada penemuan ke janggalan pada mesin.

2.3 Cathode Stripping Machine

Proses *Electro Refinery* merupakan salah satu tahap penting dalam industri pemurnian tembaga yang bertujuan menghasilkan tembaga dengan tingkat kemurnian tinggi. *Anoda* tembaga hasil peleburan dengan kemurnian sekitar 99 % ditempatkan bersama pelat katoda berbahan *stainless steel* di dalam larutan *elektrolit asam sulfat* (H_2SO_4), selanjutnya diberikan tegangan listrik sehingga terjadi reaksi elektrokimia yang menyebabkan tembaga dari anoda larut menjadi ion Cu^{2+} dan kemudian mengendap pada permukaan katoda *stainless steel* sebagai tembaga murni dengan kemurnian mencapai $\pm 99,99\%$ (Wattimena, t.t.). Hasil dari proses *electrorefining* selama 7 hari berupa lembaran katoda yang terdiri dari pelat *stainless steel* yang dilapisi tembaga murni pada kedua sisinya.

Setelah proses *electrorefining* selesai, katoda tembaga dipindahkan menggunakan crane menuju *Cathode Stripping Machine* (CSM) untuk dilakukan proses pemisahan antara lembaran tembaga dengan pelat *stainless steel*. *Cathode Stripping Machine* merupakan mesin yang digunakan pada tahap akhir proses *electrorefining* tembaga untuk memisahkan lembaran *copper cathode* dari *stainless steel cathode blank* (Forouzanmehr et al., 2025)



Gambar 2.1 Proses *Harvest Electro Refinery*

Proses pemisahan katoda merupakan tahap yang sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap kelancaran proses produksi dan kualitas produk tembaga yang dihasilkan. Apabila terjadi gangguan pada *Cathode Stripping Machine*, maka proses produksi dapat terhenti dan menyebabkan peningkatan waktu downtime mesin.

2.4 Prinsip Kerja Cathode Stripping Machine

Proses Operasinya melibatkan sistem robotik untuk pemindahan material, mekanisme tumbukan (*Flex/impactor*) untuk memulai proses pemisahan, serta *cutting blades* untuk menyelesaikan pelepasan lembaran tembaga dari *cathode* blank. Setelah terpisah, *cathode* diteruskan ke proses akhir, sedangkan *cathode blank* digunakan kembali pada proses *electrorefining* (Forouzanmehr et al., 2025)

Cathode Stripping Machine bekerja berdasarkan sistem mekanis dan otomatisasi yang menggabungkan beberapa komponen seperti robot, conveyor, gripper, roller, serta mekanisme stripping. Proses kerja mesin *Cathode Stripping Machine* secara umum terdiri dari beberapa tahapan yaitu:

2.4.1 Proses Pencucian (Wash Chamber)

Cathode hasil proses elektrolisis diambil dari tangki elektrolisis menggunakan crane ke Rack (*Receiving Beam*), *cathode* yang belum di pisah kan dari *mother blank* diambil menggunakan *loading wagon* dan di transfer menggunakan conveyour ke area pencucian, menggunakan air condensate dengan temperature 75° C, menggunakan 2 Pump Centrifugal dan satu tank penyimpanan air (Metso outotec, 2024: 14).



Gambar 2.2 Washing Chamber

2.4.2 Prose Pemindahan Cathode Menggunakan Conveyor setelah di lakukan pencucian

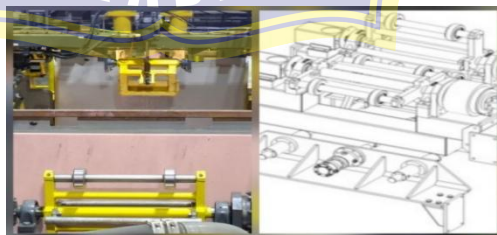
Transverse Conveyor merupakan sistem konveyor yang berfungsi untuk memindahkan *mother blank* secara menyamping dari *Receiving/Wash Conveyor* melalui bantuan *In-feed Robot* menuju beberapa stasiun proses, yaitu *Deposit Detachment Unit 1&2 Chiseling Unit 1 & 2*, dan *Down Ender 1 & 2*. Selama proses perpindahan tersebut, katoda diangkut di atas rantai konveyor sehingga material dapat bergerak dengan stabil menuju setiap stasiun pengupasan (Cathode Cathode Stripping Machine IOMS Manual Description Of Equipment IOMS Manual, 2024)



Gambar 2.3 Transverse Conveyor 1 dan Transverse Conveyor 2

2.4.3 Proses Pengupasan Tembaga (Deposit detachment unit) DDU 1 & DDU 2

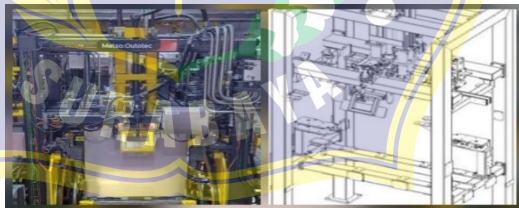
Deposit Detachment Unit (DDU) 1 dan 2 merupakan unit yang berfungsi sebagai tahap pengupasan awal pada proses pelepasan tembaga dari *mother blank*. Unit ini Ter Integrasi dengan Cross Conveyor 1 dan 2. Prinsip kerjanya, memberikan tekanan dari kedua sisi pada mother blank sehingga lapisan tembaga yang menempel mulai terbuka dan terlepas dari permukaan lembaran tersebut. Proses ini merupakan tahap awal sebelum pemisahan tembaga dilakukan secara penuh pada unit berikutnya (*Cathode Stripping Machine* IOMS Manual Description Of Equipment IOMS Manual, 2024)



Gambar 2.4 Deposit detachment unit (DDU 1 & DDU 2)

2.4.4 Proses Pemisahan Tembaga (Stripping Unit 1 dan 2)

Chiseling Unit merupakan unit yang berfungsi sebagai tahap pengupasan sekunder pada proses pemisahan tembaga dari *mother blank*. Prinsip kerja dengan cara memberikan tekanan menggunakan pisau pahat sehingga pelat tembaga terlepas dari *mother blank* dan jatuh menuju gripper yang terpasang pada *Down Ender*. Chiseling Unit terdiri dari rangka kuat berbahan baja karbon yang dipasang melintang di atas Transverse Conveyor 1 dan 2. Stripping Unit terdapat dua silinder hidrolik berkapasitas 120 Bar yang masing-masing dilengkapi dengan *chiseling blade*. Bagian pisau pahat terdapat dua *gliding bushes* yang bergerak pada poros baja, yang berfungsi untuk mengontrol dan menstabilkan pergerakan pahat selama proses pengupasan tembaga berlangsung (Cathode Stripping Machine IOMS Manual Description Of Equipment IOMS Manual, 2024)

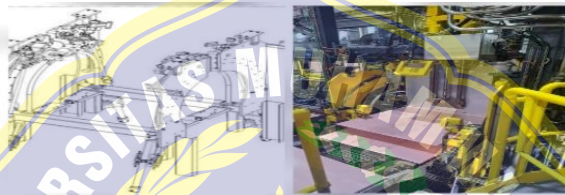


Gambar 2.5 Stripping Unit 1 dan Stripping Unit 2

2.4.5 Proses Reorientasi Tembaga (Down Ender 1 dan 2)

Down Ender Unit merupakan unit yang dipasang melintang di atas *Transverse Conveyor* 1 dan 2 berada di bawah *Chiseling Unit* 1 dan 2. *Down Ender* berfungsi untuk

memutar pelat tembaga hasil proses pengupasan dari posisi vertikal menjadi horizontal dengan sudut putaran sekitar 90° menggunakan selinder hidrolik sebagai penggerak. Setelah diputar, pelat tembaga kemudian ditempatkan pada *Cathode Conveyor 1* dan 2 untuk proses pemindahan selanjutnya (Cathode Stripping Machine IOMS Manual Description Of Equipment IOMS Manual, 2024)



Gambar 2.6 Down Ender 1 dan 2

2.4.6 Proses Pengeluaran Mother Blank

Discharge Conveyor merupakan konveyor yang berfungsi untuk menerima mother blank yang telah terlepas dari deposit tembaga dari *Out-feed Robot* secara satu per satu dan menempatkannya dengan jarak yang telah ditentukan. Sistem penggerak konveyor menggunakan motor hidrolik yang dihubungkan dengan rantai melalui poros dan gearbox reduksi tipe planetary untuk mengatur kecepatan dan torsi selama proses pemindahan material (Cathode Stripping Machine IOMS Machine IOMS Manula Description of Equipment IOMS Manual,2024)



Gambar 2.7 *Discharge Conveyor*

2.4.7 Cathode Transfer Process

Cathode Conveyor 1 dan 2 Merupakan proses pemindahan pelat tembaga dari unit *Down Ender* menuju *Stacking Robot* melalui sistem konveyor rantai sebelum dilakukan proses penumpukan. Sistem penggerak konveyor menggunakan motor listrik yang dihubungkan dengan rantai melalui poros dan gearbox reduksi tipe planetary, sehingga rantai dapat bergerak dan memindahkan pelat tembaga ke tahap berikutnya (*Cathode Stripping Machine IOMS Manual Description Of Equipment IOMS Manual, 2024*)

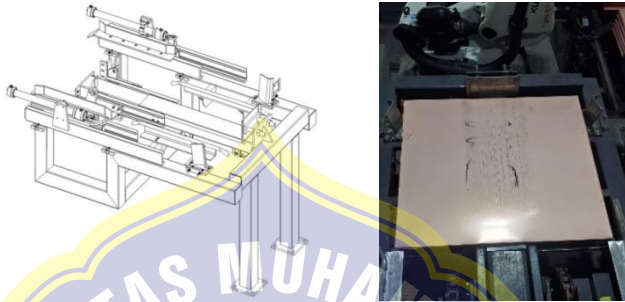


Gambar 2.8 *Cathode Conveyor* 1 dan 2

2.4.8 Proses Pengumpulan Tembaga

Cathode Collection Table 1 dan 2 proses mengumpulkan pelat tembaga yang dikirim dari *Cathode Conveyor* 1 dan *Cathode Conveyor* 2. Pelat tembaga ditampung sementara pada meja ini hingga jumlahnya mencapai dua pasang. Tumpukan pelat tembaga akan diambil oleh *Stacking Robot* untuk dipindahkan ke proses penumpukan dan penimbangan

(Cathode Stripping Machine IOMS Manual Description
Of Equipment IOMS Manual, 2024)



Gambar 2.9 Cathode Collecting Table

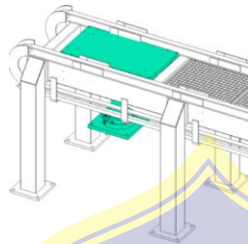
2.4.9 Proses Penimbangan Plat Tembaga

Weighing Unit terdiri dari empat load cell yang dipasang pada meja pengangkat (*lifting table*) yang digunakan untuk menimbang setiap tumpukan katoda secara terpisah. *Weighing Unit* berada di dalam *Stack Conveyor* sehingga proses penimbangan dapat dilakukan secara otomatis saat tumpukan tembaga melewati jalur konveyor. Saat tumpukan katoda berada di atas meja pengangkat, sistem load cell akan mendeteksi dan mengukur berat total dari tumpukan tembaga.

Proses penimbangan dilakukan untuk memastikan bahwa berat produk sesuai dengan standar produksi serta memudahkan proses pencatatan dan pengendalian kualitas. Sistem penimbangan pada *Weighing Unit* memiliki tingkat

akurasi sesuai *standar internasional OIML Class III* dan *NIST Handbook 44*. Akurasi penimbangan mencapai $\pm 1,5$ kg untuk beban 3000 kg. Kapasitas maksimum penimbangan 3000 kg untuk setiap tumpukan tembaga

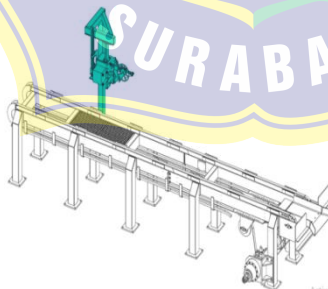
(Cathode Stripping Machine IOMS Manual Description Of Equipment IOMS Manual, 2024)



Gambar 2.10 Weighing Unit

2.4.10 Proses Pelabelan

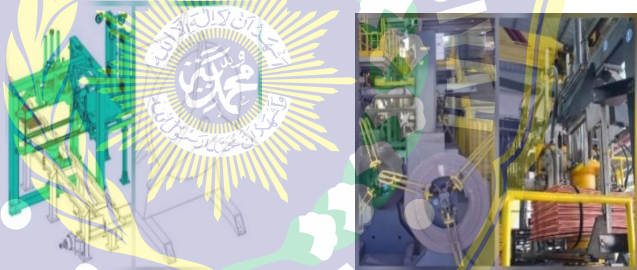
Labelling Unit merupakan unit yang berfungsi untuk memberikan label pada tumpukan katoda yang berisi informasi produk seperti tanggal dan waktu produksi, nomor tumpukan, berat, jumlah katoda dalam satu tumpukan, serta informasi lain yang diperlukan. *Labelling Unit* berada di area *Stack Conveyor* sehingga proses pelabelan dapat dilakukan secara otomatis setelah proses penimbangan (Cathode Stripping Machine IOMS Manual Description Of Equipment IOMS Manual, 2024)



Gambar 2.11 Labelling Unit

2.4.11 Proses Pengikatan dan Penyediaan Strap

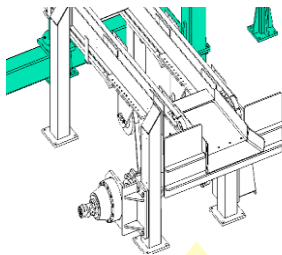
Proses pengikatan dilakukan pada automatic strapping station yang berada di Stack Conveyor. *Strapping Unit* berfungsi untuk mengikat tumpukan tembaga menggunakan strap agar tetap stabil selama proses penanganan dan pengiriman. Mesin strapping dilengkapi dengan sistem press berkapasitas 5-ton yang bekerja saat proses pengikatan berlangsung. Material strap disuplai dari Jumbo Coil yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan strap. Jumbo coil mengalirkan strap secara otomatis ke Strapping Unit dan digerakkan oleh motor listrik sehingga proses pengikatan dapat berlangsung secara terus menerus (Cathode Stripping Machine IOMS Manual Description Of Equipment IOMS Manual, 2024)



Gambar 2.12 Strapping Unit dan Jumbo Coil

2.4.12 Proses Off-Loading Tembaga

Setelah proses penimbangan, pelabelan, dan pengikatan selesai dilakukan, bundel tembaga akan dipindahkan menuju posisi off-loading yang berada di ujung *Stack Discharge Conveyor*. Bundel tembaga diambil dan dipindahkan menggunakan forklift ke cathode bundel area (Cathode Stripping Machine IOMS Manual Description Of Equipment IOMS Manual, 2024)



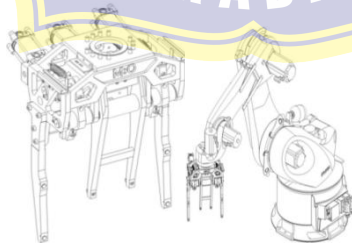
Gambar 2.13 Off-Loading Tembaga

2.5 Robot

2.5.1 In-feed Robot

Robot In-feed merupakan salah satu komponen penting dalam sistem *Cathode Stripping Machine (CSM)* yang berfungsi untuk memindahkan katoda dan endapan tembaga setelah pencucian dari *Wash Conveyor* menuju DDU 1 dan DDU 2 (*deposit detachment unit*).

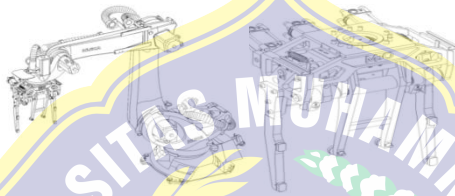
Robot In-feed dilengkapi *gripper* atau alat penjepit yang berfungsi untuk memegang dan memindahkan katoda beserta endapan tembaga dengan aman, bagian gripper terdapat alat khusus (*special tool*) yang dirancang untuk mencegah terjadinya *pre-stripping*, yaitu terlepasnya endapan tembaga dari katoda sebelum proses pemisahan pada *Stripping unit* (Roboter GmbH, 2013)



Gambar 2.14 In-feed Robot dan In-feed robot Tool (Gripper)

2.5.2 Out-Feed Robot

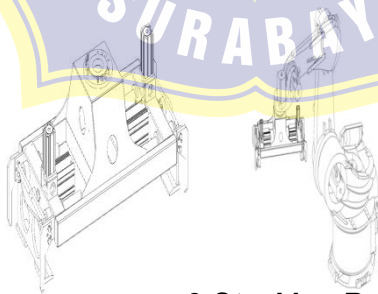
Robot Out-feed berfungsi untuk memindahkan katoda yang telah dipisahkan dari tembaga (*stripping unit*) dari Transverse Conveyor 1 dan 2 menuju *Discharge Conveyor* dan dilengkapi dengan *gripper* yang berfungsi untuk menjepit katoda agar pemindahan berjalan dengan baik (Roboter GmbH, 2013)



Gambar 2.15 Out-feed Robot dan Out-feed robot Tool (Gripper)

2.5.3 Stacking Robot

Robot *stacking* berfungsi untuk mengangkat pelat tembaga dari *Cathode Collecting Tables* 1 dan 2 kemudian menyusunnya menjadi satu tumpukan pada *Stack Conveyor* dan dilengkapi dengan *gripper* yang berfungsi untuk menjepit tumpukan tembaga, agar pemindahan berjalan dengan baik (Roboter GmbH, 2013)



Gambar 2.16 Stacking Robot dan Stacking robot Tool (Gripper)

2.6 Mean Time Between Failure (MTBF)

Mean Time Between Failure (MTBF) merupakan parameter yang menunjukkan rata-rata waktu antara dua kegagalan suatu mesin (Heru Haerudin & Dwi Wibowo, 2024). MTBF menunjukkan rata-rata waktu operasi suatu mesin sebelum mengalami kerusakan atau kegagalan yang dapat digunakan untuk mengetahui interval waktu rata-rata antara satu kegagalan dengan kegagalan berikutnya pada suatu mesin. (Husein Habibi et al., 2025)

Nilai MTBF yang tinggi memberikan informasi keandalan mesin dalam keadaan baik dan beroperasi dalam waktu yang lebih lama, sebelum mengalami kerusakan. MTBF digunakan sebagai dasar dalam menentukan jadwal *preventive maintenance* sehingga perusahaan dapat melakukan tindakan perawatan sebelum kerusakan terjadi. Penggunaan metode MTBF dapat membantu perusahaan dalam meningkatkan keandalan mesin serta mengurangi downtime saat proses produksi.

Rumus MTBF

$$MTBF = \frac{\text{Total Operation Time}}{\text{Breakdown Frequency}}$$

Keterangan:

MTBF = *Mean Time Between Failure*

Total Operation Time = Total Waktu Produksi

Breakdown Frequency = Jumlah kegagalan yang terjadi pada mesin

Menggunakan rumus tersebut, perusahaan dapat mengetahui rata-rata waktu mesin beroperasi sebelum mengalami kerusakan sehingga dapat dilakukan perencanaan perawatan yang lebih efektif. (Husein Habibi et al., 2025)

2.6.1 Langkah-langkah Meningkatkan *Mean Time Between Failure* (MTBF)

Peningkatan nilai *Mean Time Between Failure* (MTBF) dapat dilakukan melalui penerapan *preventive Maintenance* yang terjadwal, inspeksi rutin terhadap komponen kritis, pelaksanaan *Reliability Centered Maintenance* (RCM), peningkatan kompetensi operator, serta pengurangan penyebab kerusakan berulang. Strategi tersebut terbukti mampu meningkatkan keandalan peralatan, mengurangi kegagalan mesin dan mengurangi downtime (Novarika dkk., 2025).

2.7 Mean Time To Repair (MTTR)

Mean Time to Repair (MTTR) merupakan indikator yang digunakan untuk mengetahui rata-rata waktu yang diperlukan untuk memperbaiki mesin setelah terjadi kerusakan yang digunakan untuk mengukur seberapa cepat proses perbaikan mesin dapat dilakukan oleh tim maintenance (Husein Habibi et al., 2025).

Nilai MTTR yang rendah menunjukkan bahwa proses perbaikan mesin dapat dilakukan dengan cepat sehingga downtime mesin dapat diminimalkan. MTTR dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas sistem perawatan yang diterapkan dalam suatu perusahaan, dengan cara mengetahui nilai MTTR, perusahaan dapat mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan lamanya waktu perbaikan, seperti keterlambatan penyediaan suku cadang, keterbatasan tenaga teknisi, atau prosedur perbaikan yang kurang efisien.

Rumus MTTR

$$MTTR : \frac{\text{Breakdown Time}}{\text{Frekuensi Breakdown}}$$

Keterangan:

MTTR = *Main Time To Repair*

Breakdown Time = Total waktu yang dihabiskan untuk perbaikan selama periode tertentu

Frekuensi Breakdown = Jumlah kerusakan yang terjadi pada mesin.

Menggunakan rumus MTTR, perusahaan dapat mengetahui rata-rata waktu untuk melakukan perbaikan yang dibutuhkan oleh suatu komponen sehingga dapat di persiapkan alat bantu kerja sebelum terjadinya kerusakan pada komponen.

2.7.1 Langkah - langkah Menurunkan *Main Time To Repair (MTTR)*

Tata cara untuk menurunkan Nilai MTTR, dengan cara melaksanakan preventive maintenance secara terjadwal yang bertujuan untuk mendeteksi dan memperbaiki potensi kerusakan sebelum terjadinya kegagalan pada mesin (Alfionita & Alifin, 2023). Meningkatkan kemampuan Teknisi melalui pelatihan dan pengembangan keterampilan. Teknisi yang memiliki kemampuan menganalisa kerusakan yang baik akan lebih cepat menemukan penyebab kegagalan sehingga waktu yang dibutuhkan untuk perbaikan dapat dikurang dan paham terhadap prosedur kerja (Kharisma & Ridwandi, 2025).

Perusahaan perlu menyediakan suku cadang yang memadai, dikarenakan perbaikan sering kali tertunda akibat

keterlambatan pengadaan komponen pengganti dengan adanya persediaan suku cadang yang baik, waktu tunggu selama proses perbaikan dapat diminimalkan sehingga mesin bisa beroperasi Kembali (Novarika et al., 2025).

Mengidentifikasi komponen kritis menggunakan metode Failure Mode and *Effects Analysis* (FMEA), komponen yang memiliki nilai Risk Priority Number (RPN) tinggi perlu mendapatkan perhatian khusus karena berpotensi menyebabkan kerusakan yang berdampak besar terhadap operasional, dengan melakukan pemantauan dan perawatan pada komponen kritis. Perusahaan dapat mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan yang membutuhkan waktu perbaikan lama. (Alfionita & Alifin, 2023)

Perusahaan dapat menerapkan sistem pencatatan dan analisis data kerusakan, data histori kerusakan dapat digunakan untuk mengidentifikasi pola kegagalan, menentukan penyebab dominan kerusakan dan Menyusun strategi pemeliharaan yang lebih efektif. (Novarika et al., 2025)

2.8 Tingkat Keandalan mesin (Availability)

Availability merupakan salah satu parameter penting dalam analisis keandalan mesin yang menunjukkan tingkat ketersediaan suatu mesin atau peralatan untuk digunakan dalam proses produksi. *Availability* menggambarkan proporsi waktu mesin berada dalam kondisi operasional dibandingkan dengan total waktu yang tersedia.

Availability sebagai perbandingan antara waktu operasi mesin dengan total waktu operasi dan waktu perbaikan mesin. Nilai *availability* digunakan untuk mengetahui seberapa besar tingkat ketersediaan mesin dalam

mendukung kegiatan produksi. Nilai *availability* dihitung dengan menggunakan hubungan antara *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan *Mean Time To Repair* (MTTR) (Trihero et al., 2026)

Rumus *Availability*

Availability:

$$\frac{\text{Mean Time Between Failure}}{\text{Mean Time To Repair} + \text{Mean Time Between Failure}} \times 100\%$$

Keterangan:

Availability = Tingkat ketersediaan mesin dalam proses produksi (%)

MTBF = Rata-rata waktu operasi mesin sebelum terjadi kerusakan

MTTR = Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki mesin

Nilai *availability* yang tinggi menunjukkan bahwa mesin memiliki tingkat keandalan yang baik karena mesin dapat beroperasi dalam waktu yang lebih lama dibandingkan dengan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perbaikan. Jika nilai *availability* rendah menunjukkan bahwa mesin sering mengalami kerusakan atau membutuhkan waktu perbaikan yang cukup lama sehingga dapat mengurangi waktu operasi mesin dalam proses produksi. Analisis *availability* dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas sistem pemeliharaan mesin. Dalam penelitian tersebut, perhitungan MTBF, MTTR, dan *availability* digunakan untuk menilai kinerja perawatan peralatan dan mengidentifikasi upaya peningkatan keandalan mesin dan efektivitas kegiatan *maintenance*.

2.9 Analisi Pareto

Diagram Pareto merupakan salah satu alat pengendalian kualitas yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis masalah berdasarkan frekuensi kejadian sehingga dapat ditentukan prioritas perbaikan pada masalah yang paling dominan (Putra, 2024).

Diagram Pareto digunakan untuk membandingkan berbagai kategori kejadian yang disusun menurut ukurannya, dari yang paling kecil disebelah kanan. Susunan tersebut membantu menentukan pentingnya kejadian yang dikaji atau mengetahui permasalahan.

Manfaat Diagram Pareto sebagai berikut:

1. Menentukan prioritas penyebab masalah yang perlu ditanganin
2. Fokus perbaikan pada masalah yang paling dominan
3. Evaluasi efektivitas tindakan perbaikan yang telah dilakukan
4. Menampilkan data menjadi informasi yang mudah dipahami untuk mendukung pengambilan keputusan

2.9.1 Rumus Analisis Pareto

Penyusunan diagram Pareto dilakukan dengan mengelompokkan data berdasarkan jenis kejadian menghitung frekuensi masing-masing kategori, menghitung persentase terhadap total kejadian, setelah itu persentase kumulatif sebelum disajikan diagram.

Rumus:

$$\text{Persentase (\%)} = \frac{\text{Frekuensi Kerusakan}}{\text{Total Kerusakan}} 100\%$$

Frekuensi Kerusakan = Jumlah kejadian untuk satu jenis kerusakan

Total Frekuensi Kerusakan = Jumlah seluruh kejadian kerusakan yang dianalisa

2.10 Analisis Fault Tree Analysis (FTA)

FTA Merupakan metode analisis deduktif (*top-down*) yang digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) suatu kegagalan sistem melalui hubungan logika antar *top event* dan *basic event*. (Yazdi et al., 2023). FTA merupakan alat yang digunakan untuk menganalisis sistem dan mengidentifikasi semua penyebab kegagalan yang mungkin di semua tingkatan yang memungkinkan di semua tingkatan dengan sistem

2.10.1 Tujuan Fault Tree Analysis (FTA)

Menemukan akar penyebab *Root Cause* kerusakan pada dari suatu permasalahan sehingga perusahaan dapat menetapkan langkah perbaikan yang efektif untuk mengurangi kegagalan yang terjadi (Fernando et al., 2024). Hal ini juga memberikan masukan untuk pengujian, pemeliharaan, dan operasional prosedur dan kebijakan, yaitu menegaskan kemampuan sistem untuk memenuhi persyaratan keselamatan yang dipaksakan tersebut.

2.10.2 Simbol-simbol Fault Tree Analysis (FTA)

Simbol yang sering digunakan untuk membangun sebuah pohon kesalahan

SIMBOL – SIMBOL FAULT TREE ANALYSIS (FTA)

No.	Simbol	Nama Simbol	Keterangan	Contoh Penggunaan
1.		Top Event	Kejadian utama atau kegagalan puncak yang akan dianalisis.	
2.		Intermediate Event	Kejadian antara yang merupakan hasil kombinasi dari beberapa penyebab.	
3.		Basic Event	Kejadian dasar yang tidak dianalisis lebih lanjut.	
4.		Undeveloped Event	Kejadian yang tidak dikembangkan lebih lanjut karena data tidak tersedia atau di luar ruang lingkup analisis.	
5.		OR Gate	Gerbang logika "OR". Output (kejadian di atas) terjadi jika salah satu input (penyebab) terjadi.	
6.		AND Gate	Gerbang logika "AND". Output (kejadian di atas) terjadi jika semua input (penyebab) terjadi secara bersamaan.	

Contoh Penggunaan Simbol FTA (Sederhana)

Keterangan:

- = Top Event
- = Intermediate Event
- = Basic Event
- = Undeveloped Event
- = OR Gate (Salah satu terjadi)
- = AND Gate (Semua terjadi)

Gambar 2.17 Simbol-Simbol *Fault Tree Analysis* (FTA)

2.10.3 Manfaat *Fault Tree Analysis* (FTA)

1. Menganalisis kegagalan dan potensial kegagalan secara visual
2. Menunjukkan hubungan logis penyebab kegagalan
3. Memberikan pemahaman terhadap perilaku system atau peralatan
4. Mendukung analisis keandalan, pemeliharaan dan keselamatan system.

2.10.4 Kekurangan *Fault Tree Analysis* (FTA)

1. Memerlukan data yang akurat agar hasil analisis Valid
2. Sulit diterapkan pada system yang sangat kompleks
3. Tidak menggambarkan urutan waktu terjadinya kegagalan.
4. Penyusunan pohon kesalahan membutuhkan waktu dan keahlian
5. Hasil analisis bergantung pada ketepatan indentifikasi penyebab kegagalan.

2.11 Failure Mode and Effects Analysis

FMEA merupakan metode yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan (*Failure Mode*), menganalisis penyebab dan dampaknya, serta menentukan prioritas perbaikan melalui perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) (Lukman Hakim & Sidhi Cahyana, 2024).

2.11.1 Keuntungan menggunakan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA)

1. Membantu manajemen mengidentifikasi Risiko kegagalan
2. Mengklasifikasikan mode kegagalan secara sistematis.
3. Mengidentifikasi penyebab, dampak dan tingkat keparahm kegagalan.
4. Mendukung analisis keandalan, keselamatan dan pemeliharaan system
5. Dapat diterapkan pada system sederhana maupun kompleks
6. Mudah dipahami dan digunakan
7. Menganalisis kegagalan dari Tingkat komponen hingga system
8. Membantu mendeteksi Risiko yang memengaruhi kinerja dan keselamatan system

2.11.2 *Risk Priority Number* (RPN)

Risk Priority Number (RPN) merupakan nilai yang digunakan dalam metode *Filure Mode and Efect Analysis* (FMEA) untuk menentukan tingkat prioritas Risiko suatu mode kegagalan. Nilai RPN diperoleh dari perkalian tiga parameter yaitu nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O) dan *Detection* (D). semakin tinggi nilai RPN maka semakin tinggi resiko sehingga komponen tersebut menjadi prioritas utama untuk dilakukan tindakan perbaikan (Al Saadi et al., 2026).

Rumus RPN:

$$\text{RPN} = \text{Severity (S)} * \text{Occurrence (O)} * \text{Detection (D)}$$

Keterangan:

Severity (S)= Tingkat keparahan dampak kegagalan

Occurrence(O)=Frekuensi kemungkinan terjadinya kegagalan

Detection (D) = Kemampuan system mendeteksi kegagalan sebelum menimbulkan dampak.

Semakin besar nilai RPN, maka semakin tinggi prioritas Tindakan perbaikan yang harus dilakukan. Mode kegagalan dengan RPN tinggi Kritis dan diberikan prioritas yang lebih tinggi dari pada 1 sampai 10, nilai satuan RPN antar 1-99 *low*, *medium* 100-199 dan *high* 200-500. Namun, skala dan kategori yang digunakan dapat bervariasi dari satu organisasi ke yang lain

2.11.3 Severity (S)

Tingkat keparahan ke gagal dapat di gambarkan sebagai sejauh mana kegagalan komponen akan mempengaruhi jalannya operasional dari mesin atau system

Tabel 2.1 Peringkat Severity (S)

Nilai	Kategori	Deskripsi
10	Hazardous	Kegagalan sangat berbahaya, menghentikan produksi dan berpotensi menimbulkan risiko keselamatan.
9	Very High	<u>Kerusakan</u> sangat serius, <u>mesin berhenti</u> total.
8	High	<u>Mesin tidak dapat beroperasi sehingga produksi terganggu.</u>
7	Moderately High	Kinerja <u>mesin menurun secara signifikan.</u>
6	Moderate	<u>Gangguan sedang, mesin masih dapat beroperasi terbatas.</u>
5	Low	<u>Gangguan ringan yang memerlukan perbaikan.</u>
4	Very Low	<u>Dampak kecil terhadap operasi.</u>
3	Minor	<u>Pengaruh sangat kecil terhadap mesin.</u>
2	Very Minor	<u>Hampir tidak memengaruhi sistem.</u>
1	None	<u>Tidak menimbulkan dampak.</u>

2.11.4 Occurrence (O)

Terjadi kegagalan didefinisikan sebagai bahwa probabilitas kegagalan sebagian terjadi atau jumlah relative kegagalan selama umur pemakaian yang di harapkan. Dengan bantuan dari departemen pemeliharaan diputuskan untuk mengambil umur hidup 2 tahun.

Tabel 2.2 Ranking untuk terjadinya kegagalan (O)

Nilai	Kategori	Keterangan
10	Very High	Sangat sering terjadi.
9	High	<u>Terjadi berulang kali.</u>
8	Moderately High	Sering terjadi.
7	Moderate	<u>Cukup sering terjadi.</u>
6	Low	<u>Kadang-kadang terjadi.</u>
5	Very Low	<u>Jarang terjadi.</u>
4	Remote	Sangat jarang terjadi.
3	Very Remote	<u>Hampir tidak pernah terjadi.</u>
2	Almost Never	<u>Kemungkinan sangat kecil.</u>
1	Never	<u>Tidak pernah terjadi.</u>

2.11.5 Deteksi (D)

Deteksi merupakan sebagai kemampuan untuk mengidentifikasi masalah atau sumber potensial kesalahan. Semakin dini kesalahan terdeteksi semakin baik. Jika kerusakan tidak terdeteksi dari awal, hasil yang diperoleh dapat berakibat fatal bagi pabrik dalam hal biaya pemeliharaan perbaikan biayakerugian produksi.

Tabel 2.3 Ranking Deteksi Kegagalan (D)

Nilai	Kategori	Keterangan
10	Impossible	Tidak dapat dideteksi.
9	Very Remote	Sangat sulit dideteksi.
8	Remote	Sulit dideteksi.
7	Very Low	Kemungkinan deteksi rendah.
6	Low	Dapat dideteksi melalui inspeksi.
5	Moderate	Cukup mudah dideteksi.
4	Moderately High	Mudah dideteksi.
3	High	Sangat mudah dideteksi.
2	Very High	Hampir selalu terdeteksi.
1	Almost Certain	Pasti terdeteksi.