

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Perawatan (*Maintenance*)

Perawatan adalah segala kegiatan yang penting dengan tujuan untuk menghasilkan produk yang baik atau untuk mengembalikan keadaan yang memuaskan. Perawatan atau maintenance dapat didefinisikan sebagai sebuah aktivitas yang dibutuhkan untuk menjaga atau mempertahankan kualitas pemeliharaan suatu fasilitas agar fasilitas tersebut dapat berfungsi dengan baik dalam kondisi siap pakai. (Widyaswara Pradana & Widiasih, 2023)

Perawatan mesin merupakan kegiatan yang sangat diperlukan dalam meningkatkan keandalan kegiatan produksi. Rendahnya keandalan mesin menyebabkan biaya pemeliharaan dan opportunity cost menjadi tinggi (Rosyid, M. A. & Indrayana, 2023). Kendala utama dalam aktivitas perawatan mesin yaitu menentukan waktu penjadwalan perawatan mesin secara teratur. Kerusakan mesin terjadi karena kerusakan komponen-komponen mesin yang tidak dapat diketahui dengan pasti. Kondisi tersebut memerlukan waktu penjadwalan perawatan mesin yang baik sehingga dapat mengantisipasi dan menangani kerusakan pada mesin.

Menurut (Iqbal, 2017) Perawatan (preventive) merupakan kegiatan yang tidak bisa dipandang sebelah mata oleh perusahaan, karena perawatan ini adalah sifatnya kontinuitas. Banyak perusahaan yang merampingkan biaya perawatan oleh karena tuntutan efisiensi. Memang benar perampingan biaya dapat menekan biaya tapi ini lebih bersifat jangka pendek, akan tetapi dalam jangka panjang perusahaan akan mengalami kesulitan dalam kegiatan proses produksinya yang memerlukan biaya yang besar karena harus melakukan perbaikan-perbaikan dari mesin-mesin dan fasilitas pabrik yang tidak terpelihara dengan baik dan bahkan dapat menyebabkan proses produksi tidak berjalan sama sekali.

2.1.1 Jenis – Jenis Perawatan

Maintenance (Perawatan) dapat dikategorikan beberapa jenis menurut (Kurniawati & Muzaki, 2017):

1. Unplanned Maintenance merupakan jenis perawatan yang dilakukan secara tiba – tiba tanpa perencanaan sebelumnya. Perawatan ini biasanya bersifat darurat dan harus segera dilakukan untuk mencegah dampak yang lebih serius, seperti terganggunya proses produksi, kerusakan parah pada peralatan, atau risiko terhadap keselamatan dan keamanan.
2. Planned Maintenance, yaitu perawatan yang kinerjanya berdasarkan SOP yang terbagi lagi menjadi menjadi dua:
 - a. Preventive Maintenance, yaitu pemeliharaan serta perawatan untuk menanggulangi kerusakan yang tidak terduga.
 - b. Corrective Maintenance, yaitu pemeliharaan dan perawatan yang dilakukan sesudah terjadi kerusakan atau kegagalan

2.1.1.1 Preventive Maintenance

Secara umum maintenance terbagi Perawatan dapat dibagi menjadi dua jenis, yang pertama adalah preventive maintenance yang bertujuan untuk mencegah timbulnya kerusakan dini mungkin, sehingga dapat meminimalisir kerusakan yang lebih serius sehingga menimbulkan berbagai kerugian yang tidak terduga. Pemeliharaan korektif adalah pemeliharaan yang dilakukan pada peralatan setelah terjadi kerusakan agar peralatan tersebut dapat digunakan kembali pada era yang baru (Baja; & Ani, 2020). Pendapat ini sejalan dengan Haidar et al. (2019), yang menyatakan bahwa melalui penerapan preventive maintenance selama proses produksi, perusahaan dapat menjaga kualitas dan standar produk yang dihasilkan. Hal ini juga membantu meminimalkan risiko kegagalan pada produk.

Preventive maintenance mencakup empat faktor utama menurut Kusnadi (2016), yaitu:

1. Pencegahan terhadap kasus kegagalan.
2. Deteksi dini terhadap kesalahan.

3. Identifikasi potensi kegagalan tersembunyi (hidden failure).
4. Tidak melakukan tindakan jika dinilai lebih efektif daripada melakukan perubahan.

Jika prosedur preventive maintenance dijalankan dengan baik, serta terdapat koordinasi yang efektif antara departemen produksi dan pemeliharaan, beberapa manfaat dapat diperoleh, seperti yang diungkapkan oleh Praharsi et al. (2015):

- a Mengurangi waktu produksi.
- b Menekan atau menghindari biaya perbaikan yang tinggi.
- c Meminimalkan gangguan jadwal produksi dan pemeliharaan sehingga efisiensi waktu dapat terjaga.

2.1.1.2 Corrective Maintenance

Corrective maintenance adalah salah satu jenis kegiatan perawatan yang mana baru akan dilakukan bila telah terjadi kerusakan pada suatu mesin yang ditandai dengan tidak dapat berjalannya mesin tersebut sebagai mana mestinya (Asman & Widjajati, 2021). Aktivitas Corrective maintenance sering disebut aktivitas perbaikan. Corrective maintenance merupakan kegiatan yang tidak pernah direncanakan sebelumnya sehingga terkadang perawatan yang dilakukan bersifat major.

2.1.1.3 Breakdown Maintenance

Breakdown Maintenance adalah terjadi, bila peralatan gagal, dan harus direparasi dalam kondisi emergensi atau dilakukan atas dasar prioritas (Mulya, Rita Tri Yusnita, & Suci Putri Lestari, 2022). Tujuan breakdown maintenance adalah untuk dapat meminimalkan waktu terhenti operasi perusahaan, mengendalikan biaya - biaya pemeliharaan dan operasi, mengendalikan kegiatan pemeliharaan yang bertujuan langsung pada mesin produksi akibat kerusakan yang terjadi pada mesin produksi yang dimiliki. Sehingga dengan sistem Preventive Maintenance dan Breakdown Maintenance ini diharapkan mampu memberikan solusi yang efektif bagi penanganan mesin-mesin produksi agar tetap bekerja secara maksimal supaya target yang di rencanakan dapat tercapai.

2.1.1.4 Predictive Maintenance

Menurut (Widyaswara Pradana & Widiasih, 2023) Predictive maintenance pada dasarnya merupakan perawatan tindakan pencegahan berdasarkan data - data atau kondisi suatu mesin. Dengan mendeteksi kerusakan pada mesin lebih awal, maka bagian mesin yang mengalami kerusakan dapat dilakukan penjadwalan untuk dilakukan penggantian sehingga tidak sampai terjadi breakdown yang berakibat proses produksi terhenti untuk melakukan perbaikan

2.1.2 Biaya Perawatan

Biaya perawatan adalah biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan untuk menjaga agar mesin dan peralatan tetap berfungsi dengan baik dan optimal dalam proses produksi. Menurut (Heizer & Render, 2004), biaya perawatan mencakup seluruh pengeluaran yang terkait dengan pemeliharaan sistem peralatan agar dapat terus bekerja sesuai standar operasional. (Garrison, 2014), menyatakan bahwa biaya ini termasuk dalam kategori prevention cost, yaitu biaya yang digunakan untuk mencegah terjadinya kerusakan atau cacat pada produk. Oleh karena itu, perusahaan perlu mempertimbangkan strategi perawatan yang optimal agar dapat menekan biaya perawatan sekaligus meminimalisir terjadinya gangguan produksi. Perhitungan biaya tenaga kerja dan biaya *Downtime* mesin dicari untuk menentukan biaya.

2.1.3 Kegiatan Perawatan

Menurut (Assauri, 2004) , kegiatan perawatan merupakan serangkaian tindakan yang dilakukan untuk menjaga, memperbaiki, dan mengembalikan kondisi peralatan atau mesin agar tetap dalam keadaan yang layak guna dan dapat berfungsi sesuai dengan fungsinya secara optimal. Assuari menekankan bahwa perawatan tidak hanya dilakukan saat terjadi kerusakan, tetapi juga harus dilakukan secara rutin dan sistematis untuk mencegah kerusakan yang lebih parah dan menghindari gangguan produksi. Kegiatan perawatan dapat dibagi menjadi lima tugas yaitu; Inspeksi, Kegiatan Teknik, Kegiatan Produksi, Kegiatan Administrasi, House keeping

- a Inspeksi, yaitu pemeriksaan secara berkala terhadap kondisi peralatan untuk mendeteksi adanya potensi kerusakan atau keausan.
- b Kegiatan teknik, meliputi pelaksanaan perbaikan dan pemeliharaan teknis yang diperlukan untuk menjaga dan memperbaiki peralatan agar tetap dalam kondisi optimal.
- c Kegiatan produksi, yaitu aktivitas yang berkaitan dengan pengoperasian peralatan secara efektif agar mendukung proses produksi.
- d Kegiatan administrasi, meliputi pencatatan, pelaporan, dan pengelolaan data yang berhubungan dengan perawatan dan perbaikan peralatan.
- e *Housekeeping*, yaitu menjaga kebersihan dan kerapian lingkungan kerja serta peralatan agar tidak menimbulkan gangguan dan memperpanjang umur mesin.

2.2 Biaya Tenaga Kerja dan Biaya *Downtime* Pada Perusahaan

Perhitungan biaya tenaga kerja dan biaya *Downtime* mesin dicari untuk menentukan biaya perawatan pada perusahaan (Baja; & Ani, 2020). Biaya *Downtime* adalah biaya yang disebabkan, dimana suatu equipment tidak dapat beroperasi disebabkan adanya kerusakan (*failure*). (Hendrawan, 2018) Sehingga biaya *Downtime* dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Biaya } Downtime = (\text{Harga jual produk} - \text{Biaya produksi}) \times \text{Jumlah output per jam} \dots\dots\dots(2.1)$$

Selain itu, kerugian akibat *Downtime* mesin juga dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Biaya kerugian } Downtime = \frac{\text{Waktu } Downtime \text{ komponen/menit}}{60 \text{ meni}} \times \text{Biaya } Downtime/\text{jam} \dots\dots\dots(2.2)$$

Biaya tenaga kerja adalah seluruh biaya yang dikeluarkan perusahaan untuk membayar tenaga kerja/operator yang terlibat dalam proses produksi. Biaya ini mencakup gaji, tunjangan, dan kompensasi lain yang diberikan kepada pekerja. Rumus perhitungan biaya tenaga kerja:

$$\text{Biaya tenaga kerja/operator} = \frac{\text{Gaji per bulan (Rp)}}{\text{Jam kerja per bulan (jam)}} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\text{Total biaya operator} = \text{Biaya operator} \times \text{Jumlah operator} \dots\dots\dots(2.4)$$

Jika terjadi *Downtime*, operator yang seharusnya bekerja menjadi tidak aktif (menganggur), sehingga biaya operator menganggur juga harus diperhitungkan:

$$\text{Biaya operator menganggur} = \frac{\text{Waktu Downtime komponen/menit}}{60 \text{ menit}} \times \text{Biaya operator/Jam.(2.5)}$$

Dari perhitungan biaya *Downtime* dan biaya tenaga kerja, maka total biaya awal yang dapat diperoleh adalah:

$$\text{Total Cost (TC) Awal} = \text{Total biaya perawatan} + \text{Kerugian Downtime} + \text{Kerugian operator menganggur} + \text{Biaya tenaga kerja/operator.....(2.6)}$$

2.3 Reliability (Keandalan)

Menurut (Ansori, 2013), keandalan mencerminkan karakteristik atau performa suatu perangkat, yang dapat dinilai dalam kategori baik atau buruk. Melalui evaluasi keandalan, perusahaan dapat memperoleh informasi yang lebih jelas mengenai kondisi dan kinerja peralatan yang dimiliki. Hal ini memungkinkan adanya prediksi mengenai perlakuan atau pemeliharaan terhadap alat tersebut. Secara umum, pengujian keandalan bertujuan untuk:

1. Menentukan kondisi operasional dari peralatan yang digunakan.
2. Mengukur tingkat keandalan peralatan dalam konteks perjanjian kontrak.
3. Menilai perubahan desain proses yang dilakukan oleh vendor.
4. Merumuskan kebijakan layanan dan pengembangan produk.
5. Mengidentifikasi jalur atau sumber kegagalan dalam proses desain dan produksi.
6. Mendukung pengambilan keputusan manajemen dalam strategi penggunaan alat.

Sementara itu, menurut (Lubis, 2021) keandalan adalah peluang atau probabilitas suatu mesin atau komponen yang sedang digunakan mampu menjalankan fungsinya secara optimal dalam jangka waktu tertentu. Oleh

karena itu, keandalan menjadi faktor penting dalam mencegah terjadinya kegagalan sistem atau komponen selama masa operasi yang ditentukan.

Keandalan suatu sistem sering kali diukur dengan angka yang merepresentasikan usia pakai yang diharapkan. Mean Time To Failure (MTTF) merupakan rata-rata waktu hingga suatu komponen mengalami kegagalan, dan digunakan khusus untuk peralatan atau suku cadang yang tidak dapat diperbaiki, sehingga perlu diganti dengan komponen baru yang masih dalam kondisi baik. Sementara itu, untuk komponen yang masih dapat diperbaiki dan kemungkinan mengalami kegagalan kembali, digunakan ukuran waktu antara dua kegagalan yang dikenal sebagai Mean Time Between Failure (MTBF).

Rumus-rumus terkait adalah sebagai berikut:

$$\text{TTR (Time To Repair)} = \text{Waktu Selesai Kerusakan} - \text{Waktu Mulai Kerusakan} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$\text{TTF (Time To Failure)} = (\text{Waktu Selesai Kerusakan} - \text{Jam Kerja Selesai}) + (\text{Jam Kerta}) + (\text{Jam Kerja Mulai} - \text{Waktu Mulai Rusak}) \dots \dots \dots (2.8)$$

2.4 Modularity Design

Menurut Tarigan et al. (2013), *Modularity Design* berfungsi untuk mengelompokkan elemen-elemen mesin sesuai dengan urutan proses perbaikannya. Pendapat serupa disampaikan oleh Silalahi et al. (2008), yang menyatakan bahwa *Modularity Design* menyederhanakan proses manufaktur dan perakitan.

Modularity Design merupakan pendekatan yang umum digunakan dalam merancang suatu produk, dan kini juga mulai diterapkan dalam sistem perawatan (*maintenance*). Modularisasi mengacu pada proses mengelompokkan bagian-bagian produk ke dalam unit-unit tertentu berdasarkan fungsi masing-masing. Tujuan dari pengelompokan ini adalah untuk memudahkan proses penggantian atau perakitan kembali, yang pada akhirnya dapat menekan biaya dan memberikan solusi perawatan yang lebih efisien bagi perusahaan. Modularisasi dimulai sejak fase perancangan produk, di mana komponen individu dirancang untuk dapat dirakit menjadi

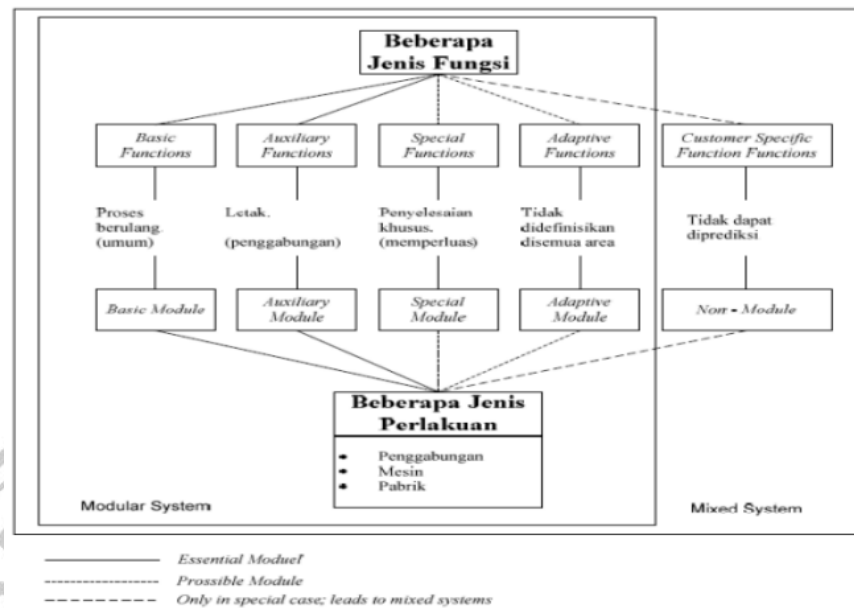
berbagai variasi modul sesuai kebutuhan. Dengan menyusun komponen berdasarkan kesamaan fungsi dan ketergantungan proses, *Modularity Design* memungkinkan proses perawatan serta perbaikan dilakukan secara lebih hemat waktu dan biaya. Menurut (Pahl & Beitz, 1996), setiap fungsi dalam sebuah produk idealnya berdiri sendiri dan tidak saling tergantung. Mereka juga menjelaskan dua ciri utama dari *Modularity Design*:

- Terdapat kemiripan dalam bentuk fisik dan fungsi komponen dalam struktur desain, yang memberikan pendekatan baru dalam memisahkan bentuk dari proses kerja.
- Interaksi antar komponen diminimalkan, terutama jika tidak terlalu berpengaruh secara langsung terhadap fungsi fisik keseluruhan.

Struktur dalam desain produk mencakup baik sisi fungsional maupun sisi fisik. Modul fungsional bertugas menjalankan fungsi teknis secara mandiri atau bersama modul lain, sedangkan modul produksi lebih fokus pada kegiatan manufaktur dan dibuat agar tetap independen dari segi fungsi..

Menurut (Pahl & Beitz, 1996), terdapat beberapa jenis dan fungsi modul dalam sistem modular maupun sistem campuran:

- a *Basic Function*: Fungsi inti yang menjadi dasar dari sistem, berfungsi mendukung komponen lain, dan bisa terdiri dari berbagai bentuk dan tingkatan.
- b *Auxiliary Function*: Fungsi tambahan yang mendukung modul utama dan kadang juga termasuk fungsi penting lainnya.
- c *Special Function*: Fungsi pelengkap yang tidak termasuk dalam fungsi utama, bersifat opsional dan dikelola melalui modul khusus.
- d *Adaptive Function*: Fungsi yang bisa menyesuaikan terhadap sistem atau kondisi tertentu yang tidak terduga. Modul adaptif bersifat fleksibel, ukurannya bisa bervariasi, dan dapat dibuat sesuai kebutuhan.



Sumber : (Pahl & Beitz, 1996)

Gambar 2.1 Fungsi dan Tipe Modul pada *Modular System* dan *Mix System* dan *Customer-specific Function*: Merupakan fungsi khusus yang dirancang berdasarkan kebutuhan pelanggan. Karena memiliki banyak variasi dan perubahan, fungsi ini tidak disarankan dalam sistem modular dan biasanya diatur dalam sistem gabungan antara modular dan non-modular.

Dalam konteks perawatan mesin, modularity berarti penggunaan unit-unit mandiri yang dapat diganti tanpa harus mengubah struktur utama peralatan. Modul ini berdiri sendiri, memiliki fungsi khusus, dan tidak bergantung pada komponen lain. Sistem modular menawarkan sejumlah keunggulan, terutama bagi operator, seperti:

1. Desain sistem pemeliharaan menjadi lebih ringkas dan efisien.
2. Menghemat waktu dan biaya pelatihan personel pemeliharaan.
3. Mempermudah proses perawatan secara keseluruhan.
4. Mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk pelaksanaan perawatan.
5. Pindahan modul tidak memerlukan keahlian teknis tinggi.
6. Menurunkan risiko kerusakan pada mesin atau peralatan lainnya.
7. Memungkinkan identifikasi dan penanganan kerusakan secara terpisah.

8. Modul yang mengalami kerusakan dapat dipindahkan ke lokasi atau kondisi yang lebih kondusif untuk dilakukan perbaikan.

2.4.1 Keterkaitan Konsep *Modularity Design* Dengan Perawatan Preventif

Dalam penerapan sistem preventive maintenance, penting untuk mengelompokkan mesin berdasarkan fungsi dan proses kerjanya. Proses pengelompokan ini dapat didukung dengan konsep *Modularity Design*, yang berfungsi untuk menyusun komponen-komponen mesin kritis atau yang sering mengalami kerusakan ke dalam modul-modul tertentu, sehingga mempermudah kegiatan pemeliharaan mesin produksi (Handayani dan Harada, 2015). Hal ini juga ditegaskan oleh Hariyanto et al. (2017), yang menyatakan bahwa *Modularity Design* memberikan keuntungan berupa proses manufaktur dan perakitan yang menjadi lebih efisien, murah, dan sederhana.

2.5 Distribusi Keandalan

Dalam analisis keandalan (Reliability), pola distribusi digunakan untuk memodelkan waktu hingga kegagalan suatu sistem atau komponen. Distribusi ini penting untuk memperkirakan umur pakai, menentukan jadwal perawatan, dan menganalisis probabilitas kegagalan.

2.5.1 Distribusi Eksponensial

Distribusi eksponensial digunakan ketika suatu sistem atau komponen memiliki tingkat kegagalan konstan sepanjang waktu. Artinya peluang terjadinya kegagalan tidak tergantung pada berapa lama komponen tersebut telah digunakan. Distribusi ini paling sering digunakan pada komponen elektronik atau sistem yang tidak mengalami keausan secara fisik, dan lebih rentan terhadap kegagalan yang mendadak.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana :

$R(t)$: Probabilitas bahwa sistem masih berfungsi pada waktu t

λ : Failure rate (Tingkat kegagalan persatuan waktu)

t : Waktu operasi

2.5.2 Distribusi Weibull

Distribusi Weibull adalah salah satu distribusi fleksibel dan banyak digunakan dalam analisis keandalan. Distribusi ini dapat menggambarkan berbagai pola kegagalan, tergantung pada nilai parameter (β):

- $\beta < 1$: kegagalan awal atau infant mortality
- $\beta = 1$: kegagalan acak, identik dengan distribusi eksponensial
- $\beta > 1$: kegagalan karena keausan, menunjukkan bahwa kemungkinan kegagalan meningkat seiring waktu

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

η : scale parameter (umur karakteristik)

β : shape parameter

t : waktu operasi

2.5.3 Distribusi Normal

Distribusi normal digunakan ketika data waktu kegagalan. Ini berarti kegagalan tidak terjadi terlalu awal atau terlalu lambat, tetapi paling sering terjadi di sekitar waktu tertentu. Distribusi ini digunakan ketika penyebab kegagalan adalah hasil dari banyak faktor kecil.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

μ : Rata – rata waktu kegagalan

σ : Standar deviasi (variabilitas kegagalan)

t : Waktu

2.5.4 Distribusi Log-Normal

Distribusi log-normal digunakan saat waktu hingga kegagalan tidak bisa bernilai negatif dan data waktu kegagalan menyebarkan. Ini sering terjadi ketika waktu hidup suatu komponen dipengaruhi oleh proses akumulatif seperti keausan, korosi, atau kelelahan material. Jika logaritma waktu hidup suatu komponen mengikuti distribusi normal, maka waktu hidup komponen tersebut mengikuti distribusi log-normal.

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}, t > 0 \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana :

t : Waktu (harus lebih dari 0)

μ : Rata-rata dari logaritma waktu kegagalan (bukan rata-rata langsung dari waktu kegagalan)

σ : Simpangan baku dari logaritma waktu kegagalan

$\ln t$: Logaritma natural dari waktu

$f(t)$: Fungsi kepadatan probabilitas (PDF) yang menunjukkan kemungkinan kegagalan pada waktu t

2.6 Penjadwalan Perawatan Mesin

Produksi adalah rangkaian proses yang dilakukan untuk menghasilkan produk atau jasa. Sistem produksi merupakan kumpulan berbagai subsistem pendukung yang bekerja bersama untuk mengubah input menjadi output produksi sesuai tujuan. Menurut (Baker, 1974), perencanaan penjadwalan adalah kegiatan pengalokasian sumber daya dan mesin yang tersedia untuk melaksanakan serangkaian tugas dalam periode waktu tertentu.

Salah satu tantangan utama dalam sistem produksi adalah mengatur dan menjadwalkan pekerjaan agar pesanan dapat diselesaikan tepat waktu sesuai kesepakatan, sekaligus memanfaatkan sumber daya yang ada secara maksimal. Untuk mencapai hal tersebut, diperlukan penjadwalan produksi yang terstruktur dengan baik. Penjadwalan yang rinci diharapkan dapat meminimalkan waktu tunggu (idle time) pada unit produksi serta mengoptimalkan proses barang dalam produksi (work in process).

Tujuan pembuatan jadwal produksi adalah untuk meningkatkan efisiensi operasional sekaligus menekan biaya pengeluaran. Salah satu aspek penting dalam penjadwalan adalah job sequencing, yaitu proses pengurutan pekerjaan berdasarkan urutan dan kinerja yang diukur. (Baker, 1974) menjelaskan bahwa penjadwalan adalah pendistribusian sumber daya dan mesin yang ada guna menyelesaikan serangkaian tugas dalam jangka waktu

tertentu. Dalam konteks ini, pekerjaan atau job terdiri dari sejumlah aktivitas atau operasi dasar yang harus dilakukan.

Beberapa tujuan utama dalam perencanaan penjadwalan telah dijelaskan oleh (Baker, 1974):

1. Meningkatkan efisiensi penggunaan mesin dengan meminimalkan waktu mesin tidak beroperasi (*Downtime*).
2. Mengurangi stok produk dalam proses dengan menekan jumlah pekerjaan yang menumpuk akibat mesin yang sedang sibuk.
3. Mengurangi keterlambatan yang disebabkan oleh batas waktu tertentu, meliputi:
 - a. Menekan keterlambatan maksimum yang terjadi,
 - b. Menurunkan jumlah total pekerjaan yang mengalami keterlambatan.
 - c. Memperkecil biaya produksi secara keseluruhan.

Memastikan kepatuhan terhadap tenggat waktu yang telah ditetapkan, mengingat pelanggaran batas waktu bisa mengakibatkan denda (penalty).

2.6.1 Biaya Perawatan Penggantian

Menurut (Kurniawan, 2013), penggantian komponen merupakan langkah preventif yang dilakukan sebelum terjadi kerusakan serius yang dapat menyebabkan biaya perbaikan yang lebih tinggi. Dalam menentukan waktu yang tepat untuk melakukan penggantian, terdapat beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan, yaitu:

- a. Keuntungan (profit) yang dihasilkan,
- b. Jumlah total biaya yang dikeluarkan,
- c. Waktu henti operasional (*Downtime*).

Seiring bertambahnya usia peralatan, biaya operasional cenderung meningkat. Oleh karena itu, perusahaan perlu menentukan titik optimal untuk melakukan penggantian mesin atau alat, yaitu sebelum terjadi kerusakan. Hal ini disebabkan oleh:

- a. Biaya penggantian yang dilakukan setelah kerusakan cenderung lebih besar dibandingkan jika dilakukan sebelumnya,
- b. Tingkat kerusakan alat akan terus meningkat seiring waktu.

Untuk menghitung biaya penggantian komponen dalam kegiatan perawatan, terdapat rumus atau metode tertentu yang dapat digunakan sebagai acuan:

$$C_p = [(Biaya\ operator + Biaya\ mekanik) \times MTTR] + \text{Harga komponen} \dots\dots\dots(2.13)$$

Biaya korektif merupakan pengeluaran yang timbul akibat terhentinya mesin secara tiba-tiba selama proses produksi berlangsung. Untuk menghitung biaya penggantian komponen yang rusak, dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$C_f = [(Biaya\ operator + Biaya\ mekanik + Biaya\ Downtime) \times MTTR] + \text{Harga komponen} \dots\dots\dots(2.14)$$

2.6.2 Interval Waktu Perawatan Optimal

Waktu perawatan yang optimal untuk operasi penggantian preventif dapat ditentukan dengan memilih periode yang menghasilkan biaya terendah. Permasalahan utamanya adalah menentukan waktu yang tepat untuk mengganti, guna meminimalkan total waktu henti (*Downtime*). Adapun tantangan yang muncul antara lain:

1. Meningkatkan frekuensi penggantian memang bisa menambah *Downtime* karena penggantian itu sendiri, namun hal ini dapat mengurangi *Downtime* akibat kegagalan.
2. Sebaliknya, menurunkan frekuensi penggantian dapat mengurangi *Downtime* akibat proses penggantian, namun berisiko meningkatkan *Downtime* karena kerusakan yang tidak terduga.

Kedua kondisi ini menunjukkan perlunya keseimbangan yang tepat. Strategi penggantian dan pemeliharaan tersebut dapat dikategorikan ke dalam pendekatan deterministik maupun probabilistik (Jardine, 2013).

Untuk mendapatkan Total Cost (TC) minimum, maka turunan TC terhadap waktu perawatan $\frac{dTc}{dTM} = nol$. Dengan demikian, interval waktu perawatan yang optimal, apabila mengikuti distribusi Weibull, dapat ditentukan menggunakan rumus berikut (Ansori, 2013)

$$TM = \eta x \left| \frac{Cp}{Cf(\beta-1)} \right|^{\frac{1}{\beta}} \dots \dots \dots (2.15)$$

Keterangan :

TC = Biaya total perawatan per satuan waktu

Cf = Biaya penggantian kerusakan komponen

Cp = Biaya penggantian pencegahan komponen

TM = Interval waktu perawatan optimal dalam satuan jam

Menurut Jardine (2013:32), terdapat dua hal penting yang perlu diperhatikan dalam menetapkan kebijakan penggantian suku cadang, yaitu:

- a Total biaya penggantian komponen akibat kerusakan harus melebihi total biaya yang dikeluarkan jika penggantian dilakukan secara preventif.
- b Diperkirakan bahwa tingkat kegagalan peralatan akan mengalami peningkatan seiring waktu.

2.7 Total Biaya Perawatan

Dalam dunia industri, pengelolaan dana yang memadai sangat diperlukan, sehingga dibutuhkan manajemen keuangan yang cermat dan mampu memperkirakan besarnya biaya yang dibutuhkan untuk kegiatan perawatan. Menurut (Sudrajat, 2011), biaya merupakan pengeluaran operasional yang meliputi biaya perawatan bahan baku, tenaga kerja, serta biaya sub-kontrak atau pembayaran kontrak perawatan. Biaya perawatan dialokasikan untuk menjaga kelancaran operasional agar pekerjaan tetap berjalan normal. Ada berbagai jenis biaya yang harus dikeluarkan perusahaan selama proses perawatan, antara lain:

1. Biaya perawatan rutin, yang mencakup biaya tenaga kerja dan material untuk kegiatan operasional sehari-hari, termasuk pemeliharaan estetika dan perawatan peralatan seperti pembersihan, pelumasan, pemeriksaan, dan penyetelan.
2. Biaya inspeksi peralatan, yaitu biaya tenaga kerja dan material yang digunakan untuk pemeriksaan internal guna mendeteksi ketidakwajaran

serta menentukan bagian peralatan yang rusak dan masih bisa diperbaiki (Sudrajat, 2011)

Oleh karena itu, pola perawatan yang optimal perlu diperhatikan agar biaya perawatan dan perbaikan dapat seimbang serta menghasilkan total biaya (total cost) yang paling efisien.

Menurut Yanti (2015), total biaya perawatan dengan pendekatan *Modularity Design* dapat dihitung menggunakan rumus distribusi Weibull sebagai berikut:

$$TC = \frac{c_f}{\eta} \beta T M^{\beta-1} + \frac{c_p}{TM} \dots\dots\dots(2.16)$$

Keterangan:

TC = Total Cost

Cf = Biaya kegagalan

Cp = Biaya pencegahan

η = Parameter skala Weibull

β = Parameter bentuk Weibull

TM = Interval waktu perawatan

Sedangkan total biaya perawatan tahunan (TC^*) dihitung dengan persamaan:

$$TC^* = \left(\frac{\text{Jumlah hari kerja} \times \text{Jam kerja per hari} \times 60}{TM} \times MTTR \times TC \right) + \text{Harga Komponen} \dots\dots\dots(2.17)$$

Perbandingan biaya perawatan yang diusulkan dengan biaya perawatan perusahaan dapat dirumuskan sebagai berikut

$$Efisiensi = \frac{TC \text{ Perusahaan} - TC \text{ usulan}}{TC \text{ Perusahaan}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.18)$$

2.8 Literatur Review

Penelitian terdahulu memberikan kontribusi penting dalam pemahaman dan penerapan metode *Modularity Design* di berbagai sektor industri. Berikut ini tabel kajian terdahulu disajikan dalam tabel:

Tabel 2. 1 Literature Review

No.	Peneliti (Tahun)	Objek Penelitian	Fokus/Variabel yang Diteliti	Metode					Relevansi ke Studi Saat Ini
				Preventive Maintenance	Corrective Maintenance	Predictive Maintenance	<i>Modularity Design</i>	Reliability Analysis	
1	Erdizon (2024)	Mesin pengolahan kelapa sawit	FMEA, RCM, OEE untuk efisiensi operasional dan keandalan mesin	✓	✓	✓	–	✓	Pendekatan komprehensif meningkatkan keandalan produksi
2	Sodikin et al. (2024)	Mesin diesel PLTD Masohi	Preventive dan Predictive Maintenance scheduling	✓	–	✓	–	–	Pengurangan biaya dan downtime melalui penjadwalan tepat
3	Sibuea (2022)	Mesin Rolling Plate DAVI	Implementasi Total Productive Maintenance (TPM)	✓	–	–	–	–	Peningkatan OEE dan pengurangan downtime
4	Hariono et al. (2023)	Mesin huller	Biaya optimal preventive dan repair maintenance	✓	✓	–	–	–	Optimalisasi biaya pemeliharaan
5	Fahri (2025)	Unit WA800-3 (alat berat)	Efektivitas preventive maintenance periodic inspection	✓	–	–	–	–	Peningkatan performa alat berat melalui preventive maintenance

6	Pranata & Saifudin (2024)	Mesin Industri	Penjadwalan dan estimasi biaya maintenance modular	✓	-	-	✓	-	Desain modular dan pengurangan biaya
7	Misaii & Haghghi (2024)	Sistem multikomponen	Optimalisasi corrective maintenance dengan data-driven	-	✓	-	-	✓	Efisiensi corrective maintenance
8	Cruz et al. (2024)	Peralatan industri	Prediksi kerusakan berbasis AI	-	-	✓	-	-	Machine learning untuk predictive maintenance
9	Redyantanu (2024)	Arsitektur modular	Konsep desain modular sebagai konteks penggunaan	-	-	-	✓	-	Penerapan desain modular dalam maintenance
10	Octavia (2025)	Mesin Industri	Perencanaan preventive maintenance menggunakan age replacement	✓	-	-	-	-	Perencanaan pemeliharaan preventif optimal
11	Levitin (2024)	Sistem produksi multistate	Optimasi corrective maintenance	-	✓	-	-	✓	Perbaikan maintenance korektif pada sistem multistate
12	Sanusi (2024)	Desain modular 3D	Parameter desain modular baru	-	-	-	✓	-	Penentuan parameter desain modular dalam pengembangan
13	Yao (2024)	Struktur pondasi	Analisis reliabilitas struktur bertongkat	-	-	-	-	✓	Studi keandalan pondasi teknik

14	Agustin & Desmira (2024)	Industri manufaktur	Dampak preventive maintenance terhadap downtime	✓	-	-	-	-	Penurunan downtime dan peningkatan produktivitas
15	Dewi et al. (2024)	Komponen mesin	Interval optimal preventive maintenance	✓	-	-	-	✓	Penentuan waktu perawatan paling efisien
16	Sutrisno & Setiafindari (2024)	Mesin bubut	Pengukuran OEE dan penanganan kerusakan	✓	-	-	-	-	Peningkatan efektivitas produksi dan pengurangan kerusakan
17	Sudrajat (2023)	Mesin industri	Estimasi biaya downtime dan maintenance	-	✓	-	-	-	Analisis biaya downtime akibat kerusakan
18	Rachman et al. (2024)	Mesin pabrik	Analisis reliability untuk penjadwalan preventive maintenance	-	-	-	-	✓	Reliability-based maintenance scheduling
19	Siptarini et al. (2024)	Mesin produksi	Pengaruh preventive maintenance terhadap OEE	✓	-	-	-	-	Peningkatan OEE mesin produksi
20	Hadid et al. (2024)	Sistem produksi	Model prediksi kerusakan berbasis AI	-	-	✓	-	-	Penerapan AI untuk predictive maintenance

Penelitian-penelitian sebelumnya telah banyak membahas strategi pemeliharaan mesin dengan menggunakan metode seperti preventive maintenance, corrective maintenance, predictive maintenance, *Modularity Design*, serta reliability analysis. Beberapa studi seperti oleh Tarigan et al. (2013), Yanti (2015), dan Amanda & Widiasih (2021) membuktikan bahwa penerapan *Modularity Design* dapat menurunkan biaya perawatan dan mengoptimalkan penjadwalan perawatan, terutama dalam sistem produksi berskala kecil hingga menengah. Selain itu, penelitian oleh Handayani & Harada (2015) dan Silalahi et al. (2017) juga mendukung efisiensi biaya dan adaptabilitas sistem modular dalam menghadapi kondisi tak terduga.

Sementara itu, pendekatan preventive maintenance dominan digunakan dalam berbagai penelitian seperti oleh Hariyanto et al. (2017), Kurniawan (2013), dan Sudrajat (2016) untuk menekan risiko kerusakan mesin yang dapat mengganggu kelancaran proses produksi. Penelitian lain oleh Sipos et al. (2014) juga memperkenalkan metode predictive maintenance berbasis kondisi alat sebagai pendekatan alternatif yang lebih adaptif.

Penelitian ini dilakukan di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk, Pabrik Tuban, dengan fokus pada mesin Kiln sebagai objek utama. Berbeda dari penelitian terdahulu, penelitian ini mengembangkan penerapan *Modularity Design* pada mesin Kiln dengan tujuan mengelompokkan komponen kritis berdasarkan fungsi dan proses perbaikannya. Strategi ini diharapkan dapat mempermudah proses pemeliharaan, mempercepat waktu perbaikan, dan mengurangi *Downtime* secara signifikan. Dengan demikian, penelitian ini mengisi celah (gap) dalam literatur sebelumnya yang belum mengkaji penerapan *Modularity Design* pada mesin berskala besar di industri semen, serta memberikan kontribusi praktis dalam peningkatan efisiensi sistem perawatan.