

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 *Maintenance*

Maintenance adalah serangkaian aktivitas yang dilakukan untuk mempertahankan atau mengembalikan kondisi suatu peralatan agar tetap dapat berfungsi sesuai standar operasional yang ditetapkan. Tujuan utama *maintenance* adalah meningkatkan keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) mesin, mengurangi frekuensi kerusakan, serta meminimalkan biaya operasional selama masa penggunaan aset (Nugroho & Sukmono, 2024). Fungsi *maintenance* dalam industri manufaktur tidak hanya terbatas pada perbaikan ketika terjadi kerusakan, tetapi juga mencakup perencanaan, pengendalian, dan evaluasi seluruh kegiatan pemeliharaan agar produksi tetap berjalan secara efisien dan aman (Waluyo & Widyaningrum, 2023).

Penerapan sistem *maintenance* yang baik akan membantu perusahaan dalam menjaga kontinuitas proses produksi, mengurangi risiko kerugian akibat *downtime*, dan memastikan kualitas produk tetap konsisten (Wicaksono & Rosady, 2024). *Maintenance* memiliki keterkaitan erat dengan pengelolaan aset karena keputusan terkait perawatan dapat memengaruhi umur pakai peralatan dan efisiensi biaya secara keseluruhan. Dalam konteks industri manufaktur modern, *maintenance* juga berperan sebagai strategi untuk mengoptimalkan produktivitas mesin, karena mesin yang terpelihara dengan baik memiliki probabilitas lebih tinggi untuk beroperasi sesuai spesifikasi teknis dan target produksi yang ditetapkan. Dengan demikian,

pemahaman yang menyeluruh mengenai konsep, tujuan, dan fungsi *maintenance* menjadi dasar penting dalam menerapkan metode analisis keandalan seperti *Reliability Centered Maintenance (RCM)* dan evaluasi biaya menggunakan *Life Cycle Cost (LCC)* (Ishak et al., 2024).

2.3.1 Jenis-Jenis *Maintenance*

Secara umum *maintenance* dapat dikategorikan berdasarkan waktu pelaksanaan dan pendekatan yang digunakan, yaitu *corrective maintenance*, *preventive maintenance*, dan *predictive maintenance*. Masing-masing pendekatan memiliki karakteristik, tujuan, serta tingkat efektivitas yang berbeda dalam menjaga performa mesin selama masa operasionalnya (Dhillon, 2002).

A. *Corrective Maintenance*

Corrective maintenance merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan setelah mesin atau komponen mengalami kerusakan dan tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Pendekatan ini bersifat reaktif karena tindakan perbaikan baru dilakukan setelah terjadi kegagalan sistem (Muhtadi & Puspitasari, 2022). Meskipun *corrective maintenance* relatif sederhana dalam perencanaan, pendekatan ini sering menyebabkan *downtime* tidak terencana, gangguan proses produksi, serta peningkatan biaya akibat kerusakan lanjutan pada komponen lain (Aprilianto et al., 2025).

B. *Preventive Maintenance*

Preventive maintenance merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal berdasarkan interval waktu atau jam operasi tertentu dengan tujuan mencegah terjadinya kerusakan mesin. Pendekatan ini berfokus pada inspeksi rutin, pelumasan, penyetelan, dan penggantian komponen sebelum mencapai kondisi gagal (Muhtadi & Puspitasari, 2022). *Preventive maintenance* mampu mengurangi risiko kerusakan mendadak, namun sering kali belum mempertimbangkan tingkat keandalan aktual setiap komponen, sehingga berpotensi menimbulkan aktivitas perawatan yang tidak efisien dan pemborosan sumber daya (Pincirolì et al., 2023).

C. *Predictive Maintenance*

Predictive maintenance merupakan pendekatan pemeliharaan yang didasarkan pada kondisi aktual mesin dengan memanfaatkan data historis, parameter operasi, dan hasil pemantauan kondisi untuk memprediksi potensi kegagalan. Pendekatan ini memungkinkan perusahaan melakukan perawatan hanya ketika diperlukan, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya maintenance secara keseluruhan (Molęda et al., 2023). Namun, penerapan *predictive maintenance* umumnya memerlukan investasi teknologi yang relatif tinggi serta ketersediaan sistem pemantauan yang andal, sehingga tidak selalu dapat diterapkan secara optimal pada seluruh perusahaan manufaktur (Abidi et al., 2022).

2.3.2 Mesin *Mixing* pada *Batching Plant*

Mesin *mixing* merupakan salah satu komponen utama dalam sistem produksi beton *ready mix* yang berfungsi untuk mencampurkan seluruh material penyusun beton, seperti semen, agregat, air, dan bahan tambahan (*admixture*) hingga menghasilkan campuran yang homogen (Arifin & Malik, 2025). Proses pencampuran pada mesin ini dilakukan melalui mekanisme pengadukan menggunakan komponen berputar yang berada di dalam ruang pencampur (*mixing chamber*). Kualitas hasil pencampuran sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional mesin serta kinerja komponen pendukung seperti motor penggerak, *gearbox*, *shaft*, dan *blade*. Apabila terjadi gangguan pada salah satu komponen tersebut, maka proses pencampuran dapat terganggu dan berpotensi menyebabkan penurunan kualitas beton, keterlambatan produksi, serta peningkatan waktu henti mesin (*downtime*) (Amanda & Prasetyo, 2023).

Mesin *mixing* umumnya menggunakan tipe *twin shaft mixer* karena memiliki kemampuan menghasilkan pencampuran yang cepat dan merata. Sistem kerja *twin shaft mixer* menggunakan dua poros pengaduk yang berputar secara berlawanan untuk menghasilkan gaya pencampuran yang lebih optimal dibandingkan dengan jenis *mixer* lainnya. Selain itu, mesin ini memiliki beberapa komponen kritis yang berperan penting dalam menjaga kinerja operasi, seperti bearing yang menopang putaran poros, seal yang mencegah kebocoran material, serta *blade* yang melakukan proses pengadukan material (Chandra et al., 2025). Kondisi komponen tersebut perlu diperhatikan karena tingkat beban kerja yang tinggi dan kontak langsung

dengan material beton dapat mempercepat terjadinya keausan dan kerusakan (Aprilianto et al., 2025).

Pemeliharaan mesin *mixing* menjadi aspek penting dalam menjaga keberlangsungan proses produksi karena mesin ini memiliki fungsi utama dalam menghasilkan produk beton sesuai standar yang ditetapkan. Strategi *maintenance* yang tepat diperlukan untuk mengurangi kemungkinan kegagalan komponen, meningkatkan keandalan mesin, serta mengendalikan biaya akibat aktivitas perbaikan (Syafei & Suhendar, 2022). Oleh karena itu, mesin *mixing* dapat dikategorikan sebagai aset kritis yang membutuhkan pengelolaan perawatan secara sistematis berdasarkan kondisi kegagalan dan dampak yang ditimbulkan terhadap proses produksi (Kusuma et al., 2023).

2.2 Reliability

Keandalan (*reliability*) merupakan kemampuan suatu mesin, komponen, atau sistem untuk menjalankan fungsi yang telah ditentukan dalam kondisi operasi tertentu selama periode waktu tertentu tanpa mengalami kegagalan. Tingkat keandalan menjadi salah satu indikator penting dalam sistem pemeliharaan karena berkaitan langsung dengan kemampuan mesin dalam mempertahankan performa produksi, mengurangi gangguan operasional, serta meningkatkan efektivitas proses produksi (Utami et al., 2025). Mesin dengan tingkat keandalan tinggi memiliki kemungkinan mengalami kegagalan yang lebih rendah sehingga dapat mendukung keberlangsungan proses produksi secara optimal (Krisnanda & Widjajati, 2023).

Keandalan mesin memiliki hubungan erat dengan kegiatan pemeliharaan (*maintenance*). Perawatan yang dilakukan secara tepat bertujuan menjaga kondisi mesin agar tetap mampu menjalankan fungsi sesuai standar operasi, meningkatkan *availability*, serta mengurangi waktu berhenti mesin (*downtime*). Tujuan utama kegiatan pemeliharaan adalah mempertahankan tingkat keandalan (*reliability*), kemampuan pemeliharaan (*maintainability*), dan ketersediaan (*availability*) mesin sehingga proses produksi dapat berjalan secara optimal (Fahri et al., 2025).

Penurunan tingkat keandalan mesin umumnya disebabkan oleh meningkatnya frekuensi kegagalan komponen akibat faktor usia pemakaian, beban kerja, kondisi lingkungan kerja, maupun kurang optimalnya sistem pemeliharaan yang diterapkan (Bone et al., 2025). Diperlukan analisis keandalan berdasarkan data historis kerusakan untuk mengetahui pola kegagalan dan menentukan strategi perawatan yang sesuai. Menurut Krisnanda & Widjajati (2023), analisis keandalan digunakan untuk menentukan interval waktu perawatan komponen dengan mempertimbangkan data kerusakan, waktu antar kegagalan, serta waktu perbaikan sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih efektif.

Salah satu pendekatan yang sering digunakan dalam mengukur keandalan mesin adalah analisis waktu antar kerusakan (*Mean Time Between Failure/MTBF*) dan waktu perbaikan (*Mean Time To Repair/MTTR*). *MTBF* menunjukkan rata-rata waktu operasi mesin sebelum mengalami kegagalan, sedangkan *MTTR* menunjukkan rata-rata waktu yang diperlukan untuk

memperbaiki mesin hingga kembali beroperasi. Nilai *MTBF* yang semakin besar menunjukkan bahwa mesin memiliki tingkat keandalan yang lebih baik, sedangkan nilai *MTTR* yang semakin kecil menunjukkan kemampuan perbaikan (*maintainability*) yang lebih tinggi (Silvia et al., 2023).

2.2.1 *Mean Time Between Failure (MTBF)*

Mean Time Between Failure (MTBF) merupakan ukuran statistik yang digunakan untuk mengetahui rata-rata waktu operasi suatu mesin sebelum mengalami kerusakan. Parameter ini menggambarkan tingkat keandalan suatu peralatan berdasarkan interval waktu antar kegagalan yang terjadi. Semakin tinggi nilai *MTBF* menunjukkan bahwa mesin mampu beroperasi lebih lama sebelum terjadi gangguan, sehingga frekuensi penghentian produksi dapat dikurangi (Sunardi et al., 2022). Analisis dilakukan dengan menggabungkan data kegagalan, nilai keandalan, serta metode *RCM* untuk menentukan tindakan pemeliharaan yang sesuai. Persamaan *MTBF* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$MTBF = \frac{\sum Uptime}{n} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

Uptime : waktu optimal mesin

n : frekuensi kerusakan (Purba et al., 2023)

Nilai *MTBF* dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan strategi pemeliharaan karena memberikan gambaran mengenai pola keandalan suatu mesin. Apabila nilai *MTBF* rendah, maka diperlukan evaluasi

terhadap komponen penyebab kegagalan serta penyesuaian strategi pemeliharaan agar kerusakan dapat diminimalkan (Silvia et al., 2023).

2.3.1 *Mean Time To Repair (MTTR)*

Mean Time To Repair (MTTR) merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui rata-rata waktu yang dibutuhkan dalam melakukan perbaikan mesin setelah mengalami kegagalan. Nilai MTTR menggambarkan tingkat kemudahan suatu mesin untuk diperbaiki serta efektivitas aktivitas pemeliharaan yang dilakukan oleh teknisi. Menurut Krisnanda dan Widjajati (2023), *MTTR* merupakan waktu rata-rata yang diperlukan untuk melakukan proses perbaikan terhadap komponen yang mengalami kerusakan. Semakin besar nilai MTTR menunjukkan bahwa proses perbaikan membutuhkan waktu yang lebih lama sehingga tingkat *maintainability* mesin menjadi lebih rendah. Persamaan *MTTR* adalah:

$$MTTR = \frac{\sum t}{n} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

t : waktu *downtime*

n : frekuensi kerusakan (Purba et al., 2023)

Analisis *MTTR* penting dilakukan karena waktu perbaikan yang tinggi dapat menyebabkan meningkatnya *downtime* dan menurunkan produktivitas perusahaan (Wisjhnuadji et al., 2022). Oleh sebab itu, pengurangan nilai *MTTR* menjadi salah satu tujuan utama dalam penerapan strategi pemeliharaan berbasis keandalan.

2.3.2 Hubungan *Reliability* dengan Strategi *Maintenance*

Konsep keandalan menjadi dasar dalam pengembangan strategi pemeliharaan modern karena keputusan perawatan tidak hanya dilakukan berdasarkan jadwal tertentu, tetapi mempertimbangkan kondisi aktual dan tingkat risiko kegagalan mesin (Ayuni & Supriyadi, 2023). *RCM* merupakan pendekatan sistematis yang digunakan untuk menentukan kebutuhan pemeliharaan aset berdasarkan fungsi mesin, pola kegagalan, serta konsekuensi yang ditimbulkan akibat kegagalan tersebut (Costa et al., 2025). Melalui metode *RCM*, perusahaan dapat menentukan komponen kritis, mengidentifikasi penyebab kegagalan, serta memilih tindakan pemeliharaan yang paling efektif untuk meningkatkan keandalan sistem (Patil et al., 2022). Penerapan *RCM* juga mampu mengintegrasikan berbagai strategi pemeliharaan seperti *corrective maintenance*, *preventive maintenance*, dan *predictive maintenance* untuk memperoleh tingkat keandalan sistem yang optimal dengan biaya pemeliharaan yang efisien. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan *RCM* dapat meningkatkan keandalan sistem serta mengurangi biaya pemeliharaan melalui penentuan strategi perawatan yang tepat (Doda et al., 2025).

Dengan ini analisis *reliability* melalui parameter *MTBF* dan *MTTR* menjadi tahapan penting sebelum menentukan strategi pemeliharaan menggunakan metode *RCM* (Sugioko et al., 2024). Data keandalan tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi komponen kritis dan menyusun tindakan pemeliharaan yang mampu meningkatkan kinerja mesin serta mengurangi risiko terjadinya downtime pada proses produksi.

2.3.3 Prinsip Dasar *Reliability Centered Maintenance*

RCM didasarkan pada prinsip bahwa setiap aset fisik memiliki fungsi spesifik yang harus dipertahankan selama masa operasinya agar sistem dapat beroperasi secara optimal. Prinsip utama *RCM* menyatakan bahwa tidak semua kegagalan memiliki dampak yang sama terhadap sistem, sehingga prioritas pemeliharaan harus ditentukan berdasarkan tingkat konsekuensi kegagalan tersebut (Hafidhoh et al., 2024). Dengan demikian, strategi pemeliharaan tidak hanya berfokus pada seberapa sering kegagalan terjadi, tetapi juga pada seberapa besar dampaknya terhadap keselamatan, operasi, dan biaya (Wicaksono & Rosady, 2024).

2.3 *Reliability Centered Maintenance (RCM)*

2.3.1 Tahapan *Reliability Centered Maintenance (RCM)*

A. Penentuan Fungsi Sistem

Tahap awal dalam *RCM* adalah penentuan fungsi utama dan fungsi pendukung dari sistem atau mesin yang dianalisis. Fungsi sistem didefinisikan sebagai kemampuan mesin untuk menghasilkan output sesuai dengan standar kinerja yang ditetapkan, baik dari segi kapasitas, kualitas, maupun kontinuitas operasi (Anggraini & Priyadi, 2023). Penentuan fungsi yang jelas menjadi dasar dalam mengidentifikasi potensi kegagalan yang dapat menghambat pencapaian tujuan operasional sistem (Muhtadi & Puspitasari, 2022).

B. Identifikasi *Functional Failure*

Functional failure merupakan kondisi ketika sistem tidak mampu menjalankan fungsi yang telah ditetapkan atau mengalami penurunan kinerja di bawah standar yang diizinkan. Identifikasi *functional failure* dilakukan untuk menggambarkan kondisi kegagalan yang relevan secara operasional, seperti penurunan output produksi, peningkatan waktu siklus, atau ketidaksesuaian kualitas produk (Wisnuaji & Priyanto, 2023). Tahap ini penting untuk memastikan bahwa analisis kegagalan difokuskan pada kondisi yang benar-benar berdampak terhadap kinerja sistem (Aprilianto et al., 2025).

C. *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan, penyebab kegagalan, serta dampak kegagalan terhadap sistem secara sistematis. Dalam *FMEA*, tingkat risiko setiap kegagalan dinilai menggunakan *Risk Priority Number (RPN)* yang merupakan hasil perkalian antara *severity*, *occurrence*, dan *detection* (Muhtadi & Puspitasari, 2022). Perangkingan *S*, *O*, dan *D* dimulai dari 1-10, semakin besar nilai yang diperoleh maka semakin tinggi akibat yang dihasilkan (Syafei & Suhendar, 2022). Nilai *RPN* yang tinggi menunjukkan bahwa kegagalan tersebut memiliki tingkat risiko yang besar dan harus diprioritaskan dalam penentuan kebijakan *maintenance* (Aprilianto

et al., 2025). *FMEA* membantu memastikan bahwa perhatian pemeliharaan difokuskan pada kegagalan yang paling kritis terhadap sistem.

D. *Logic Tree Analysis (LTA)*

Logic Tree Analysis (LTA) digunakan untuk mengklasifikasikan kegagalan berdasarkan konsekuensi yang ditimbulkan terhadap keselamatan, operasi, dan aspek ekonomi (Yusuf et al., 2024). Analisis ini membantu mengelompokkan kegagalan ke dalam kategori seperti *safety-related failure*, *hidden failure*, *operational failure*, dan *economic failure*. Hasil LTA menjadi dasar dalam menentukan jenis kebijakan pemeliharaan yang paling sesuai dengan karakteristik kegagalan tersebut (Rahmat & Handayani, 2022).

E. Pemilihan Kebijakan *Maintenance*

Tahap akhir RCM adalah pemilihan kebijakan *maintenance* berdasarkan hasil FMEA dan LTA. Kebijakan *maintenance* yang umum diterapkan meliputi *time-directed maintenance*, *condition-directed maintenance*, *failure-finding maintenance*, dan *run to failure* (Cahyati et al., 2024). Pemilihan kebijakan ini bertujuan untuk mengendalikan risiko kegagalan dengan biaya yang paling efisien sekaligus mempertahankan tingkat keandalan sistem yang optimal (Moleđa et al., 2023).

2.3.2 Penentuan *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*

Penilaian risiko dalam *FMEA* dilakukan dengan menggunakan tiga parameter utama, yaitu *severity*, *occurrence*, dan *detection*. *Severity* (*S*) menggambarkan tingkat keparahan dampak kegagalan terhadap keselamatan, kualitas produk, kontinuitas operasi, dan biaya. Semakin besar dampak kegagalan yang ditimbulkan, maka nilai *severity* yang diberikan akan semakin tinggi (Sifonte & Reyes-Picknell, 2017). *Occurrence* (*O*) menunjukkan tingkat kemungkinan atau frekuensi terjadinya kegagalan selama periode operasi tertentu. Penentuan nilai *occurrence* didasarkan pada data historis kerusakan, catatan *downtime*, atau pengalaman operasional mesin, sehingga nilai ini mencerminkan probabilitas aktual terjadinya kegagalan (Aprilianto et al., 2025). *Detection* (*D*) menggambarkan kemampuan sistem, prosedur, atau operator dalam mendeteksi kegagalan sebelum kegagalan tersebut menimbulkan dampak yang signifikan. Nilai *detection* yang tinggi menunjukkan bahwa kegagalan sulit dideteksi, sehingga meningkatkan tingkat risiko kegagalan (Ahmad et al., 2023).

2.3.3 Perhitungan *Risk Priority Number (RPN)*

Risk Priority Number (RPN) merupakan indikator kuantitatif yang digunakan untuk menentukan tingkat prioritas suatu mode kegagalan dalam *FMEA*. Nilai *RPN* diperoleh dari hasil perkalian nilai *severity*, *occurrence*, dan *detection*, yang dirumuskan sebagai berikut (Muhtadi & Puspitasari, 2022):

$$RPN = S \times O \times D. \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

S : *Severity* (tingkat keparahan dampak kegagalan)

O : *Occurrence* (frekuensi terjadinya kegagalan)

D : *Detection* (kemampuan mendeteksi kegagalan)

Nilai *RPN* yang tinggi menunjukkan bahwa mode kegagalan tersebut memiliki tingkat risiko yang besar dan harus menjadi prioritas utama dalam perencanaan tindakan pemeliharaan (Wahyu et al., 2022). Sebaliknya, mode kegagalan dengan nilai *RPN* rendah dapat diberikan prioritas yang lebih rendah atau dipertimbangkan untuk kebijakan *run to failure* apabila konsekuensi kegagalannya tidak signifikan (Galar et al., 2017).

2.3.4 Peran *FMEA* dalam *Reliability Centered Maintenance (RCM)*

Dalam kerangka *Reliability Centered Maintenance*, *FMEA* memiliki peran strategis sebagai dasar analisis kegagalan sistem. *FMEA* digunakan untuk mengidentifikasi *failure mode* dan *failure effect* yang merupakan bagian penting dalam menjawab pertanyaan ketiga dan keempat dari tujuh pertanyaan dasar *RCM* (Sifonte & Reyes-Picknell, 2017). Hasil *FMEA* selanjutnya digunakan dalam *Logic Tree Analysis (LTA)* untuk mengklasifikasikan kegagalan berdasarkan konsekuensinya terhadap keselamatan, operasi, dan aspek ekonomi (Setiadi & Faritsy, 2023).

Selain itu, *FMEA* mendukung proses pemilihan kebijakan *maintenance* dalam *RCM*, seperti *preventive maintenance*, *condition-based maintenance*, atau *failure-finding maintenance*, dengan mempertimbangkan tingkat risiko dan dampak kegagalan yang telah dianalisis. Dengan demikian, integrasi *FMEA* dalam *RCM* memungkinkan penerapan strategi

pemeliharaan yang lebih terarah, berbasis risiko, dan efisien secara teknis maupun ekonomis (Syahputra et al., 2023).

2.4 Life Cycle Cost (LCC)

Life Cycle Cost (LCC) merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk menghitung total biaya yang dikeluarkan selama seluruh siklus hidup suatu aset, mulai dari tahap perencanaan dan pengadaan hingga tahap operasi, pemeliharaan, dan penggantian aset (Jati, 2022). Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai biaya kepemilikan suatu mesin sehingga proses pengambilan keputusan tidak hanya didasarkan pada biaya investasi awal, tetapi juga mempertimbangkan seluruh biaya jangka panjang yang muncul selama masa operasional aset tersebut (Galar et al., 2017). Dengan demikian *LCC* memungkinkan manajemen untuk memahami struktur biaya secara komprehensif dan menghindari keputusan yang bersifat jangka pendek (Darshan et al., 2024).

Life Cycle Cost (LCC) digunakan sebagai pendekatan ekonomi untuk mengevaluasi total biaya kepemilikan mesin sepanjang umur pakainya, yang mencakup biaya investasi awal, biaya operasi, biaya maintenance, biaya downtime, dan biaya penggantian. Integrasi *RCM* dan *LCC* memungkinkan hasil analisis teknis dari *RCM* digunakan sebagai dasar perhitungan biaya dalam *LCC*, sehingga kebijakan *maintenance* yang dipilih tidak hanya optimal dari sisi keandalan, tetapi juga efisien dari sisi biaya (Ayuni & Supriyadi, 2023). Dengan demikian, hubungan antara *downtime*, *RCM*, dan

LCC membentuk satu kesatuan kerangka pengambilan keputusan *maintenance* yang komprehensif (Nugroho & Sukmono, 2024).

2.4.1 Komponen Biaya LCC

Analisis *Life Cycle Cost* terdiri dari beberapa komponen biaya utama yang mencerminkan seluruh pengeluaran selama siklus hidup mesin, baik yang bersifat langsung maupun tidak langsung (Galar et al., 2017). Identifikasi komponen biaya ini harus dilakukan secara sistematis agar hasil analisis *LCC* akurat, konsisten, dan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan manajerial yang rasional. Setiap komponen biaya memiliki karakteristik dan kontribusi yang berbeda terhadap total *LCC*, tergantung pada jenis mesin dan kebijakan *maintenance* yang diterapkan (Milal & Puspitasari, 2025).

A. Biaya Investasi Awal

Biaya investasi awal merupakan biaya yang dikeluarkan pada tahap awal pengadaan mesin, yang meliputi biaya pembelian mesin, biaya instalasi, biaya pengujian awal, serta biaya pelatihan operator (Albany & Saifuddin, 2025). Biaya ini bersifat satu kali (*one-time cost*) dan umumnya menjadi pertimbangan utama dalam keputusan pembelian aset produksi. Meskipun demikian, penelitian menunjukkan bahwa biaya investasi awal tidak selalu menjadi komponen terbesar dalam total biaya siklus hidup mesin jika dibandingkan dengan biaya operasi dan *maintenance* jangka panjang (Galar et al., 2017).

B. Biaya Operasi

Biaya operasi mencakup seluruh biaya yang dikeluarkan selama mesin beroperasi secara rutin, seperti biaya energi listrik, bahan baku pendukung, serta biaya tenaga kerja operator. Pada mesin *mixing*, biaya operasi memiliki kontribusi signifikan terhadap LCC karena mesin bekerja secara kontinu dengan konsumsi energi yang relatif tinggi. Efisiensi operasional mesin dan stabilitas proses produksi sangat memengaruhi besarnya biaya operasi selama umur pakai mesin (Serfandi et al., 2025).

C. Biaya *Maintenance*

Biaya *maintenance* merupakan biaya yang timbul akibat aktivitas pemeliharaan mesin, baik yang bersifat *corrective*, *preventive*, maupun *condition-based maintenance* (Galar et al., 2017). Biaya ini meliputi biaya pengadaan suku cadang, biaya tenaga kerja teknisi, serta biaya peralatan dan material pendukung kegiatan pemeliharaan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa biaya *maintenance* merupakan salah satu komponen biaya terbesar dalam LCC mesin produksi dan sangat dipengaruhi oleh strategi *maintenance* yang diterapkan perusahaan (Aprilianto et al., 2025).

D. Biaya *Downtime*

Biaya *downtime* adalah biaya yang timbul akibat berhentinya operasi mesin, baik secara terencana maupun tidak terencana, yang menyebabkan hilangnya peluang produksi dan potensi pendapatan. Biaya

ini dapat berupa kehilangan *output* produksi, keterlambatan pengiriman produk, penalti keterlambatan, serta gangguan terhadap jadwal produksi secara keseluruhan (Riyanti & Apsari, 2026). *Downtime* tidak terencana sering menjadi penyumbang utama pembengkakan biaya siklus hidup mesin karena tingginya ketergantungan proses produksi terhadap kontinuitas operasi mesin (Muhtadi & Puspitasari, 2022).

E. Biaya Penggantian

Biaya penggantian merupakan biaya yang dikeluarkan pada akhir umur ekonomis mesin, yang meliputi biaya pembongkaran, biaya pembuangan atau daur ulang mesin lama, serta biaya pengadaan dan instalasi mesin pengganti. Penentuan waktu penggantian mesin yang tepat menjadi aspek penting dalam manajemen aset untuk menghindari peningkatan biaya operasi dan maintenance yang tidak ekonomis akibat penuaan mesin (Galar et al., 2017). Oleh karena itu, analisis biaya penggantian memiliki peran strategis dalam perencanaan investasi jangka panjang perusahaan (Wisnuaji & Priyanto, 2023).

2.4.2 Perhitungan *LCC*

Secara umum *Life Cycle Cost* dapat dirumuskan sebagai penjumlahan seluruh komponen biaya yang timbul selama umur pakai mesin, mulai dari tahap awal hingga tahap akhir siklus hidup aset. Perhitungan *LCC* dilakukan untuk memperoleh nilai total biaya kepemilikan mesin secara komprehensif dan terukur. Rumus dasar *Life Cycle Cost* dinyatakan sebagai berikut (Galar et al., 2017):

$$LCC = C_I + C_O + C_M + C_D + C_R \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

C_I : Biaya investasi awal

C_O : Biaya operasional

C_M : Biaya *maintenance*

C_D : Biaya *downtime*

C_R : Biaya penggantian

Rumus ini memberikan kerangka dasar dalam menghitung total biaya siklus hidup mesin dan dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mempertimbangkan faktor waktu, serta proyeksi biaya di masa depan sesuai dengan kebutuhan analisis dan ketersediaan data perusahaan.

2.4.3 Manfaat Analisis *LCC* dalam Keputusan *Maintenance*

Analisis *Life Cycle Cost* memberikan manfaat strategis dalam pengambilan keputusan *maintenance* dengan memungkinkan perusahaan mengevaluasi dampak ekonomi jangka panjang dari berbagai alternatif kebijakan pemeliharaan (Azmi et al., 2023). Dengan menggunakan *LCC*, perusahaan dapat membandingkan biaya total antara kebijakan *maintenance eksisting* dan kebijakan *maintenance* berbasis *Reliability Centered Maintenance* untuk menentukan strategi yang paling efisien secara ekonomi (Aprilianto et al., 2025). Pendekatan ini membantu manajemen dalam menghindari keputusan *maintenance* yang hanya berorientasi pada pengurangan biaya jangka pendek.

Selain itu, analisis *LCC* membantu perusahaan dalam menentukan umur ekonomis mesin, waktu penggantian aset yang optimal, serta

memberikan justifikasi ekonomi terhadap investasi *maintenance* yang bersifat *preventif* dibandingkan *corrective* (Wahab et al., 2026). Integrasi analisis *Life Cycle Cost* dengan *Reliability Centered Maintenance* memungkinkan perusahaan tidak hanya meningkatkan keandalan mesin, tetapi juga mengendalikan biaya kepemilikan aset secara menyeluruh dan berkelanjutan (Sugiarto & Endang, 2023). Dengan demikian *LCC* berperan sebagai alat pendukung keputusan yang krusial dalam manajemen aset dan pemeliharaan mesin produksi di industri manufaktur.

2.5 Penelitian Sebelumnya

Metode *Reliability Centered Maintenance* (*RCM*) banyak diterapkan pada berbagai sektor industri untuk meningkatkan efektivitas sistem perawatan melalui identifikasi fungsi aset, analisis pola kegagalan, penentuan komponen kritis, serta pemilihan tindakan pemeliharaan yang sesuai. Selain itu, beberapa penelitian mengintegrasikan metode *RCM* dengan *Life Cycle Cost* (*LCC*) untuk menghasilkan keputusan pemeliharaan yang tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga mempertimbangkan aspek ekonomi selama siklus hidup aset. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan *RCM* dan *LCC* mampu membantu perusahaan mengurangi risiko kegagalan mesin, meningkatkan keandalan peralatan, serta mengoptimalkan biaya pemeliharaan.

Di departemen pemeliharaan industri banyak langkah operasional yang masih bersifat *non-value added*, yaitu aktivitas yang tidak langsung memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan kinerja mesin atau

komponen. Ketika kerusakan berat atau *breakdown* terjadi kinerja peralatan menurun secara signifikan, berdampak pada gangguan proses produksi, serta menimbulkan kerugian finansial yang langsung dirasakan oleh perusahaan. Hal ini menunjukkan bahwa strategi pemeliharaan yang tidak tepat tidak hanya mengurangi efisiensi operasional tetapi juga menghambat pencapaian target produksi dan kualitas. Berbagai studi kasus dari sektor jasa maupun manufaktur menegaskan pentingnya penerapan manajemen perawatan yang sistematis dan berbasis data, sesuai karakteristik kerusakan dan tingkat kritis masing-masing peralatan. Karena itu penelusuran dan kajian kritis terhadap penelitian-penelitian terdahulu dilakukan untuk memperoleh perbandingan yang relevan, mengidentifikasi praktik terbaik, sekaligus membangun dasar ilmiah yang kokoh bagi penelitian ini. Hasil kajian tersebut akan menjadi referensi utama dalam menganalisis strategi *maintenance* pada mesin *mixing* di PT. Citra Indobeton Abadi, termasuk penerapan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan evaluasi biaya melalui *Life Cycle Cost* (LCC). penelitian ini diklasifikasikan berdasarkan kesesuaian kajian, metode penelitian, dan objek penelitian. Klasifikasi tersebut meliputi aspek *Reliability Centered Maintenance* (RCM), *Life Cycle Cost* (LCC), analisis keandalan menggunakan *Reliability Analysis* (RA) dan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Adapun hasil kajian penelitian terdahulu dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Kajian				Metode		Hasil Penelitian
		RCM	LCC	RA	FMEA	Kuan.	Kual.	
1	Patil et al. (2022)	✓		✓	✓	✓		Penerapan RCM meningkatkan reliability sistem sebesar 28,15%, meningkatkan availability 0,16%, dan menurunkan biaya maintenance sebesar 20,32%.
2	Syafei & Suhendar (2022)	✓			✓		✓	RCM digunakan untuk menentukan strategi perawatan berdasarkan fungsi mesin dan risiko kegagalan komponen.
3	Chandrahadinata & Kusuma (2022)	✓			✓		✓	RCM menghasilkan perencanaan pemeliharaan berdasarkan tingkat kritis mesin dan konsekuensi kegagalan.
4	Ramadani et al. (2022)	✓		✓		✓		RCM II menghasilkan interval pemeliharaan berdasarkan tingkat reliability komponen mesin.
5	Krisnanda & Widjajati (2023)	✓	✓	✓			✓	Integrasi RCM II dan LCC menghasilkan strategi perawatan optimal berdasarkan reliability dan biaya pemeliharaan.

No	Peneliti & Tahun	Kajian				Metode		Hasil Penelitian
		RCM	LCC	RA	FMEA	Kuan.	Kual.	
6	Timothy & Endang (2023)	✓	✓	✓		✓		Penerapan RCM II dan LCC menurunkan biaya maintenance dari Rp300 juta menjadi Rp258 juta.
7	Kusuma et al. (2023)	✓		✓		✓		Analisis reliability digunakan untuk menentukan komponen kritis pada mesin mixing berdasarkan pola kegagalan.
8	Waluyo & Widyaningrum (2023)	✓		✓	✓	✓		FMECA menghasilkan identifikasi komponen kritis berdasarkan nilai risiko kegagalan dan rekomendasi maintenance.
9	Musthopa et al. (2023)	✓			✓	✓		Integrasi TPM dan RCM mampu mengurangi gangguan sistem hingga 50%.
10	Molęda et al. (2023)	✓				✓		Review menunjukkan perubahan strategi maintenance dari corrective menuju predictive untuk meningkatkan keandalan aset.

No	Peneliti & Tahun	Kajian				Metode		Hasil Penelitian
		RCM	LCC	RA	FMEA	Kuan.	Kual.	
11	Pratama & Puspitasari (2024)	✓		✓	✓	✓		RCM menghasilkan identifikasi 4 komponen kritis dan rekomendasi preventive maintenance dengan pengurangan biaya 8,5%.
12	Firmansyah & Rizqi (2024)	✓			✓	✓		FMEA digunakan untuk menentukan prioritas komponen berdasarkan nilai risiko kegagalan.
13	Mayuta et al. (2024)	✓		✓			✓	RCM digunakan untuk mengevaluasi performa mesin dan menentukan strategi perawatan optimal.
14	Wicaksono & Rosady (2024)	✓		✓		✓		RCM menentukan strategi perawatan berdasarkan analisis kegagalan dan tingkat reliability mesin.
15	Cahyati et al. (2024)	✓		✓	✓	✓		RCM mampu meningkatkan efektivitas preventive maintenance pada mesin kritis.

No	Peneliti & Tahun	Kajian				Metode		Hasil Penelitian
		RCM	LCC	RA	FMEA	Kuan.	Kual.	
16	Chen et al. (2023)	✓		✓		✓		Optimasi RCM menghasilkan keputusan preventive maintenance berdasarkan probabilitas kegagalan komponen.
17	Abidi et al. (2022)	✓			✓	✓		Integrasi teknologi digital dan RCM meningkatkan efektivitas sistem maintenance industri.
18	Indrakusuma et al. (2024)	✓		✓		✓		RCM dan fault diagnosis meningkatkan akurasi strategi pemeliharaan mesin.
19	Andika et al. (2025)			✓	✓	✓		Analisis FMEA menemukan mixer mengalami 9 kali kerusakan dengan downtime 85 jam, sehingga menjadi komponen prioritas perawatan.
20	Muhajir & Yuamita (2023)			✓		✓		Nilai OEE mesin batching mencapai sekitar 82%, dengan faktor utama kehilangan waktu akibat downtime.

No	Peneliti & Tahun	Kajian				Metode		Hasil Penelitian
		RCM	LCC	RA	FMEA	Kuan.	Kual.	
21	Haliza et al. (2023)			✓		✓		Produktivitas batching plant rata-rata mencapai 26 m ³ /jam, menunjukkan pentingnya keandalan mesin terhadap produksi.
22	Arifin & Malik (2025)			✓		✓		Performa mesin mixing berpengaruh terhadap kualitas pencampuran beton dan kelancaran proses produksi.
23	Hasan et al. (2025)	✓		✓	✓		✓	RCM mampu mengidentifikasi penyebab kerusakan mesin mixing dan menentukan tindakan preventive maintenance.
24	Costa et al. (2025)	✓		✓			✓	RCM menghasilkan jadwal preventive maintenance berdasarkan tingkat keandalan komponen mesin.
25	Milal & Puspitasari (2025)	✓		✓	✓	✓		RCM dan RCS digunakan untuk menentukan komponen kritis serta kebutuhan spare part.

(Sumber : Pengolahan Data, 2026)