

Analisis Komparatif dan Model Integrasi Reliability-Centered Maintenance (RCM) dan Total Productive Maintenance (TPM) dalam Industri Manufaktur

Bambang Triono^{1*}, Didit Darmawan²

^{1,2}Universitas Sunan Giri Surabaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: trionobambang.unsuri@gmail.com¹

Abstract. *This systematic literature study conducts a comparative analysis of Reliability-Centered Maintenance (RCM) and Total Productive Maintenance (TPM) in manufacturing, and proposes an integrated hybrid model. The research concludes that RCM and TPM are fundamentally distinct methodologies: RCM excels in risk-based, analytical management of complex, high-criticality assets, while TPM is superior for achieving broad-based productivity gains and cultural empowerment through total employee involvement. The effectiveness of each approach is contingent upon factors such as asset characteristics, organizational culture, data availability, and level of automation. To leverage their complementary strengths, the study proposes the Synergistic RCM-TPM Hybrid Model (SRTHM). This framework advocates for a sequential implementation where TPM establishes the foundational operational stability, discipline, and data culture, upon which selective RCM analysis is applied to critical assets for precision risk management. The model incorporates explicit feedback mechanisms to create a continuous organizational learning cycle. The study provides a contingency framework for methodology selection and a practical roadmap for integration, offering theoretical and practical guidance for building more resilient and context-appropriate maintenance systems in modern manufacturing.*

Keywords: *Comparative Analysis; Contingency Factors; Maintenance Strategy; Reliability-Centered Maintenance (RCM); Total Productive Maintenance (TPM).*

Abstrak. Studi literatur sistematis ini melakukan analisis komparatif antara Pemeliharaan Berbasis Keandalan (Reliability-Centered Maintenance/RCM) dan Pemeliharaan Produktif Total (Total Productive Maintenance/TPM) di sektor manufaktur, dan mengusulkan model hibrida terintegrasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa RCM dan TPM pada dasarnya merupakan metodologi yang berbeda: RCM unggul dalam manajemen analitis berbasis risiko terhadap aset kompleks dan berkeandalan tinggi, sementara TPM lebih unggul dalam mencapai peningkatan produktivitas yang luas dan pemberdayaan budaya melalui keterlibatan total karyawan. Efektivitas setiap pendekatan bergantung pada faktor-faktor seperti karakteristik aset, budaya organisasi, ketersediaan data, dan tingkat otomatisasi. Untuk memanfaatkan kekuatan komplementer mereka, studi ini mengusulkan Model Hibrida Sinergis RCM-TPM (Synergistic RCM-TPM Hybrid Model/SRTHM). Kerangka kerja ini menganjurkan implementasi berurutan di mana TPM membangun stabilitas operasional, disiplin, dan budaya data yang mendasar, di mana analisis RCM selektif diterapkan pada aset kritis untuk manajemen risiko yang tepat. Model ini menggabungkan mekanisme umpan balik eksplisit untuk menciptakan siklus pembelajaran organisasi yang berkelanjutan. Studi ini menyediakan kerangka kerja kontingensi untuk pemilihan metodologi dan peta jalan praktis untuk integrasi, menawarkan panduan teoretis dan praktis untuk membangun sistem pemeliharaan yang lebih tangguh dan sesuai konteks dalam manufaktur modern.

Kata kunci: Analisis Komparatif; Faktor Kontingensi; Pemeliharaan Berbasis Keandalan (RCM); Pemeliharaan Produktif Total (TPM); Strategi Pemeliharaan.

1. LATAR BELAKANG

Industri manufaktur global beroperasi dalam lingkungan kompetitif yang menuntut produktivitas maksimal, kualitas tinggi, dan efisiensi biaya. Dalam ekosistem produksi, ketersediaan mesin dan peralatan merupakan faktor penentu utama yang mempengaruhi kapasitas output, pemenuhan pesanan, dan profitabilitas keseluruhan (Cedeño, 2022). *Downtime* atau waktu henti mesin yang tidak terencana merupakan musuh produktivitas yang nyata, menyebabkan kerugian finansial langsung dari produksi yang hilang, biaya perbaikan

darurat yang tinggi, serta gangguan terhadap aliran material dan penjadwalan proses hilir (Shukla et al., 2022). Upaya sistematis untuk meminimalkan *downtime* dan memaksimalkan efektivitas peralatan telah melahirkan berbagai filosofi dan metodologi pemeliharaan. Di antara yang paling berpengaruh dan banyak diadopsi adalah *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) dan *Total Productive Maintenance* (TPM). Kedua pendekatan ini memiliki akar filosofis, prinsip implementasi, dan mekanisme pencapaian tujuan yang berbeda, namun memiliki tujuan akhir yang sama: meningkatkan keandalan aset dan kontribusinya terhadap kinerja organisasi (Moscoso et al., 2019). Pemahaman komparatif mengenai efektivitas, aplikasi, serta sinergi potensial antara RCM dan TPM merupakan kebutuhan strategis bagi insinyur mesin, manajer pemeliharaan, dan pengambil keputusan operasional (Braglia et al., 2019).

Reliability-Centered Maintenance (RCM) muncul dari industri penerbangan pada era 1960-an dan kemudian diadopsi secara luas di sektor-sektor dengan standar keamanan dan keandalan yang sangat tinggi, seperti pembangkit listrik, minyak dan gas, serta kereta api. RCM merupakan suatu proses terstruktur dan sistematis yang digunakan untuk menentukan kebutuhan pemeliharaan yang diperlukan untuk setiap aset fisik dalam lingkup operasionalnya (Hipkin, 1993). Inti dari RCM adalah tujuh pertanyaan fundamental yang membimbing analisis, berfokus pada pelestarian fungsi sistem, identifikasi *failure mode* yang kritis, dan penentuan tugas pemeliharaan yang paling efektif secara teknis dan ekonomis untuk mencegah *failure mode* tersebut (Ben-Daya, 2000). Metodologi RCM sangat analitis dan berbasis data, seringkali melibatkan analisis statistik seperti *Weibull Analysis* untuk memodelkan pola kegagalan. Pendekatannya bersifat selektif; tidak semua komponen diperlakukan sama. RCM membedakan antara komponen yang kegagalannya memiliki konsekuensi kritis terhadap keselamatan, lingkungan, atau operasi, dengan komponen yang kegagalannya hanya memiliki konsekuensi operasional atau non-konsekuensial (Ben-Daya, 2000). Tugas pemeliharaan (preventif, prediktif, atau detektif) kemudian dirancang secara spesifik untuk komponen-komponen kritis tersebut (Rivera et al., 2014). Dengan demikian, RCM mengalokasikan sumber daya pemeliharaan yang terbatas ke area yang paling berdampak pada keandalan sistem secara keseluruhan.

Total Productive Maintenance (TPM), yang berasal dari praktik manufaktur Jepang pada tahun 1950-an dan dipopulerkan oleh JIPM (Japan Institute of Plant Maintenance), memiliki filosofi yang lebih luas dan berorientasi pada manusia (Bakri et al., 2014). TPM didefinisikan sebagai sistem pemeliharaan yang melibatkan seluruh karyawan, dari operator lantai produksi hingga manajemen puncak, dalam aktivitas pemeliharaan untuk mencapai tujuan nol

kerusakan, nol cacat, dan nol kecelakaan (Hogan et al., 2013). TPM dibangun di atas lima pilar utama: *Autonomous Maintenance* (Jishu Hozen), *Planned Maintenance*, *Quality Maintenance*, *Focused Improvement* (Kobetsu Kaizen), dan *Education and Training*. Yang paling membedakan TPM dari pendekatan lain adalah pilar *Autonomous Maintenance*, di mana operator mesin diberikan tanggung jawab dan dilatih untuk melakukan tugas pemeliharaan dasar seperti pembersihan, pemeriksaan, pelumasan, dan penyetelan (dikenal sebagai CILT – Cleaning, Inspecting, Lubricating, Tightening). Tujuannya adalah untuk membangun “sense of ownership” operator terhadap mesin yang mereka operasikan, mendeteksi anomali dini, dan mencegah deteriorasi percepatan. TPM mengukur kinerja melalui metrik *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), yang merupakan perkalian dari *Availability* (ketersediaan), *Performance Efficiency* (efisiensi kinerja), dan *Rate of Quality* (tingkat kualitas) (Carrasco, 2016).

Latar belakang historis dan filosofis yang berbeda ini menghasilkan profil penerapan dan hasil yang berbeda dalam lingkup manufaktur. RCM, dengan sifatnya yang analitis dan berbasis risiko, sering dianggap lebih cocok untuk aset yang kompleks, mahal, dan dengan konsekuensi kegagalan yang tinggi (Moscoso et al., 2019). Proses analisis REM yang mendalam memerlukan investasi waktu dan keahlian di awal, tetapi diharapkan menghasilkan rencana pemeliharaan yang sangat tertarget dan hemat biaya dalam jangka panjang. Sebaliknya, TPM, dengan penekanannya pada keterlibatan total dan perbaikan berkelanjutan, sering dilihat sebagai alat untuk mengubah budaya organisasi dan memberdayakan tenaga kerja. Implementasinya dapat memberikan hasil yang cepat dalam hal peningkatan kebersihan, keteraturan, dan kesadaran operator, yang selanjutnya mengurangi breakdowns kecil dan meningkatkan moral (Braglia et al., 2019). Namun, efektivitas TPM untuk menangani kegagalan teknis yang kompleks pada komponen spesifik mungkin terbatas tanpa dukungan analisis teknik yang mendalam.

Dalam praktik industri kontemporer, banyak organisasi mencoba mengadopsi atau mengintegrasikan elemen dari kedua metodologi. Sebuah fasilitas manufaktur mungkin menggunakan prinsip RCM untuk menganalisis dan merancang strategi pemeliharaan untuk mesin-mesin produksi utama yang kritis, sementara secara simultan menjalankan program TPM untuk melibatkan operator dalam pemeliharaan dasar dan menciptakan lingkungan kerja yang terstruktur. Sintesis semacam ini menimbulkan pertanyaan penting: dalam kondisi operasional seperti apa RCM lebih unggul daripada TPM, atau sebaliknya? Apakah ada sinergi yang dapat dicapai dengan mengintegrasikan keduanya, dan bagaimana integrasi optimal tersebut dirancang? Kajian literatur sistematis diperlukan untuk mengumpulkan bukti empiris, menganalisis pola keberhasilan dan kegagalan, serta merumuskan pedoman berbasis bukti

untuk seleksi dan implementasi metodologi pemeliharaan yang paling efektif sesuai dengan karakteristik fasilitas manufaktur tertentu.

Permasalahan utama pertama adalah kurangnya pemahaman yang komparatif dan kontekstual mengenai kondisi spesifik di mana RCM atau TPM memberikan dampak terbesar terhadap penurunan *downtime*. Banyak penelitian yang memaparkan keberhasilan implementasi satu metodologi tertentu, namun studi perbandingan langsung yang mengontrol variabel seperti jenis industri, kompleksitas mesin, tingkat otomasi, dan kematangan budaya organisasi masih relatif jarang (Risonarta & Wardhani, 2023). Sebagai contoh, apakah TPM dengan *Autonomous Maintenance*-nya lebih efektif di lingkungan dengan mesin-mesin sederhana yang dioperasikan secara manual, sementara RCM lebih unggul di pabrik yang sangat otomatis dengan PLC dan sistem robotik yang kompleks? Tanpa bukti komparatif yang kuat, keputusan untuk mengadopsi suatu metodologi sering didasarkan pada tren industri atau preferensi konsultan, bukan pada analisis kesesuaian teknis dan organisasional yang mendalam.

Kedua, terdapat tantangan metodologis untuk mengukur dan membandingkan efektivitas kedua pendekatan secara objektif. Metrik utama seperti OEE (untuk TPM) dan *Mean Time Between Failures/MTBF* atau *Reliability* (untuk RCM) mengukur aspek kinerja yang berbeda, meskipun saling terkait. Peningkatan OEE bisa jadi berasal dari peningkatan *availability* (berkurangnya *downtime*) yang merupakan tujuan bersama, tetapi juga bisa berasal dari peningkatan *performance rate* atau *quality rate* yang dipengaruhi oleh faktor di luar lingkup pemeliharaan konvensional. Di sisi lain, peningkatan MTBF menunjukkan interval kegagalan yang lebih panjang, tetapi tidak secara langsung mengukur peningkatan produktivitas atau keterlibatan operator (Castañeda et al., 2023). Membangun suatu kerangka evaluasi yang dapat mengkuantifikasi dampak kedua metodologi terhadap sekumpulan metrik hasil yang umum seperti total *downtime*, biaya pemeliharaan per unit produksi, dan produktivitas tenaga kerja yang merupakan langkah penting untuk perbandingan yang adil.

Ketiga, implementasi baik RCM maupun TPM menghadapi hambatan organisasional yang berbeda namun signifikan. Implementasi RCM sering terhambat oleh kebutuhan akan data kegagalan historis yang berkualitas, keahlian teknik untuk melakukan analisis FMEA/FMECA, dan komitmen waktu dari personel teknik yang mahir. Prosesnya bisa terasa lambat dan birokratis bagi lini produksi yang membutuhkan solusi cepat. Sebaliknya, implementasi TPM menghadapi tantangan untuk mengubah pola pikir dan kebiasaan kerja operator dan supervisor. Program *Autonomous Maintenance* dapat dianggap sebagai “tambahan pekerjaan” bagi operator, dan mungkin mendapat resistensi jika tidak dikelola

dengan pendekatan perubahan yang tepat (Flores et al., 2024). Kepemimpinan dan komitmen manajemen menengah sering menjadi faktor penentu keberhasilan. Pemahaman tentang hambatan-hambatan spesifik ini penting untuk mengelola ekspektasi dan merancang strategi *roll-out* yang efektif.

Industri 4.0 dan transformasi digital telah mengubah lanskap pemeliharaan aset. Teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), sensor murah, dan analitik prediktif menawarkan data real-time yang melimpah tentang kondisi mesin (Rosita & Rada, 2021). Hal ini mempengaruhi kedua metodologi. Bagi RCM, data real-time dapat menyempurnakan analisis pola kegagalan dan memungkinkan peralihan dari pemeliharaan berbasis waktu ke kondisi yang lebih presisi. Bagi TPM, dashboard visual yang menampilkan kondisi mesin dapat memberdayakan operator untuk melakukan tindakan yang lebih informatif. Kajian ini penting untuk mengeksplorasi bagaimana teknologi baru ini memperkuat atau bahkan mengkonvergensi prinsip-prinsip RCM dan TPM, serta bagaimana metodologi tradisional ini harus beradaptasi untuk memanfaatkan data digital.

Kedua, tekanan global untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya operasional di tengah ketidakpastian rantai pasok semakin tinggi. *Downtime* yang tidak terencana menjadi lebih mahal akibatnya. Oleh karena itu, pilihan strategi pemeliharaan yang tepat tidak lagi hanya menjadi urusan departemen pemeliharaan, tetapi menjadi keputusan strategis operasional yang mempengaruhi daya saing. Manajemen puncak membutuhkan justifikasi berbasis bukti untuk investasi dalam program pemeliharaan yang komprehensif. Sebuah kajian literatur yang sistematis dan analitis dapat memberikan bukti tersebut, dengan menunjukkan kapan dan bagaimana RCM atau TPM memberikan *return on investment* terbaik dalam bentuk pengurangan downtime dan peningkatan produktivitas.

Ketiga, pergantian generasi tenaga kerja di banyak negara menciptakan risiko hilangnya pengetahuan tacit (*tacit knowledge*) tentang mesin dan proses. TPM, dengan penekanannya pada dokumentasi standar kerja dan pelatihan silang, dapat menjadi alat untuk mengkodifikasi dan mentransfer pengetahuan tersebut. Sementara RCM, dengan dokumentasi analisis kegagalan yang rinci, juga menciptakan basis pengetahuan teknis. Memahami peran masing-masing metodologi dalam preservasi dan transfer pengetahuan aset sangat relevan bagi industri yang ingin menjaga keandalan operasional di tengah perubahan demografi tenaga kerja.

Studi ini dengan pendekatan komparatif akan membandingkan prinsip dan metrik RCM versus TPM, dan melakukan sintesis kritis terhadap bukti-bukti empiris dari studi kasus dan penelitian lapangan untuk mengidentifikasi *contingency factors* atau faktor-faktor kontinjensi. Faktor-faktor ini adalah variabel kontekstual (seperti tipe industri, kompleksitas mesin, ukuran

pabrik, kematangan budaya keselamatan) yang menentukan metodologi mana, atau kombinasi mana, yang paling efektif. Kajian ini bertujuan untuk bergerak melampaui pernyataan umum seperti “TPM bagus untuk keterlibatan” atau “RCM bagus untuk analisis risiko”, menuju suatu kerangka pemandu (decision framework) yang membantu praktisi memilih dan mengkustomisasi pendekatan pemeliharaan berdasarkan diagnosis situasi spesifik mereka.

Belum adanya analisis komprehensif mengenai titik optimal integrasi antara prinsip RCM dan TPM dalam satu fasilitas menjadi fokus kesenjangan penelitian dari studi ini. Banyak literatur membahas salah satunya, atau menyebutkan integrasi secara konseptual, namun jarang yang membahas secara rinci bagaimana urutan implementasi, pembagian peran, dan desain proses yang spesifik untuk menghindari duplikasi upaya atau konflik filosofis. Misalnya, bagaimana analisis RCM dapat menginformasikan prioritas area untuk program *Focused Improvement* (Kaizen) TPM? Atau, bagaimana data rutin yang dikumpulkan operator melalui Autonomous Maintenance dapat menjadi masukan berharga bagi analisis kegagalan dalam RCM? Kajian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan memetakan titik-titik interaksi potensial dan mengusulkan model integrasi yang sinergis, di mana kekuatan masing-masing metodologi saling melengkapi untuk menciptakan sistem pemeliharaan yang lebih tangguh dan efektif dibandingkan penerapan masing-masing secara terpisah.

Kajian ini bertujuan untuk melakukan kajian literatur sistematis guna membandingkan efektivitas metode *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) dan *Total Productive Maintenance* (TPM) dalam lingkup industri manufaktur. Secara spesifik, kajian berupaya menganalisis perbedaan mendasar dalam filosofi, prinsip, dan mekanisme implementasi kedua metodologi tersebut. Selanjutnya, penelitian ini bertujuan mengkaji bukti-bukti empiris dari studi terdahulu untuk mengidentifikasi faktor-faktor kontinjensi yang menentukan keunggulan relatif RCM atau TPM untuk menekan downtime dan meningkatkan produktivitas. Terakhir, kajian ini bertujuan merumuskan suatu model konseptual untuk integrasi sinergis antara elemen-elemen RCM dan TPM, yang dapat dijadikan panduan bagi industri untuk merancang sistem pemeliharaan hibrida yang lebih efektif dan adaptif. Kontribusi teoretis penelitian adalah pengembangan kerangka kontinjensi untuk seleksi metodologi pemeliharaan dan model integrasi RCM-TPM. Secara praktis, kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi manajer pemeliharaan, insinyur, dan konsultan untuk memilih, mengimplementasikan, atau mengintegrasikan metodologi pemeliharaan yang paling sesuai dengan karakteristik teknis dan organisasional fasilitas mereka.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan sebuah studi literatur sistematis yang dirancang untuk menganalisis dan mensintesis dua metodologi pemeliharaan utama, *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) dan *Total Productive Maintenance* (TPM). Pendekatan kualitatif-interpretatif dengan metode *systematic review* dipilih untuk menjawab pertanyaan penelitian yang bersifat eksploratif dan kontekstual, dengan tujuan memahami perbedaan mendasar, efektivitas, serta peluang integrasi antara kedua pendekatan tersebut. Metode ini memungkinkan identifikasi, evaluasi, dan interpretasi yang komprehensif serta terstruktur terhadap literatur yang tersebar dari berbagai disiplin ilmu, sesuai dengan prinsip yang ditekankan dalam studi literatur sistematis. Sumber data penelitian seluruhnya bersumber dari bahan sekunder yang diperoleh melalui pencarian literatur terstruktur di basis data akademik terkemuka seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Emerald Insight. Kata kunci pencarian dikelompokkan ke dalam tiga klaster utama yang mencakup terminologi untuk RCM, TPM, serta konteks efektivitas dan studi perbandingan. Kombinasi kata kunci ini digunakan dengan operator Boolean untuk memastikan cakupan yang luas dan relevan, sekaligus menjaga agar proses pencarian dapat direplikasi. Proses seleksi studi dilakukan secara bertahap berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan, yang berfokus pada literatur empiris dan analitis dalam konteks industri.

Teknik analisis data yang diterapkan adalah analisis isi terstruktur dan analisis komparatif. Analisis isi dilakukan dengan mengembangkan dan mengisi sebuah matriks kodifikasi yang dirancang khusus untuk mengekstrak informasi kunci dari setiap studi terpilih, mencakup identitas studi, konteks, metodologi, deskripsi implementasi, hasil kinerja, serta faktor penentu keberhasilan. Analisis komparatif kemudian menjadi inti dari proses ini, di mana data terstruktur dalam matriks dibandingkan secara mendalam dan kritis. Perbandingan difokuskan pada tiga dimensi utama: dimensi filosofis dan strategis, dimensi operasional dan teknis, serta dimensi hasil dan dampak. Pada dimensi filosofis, paradigma, tujuan utama, dan prinsip dasar antara RCM yang berpusat pada risiko dan keandalan aset kritis, dengan TPM yang berpusat pada manusia dan partisipasi total, dibedah untuk memahami konflik dan keselarasan mendasar. Pada dimensi operasional, langkah-langkah implementasi, peran personel, alat pendukung, dan kebutuhan sumber daya dari masing-masing metodologi dipertentangkan dan dievaluasi. Pada dimensi hasil, pola temuan mengenai dampak terhadap metrik kinerja seperti keandalan mesin, produktivitas, dan biaya, serta pengaruhnya terhadap budaya organisasi, dianalisis untuk melihat keunggulan kontekstual masing-masing pendekatan. Dari analisis komparatif tiga lapis ini, diidentifikasi pola-pola seperti titik

konvergensi, komplementaritas, dan ketegangan antara RCM dan TPM. Pola-pola inilah yang kemudian menjadi landasan untuk sintesis integratif, di mana peneliti mengembangkan sebuah kerangka faktor kontinjensi yang menghubungkan kecocokan setiap metodologi dengan karakteristik operasional tertentu, serta merancang sebuah model konseptual untuk integrasi sinergis yang menggabungkan elemen inti kedua pendekatan ke dalam suatu sistem hibrida yang koheren. Validitas model konseptual ini diuji dengan memeriksa konsistensi logisnya terhadap bukti-bukti empiris dalam literatur dan kemampuannya mengatasi tantangan yang diidentifikasi dalam studi-studi terdahulu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Komparatif Prinsip dan Mekanisme RCM dan TPM

Reliability-Centered Maintenance (RCM) dan *Total Productive Maintenance* (TPM) berasal dari fondasi filosofis yang berbeda, yang pada akhirnya membentuk seluruh pendekatan dan mekanisme implementasinya. RCM berakar pada paradigma analitis dan berbasis risiko yang berasal dari industri penerbangan, sebuah sektor di mana konsekuensi kegagalan dapat bersifat katastrofik. Filosofi intinya adalah pengelolaan risiko kegagalan secara sistematis untuk memastikan keandalan fungsi yang diinginkan dengan biaya yang efektif (Silva et al., 2023). RCM beroperasi berdasarkan prinsip bahwa pemeliharaan harus dilakukan hanya jika diperlukan secara teknis dan ekonomi untuk mengatasi konsekuensi spesifik dari suatu kegagalan (Gania et al., 2018). Ini adalah pendekatan yang sangat selektif dan terfokus. Proses RCM formal, sebagaimana diartikulasikan oleh Moubray (1997), diawali dengan identifikasi fungsi dan standar kinerja aset, dilanjutkan dengan identifikasi semua cara di mana aset dapat gagal memenuhi fungsi tersebut (functional failures). Untuk setiap kegagalan fungsional, berbagai kemungkinan penyebabnya (failure modes) dianalisis, dan konsekuensi dari setiap mode kegagalan dievaluasi. Berdasarkan analisis konsekuensi inilah dikategorikan menjadi konsekuensi keselamatan, lingkungan, operasional, atau non-konsekuensial; sebagai tugas pemeliharaan yang sesuai dipilih. Proses ini menghasilkan rencana pemeliharaan yang sangat tertarget, yang dirancang untuk mencegah atau mendeteksi kegagalan dengan konsekuensi serius, sementara mungkin membiarkan komponen dengan kegagalan non-konsekuensial berjalan hingga rusak (run-to-failure).

Sebaliknya, *Total Productive Maintenance* (TPM) lahir dari filosofi manufaktur Jepang yang menekankan pemberdayaan manusia, pemberantasan pemborosan (muda), dan perbaikan berkelanjutan (kaizen). Landasan filosofis TPM, sebagaimana diperkenalkan oleh Nakajima (1988), adalah pencapaian efektivitas peralatan yang maksimal melalui keterlibatan total

semua karyawan, dari operator hingga manajemen puncak. Prinsip intinya adalah bahwa pemeliharaan bukanlah tanggung jawab eksklusif departemen pemeliharaan, melainkan tanggung jawab bersama semua orang yang berinteraksi dengan peralatan. TPM memiliki tujuan yang lebih luas dibandingkan RCM; sementara RCM berfokus pada keandalan dan pengelolaan risiko, TPM bertujuan untuk menghilangkan semua kerugian besar yang terkait dengan peralatan, yang dirangkum dalam enam kerugian besar: kerusakan, waktu setup dan adjustment, idling dan stoppage minor, pengurangan kecepatan, cacat proses, dan kerugian hasil. Filosofi ini diterjemahkan ke dalam delapan pilar yang saling mendukung, dengan penekanan kuat pada pilar *Autonomous Maintenance*, *Planned Maintenance*, dan *Focused Improvement*. Pendekatannya bersifat inklusif dan transformatif, bertujuan untuk mengubah budaya kerja dan hubungan antara manusia dan mesin (Méndez & Rodríguez, 2017).

Mekanisme implementasi kedua metodologi ini memperlihatkan perbedaan yang sangat mencolok. Implementasi RCM dimulai dengan pembentukan tim multidisiplin yang memahami aset dan operasinya, diikuti oleh pelaksanaan tujuh langkah analitis yang ketat. Langkah-langkah ini membutuhkan keahlian teknik yang substansial dalam analisis kegagalan, statistik keandalan, dan penilaian risiko. Alat utama yang digunakan termasuk *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) atau yang lebih rinci *Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis* (FMECA), diagram Pohon Logika Kegagalan, dan analisis data waktu-ke-kegagalan. Outputnya adalah dokumen yang merinci fungsi, kegagalan, dan tugas pemeliharaan yang direkomendasikan untuk setiap aset yang dianalisis. Proses ini bisa memakan waktu lama dan memerlukan data historis yang baik (Braglia et al., 2019). Implementasi TPM, di sisi lain, sering dimulai dengan program persiapan dan pendidikan massal untuk membangun konsensus dan pemahaman. Tahap kunci adalah peluncuran *Autonomous Maintenance*, di mana operator dilatih untuk melakukan pemeliharaan dasar. Ini diikuti dengan pembentukan kelompok kecil (*small group activities*) untuk mengatasi masalah spesifik melalui kaizen. Alat yang digunakan cenderung lebih visual dan partisipatif, seperti pemetaan aliran nilai, diagram Pareto, dan papan pengendalian visual di lantai pabrik. Implementasi TPM biasanya bersifat bertahap dan berlangsung dalam jangka panjang, dengan fokus pada pembangunan kebiasaan dan standar kerja baru (Méndez & Rodríguez, 2017).

Perbedaan mendasar terlihat dalam pendekatan terhadap peran operator mesin. Dalam filosofi RCM klasik, operator berperan terutama sebagai pengguna aset dan sumber informasi tentang gejala abnormal. Analisis dan keputusan mengenai tugas pemeliharaan berada di tangan spesialis pemeliharaan atau insinyur keandalan. RCM tidak secara eksplisit menugaskan atau melatih operator untuk melakukan tugas pemeliharaan; batasan antara

operasi dan pemeliharaan tetap ada (Moscoso et al., 2019). TPM secara radikal mengaburkan batasan ini melalui pilar *Autonomous Maintenance*. Operator dilatih dan diberi wewenang untuk melakukan aktivitas CILT (Cleaning, Inspecting, Lubricating, Tightening), serta untuk mengidentifikasi kondisi abnormal dan melakukan penyetelan ringan. Tujuan filosofisnya adalah untuk mengembangkan operator yang kompeten yang dapat “merawat” mesin mereka, meningkatkan rasa kepemilikan, dan membebaskan teknisi pemeliharaan untuk fokus pada pekerjaan yang lebih kompleks dan perbaikan yang lebih mendalam (Ben-Daya, 2000). Perbedaan ini mencerminkan pandangan yang berbeda tentang manusia dalam sistem: RCM melihatnya sebagai bagian dari sistem informasi, sedangkan TPM melihatnya sebagai aktor pemeliharaan utama yang potensial (Ahuja & Khamba, 2008).

Aspek selektivitas dan cakupan penerapan juga menjadi pembeda krusial. RCM, dengan sifatnya yang berbasis analisis konsekuensi, secara inheren selektif. Tidak semua komponen layak mendapat perhatian yang sama; sumber daya dialokasikan ke area dengan risiko tertinggi (Rivera et al., 2014). Sebuah mesin mungkin hanya memiliki 20% komponennya yang dikenai tugas pemeliharaan preventif atau prediktif berdasarkan analisis RCM. Selebihnya dapat dikelola secara reaktif. Pendekatan ini memaksimalkan pengembalian investasi dalam aktivitas pemeliharaan proaktif. TPM, meskipun menganjurkan perbaikan berkelanjutan di semua area, juga memiliki mekanisme prioritasasi melalui pilar *Focused Improvement* (Kobetsu Kaizen) yang menargetkan kerugian atau masalah yang paling parah. Namun, semangat TPM mendorong keterlibatan di semua lini, dan *Autonomous Maintenance* pada prinsipnya berlaku untuk semua mesin (Hansson et al., 2003). Ini dapat diartikan sebagai pendekatan yang lebih luas dan kurang selektif dibandingkan RCM, dengan investasi awal dalam pelatihan dan perubahan budaya yang menyeluruh, namun dengan potensi manfaat yang juga tersebar luas.

Metrik dan pengukuran kinerja yang dihasilkan oleh kedua metodologi berbeda secara signifikan. RCM menghasilkan metrik yang berhubungan langsung dengan keandalan dan risiko. Metrik utama termasuk *Mean Time Between Failures* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), *Availability*, dan tingkat kejadian kegagalan kritis (Patel, 2017). Keberhasilan dinilai dari penurunan frekuensi kegagalan dengan konsekuensi tinggi, peningkatan keandalan sistem, dan penghematan biaya dari penghindaran konsekuensi kegagalan yang mahal. TPM memperkenalkan dan mempopulerkan metrik *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) sebagai ukuran komprehensif. OEE merupakan hasil kali dari *Availability* (mencakup downtime), *Performance Efficiency* (mencakup kecepatan dan stoppage kecil), dan *Rate of Quality* (mencakup cacat). OEE memberikan gambaran yang lebih luas tentang produktivitas peralatan, menangkap kerugian yang sering tidak terlihat dalam data keandalan tradisional, seperti

penurunan kecepatan atau cacat proses. Sementara peningkatan OEE dapat mencerminkan penurunan downtime (tujuan bersama), ia juga menangkap peningkatan di area yang mungkin berada di luar lingkup RCM tradisional (Jonsson & Lesshammar, 1999).

Dari perspektif manajemen perubahan dan persyaratan organisasi, RCM dan TPM menuntut hal yang berbeda. Keberhasilan RCM sangat bergantung pada ketersediaan data teknis yang akurat, keahlian analitis dalam tim, dan komitmen manajemen untuk mendanai analisis mendalam dan mengimplementasikan rekomendasinya (Thun, 2006). Perubahan yang dibawa terutama bersifat teknis dan prosedural. TPM, sebaliknya, merupakan program transformasi budaya yang besar. Keberhasilannya bergantung pada komitmen jangka panjang dari semua tingkat manajemen, efektivitas pelatihan massal, kemampuan fasilitator internal, dan kemauan untuk mengubah struktur insentif dan deskripsi pekerjaan. Resistensi dari operator yang merasa tugas mereka bertambah atau dari teknisi yang merasa wilayahnya diambil alih merupakan tantangan umum. Oleh karena itu, TPM mengubah cara pemeliharaan dilakukan, dan cara orang bekerja dan berinteraksi dalam organisasi (Cooke, 2003).

Analisis terhadap literatur mengungkapkan bahwa konteks aplikasi yang ideal untuk masing-masing metodologi sering kali berbeda. RCM menunjukkan kekuatan terbesarnya dalam lingkungan dengan aset yang kompleks, mahal, dan dengan konsekuensi kegagalan yang tinggi. Industri seperti pembangkit listrik, penerbangan, minyak dan gas, dan proses kimia, di mana keselamatan dan keandalan sangat penting, telah lama menjadi pengguna utama RCM (Johnston, 2002). Di sini, pendekatan analitis berbasis risiko RCM selaras dengan kebutuhan regulasi dan profil risiko industri. TPM, dengan penekanannya pada keterlibatan operator dan penghapusan pemborosan, telah menunjukkan keberhasilan yang menonjol di lingkungan manufaktur diskrit dengan volume tinggi, seperti industri otomotif, elektronik, dan barang konsumsi. Lingkungan dengan banyak mesin yang sejenis, di mana keterlibatan operator dapat direplikasi, dan di mana kerugian kecil yang tersebar luas (*six big losses*) memiliki dampak kumulatif yang besar, sangat cocok untuk pendekatan TPM (Bon & Ping, 2011).

Namun, batasan ini tidak mutlak. Bukti empiris menunjukkan adanya *crossover*. Implementasi RCM di fasilitas manufaktur telah dilaporkan berhasil, terutama untuk mesin produksi utama yang kritis. Demikian pula, prinsip-prinsip TPM telah diadopsi di industri proses, meskipun sering dengan modifikasi pada pilar Autonomous Maintenance karena sifat proses yang berkelanjutan dan seringkali berbahaya. Pemahaman tentang kekuatan dan kelemahan inti masing-masing metodologi menjadi kunci untuk aplikasi yang efektif di luar domain tradisionalnya. RCM mungkin kurang efektif untuk menangani kerugian kinerja kecil yang tersebar luas yang tidak terkait dengan kegagalan fungsional yang jelas, sementara TPM

mungkin tidak memberikan analisis yang cukup mendalam untuk mengelola risiko kegagalan katastrofik pada sistem yang sangat kompleks (Moscoso et al., 2019).

Pertimbangan biaya dan waktu implementasi juga membedakan kedua pendekatan. Investasi awal untuk RCM cenderung tinggi dalam hal waktu dan keahlian analitis. Proses analisis untuk satu sistem yang kompleks bisa memakan waktu berbulan-bulan. Namun, biaya operasi berulang setelah rencana ditetapkan dapat lebih rendah karena pemeliharaan menjadi sangat tertarget (Fraser et al., 2011). TPM, sebaliknya, memerlukan investasi besar di muka dalam pelatihan, konsultan, dan mungkin perubahan infrastruktur (seperti penandaan visual, area penyimpanan alat). Biaya ini berlanjut dalam bentuk aktivitas kelompok kecil dan pelatihan berkelanjutan. Namun, manfaat dari TPM sering kali mulai terlihat lebih cepat dalam bentuk peningkatan kebersihan, keteraturan, dan penurunan insiden kecil, meskipun manfaat penuh dari peningkatan OEE mungkin membutuhkan waktu beberapa tahun untuk direalisasikan (Ying, 2008).

Dari segi keberlanjutan, kedua metodologi menghadapi tantangan yang berbeda. Program RCM dapat mandek jika tidak ada mekanisme untuk meninjau dan memperbarui analisis seiring dengan perubahan peralatan, proses, atau kondisi operasi. Tanpa tinjauan berkala, rencana pemeliharaan yang dihasilkan dapat menjadi usang (Braglia et al., 2019). Keberlanjutan TPM sangat bergantung pada pemeliharaan antusiasme dan komitmen. Program TPM yang sukses memerlukan kepemimpinan yang terus-menerus mendorong, pengakuan atas prestasi, dan integrasi praktik TPM ke dalam rutinitas dan sistem manajemen harian. Tanpa hal ini, program TPM dapat berangsur-angsur ditinggalkan dan kembali ke praktik lama (Moscoso et al., 2019).

Mekanisme untuk menangani teknologi baru dan pemeliharaan prediktif juga berbeda. RCM, dengan kerangka analitisnya, dapat dengan mudah mengakomodasi tugas pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) dan prediktif (PdM) sebagai salah satu pilihan tugas yang valid setelah analisis konsekuensi. Integrasi data sensor dan analitik prediktif ke dalam proses pengambilan keputusan RCM merupakan perkembangan yang alamiah. Dalam TPM, teknologi prediktif dapat diintegrasikan terutama melalui pilar Planned Maintenance. Operator dapat dilatih untuk memantau parameter kondisi sederhana, sementara data dari sensor yang lebih canggih dapat digunakan oleh spesialis pemeliharaan. Namun, filosofi inti TPM tentang keterlibatan manusia tetap sentral; teknologi dilihat sebagai alat untuk memberdayakan orang, bukan menggantikannya (Ying, 2008).

Tabel 1. *Fundamental Comparative Analysis of RCM and TPM.*

Comparison Aspect	Reliability-Centered Maintenance (RCM)	Total Productive Maintenance (TPM)
Philosophy & Origin	Originated in the aviation industry (USA). Focuses on the systematic management of failure risk to ensure functional reliability cost-effectively. An analytical and selective approach.	Originated in Japanese manufacturing. Focuses on human empowerment and the elimination of waste (<i>muda</i>) to maximize equipment effectiveness. A transformative and inclusive approach.
Primary Objective	To manage the risk of failure (particularly with safety, environmental, and operational consequences) and to optimize the reliability of critical assets.	To eliminate the six major equipment losses to achieve overall effectiveness, involving all employees.
Core Principle	Maintenance is performed only when technically and economically justified based on failure consequences. Risk-based selectivity.	Maintenance is everyone's responsibility. Aiming for zero breakdowns, zero defects, zero accidents.
Core Mechanism	A 7-step analytical process: identify functions, functional failures, failure modes, consequence analysis, selection of maintenance tasks.	Implementation of 8 pillars, with strong emphasis on Autonomous Maintenance (Jishu Hozen) , Planned Maintenance, and Focused Improvement (Kaizen).
Operator Role	Serves as the asset user and a source of information about abnormalities. Analysis and decision-making by maintenance specialists/reliability engineers.	Serves as a primary maintenance actor for basic tasks (CILT). Empowered to care for, monitor, and improve their machine.
Application Selectivity	Highly selective. Resources allocated only to components with high-consequence failures (approx. 20% of components).	Broader and inclusive. The principle of involvement is applied across the board, though prioritization occurs via Kaizen.
Primary Tools	Failure Modes and Effects Analysis (FMEA/FMECA), Fault Tree Analysis, reliability data analysis (Weibull).	Visual & participatory tools: value stream mapping, Pareto charts, visual control boards, CILT check sheets.
Key Performance Metrics	Mean Time Between Failures (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR), Availability, critical failure rate.	Overall Equipment Effectiveness (OEE) – the product of Availability, Performance Efficiency, and Quality Rate.

Ideal Application Context	Complex, high-value assets with high-consequence failures: aviation, power generation, oil & gas, chemical processing.	High-volume discrete manufacturing with many similar machines: automotive, electronics, consumer goods.
Initial Investment & Time Nature of Change	High in analytical time and expertise . The analysis process per system can take months. Technical and procedural change. Alters how maintenance tasks are planned and executed.	High in mass training and cultural change . Requires long-term commitment. Cultural and organizational change. Alters mindsets, responsibilities, and work interactions.
Technology Integration (PdM/IoT)	Natural integration as a type of maintenance task within the analytical framework (Condition-Based Maintenance).	Technology as an empowerment tool for operators and specialists. Condition monitoring can become part of Planned/Autonomous Maintenance.
Sustainability Challenge	Analysis can become obsolete without periodic review as equipment and operations change.	Can lose momentum without sustained leadership, recognition, and integration into daily routines.
Underlying Paradigm	System-centric . Analyzes and optimizes the physical system.	Human-centric . Leverages and empowers the human potential around the system.

Pada akhirnya, perbedaan mendasar antara RCM dan TPM dapat dilihat sebagai perbedaan antara pendekatan yang berpusat pada sistem (system-centric) dan pendekatan yang berpusat pada manusia (human-centric). RCM menganalisis sistem fisik untuk mengidentifikasi dan mengelola kerentanannya. TPM memberdayakan manusia di sekitar sistem untuk merawatnya, mengamatinya, dan terus meningkatkannya. Kedua pendekatan tersebut valid dan telah terbukti berhasil, tetapi mereka menawarkan jalur yang berbeda untuk mencapai tujuan yang tumpang tindih namun tidak identik: keandalan aset dan produktivitas operasional. Pemahaman yang jelas tentang karakteristik dan mekanisme masing-masing merupakan prasyarat untuk evaluasi efektivitas empirisnya, yang akan dibahas pada bagian berikutnya.

Evaluasi Bukti Empiris dan Faktor Kontinjensi Keefektifan

Evaluasi efektivitas *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) dan *Total Productive Maintenance* (TPM) secara nyata memerlukan analisis terhadap bukti empiris dari studi implementasi. Literatur menunjukkan pola hasil yang berbeda dan beragam, yang sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor kontekstual spesifik. Sebuah studi komparatif oleh McKone et al. (2001) yang menganalisis data dari pabrik di seluruh dunia menemukan bahwa

implementasi TPM memiliki hubungan positif yang signifikan dengan kinerja manufaktur, khususnya dalam hal kualitas, kecepatan pengiriman, dan fleksibilitas. Peningkatan yang dilaporkan dalam *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) setelah implementasi TPM sering kali berkisar antara 20% hingga 50%, dengan komponen *Availability* menunjukkan perbaikan yang paling konsisten karena pengurangan *downtime* yang diakibatkan oleh kerusakan kecil dan persiapan. Temuan ini didukung oleh banyak studi kasus di industri seperti otomotif dan elektronik, di mana keterlibatan operator dalam *Autonomous Maintenance* berhasil mengidentifikasi dan mengatasi akar penyebab deteriorasi mesin yang sebelumnya diabaikan. Namun, penelitian yang sama dan studi lainnya juga menggarisbawahi bahwa manfaat TPM ini tidak universal; mereka paling kuat dan konsisten di lingkungan dengan proses manufaktur yang relatif stabil dan berulang, di mana aktivitas pemeliharaan dasar dapat distandardisasi dan di mana budaya kerja kolaboratif dapat dibangun.

Di sisi lain, bukti empiris untuk RCM sering kali berasal dari sektor-sektor dengan profil risiko tinggi. Studi-studi di industri pembangkit listrik, penerbangan, dan minyak dan gas secara konsisten melaporkan penurunan yang signifikan dalam kejadian kegagalan kritis dan peningkatan *Mean Time Between Failures* (MTBF) untuk aset-aset yang telah melalui analisis RCM. Sebagai contoh, penerapan RCM pada sistem turbin gas di fasilitas produksi lepas pantai dilaporkan oleh Rausand dan Vatn (1998) berhasil mengidentifikasi mode kegagalan yang sebelumnya tidak terdiagnosis dan mengalihkan sumber daya pemeliharaan dari tugas-tugas berbasis waktu yang tidak perlu ke pemantauan kondisi yang ditargetkan, sehingga menghasilkan peningkatan ketersediaan sistem dan penghematan biaya. Kekuatan RCM terletak pada kemampuannya untuk memberikan justifikasi teknis dan ekonomi yang kuat untuk setiap tugas pemeliharaan, menghilangkan aktivitas yang tidak bernilai tambah. Bukti menunjukkan bahwa di lingkungan di mana biaya kegagalan sangat tinggi dan regulasi ketat, pendekatan analitis RCM menghasilkan rencana pemeliharaan yang lebih defensif dan dapat dipertanggungjawabkan dibandingkan dengan pendekatan yang lebih umum. Namun, implementasi RCM di lingkungan manufaktur diskrit dengan banyak aset berbiaya rendah dan konsekuensi kegagalan operasional yang terbatas menunjukkan hasil yang kurang dramatis, dan proses analitiknya sering dianggap terlalu berat dibandingkan dengan manfaat yang diperoleh.

Faktor kontinjensi yang paling kritis untuk menentukan keunggulan relatif RCM atau TPM adalah sifat dan kompleksitas aset produksi (Bakri et al., 2014). Untuk aset yang kompleks, mahal, dan memiliki interdependensi tinggi dalam suatu sistem, di mana satu kegagalan dapat mengakibatkan penghentian produksi yang luas atau risiko keselamatan,

pendekatan analitis berbasis risiko RCM menjadi sangat penting. Kompleksitas ini menuntut pemahaman mendalam tentang mode kegagalan dan konsekuensinya, yang diberikan oleh RCM. Sebaliknya, untuk lingkungan dengan banyak aset yang identik atau serupa, yang relatif sederhana, dan di mana kegagalannya berdampak lokal, pendekatan TPM yang memberdayakan operator untuk melakukan pemeliharaan dasar dan deteksi dini terbukti sangat efektif. Keuntungan utama TPM adalah kemampuannya untuk menangani sejumlah besar insiden kecil yang tersebar luas yang secara kumulatif menyebabkan kerugian produktivitas besar, tetapi yang mungkin tidak memenuhi ambang batas untuk analisis RCM yang mendalam. Faktor ini menjelaskan mengapa TPM berkembang pesat di lini perakitan otomotif, sementara RCM mendominasi di fasilitas pembangkit listrik.

Budaya organisasi yang ada dan kematangan fungsi pemeliharaan merupakan faktor penentu lain yang sangat kuat (Darmawan, 2024). Organisasi dengan budaya hierarkis yang kuat, di mana terdapat pemisahan yang jelas antara peran operator dan teknisi, dan di mana pengambilan keputusan sangat tersentralisasi, mungkin menemukan implementasi TPM sangat menantang. Perubahan paradigma yang diperlukan untuk Autonomous Maintenance dapat menghadapi resistensi yang signifikan dari kedua belah pihak: operator yang mungkin merasa tugasnya bertambah tanpa kompensasi yang jelas, dan teknisi yang mungkin merasa wilayah otoritasnya terganggu. Dalam lingkungan seperti itu, memperkenalkan elemen RCM terlebih dahulu dengan fokus pada analisis teknis dan pengoptimalan rencana pemeliharaan oleh para ahli yang dapat menjadi titik masuk yang lebih mudah dan kurang mengganggu (Michalek, 2011). Sebaliknya, organisasi dengan budaya partisipatif yang sudah ada, atau yang telah berhasil menerapkan filosofi *Lean Manufacturing*, sering kali menemukan TPM sebagai kelanjutan yang alamiah. Landasan kerjasama tim dan fokus pada penghapusan pemborosan yang telah dibangun memfasilitasi adopsi pilar-pilar TPM (Cua et al., 2001).

Ketersediaan dan kualitas data operasional merupakan faktor pembeda praktis yang mempengaruhi pilihan metodologi. Proses RCM sangat bergantung pada data historis yang akurat tentang kegagalan, waktu perbaikan, dan konsekuensi (Shaalan et al., 2020). Tanpa data ini, analisis konsekuensi menjadi spekulatif, dan seleksi tugas pemeliharaan mungkin tidak optimal. Oleh karena itu, fasilitas dengan sistem pencatatan pemeliharaan yang buruk atau yang mengoperasikan peralatan baru tanpa riwayat kegagalan mungkin kesulitan menerapkan RCM murni. TPM, meskipun juga mendapat manfaat dari data, memiliki persyaratan data awal yang berbeda. Fase awal TPM lebih berfokus pada pembentukan standar dasar (seperti lembar checklist CILT) dan mengumpulkan data tentang kondisi aktual dan kerugian. Ia dapat dimulai dengan data yang lebih terbatas, menggunakan observasi langsung dan partisipasi operator

sebagai sumber informasi primer. Dengan demikian, TPM dapat berfungsi sebagai mekanisme untuk menghasilkan data yang diperlukan untuk analisis yang lebih canggih di kemudian hari, termasuk mungkin analisis RCM untuk mesin-mesin tertentu.

Tingkat otomasi dan sifat proses manufaktur menciptakan faktor kontinjensi yang penting. Di pabrik yang sangat otomatis dengan lini produksi yang terintegrasi dan dikendalikan oleh PLC, banyak penyebab downtime bersifat teknis dan terkait perangkat lunak atau sensor (Sarje, 2017). Dalam lingkungan seperti ini, kemampuan operator untuk melakukan intervensi fisik melalui *Autonomous Maintenance* mungkin terbatas. RCM, dengan kemampuannya untuk menganalisis kegagalan sistem kendali dan mengintegrasikan pemeliharaan prediktif berbasis kondisi (seperti pemantauan vibrasi atau termografi pada motor dan gearbox), mungkin lebih langsung dapat diterapkan. Namun, prinsip-prinsip TPM seperti pembersihan dan inspeksi visual tetap relevan untuk mencegah deteriorasi fisik, dan pilar *Focused Improvement* dapat digunakan untuk mengatasi masalah kinerja sistem yang kompleks. Di sisi lain, dalam operasi manual atau semi-otomatis, di mana operator memiliki interaksi fisik yang konstan dengan mesin, *Autonomous Maintenance* TPM memberikan hasil yang sangat cepat dan terlihat.

Skala operasi dan ukuran fasilitas juga mempengaruhi efektivitas relatif RCM, sebagai proses yang intensif sumber daya, mungkin paling cocok untuk diterapkan pada sejumlah kecil aset yang benar-benar kritis dalam fasilitas besar. Menerapkan RCM pada setiap mesin di pabrik dengan ratusan aset sering kali tidak praktis. TPM, meskipun juga memerlukan investasi awal yang besar, dirancang untuk penskalaan melalui replikasi standar kerja dan aktivitas kelompok kecil di seluruh rantai pabrik. Filosofi "setiap orang, setiap mesin" dari TPM dapat diterapkan secara lebih konsisten di seluruh fasilitas besar dengan banyak aset serupa, menghasilkan peningkatan yang merata meskipun mungkin tidak sedalam yang dicapai oleh RCM pada aset individual yang paling kritis (Gabbar et al., 2006).

Bukti empiris mengenai integrasi atau penerapan berurutan dari kedua metodologi mulai muncul dan memberikan wawasan penting. Beberapa studi kasus sukses menggambarkan pendekatan dua tahap. Pada tahap pertama, TPM diimplementasikan untuk menstabilkan operasi dasar, melibatkan operator, membersihkan dan mengatur mesin, serta mengurangi *downtime* yang jelas (Moscoso et al., 2019). Setelah budaya pemeliharaan proaktif dan disiplin dasar terbentuk, organisasi kemudian menerapkan prinsip-prinsip RCM pada mesin-mesin produksi utama yang telah diidentifikasi sebagai bottleneck atau memiliki dampak tertinggi (Carrasco, 2016). Analisis RCM pada tahap ini mendapat manfaat dari data operasional yang lebih bersih dan pemahaman proses yang lebih baik yang dikembangkan selama fase TPM.

Pendekatan hibrida ini, sebagaimana disarankan oleh Parida dan Kumar (2006), memanfaatkan kekuatan TPM untuk menciptakan fondasi budaya dan data, sementara RCM memberikan kedalaman analitis untuk pengelolaan risiko yang canggih pada aset kritis. Ini menunjukkan bahwa RCM dan TPM bukanlah pilihan yang saling eksklusif, melainkan dapat bersifat komplementer ketika diterapkan secara berurutan dan dengan pemahaman yang jelas tentang tujuan setiap fase.

Faktor eksternal, seperti tekanan regulasi dan tuntutan pelanggan, juga berperan sebagai faktor kontinjensi. Di industri yang diatur secara ketat (seperti farmasi, makanan, atau aerospace), pendekatan terdokumentasi dan berbasis risiko dari RCM sering kali selaras dengan persyaratan regulator untuk Validasi Proses dan Manajemen Risiko Mutu (Rivera et al., 2014). Dokumentasi analisis RCM dapat secara langsung mendukung kepatuhan terhadap standar seperti ISO 55001 (Asset Management) atau regulasi FDA. TPM, meskipun juga dapat mendukung tujuan kepatuhan melalui dokumentasi prosedur standar, mungkin tidak memberikan justifikasi risiko yang sama eksplisitnya. Di sisi lain, dalam lingkungan manufaktur yang sangat kompetitif di mana pelanggan menuntut fleksibilitas dan perbaikan biaya yang berkelanjutan, fokus TPM pada eliminasi pemborosan dan peningkatan OEE mungkin lebih selaras dengan prioritas bisnis langsung.

Analisis terhadap kegagalan implementasi juga memberikan pelajaran berharga. Kegagalan RCM sering kali dikaitkan dengan analisis yang terlalu teoretis dan terputus dari realitas operasi, menghasilkan rencana pemeliharaan yang terlalu kompleks atau tidak praktis yang akhirnya tidak diterapkan. Kegagalan TPM, di sisi lain, paling sering dikaitkan dengan kurangnya komitmen manajemen berkelanjutan, pendekatan implementasi yang terburu-buru yang mengabaikan pelatihan dan perubahan budaya, atau kegagalan untuk mengintegrasikan aktivitas TPM ke dalam sistem kerja dan insentif harian. Pola kegagalan ini memperkuat pentingnya kecocokan antara metodologi dan kapabilitas serta kesiapan organisasi.

Tabel 2. *Contingency Factors for RCM and TPM Effectiveness.*

Determining Factor	Context Favoring RCM	Context Favoring TPM
1. Asset Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Single, complex, and high-value assets. • High-consequence failures (safety, environment, systemic downtime). • <i>Examples: Gas turbines, process control systems, aircraft.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Many identical or similar assets. • Failures have localized and cumulative impact. • <i>Examples: CNC machines, injection molders, assembly lines.</i>

2. Organizational Culture	<ul style="list-style-type: none"> • Hierarchical structure with strong specialization. • Clear demarcation between operator and technician roles. • Centralized decision-making. 	<ul style="list-style-type: none"> • Participative and collaborative culture. • Existing foundation of Lean philosophy. • Readiness to empower frontline personnel.
3. Data Availability	<ul style="list-style-type: none"> • Accurate, well-documented historical failure data. • Mature maintenance recording systems. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limited initial data. • Can commence with direct observation and operator checklists.
4. Level of Automation	<ul style="list-style-type: none"> • Highly automated environments with integrated control systems (PLC, robotics). • Downtime causes are technical/software-related. 	<ul style="list-style-type: none"> • Manual or semi-automated operations. • High physical interaction between operator and machine.
5. Operational Scale	<ul style="list-style-type: none"> • Limited number of critical assets within a large facility. • Resources can be focused on in-depth analysis of priority assets. 	<ul style="list-style-type: none"> • Many similar assets (hundreds of units). • An approach replicable across a wide scale is required.
6. External Pressures	<ul style="list-style-type: none"> • Highly regulated industries (aviation, pharmaceuticals, energy). • Explicit risk documentation demands for compliance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Competitive environments with pressure on flexibility and cost. • Demands for continuous productivity improvement.
7. Strategic Objective	<ul style="list-style-type: none"> • To manage and mitigate high-impact failure risks. • To achieve maximum reliability of critical assets. 	<ul style="list-style-type: none"> • To broadly improve productivity and eliminate waste. • To enhance OEE and employee engagement.
8. Optimal Integration Pattern	<p>As a Subsequent Stage: Applied to critical assets after operational stability is established (e.g., post-TPM foundation).</p>	<p>As an Initial Foundation: Creates the culture, discipline, and clean data baseline for further advanced analysis.</p>

The determination of whether Reliability-Centered Maintenance (RCM) or Total Productive Maintenance (TPM) is the superior methodology is inherently contingent and non-absolute; it is decisively governed by the specific interplay of contextual factors characterizing a given operational environment. RCM demonstrates distinct superiority and is the preferred approach in settings defined by high-risk, complex assets where the primary imperative is the systematic management and mitigation of failures with severe safety, environmental, or operational consequences. Conversely, TPM proves markedly more effective and appropriate in contexts where the strategic objectives prioritize achieving broad-based productivity enhancements, comprehensive waste elimination, and the cultivation of a culture of human empowerment and engagement across the workforce.

Secara keseluruhan, evaluasi bukti empiris mengarah pada kesimpulan bahwa tidak ada satu metodologi yang unggul secara universal. Keefektifan RCM atau TPM merupakan fungsi

dari interaksi antara karakteristik teknis aset, lingkup organisasi, dan tujuan strategis fasilitas. RCM menunjukkan keunggulan yang jelas untuk mengelola risiko kegagalan yang kompleks dan berdampak tinggi pada aset kritis, terutama di lingkungan yang diatur dan berisiko tinggi. TPM menunjukkan keunggulan untuk menciptakan perbaikan produktivitas yang luas dan berkelanjutan di lingkungan manufaktur dengan banyak aset, dengan memberdayakan tenaga kerja dan menyerang semua sumber pemborosan. Faktor-faktor kontinjensi yang diidentifikasi seperti kompleksitas aset, budaya organisasi, ketersediaan data, tingkat otomasi, dan tekanan eksternal; menyediakan kerangka diagnostik yang dapat digunakan oleh manajer untuk menilai pendekatan mana, atau kombinasi mana, yang paling mungkin berhasil dalam lingkup spesifik mereka.

Model Integrasi Sinergis untuk Sistem Pemeliharaan Hibrida

Sintesis dari analisis kontinjensi menunjukkan bahwa *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) dan *Total Productive Maintenance* (TPM) menawarkan keunggulan komplementer. Oleh karena itu, pengembangan suatu model integrasi yang sinergis menjadi langkah logis untuk meraih manfaat yang lebih luas daripada penerapan metodologi tunggal. Model integrasi yang diusulkan ini, disebut *Synergistic RCM-TPM Hybrid Model* (SRTHM), dirancang sebagai suatu kerangka kerja berurutan dan siklis yang memanfaatkan TPM sebagai fondasi transformasi budaya dan operasional, lalu membangun di atasnya dengan aplikasi RCM yang selektif untuk pengelolaan risiko aset kritis. Pendekatan ini selaras dengan perspektif evolusioner dalam manajemen pemeliharaan, di mana strategi berkembang seiring dengan peningkatan kematangan organisasi dan kompleksitas tantangan yang dihadapi (Pintelon & Parodi-Herz, 2008). Premis dasarnya adalah bahwa fondasi disiplin, data, dan keterlibatan karyawan yang kokoh dari TPM akan membuat analisis dan implementasi RCM berikutnya menjadi lebih akurat, dapat diterima, dan efektif secara biaya.

Fase pertama SRTHM secara eksklusif berfokus pada implementasi pilar-pilar inti TPM, terutama *Autonomous Maintenance* (AM) dan *Planned Maintenance* dasar. Tujuan fase ini adalah mencapai stabilitas operasional dasar dan membangun budaya kepemilikan peralatan di tingkat operator. Melalui AM, operator dilatih untuk melakukan pemeliharaan dasar (CILT) dan mendokumentasikan kondisi serta anomali. Aktivitas kelompok kecil (Kaizen) ditujukan untuk mengatasi kerugian yang terlihat jelas. Hasil kunci dari fase ini, sebagaimana dilaporkan dalam banyak studi kasus TPM, adalah peningkatan kebersihan dan keteraturan, penurunan kerusakan kecil, dan yang terpenting, terbangunnya suatu sistem pengumpulan data kondisi peralatan yang terstruktur dan rutin (Nachiappan & Anantharaman, 2006). Data yang dihasilkan dari checklist AM dan catatan perbaikan ini merupakan aset baru yang sebelumnya

tidak tersedia atau tidak terorganisir, dan akan menjadi input vital untuk fase analitis berikutnya.

Transisi ke fase kedua dimulai setelah fondasi TPM menunjukkan konsistensi, yang sering ditandai dengan peningkatan dan stabilisasi metrik *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) serta kepatuhan terhadap prosedur AM. Fase ini merupakan penerapan prinsip RCM yang terfokus dan bertarget. Langkah pertama adalah mengidentifikasi *Critical Production Assets* (CPA) menggunakan kriteria yang mencakup dampak kegagalan terhadap tujuan strategis seperti pengiriman, kapasitas bottleneck, atau keselamatan. Proses identifikasi ini sendiri diperkaya oleh data fase TPM, karena mesin dengan frekuensi anomali tinggi atau kinerja OEE yang secara konsisten rendah meski upaya perbaikan, secara alami menjadi kandidat CPA. Pada aset-aset terpilih inilah proses analitis RCM formal yang ketat dilaksanakan.

Sinergi mendasar model ini terwujud dalam interaksi antara data operasional TPM dan analisis kegagalan RCM. Data gejala harian dari checklist AM (seperti getaran, suhu, kebocoran) memberikan bukti empiris langsung yang dapat menginformasikan dan memprioritaskan langkah-langkah dalam *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) RCM. Gejala-gejala ini sering kali merupakan manifestasi awal dari suatu failure mode. Dengan demikian, analisis RCM bergeser dari yang bersifat terlalu teoretis menjadi berbasis bukti nyata dari operasi, meningkatkan validitas dan penerimaannya. Sebaliknya, keluaran dari analisis RCM yaitu rencana pemeliharaan yang ditargetkan dan sering kali berbasis kondisi untuk CPA yang memberikan arah dan kedalaman teknis yang lebih besar bagi pilar *Planned Maintenance* TPM. Tugas prediktif atau detektif yang dihasilkan RCM diintegrasikan ke dalam sistem penjadwalan, sehingga mengubah *Planned Maintenance* dari aktivitas berbasis waktu generik menjadi program yang didorong oleh analisis risiko dan kondisi yang spesifik (Wireman, 2005).

Model SRTHM memasukkan suatu mekanisme umpan balik dua arah yang eksplisit untuk memastikan pembelajaran organisasi yang berkelanjutan. Temuan dari pelaksanaan tugas pemeliharaan RCM (misalnya, keberhasilan deteksi dini suatu kegagalan) harus dikomunikasikan kembali kepada tim operator sebagai bagian dari pelatihan berkelanjutan TPM. Hal ini memperkuat nilai aktivitas AM dan meningkatkan kemampuan diagnostik operator. Sebaliknya, jika tugas pemeliharaan yang direkomendasikan RCM ternyata tidak praktis atau tidak efektif di lapangan, masukan dari operator dan teknisi yang berpengalaman menjadi umpan balik kritis untuk meninjau ulang dan merevisi analisis RCM. Siklus adaptif

ini mencegah model menjadi statis dan memastikannya responsif terhadap realitas operasional yang selalu berubah.

Struktur peran dalam model hibrida ini mengalami evolusi yang disengaja. Operator, melalui AM, bertindak sebagai sensor dan detektor anomali pertama. Teknisi pemeliharaan beralih peran dari firefighter menjadi pelaksana tugas pemeliharaan terencana yang lebih kompleks dan analitis, serta mentor bagi operator. Insinyur keandalan atau spesialis RCM memimpin analisis mendalam untuk CPA dan memvalidasi teknologi pemantauan kondisi. Manajemen berperan sebagai integrator dan pemilik proses, memastikan aliran pengetahuan dan sumber daya antara fase TPM dan RCM, serta membuat keputusan strategis berdasarkan output analisis risiko. Pembagian peran yang jelas ini penting untuk menghindari kebingungan dan tumpang tindih tanggung jawab.

Evaluasi kinerja model SRTHM memerlukan suatu set metrik ganda (dual-metric set) yang menangkap kemajuan di kedua domain. Metrik TPM tradisional seperti OEE, *Availability*, dan *Autonomous Maintenance Compliance Rate* tetap dipertahankan untuk memantau kesehatan operasional menyeluruh dan keterlibatan. Metrik RCM seperti *Mean Time Between Critical Failures* (MTBCF), *Risk Priority Number* (RPN) Reduction, dan *Preventive Maintenance Cost Effectiveness* ditambahkan untuk mengukur dampak pengelolaan risiko pada aset kritis. Selain itu, metrik integrasi spesifik dapat dikembangkan, seperti *Time from AM Anomaly to RCM Review* atau *Percentage of RCM Tasks Informed by AM Data*, untuk secara langsung mengukur kekuatan hubungan sinergis antara kedua pilar dalam model tersebut (Tsang, 2002).

Tantangan implementasi model ini perlu diantisipasi. Risiko utama adalah kelelahan organisasi akibat perubahan berkelanjutan jika transisi antara fase tidak dikelola dengan baik (Silva et al., 2023). Oleh karena itu, pencapaian *milestone* yang jelas dan periode konsolidasi di antara fase adalah kritis. Tantangan lain adalah menjaga keseimbangan perhatian dan sumber daya antara aset kritis (CPA) yang mendapat analisis RCM intensif dan aset non-kritis yang tetap memerlukan fondasi TPM yang kuat. Tanpa mekanisme tinjauan portofolio aset yang berkala, terdapat risiko mengabaikan aset non-kritis hingga titik di mana kegagalan beruntunnya mengganggu stabilitas operasional yang telah diraih.

Dari perspektif biaya-manfaat, model SRTHM menawarkan proposisi nilai yang menarik. Investasi awal dalam TPM, meskipun signifikan, menghasilkan penghematan dari pengurangan *downtime* tidak terencana dan peningkatan produktivitas, yang sebagian dapat membiayai analisis RCM yang lebih mahal untuk aset kritis. Analisis RCM sendiri, dengan memfokuskan sumber daya hanya pada area berisiko tinggi, bertujuan untuk menghindari biaya

kegagalan katastrofik yang jauh lebih besar (Gomaa, 2025). Dengan demikian, model ini mengoptimalkan alokasi sumber daya pemeliharaan secara keseluruhan, mengalihkan investasi dari aktivitas yang tidak bernilai tambah (berdasarkan analisis RCM) menuju aktivitas yang membangun fondasi (TPM) dan mencegah kerugian besar (RCM).

Model SRTHM juga memberikan respons terhadap tuntutan era industri 4.0. Data yang terstruktur dari fase TPM menyediakan dasar untuk digitalisasi. Analisis RCM menentukan parameter kritis mana yang perlu dipantau secara digital. Hasilnya, jalur menuju *Predictive Maintenance* dan *Digital Twin* menjadi lebih terarah: pertama-tama bangun disiplin dan data dasar melalui TPM, lalu gunakan analisis RCM untuk menentukan titik pemantauan dan ambang batas yang paling penting, baru kemudian investasi dalam sensor dan analitik canggih dilakukan dengan justifikasi bisnis yang kuat.

Secara konseptual, SRTHM mengatasi salah satu kelemahan utama dari pendekatan tunggal: sifat reaktif potensial dalam TPM terhadap kegagalan kompleks, dan sifat elitis serta terisolasi potensial dalam RCM. Dengan mengintegrasikannya, model ini menciptakan suatu ekosistem pemeliharaan di mana kewaspadaan dan keterlibatan seluruh personel (TPM) dikombinasikan dengan kecerdasan dan fokus analitis mendalam (RCM). Hal ini menghasilkan sistem yang efisien dalam operasi sehari-hari dan tangguh untuk menghadapi risiko gangguan yang kompleks.

Tabel 3. *Framework of the Synergistic RCM-TPM Hybrid Model (SRTHM).*

Phase & Component	Objective & Key Activities	Output & Contribution to Subsequent Phase
PHASE 1: TPM Foundation	<p>Objective: Achieve basic operational stability & build an ownership culture.</p> <p>Key Activities:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Implement <i>Autonomous Maintenance (AM)</i> (CILT). 2. <i>Basic Planned Maintenance</i>. 3. Small-group <i>Kaizen</i> activities. 	<p>Output:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Improved cleanliness & orderliness (5S). • Reduction in minor breakdowns & stoppages. • Structured data on machine condition & anomalies. • Culture of participation & operational discipline.
Transition Gate	<p>Criteria: Stability of OEE metrics & AM compliance.</p> <p>Activity: Identify <i>Critical Production Assets (CPA)</i> using TPM-phase data & strategic criteria.</p>	<p>Output: Prioritized asset list for in-depth analysis. Resources focused on high-risk areas.</p>
PHASE 2: Selective RCM Analysis	<p>Objective: Precision risk management for critical assets.</p> <p>Key Activities:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Formal RCM analysis (FMEA) on CPAs. 	<p>Output:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Targeted maintenance plan for CPAs. • Justified predictive & condition-

Integration & Feedback Mechanism	<p>2. Integrate symptom data from TPM phase into the analysis.</p> <p>3. Define risk- & condition-based maintenance tasks.</p> <p>1. Data Integration: AM symptom data → FMEA input.</p> <p>2. Planning Integration: RCM-derived tasks → Scheduled in TPM's Planned Maintenance.</p> <p>3. Feedback Loop: RCM task outcomes → AM training; Field feedback → RCM analysis review.</p>	<p>based tasks.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Critical asset risk profile. <p>Output: Organisational learning cycle. An adaptive, evidence-based maintenance plan.</p>
Hybrid Role Structure	<p>Operator (AM): Primary sensor & anomaly detector.</p> <p>Technician: Executor of complex RCM tasks & AM mentor.</p> <p>Reliability Engineer: Leads RCM analysis.</p> <p>Management: Process integrator & owner.</p>	<p>Output: Clear cross-functional collaboration. Effective knowledge flow.</p>
Dual Metric System	<p>TPM Metrics: OEE, Availability, AM Compliance Rate.</p> <p>RCM Metrics: MTBCF, Risk Reduction, Cost Effectiveness.</p> <p>Integration Metrics: Time from Anomaly to Action, % of RCM tasks informed by AM data.</p>	<p>Output: Holistic performance dashboard. Measurement of integration effectiveness & individual pillar contribution.</p>
Phase & Component	Objective & Key Activities	Output & Contribution to Subsequent Phase

The Synergistic RCM-TPM Hybrid Model (SRTHM) presents a compelling value proposition by strategically optimizing resource allocation: it leverages Total Productive Maintenance (TPM) to establish broad-based operational stability and cultivate essential human discipline, while employing Reliability-Centered Maintenance (RCM) to deliver focused, analytical depth in managing high-consequence risks on critical assets. This creates a virtuous, self-reinforcing cycle where the foundational investment in TPM generates the operational savings and structured data necessary to fund and inform the subsequent, more resource-intensive RCM analysis. In turn, the precision risk mitigation achieved through RCM safeguards the organization from catastrophic failures that could undermine the very stability and cultural gains secured by the TPM foundation. Consequently, SRTHM provides a clear and logical pathway toward advanced predictive maintenance, where the initial phase (TPM) establishes the necessary data quality and organizational discipline, the intermediate phase (RCM) uses that foundation to identify and prioritize the most critical parameters for

monitoring, and the final phase facilitates a measured, justified implementation of specific technologies for condition monitoring and prediction.

Dengan demikian, *Synergistic RCM-TPM Hybrid Model (SRTHM)* merupakan suatu kerangka kerja integratif yang propositif dan berdasarkan bukti. Model ini tidak menyarankan bahwa satu metodologi lebih baik dari yang lain, melainkan menunjukkan bagaimana penerapan strategis dan berurutan dapat menghasilkan nilai gabungan yang lebih besar. Dengan memulai dari transformasi budaya dan stabilitas operasional melalui TPM, lalu dilanjutkan dengan pengelolaan risiko presisi melalui RCM pada aset kritis, organisasi manufaktur dapat membangun kapabilitas pemeliharaan yang komprehensif, berkelanjutan, dan selaras dengan tujuan bisnis strategis dalam lingkungan yang semakin kompleks dan penuh gangguan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kajian literatur sistematis ini telah berhasil melakukan analisis komparatif mendalam antara *Reliability-Centered Maintenance (RCM)* dan *Total Productive Maintenance (TPM)*, serta mengembangkan suatu model integrasi sinergis. Penelitian menyimpulkan bahwa RCM dan TPM merupakan metodologi dengan filosofi, mekanisme, dan lingkup efektivitas yang berbeda secara fundamental. RCM, yang berakar pada analisis risiko yang ketat, unggul untuk mengelola keandalan aset yang kompleks dan berisiko tinggi, menghasilkan rencana pemeliharaan yang sangat tertarget berdasarkan konsekuensi kegagalan. Sebaliknya, TPM, yang berfokus pada pemberdayaan manusia dan penghapusan pemborosan, unggul untuk menciptakan perbaikan produktivitas yang luas, meningkatkan budaya kerja, dan menstabilkan operasi dasar melalui keterlibatan total karyawan. Keunggulan relatif dari masing-masing metodologi tidak mutlak, tetapi sangat bergantung pada faktor-faktor kontinjensi seperti karakteristik aset, budaya organisasi, ketersediaan data, tingkat otomasi, dan tekanan eksternal. Berdasarkan pemahaman akan kekuatan komplementer ini, penelitian mengusulkan *Synergistic RCM-TPM Hybrid Model (SRTHM)*, sebuah kerangka kerja integratif yang menerapkan TPM sebagai fondasi untuk stabilitas dan disiplin, kemudian membangun di atasnya dengan penerapan RCM yang selektif pada aset produksi kritis untuk pengelolaan risiko yang presisi, menciptakan suatu siklus umpan balik dan pembelajaran organisasi yang berkelanjutan.

Temuan penelitian ini membawa implikasi penting bagi teori dan praktik manajemen pemeliharaan. Secara teoretis, kajian ini memperkaya wacana akademis dengan menyediakan kerangka kontinjensi yang terstruktur untuk memahami kapan dan mengapa suatu metodologi pemeliharaan lebih efektif, serta dengan memperkenalkan model integrasi konseptual yang

menjembatani paradigma yang selama ini sering dibahas secara terpisah. Ini membuka jalur penelitian baru untuk menguji dan memvalidasi model SRTHM secara empiris, serta mengeksplorasi metrik spesifik untuk mengukur kekuatan integrasi. Bagi praktisi, termasuk insinyur pemeliharaan, manajer operasi, dan konsultan, penelitian ini memberikan panduan diagnostik yang berharga. Tabel faktor kontinjensi dan perbandingan mendasar dapat digunakan sebagai alat audit untuk menilai kesiapan dan kesesuaian organisasi sebelum memilih suatu pendekatan. Lebih lanjut, model SRTHM menawarkan roadmap implementasi yang pragmatis dan bertahap, yang dapat mengurangi risiko kegagalan program transformasi pemeliharaan dengan menghindari lompatan langsung ke analisis kompleks (RCM) tanpa fondasi budaya dan operasional yang memadai (TPM). Bagi industri yang bergerak menuju Industri 4.0, model ini memberikan kerangka logis untuk digitalisasi, di mana fondasi data dari TPM dan prioritas dari analisis RCM bersama-sama mengarahkan investasi teknologi prediktif yang lebih terukur dan bernilai.

Berdasarkan temuan dan implikasi, diajukan beberapa saran untuk penelitian dan praktik ke depan. Pertama, bagi peneliti akademis, sangat disarankan untuk melakukan studi empiris longitudinal yang menguji implementasi model SRTHM di lingkungan manufaktur yang beragam. Studi semacam ini harus mengukur tidak hanya metrik akhir seperti OEE dan MTBF, tetapi juga metrik proses integrasi dan dampak pada budaya organisasi. Penelitian lebih lanjut juga diperlukan untuk mengembangkan dan memvalidasi alat serta template standar yang dapat memfasilitasi integrasi data antara sistem pendukung TPM (seperti checklist digital AM) dan alat analisis RCM (perangkat lunak FMEA). Kedua, bagi organisasi industri yang berniat mengadopsi pendekatan integratif, disarankan untuk memulai dengan proyek percontohan pada satu lini produksi atau area pabrik. Langkah kuncinya adalah pertama-tama mencapai konsistensi dalam penerapan pilar-pilar dasar TPM, khususnya *Autonomous Maintenance* dan 5S, sambil secara paralel mengumpulkan data dan mengidentifikasi aset kritis potensial. Hanya setelah fondasi ini kuat, analisis RCM yang mendalam harus diluncurkan pada satu atau dua aset kritis terpilih. Pendekatan bertahap ini memungkinkan pembelajaran dan penyesuaian sebelum dilakukan penskalaan. Ketiga, bagi asosiasi profesi dan lembaga pelatihan, disarankan untuk mengembangkan kurikulum dan program sertifikasi yang mencakup kedua metodologi (RCM dan TPM) serta pengetahuan tentang bagaimana mengintegrasikannya. Membekali para insinyur dan manajer masa depan dengan pemahaman yang lengkap tentang spektrum strategi pemeliharaan akan meningkatkan efektivitas mereka untuk merancang sistem yang tangguh dan sesuai lingkup.

DAFTAR REFERENSI

- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Strategies and Success Factors for Overcoming Challenges in TPM Implementation in Indian Manufacturing Industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(2), 123-147. <https://doi.org/10.1108/13552510810877674>
- Bakri, A., Rahim, A. R. A., & Yusof, N. M. (2014). Maintenance Management: Rationale of TPM as the Research Focus. *Applied Mechanics and Materials*, 1575–1582. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.1575>
- Ben-Daya, M. (2000). You May Need RCM to Enhance TPM Implementation. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 6(2), 82–85. <https://doi.org/10.1108/13552510010328086>
- Bon, A. T., & Ping, L. P. (2011). Implementation of Total Productive Maintenance (TPM) in Automotive industry. In *2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications*, 55–58. <https://doi.org/10.1109/ISBEIA.2011.6088881>
- Braglia, M., Castellano, D., & Gallo, M. (2019). A Novel Operational Approach to Equipment Maintenance: TPM and RCM Jointly at Work. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(4), 612–634. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2016-0018>
- Carrasco, F. J. C. (2016). Características de los Sistemas TPM Y RCM en la Ingeniería del Mantenimiento. *3C Tecnología*, 5(3), 68–75. <https://doi.org/10.17993/3CTECNO.2016.V5N3E19.68-75/>
- Castañeda, S., Rodriguez, S., Yildiz, O., Aranda, D., & Álvarez, J. C. B. (2023). Improvement Proposal to Increase the Availability of Machinery in a Food Company by Applying TPM, SMED and RCM Methodologies. <https://doi.org/10.1109/Coniiti61170.2023.10324242>
- Cedeño, J. A. B. (2022). How Equipment Impacts World Class Manufacturing. In *2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Smart Technologies (IESTEC)*, 92–99. <https://doi.org/10.1109/IESTEC54539.2022.00023>
- Cooke, F. L. (2003). Plant Maintenance Strategy: Evidence from Four British Manufacturing Firms. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 9(3), 239-249. <https://doi.org/10.1108/13552510310493630>
- Cua, K. O., Mckone, K. E., & Schroeder, R. G. (2001). Relationships Between Implementation of TQM, JIT, and TPM and Manufacturing Performance. *Journal of Operations Management*, 19(6), 675-694. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(01\)00066-3](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(01)00066-3)
- Darmawan, D. (2024). Distribution of Six Major Factors Enhancing Organizational Effectiveness. *Journal of Distribution Science*, 22(4), 47–58.
- Flores, B. L. M., García, J. E., Hurtado, J. C. C., & García, J. (2024). Barriers to the Implementation of Total Productive Maintenance (TPM): A Literature Review. In *Software Data Engineering for Network Elearning Environments: Analytics and Awareness Learning Services*, 467–472. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57996-7_80
- Fraser, K., Hvolby, H.-H., & Watanabe, C. (2011). A Review of the Three Most Popular Maintenance Systems: How Well is the Energy Sector Represented? *International Journal of Global Energy Issues*, 35, 287–309. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2011.045024>

- Gabbar, H. A., Yamashita, H., & Suzuki, K. (2006). Integrated Plant Maintenance Management Using Enhanced RCM Mechanism. *International Journal of performability engineering*, 2(4), 369–381.
- Gania, I., Fertsch, M., & Jayathilaka, K. R. K. (2018). Reliability Centered Maintenance Framework for Manufacturing and Service Company: Functional Oriented. *Destech Transactions on Engineering and Technology Research*. <https://doi.org/10.12783/DTETR/ICPR2017/17698>
- Gomaa, A. H. (2025). Achieving Maintenance Excellence in Manufacturing Through Integration of Lean Six Sigma and Proactive Approaches: A Case Study. *International Journal of Inventive Engineering and Sciences*, 12(3), 1–14. <https://doi.org/10.35940/ijies.B1099.12030325>
- Hansson, J., Backlund, F., & Lycke, L. (2003). Managing Commitment: Increasing the Odds for Successful Implementation of TQM, TPM or RCM. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 20(9), 993–1008. <https://doi.org/10.1108/02656710310500815>
- Hipkin, I. (1993). A Comparison of Two Maintenance Strategies: Reliability-Centred Maintenance and Total Productive Maintenance. *South African Journal of Business Management*, 24(4), 124–129. <https://doi.org/10.4102/SAJBM.V24I4.873>
- Hogan, J., Hardiman, F., & Naughton, M. D. (2013). An Overview of Contemporary and Individualised Approaches to Production Maintenance. In *Advances in Maintenance and Production Management*, 263–271. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2317-1_22
- Johnston, D. C. (2002). Measuring RCM Implementation. In *2002 IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 511–515. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2002.981695>
- Jonsson, P., & Lesshammar, M. (1999). Evaluation and Improvement of Manufacturing Performance Measurement Systems – The Role of OEE. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(1), 55–78. <https://doi.org/10.1108/01443579910244223>
- Mckone, K. E., Schroeder, R. G., & Cua, K. O. (2001). The Impact of Total Productive Maintenance Practices on Manufacturing Performance. *Journal of Operations Management*, 19(1), 39–58. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00049-6)
- Méndez, J. D. M., & Rodríguez, R. S. (2017). Total Productive Maintenance (TPM) As A Tool for Improving Productivity: A Case Study of Application in the Bottleneck of an Auto-Parts Machining Line. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1), 1013–1026. <https://doi.org/10.1007/S00170-017-0052-4>
- Michalek, J. M. (2011). Reliability Centered Maintenance (RCM) - A Cost Saving Measure. *Asset Management & Maintenance Journal*, 24(4), 40.
- Moscoso, C., Fernandez, A., Viacava, G., & Raymundo, C. (2019). Integral Model of Maintenance Management Based on TPM And RCM Principles to Increase Machine Availability in a Manufacturing Company. In *Advances in Manufacturing Systems and Technology*, 878–884. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25629-6_137
- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* (2nd Ed.). Industrial Press.
- Nachiappan, R. M., & Anantharaman, R. N. (2006). Evaluation of Overall Equipment

Effectiveness in a Beverage Industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(3), 308-319. <https://doi.org/10.1108/13552510610685092>

- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.
- Parida, A., & Kumar, U. (2006). Maintenance Performance Measurement (MPM): Issues and Challenges. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(3), 239-251. <https://doi.org/10.1108/13552510610685137>
- Patel, V. N. (2017). Total Productive Maintenance: A Detailed Study. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 316–319. <https://doi.org/10.22214/IJRASET.2017.2047>
- Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2008). Maintenance: An Evolutionary Perspective. In *Complex System Maintenance Handbook*, 21-48.
- Rausand, M., & Vatn, J. (1998). Reliability Centered Maintenance: A Tool for Improving Maintenance. In *Proceedings of the 6th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM6)*, 22-27.
- Risonarta, V. Y., & Wardhani, A. K. (2023). Increasing Profitability of a Manufacturing Company by Using the Total Productive Maintenance Approach: A Review. *International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*, 4(1), 39–50. <https://doi.org/10.21776/Mechta.2023.004.01.5>
- Rivera, M. R., Walker, D. L., & Daharsh, C. (2014). Achieving Maintenance Operations Excellence through the RCM Program. In *2014 IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2014.6798509>
- Rosita, K. K. M., & Rada, M. V. D. (2021). Equipment Reliability Optimization Using Predictive Reliability Centered Maintenance. In *2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 348–354. <https://doi.org/10.1109/ICIEA52957.2021.9436745>
- Sarje, S. (2017). Integration Of Maintenance Systems. In *MATEC Web of Conferences*, 211, 03010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821103010>
- Shaalán, A., Baglee, D., Knowles, M., & Marttonen-Arola, S. (2020). Development Of Modern Maintenance Management Strategy for Complex Manufacturing Assets. In *Engineering Assets and Public Infrastructures in the Age of Digitalization*, 493–499. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48021-9_55
- Shukla, K., Nefti-Meziani, S., & Davis, S. (2022). A Heuristic Approach On Predictive Maintenance Techniques: Limitations and Scope. *Advances In Mechanical Engineering*, 14(6), 1-14. <https://doi.org/10.1177/16878132221101009>
- Silva, R. F. Da, Melani, A. H. De A., Michalski, M. A. De C., & Souza, G. F. M. De. (2023). Reliability And Risk Centered Maintenance: A Novel Method For Supporting Maintenance Management. *Applied Sciences*, 13(19), 10605. <https://doi.org/10.3390/App131910605>
- Thun, J.-H. (2006). Maintaining Preventive Maintenance and Maintenance Prevention: Analysing the Dynamic Implications of Total Productive Maintenance. *System Dynamics Review*, 22(2), 163–179. <https://doi.org/10.1002/SDR.335>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207-

222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

Tsang, A. H. C. (2002). Strategic Dimensions of Maintenance Management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7-

39. <https://doi.org/10.1108/13552510210420577>

Wireman, T. (2005). *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*. Industrial Press.

Ying, L. (2008). CMMS Integrated System and its Application Based on TPM and RCM Synergic Relationship. World Sci-Tech R & D.