

Menuju Condition Based Maintenance yang Cerdas: Systematic Review atas Integrasi IoT dan Mesin Learning pada Alat Berat

Toward Intelligent Condition-Based Maintenance: A Systematic Review on IoT and Machine Learning Integration in Heavy Equipment

Aditya Kurniawan^{1*}, Kholilatul Wardani², Eki Ahmad Zaki Hamidi³

¹Akademi Teknik Alat Berat Indonesia

Jl. Laksda Adi Sucipto No.336 A, Kota Malang, Indonesia

²Politeknik Kota Malang

Jl. Raya Tlogowaru No.3, Tlogowaru, Kota Malang, Indonesia

³UIN Sunan Gunung Djati Bandung

Jalan A.H. Nasution No. 105, Kota Bandung, Indonesia

aditya@akabi.ac.id^{1*}, wardani@poltekom.ac.id², ekiahmadzaki@uinsgd.ac.id³

Abstrak - Condition-Based Maintenance (CBM) telah merevolusi manajemen aset dengan memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data secara real-time, khususnya di sektor alat berat. Integrasi teknologi Internet of Things (IoT) dan algoritma Machine Learning (ML) membuka peluang baru untuk diagnosis prediktif, deteksi anomali, dan optimasi pemeliharaan pada unit alat berat. Artikel ini menyajikan Systematic Literature Review (SLR) menggunakan metode PRISMA-based 4-step selection mengenai bagaimana IoT dan ML diintegrasikan secara arsitektural dan fungsional dalam sistem CBM untuk alat berat, dengan mengidentifikasi tren utama, tantangan, dan kesenjangan penelitian. Sebanyak 130 sumber ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2015–2025 dianalisis secara sistematis, menyoroti kemajuan dalam penerapan sensor, pemrosesan data real-time, pemodelan prediktif, dan strategi pemeliharaan terdesentralisasi. Tantangan utama yang ditemukan mencakup 1) kualitas data, 2) keterbatasan skalabilitas, 3) adaptabilitas model, serta 4) keamanan siber. Arah penelitian di masa depan diusulkan dengan menekankan pentingnya preprocessing, edge computing, skema pembelajaran ML secara online, pendekatan model hibrid untuk ML, dan infrastruktur IoT yang aman. Studi ini bertujuan untuk memberikan pandangan bagi peneliti dan praktisi dalam memahami pengembangan ekosistem CBM yang tangguh, terukur, dan cerdas khususnya untuk aplikasi industri berat.

Kata kunci: Condition-Based Maintenance, Internet of Things, Machine Learning, Alat Berat, Pemeliharaan Prediktif, Pemeliharaan Cerdas.

Abstract - Condition-Based Maintenance (CBM) has revolutionized asset management by enabling real-time, data-driven decision-making, particularly in the heavy equipment sector. The integration of Internet of Things (IoT) technologies and Machine Learning (ML) algorithms offers new possibilities for predictive diagnostics, anomaly detection, and maintenance optimization. This paper conducts a Systematic Literature Review (SLR) to examine how IoT and ML technologies are architecturally and functionally integrated within CBM systems for heavy machinery, identifying key trends, challenges, and research gaps. A total of 23 scholarly sources published between 2015 and 2025 were systematically analyzed, highlighting advances in sensor deployment, real-time data processing, predictive modeling, and decentralized maintenance strategies. Major challenges identified include data quality issues, scalability limitations, model adaptability, and cybersecurity concerns. Future research directions are proposed, emphasizing robust preprocessing pipelines, edge computing, online learning, hybrid modeling approaches, and secure IoT infrastructures.

Keywords: Condition-Based Maintenance, IoT, Machine Learning, Heavy Equipment, Predictive Maintenance, Smart Maintenance.

1. Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, Condition-Based Maintenance (CBM) telah muncul sebagai paradigma penting dalam manajemen aset industri, khususnya pada sektor-sektor yang sangat bergantung pada unit mesin bernilai tinggi seperti pertambangan, konstruksi, dan logistik [1], [2]. Berbeda dengan pemeliharaan preventif berbasis waktu (time based maintenance), CBM memungkinkan sistem melakukan pengambilan keputusan secara real-time dan berbasis data dengan menilai kondisi aktual komponen unit alat berat. Pendekatan semacam ini memberikan akurasi yang lebih baik dalam hal penggunaan sumber daya maintenance unit alat berat.

Kemajuan teknologi Internet of Things (IoT) telah merevolusi cara data operasional (misal unit alat berat) diperoleh [3]. Berbagai jenis sensor, termasuk sensor getaran, sensor suhu, sensor tekanan, dan sensor beban (load) kini telah terintegrasi secara baik ke dalam alat berat untuk memungkinkan pemantauan kondisi kesehatan engine secara berkelanjutan [4]. Jaringan sensor tersebut menghasilkan volume data yang besar dan bersifat heterogen (big data), yang pada dasarnya terlalu kompleks untuk dianalisis menggunakan metode tradisional.

Pada titik inilah Machine Learning (ML) memainkan peran krusial. Algoritma ML mampu mengekstraksi informasi yang kompleks tersebut agar dapat ditindaklanjuti, mengidentifikasi pola tersembunyi dalam sebuah data, mendeteksi anomali, serta memprediksi degradasi komponen dengan tingkat ketepatan yang semakin tinggi. Kombinasi antara IoT dan ML membentuk infrastruktur pemeliharaan cerdas yang mampu melakukan diagnosis prediktif serta memberikan rekomendasi tindakan preskriptif yang disesuaikan dengan konteks operasional setiap mesin. Misalnya prediksi pergantian komponen propeller shaft pada waktu tertentu sebelum terjadi kerusakan dan memberikan preskripsi waktu pergantian yang spesifik pada sebuah unit alat berat tertentu tergantung dengan kondisi unit tersebut [3].

Dalam konteks alat berat, penerapan CBM memiliki nilai yang sangat signifikan mengingat tingginya biaya downtime, sulitnya pelaksanaan inspeksi manual, serta risiko operasional yang besar. Mesin seperti wheel loader, excavator, dan dump truck bekerja dalam kondisi ekstrem di lapangan. Kondisi ini mencakup paparan debu, getaran berlebih, dan panas yang menimbulkan tantangan besar terhadap keandalan sensor IoT maupun ketahanan algoritma ML [4].

Untuk memahami lanskap penelitian terkini, artikel ini melakukan Systematic Literature Review (SLR) mengenai integrasi antara IoT dan ML dalam implementasi CBM pada alat berat. Secara khusus, tinjauan ini bertujuan untuk 1) Mengidentifikasi teknologi dan pendekatan algoritmik utama yang digunakan dalam penelitian terbaru. 2) Menganalisis bagaimana IoT dan ML diintegrasikan secara arsitektural dan fungsional dalam sistem CBM. 3) Mengulas berbagai tantangan yang dilaporkan dalam penerapan praktis, termasuk masalah kualitas data, keterbatasan waktu nyata (real-time constraints), dan tingkat keterjelasan model (explainability). 4) Mengusulkan kesenjangan penelitian (research gaps) serta arah pengembangan yang dapat mendorong kemajuan di bidang ini.

Dengan mensintesis 130 sumber ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2015 hingga 2025 (10 tahun terakhir), penelitian ini menyajikan gambaran terstruktur mengenai metode, implementasi, dan tren terkini dalam pemeliharaan cerdas (smart maintenance). Pada akhirnya, kajian ini diharapkan dapat menjadi informasi bagi para peneliti, praktisi, dan perancang sistem dalam membangun ekosistem CBM yang andal, skalabel, dan cerdas untuk aplikasi industri alat berat pada masa mendatang.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) dengan metode *PRISMA-based 4-step selection* (evidence-based research) di bidang teknik dan ilmu komputer. Metode ini diharapkan akan memberikan proses yang transparan, akurat, dan komprehensif dalam

mengidentifikasi, mengevaluasi, serta mensintesis literatur yang relevan terkait integrasi Internet of Things (IoT) dan Machine Learning (ML) dalam sistem Condition-Based Maintenance (CBM) untuk alat berat.

A. Pertanyaan Penelitian (Research Questions)

Untuk memandu proses tinjauan literatur, dirumuskan beberapa pertanyaan penelitian (Research Questions – RQs) sebagai berikut: RQ1: Teknologi IoT dan ML apa saja yang digunakan dalam sistem CBM? RQ2: Bagaimana teknologi tersebut diintegrasikan dalam konteks pemeliharaan alat berat? RQ3: Tantangan dan keterbatasan apa yang telah dilaporkan dalam implementasi sistem CBM berbasis IoT dan ML? RQ4: Isu penelitian terbuka dan arah pengembangan apa yang masih potensial untuk diteliti lebih lanjut?

B. Strategi Pencarian (Search Strategy)

Proses pencarian literatur dilakukan secara terstruktur pada berbagai basis data ilmiah terkemuka, antara lain IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Scopus, serta repositori ilmiah lainnya. String pencarian yang digunakan adalah sebagai berikut: (“Condition-Based Maintenance” OR “CBM”) AND (“IoT” OR “Internet of Things”) AND (“Machine Learning”) AND (“Heavy Equipment” OR “Heavy Machinery”)

Dengan string tersebut maka didapatkan 2 kelompok pasangan keyword sebagai berikut : kelompok keyword Condition-Based Maintenance yaitu : 1) Condition-Based Maintenance + IoT + Machine Learning + Heavy Equipment, 2) Condition-Based Maintenance + Internet of Things + Machine Learning + Heavy Equipment, 3) Condition-Based Maintenance + IoT + Machine Learning + Heavy Machinery, 4) Condition-Based Maintenance + Internet of Things + Machine Learning + Heavy Machinery dan kelompok keyword CBM yaitu : 1) CBM + IoT + Machine Learning + Heavy Equipment, 2) CBM + Internet of Things + Machine Learning + Heavy Equipment, 3) CBM + IoT + Machine Learning + Heavy Machinery, 4) CBM + Internet of Things + Machine Learning + Heavy Machinery

Batasan pencarian yang diterapkan meliputi: 1) Sumber ilmiah seperti artikel jurnal, prosiding konferensi, dan laporan teknis. 2) Publikasi berbahasa Inggris, dan 3) Diterbitkan dalam rentang waktu 2015 hingga 2025.

C. Kriteria Inklusi dan Eksklusi (Inclusion and Exclusion Criteria)

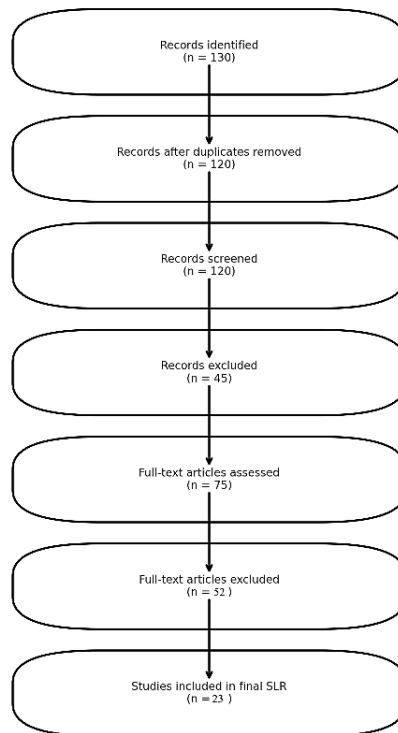
Kriteria Inklusi adalah sebagai berikut : 1) Artikel yang berfokus pada penerapan atau integrasi IoT dan ML dalam konteks CBM. 2) Studi yang melibatkan alat berat atau mesin industri dalam kondisi lapangan maupun simulasi. 3) Publikasi yang menyajikan kontribusi empiris, baik berupa eksperimen, simulasi, maupun penerapan nyata.

Kriteria Eksklusi adalah sebagai berikut : 1) Kajian literatur yang tidak menyajikan kontribusi teknis baru. 2) Artikel konseptual atau opini yang tidak memiliki validasi empiris. 3) Studi yang hanya menggunakan IoT atau hanya ML tanpa integrasi keduanya.

D. Proses Seleksi (Selection Process)

Pencarian awal dari berbagai basis data menghasilkan sekitar 130 artikel dari berbagai sumber. Setelah proses penghapusan duplikasi dan penyaringan berdasarkan judul serta abstrak untuk menilai relevansi, diperoleh 75 artikel yang dianggap memenuhi kriteria awal. Selanjutnya, dilakukan telaah penuh (full-text review) berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan, tersaring 23 sumber ilmiah yang digunakan dalam sintesis akhir penelitian ini.

Proses seleksi studi meliputi empat tahap utama berdasarkan *PRISMA-based 4-step selection*, yaitu 1) identifikasi, 2) penyaringan (screening), 3) penilaian kelayakan (eligibility assessment), dan 4) inklusi akhir (final inclusion), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 (diagram alur PRISMA).



Gambar 1. Diagram alur *PRISMA-based 4-step selection*

Pada tahap penyaringan awal berdasarkan judul dan abstrak, sebanyak 45 artikel dikeluarkan karena tidak relevan dengan integrasi IoT dan ML dalam CBM. Selanjutnya, dari 75 artikel yang ditelaah secara penuh, 52 artikel dieliminasi berdasarkan evaluasi mendalam terhadap kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan.

Rincian alasan penghapusan artikel pada tahap full-text review disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Rincian exclude artikel pada tahap full text review

Alasan Exclusion	Jumlah Artikel Excluded	Deskripsi
Literatur tidak menunjukkan kontribusi baru pada ilmu	18	Artikel hanya menyimpulkan beberapa teknik tanpa mengintroduksi teknik baru
Konseptual namun kurang bukti penerapan nyata pada alat berat	14	Hanya menyajikan model teoritis tanpa ada bukti implementasi pada unit alat berat
Hanya membahas salah satu (IoT atau ML) saja tanpa integrasi	20	Hanya pendekatan pada IoT atau ML saja tanpa integrasi lebih lanjut pada unit alat berat

3. Hasil dan Pembahasan Telaah Artikel

Hasil dari proses tinjauan sistematis ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai perkembangan penerapan Condition-Based Maintenance (CBM) pada peralatan berat, khususnya

melalui integrasi Internet of Things (IoT) dan Machine Learning (ML). Dari total 23 artikel terpilih yang memenuhi kriteria PRISMA-based selection, diperoleh temuan-temuan penting terkait tren teknologi, pendekatan metodologis, serta tantangan praktis dalam implementasi sistem pemeliharaan berbasis kondisi.

Analisis literatur menunjukkan bahwa penerapan CBM pada alat berat tidak hanya berfokus pada pemantauan kondisi komponen mekanis, tetapi juga pada integrasi arsitektur sensor cerdas dan model pembelajaran adaptif untuk mendukung pemeliharaan prediktif (predictive maintenance). Penelitian-penelitian terpilih kemudian diklasifikasikan ke dalam empat area utama, yaitu: 1) CBM dalam konteks peralatan berat, yang membahas prinsip dasar dan aplikasi praktis pada mesin seperti wheel loader, excavator, dan dump truck; 2) Teknologi IoT untuk CBM, yang berfokus pada pemanfaatan sensor dan jaringan komunikasi untuk akuisisi data secara real-time; 3) Pendekatan Machine Learning, yang mengulas metode analitik dan algoritma cerdas untuk deteksi anomali serta prediksi degradasi komponen; dan 4) Integrasi IoT dan ML terhadap CBM, yang menyoroti sinergi antara kedua teknologi dalam mewujudkan sistem pemeliharaan cerdas yang adaptif dan efisien.

Selain empat area utama tersebut, hasil kajian juga mengidentifikasi beberapa kesenjangan penelitian (research gaps) yang masih perlu ditangani, mencakup aspek kualitas data sensor, skalabilitas sistem, adaptabilitas model, eksplorasi model hibrid, validasi dan benchmarking, serta keamanan data dan privasi dalam ekosistem industri berbasis IoT.

3.1. Penerapan CBM pada Alat Berat

Peralatan berat seperti wheel loader, excavator, bulldozer, dan dump truck memiliki peran yang sangat penting dalam industri berdampak tinggi seperti pertambangan, konstruksi, kehutanan, dan pertanian [1], [5]. Mesin-mesin tersebut beroperasi dengan siklus beban yang intensif dan dalam lingkungan kerja yang keras, sehingga komponen-komponennya mengalami degradasi lebih cepat serta memiliki risiko kegagalan tak terduga yang lebih tinggi [6], [7].

Teknik pemantauan kondisi tradisional, seperti analisis getaran (vibration analysis) dan termografi (thermography), telah lama menjadi fondasi dalam praktik pemeliharaan alat berat karena mampu memberikan indikator awal terhadap potensi kerusakan mekanis [8]. Meskipun metode tersebut terbukti efektif, penerapan sistem pemantauan berkelanjutan berbasis Internet of Things (IoT) kini semakin berkembang untuk meningkatkan ketepatan diagnosis dan memperluas kemampuan deteksi dini terhadap gangguan operasional.

Dalam konteks ini, Condition-Based Maintenance (CBM) berfokus pada penilaian kondisi aktual komponen-komponen kritis secara real-time, seperti aktuator hidrolik, sistem transmisi daya (powertrain), sistem mesin, dan mekanisme pengereman [9]. Parameter-parameter penting seperti viskositas oli, tekanan silinder, tanda getaran, dan suhu mesin dipantau melalui sensor yang tertanam secara langsung pada unit peralatan [10], [11]. Tujuan utama dari pendekatan ini adalah melakukan pergeseran paradigma dari pemeliharaan rutin berbasis waktu menuju intervensi pemeliharaan adaptif yang didasarkan pada kondisi aktual komponen.

Dibandingkan dengan aset industri yang bersifat stasioner, alat berat menghadirkan tantangan tersendiri, antara lain tingkat mobilitas dan variasi medan operasi, keterbatasan konektivitas jaringan di lokasi terpencil, serta siklus operasi yang beragam — seluruhnya berkontribusi pada kompleksitas pemodelan dan deteksi anomali [5], [12]. Meskipun demikian, penerapan CBM pada peralatan berat menjanjikan peningkatan waktu operasi (uptime), pemanfaatan aset yang lebih optimal, serta peningkatan keselamatan kerja, terutama pada lingkungan dengan risiko tinggi di mana inspeksi manual sulit dilakukan [6].

Berbagai studi telah meneliti integrasi teknologi IoT dan Machine Learning (ML) untuk mengatasi tantangan-tantangan tersebut. Penelitian oleh Wardani dan Kurniawan [1] menelaah

peran kecerdasan buatan (artificial intelligence) dalam meningkatkan efektivitas pemeliharaan prediktif pada operasi alat berat. De La Fuente et al. [5] menunjukkan penerapan model ML dalam strategi pemeliharaan peralatan pertambangan bergerak, dengan hasil peningkatan signifikan terhadap akurasi prediksi kerusakan. Kerangka kerja pemantauan waktu nyata (real-time monitoring frameworks) yang dikembangkan oleh Nguyen dan Park [7] memungkinkan deteksi dini kesalahan melalui integrasi sensor tingkat lanjut.

Dalam konteks peralatan konstruksi, Zhou dan Zhang [6] menampilkan bagaimana kerangka kerja pemeliharaan prediktif cerdas dapat secara signifikan mengurangi gangguan operasional. Selain itu, Rahman dan Islam [9] menerapkan analitik data besar (big data analytics) untuk meningkatkan pemantauan kondisi pada mesin pertambangan berskala besar, sekaligus menunjukkan kemampuan skalabilitas sistem CBM dalam menangani data sensor yang beragam.

Secara keseluruhan, hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan sinergi antara IoT dan ML dalam sistem CBM untuk alat berat tidak hanya mampu mengurangi waktu henti yang tidak terencana (unplanned downtime), tetapi juga mengoptimalkan alokasi sumber daya. Hal ini pada akhirnya menghasilkan operasi yang lebih aman, efisien, dan hemat biaya [10], [11].

3.2. Teknologi IoT untuk CBM

Integrasi teknologi Internet of Things (IoT) ke dalam kerangka kerja Condition-Based Maintenance (CBM) telah secara signifikan mengubah paradigma pemeliharaan tradisional. Penerapan jaringan sensor yang beragam pada mesin memungkinkan pemantauan parameter kritis secara real-time, seperti getaran, suhu, tekanan, dan viskositas fluida [6], [7]. Sistem yang didukung IoT memfasilitasi akuisisi data secara berkelanjutan dari berbagai komponen operasional, sehingga memungkinkan pelaksanaan diagnosis prediktif serta deteksi anomali tanpa memerlukan inspeksi manual secara berkala [10], [11]. Transformasi ini mendukung pergeseran dari jadwal pemeliharaan berbasis waktu yang kaku menuju intervensi adaptif yang dipandu oleh kondisi aktual, yang pada akhirnya meminimalkan waktu henti (downtime) dan meningkatkan keandalan aset [12].

Sejumlah penelitian menyoroti peran penting IoT dalam pengembangan sistem CBM. Zhou dan Zhang [6] mengusulkan sebuah kerangka kerja pemeliharaan prediktif cerdas yang memanfaatkan teknik multi-sensor fusion untuk mengoptimalkan deteksi kesalahan pada peralatan konstruksi. Nguyen dan Park [7] mengembangkan platform pemantauan waktu nyata yang dapat dikonfigurasi ulang untuk peralatan berat dengan memanfaatkan perangkat IoT guna memastikan deteksi dini anomali dalam kondisi operasi yang dinamis. Sementara itu, Martins dan Costa [10] menunjukkan bahwa integrasi kerangka kerja IoT ke dalam protokol pemeliharaan mesin konstruksi secara signifikan mampu menurunkan tingkat kegagalan mesin yang tidak terduga serta mengurangi biaya layanan.

Inovasi terkini juga berfokus pada upaya mengatasi keterbatasan komunikasi dan komputasi yang melekat pada sistem IoT. Song et al. [12] mengeksplorasi strategi edge intelligence, yaitu pendekatan yang memproses data sensor lebih dekat dengan sumbernya untuk mengurangi latensi dan meningkatkan kemampuan pengambilan keputusan secara waktu nyata. Pendekatan ini sangat penting terutama pada lingkungan terpencil atau ekstrem di mana alat berat beroperasi. Selain itu, Becker et al. [13] mengusulkan model federated autoencoder yang disesuaikan untuk sistem Industrial IoT (IIoT), yang memungkinkan deteksi anomali secara desentralisasi tanpa mengorbankan privasi data suatu aspek penting dalam ekosistem industri kolaboratif.

Selain metrik kesehatan mesin tradisional, pendekatan terbaru juga menggabungkan analitik data tingkat lanjut dan platform berbasis cloud untuk mengorkestrasi pemeliharaan prediktif. Elvis dan Habeeb [14] dalam studi empirisnya mengintegrasikan teknik IoT dan Machine Learning (ML) untuk membangun model pemeliharaan prediktif yang berskala dan adaptif, yang

dapat diterapkan pada berbagai armada alat berat. Secara paralel, Horrell dan Reynolds [11] menekankan sinergi antara big data dan IoT dalam mentransformasi strategi pemeliharaan di berbagai industri berat.

Secara keseluruhan, perkembangan-perkembangan tersebut menunjukkan bahwa teknologi IoT tidak hanya berperan sebagai tulang punggung bagi penerapan CBM secara real-time, tetapi juga membuka peluang baru untuk membangun ekosistem pemeliharaan yang tangguh, cerdas, dan dapat diskalakan [14], [6], [7], [10], [12], [13], [11], [15].

3.3. Pendekatan Machine Learning

Integrasi teknik Machine Learning (ML) ke dalam sistem Condition-Based Maintenance (CBM) telah secara signifikan meningkatkan kemampuan untuk memprediksi dan memitigasi kegagalan peralatan. Algoritma ML mampu mengungkap pola tersembunyi dalam data sensor, memodelkan perilaku sistem yang kompleks, serta memproyeksikan tingkat degradasi komponen, sehingga kegiatan pemeliharaan dapat dijadwalkan secara tepat sebelum kegagalan terjadi [14], [5], [16]. Strategi pemeliharaan prediktif yang memanfaatkan ML telah banyak diakui karena kemampuannya dalam memprediksi potensi kerusakan berdasarkan aliran data historis maupun real-time [17]. Selain itu, teknik supervised learning khususnya menunjukkan performa yang kuat dalam prediksi kesehatan peralatan di berbagai bidang industri. Pendekatan pemantauan berbasis ambang batas (threshold-based monitoring) secara bertahap digantikan oleh analitik prediktif berbasis data yang menawarkan akurasi lebih tinggi serta kemampuan pembelajaran adaptif [4], [18].

Beragam teknik ML telah diterapkan untuk meningkatkan efektivitas sistem CBM. De La Fuente et al. [5] menerapkan algoritma supervised learning seperti decision tree dan support vector machine (SVM) guna memperbaiki strategi pemeliharaan prediktif pada peralatan pertambangan bergerak. Hossain dan Ahmed [16] melakukan studi komparatif terhadap berbagai classifier ML untuk mendeteksi kerusakan dan memperkirakan tingkat keparahannya, dan menemukan bahwa model ansambel (ensemble models) sering kali menunjukkan kinerja lebih baik dibandingkan model tunggal, terutama pada lingkungan operasional yang kompleks. Sementara itu, Kolokas et al. [4] mengusulkan kerangka kerja ML yang sangat efektif untuk estimasi kondisi aset industri, dengan memanfaatkan teknik feature engineering dan optimasi model guna memaksimalkan akurasi prediksi.

Model klasifikasi canggih yang dirancang khusus untuk alat berat juga telah dikembangkan. Al Bardan [3] memperkenalkan model ML hibrida yang menggabungkan metode statistik dengan neural network untuk mengklasifikasikan kegagalan peralatan dengan ketahanan yang lebih baik terhadap variasi profil operasi. Di sisi lain, De la Fuente et al. [19] meneliti penerapan arsitektur TinyML, yang memungkinkan deteksi anomali ringan (lightweight) dan waktu nyata langsung pada perangkat tertanam (embedded devices)—sebuah inovasi penting untuk lingkungan dengan keterbatasan sumber daya komputasi.

Integrasi antara IoT dan ML semakin memperkuat kerangka kerja CBM dengan memungkinkan aliran data sensor yang berkelanjutan untuk digunakan dalam sistem pembelajaran daring (online learning systems) [14], [10], [15]. Sinergi ini mendukung pembaruan model adaptif secara berkelanjutan, sehingga sistem dapat menyesuaikan diri terhadap pola degradasi yang berubah dalam kondisi operasi nyata. Martins dan Costa [10] menunjukkan bahwa penggabungan infrastruktur IoT dengan model ML dapat secara signifikan mengurangi waktu henti tak terencana (unscheduled downtime) pada armada peralatan konstruksi.

Secara keseluruhan, pendekatan berbasis ML menyediakan kecerdasan komputasional (computational intelligence) yang dibutuhkan untuk mentransformasi CBM dari sistem pemantauan statis menjadi sistem pemeliharaan dinamis dan prediktif. Transformasi ini tidak hanya meningkatkan keandalan operasional dan efisiensi biaya, tetapi juga memperkuat keselamatan kerja di berbagai sektor industri berat [5], [3], [16], [19].

3.4. Integrasi IoT dan Machine Learning Terhadap CBM

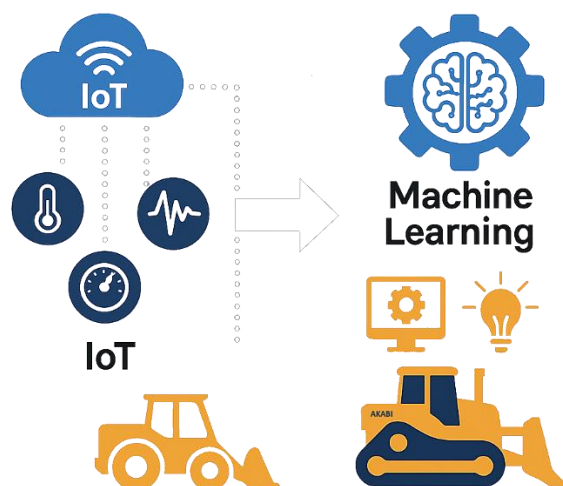
Konvergensi teknologi Internet of Things (IoT) dan Machine Learning (ML) telah secara fundamental meningkatkan kemampuan sistem Condition-Based Maintenance (CBM). IoT memungkinkan akuisisi data secara real-time melalui jaringan sensor terdistribusi, sementara algoritma ML menyediakan kapasitas analitik untuk menafsirkan pola operasional yang kompleks serta memprediksi kegagalan peralatan dengan tingkat presisi yang tinggi [14], [10], [21]. Integrasi keduanya memfasilitasi pergeseran paradigma dari pemeliharaan reaktif menuju pemeliharaan prediktif, yang memungkinkan manajer aset mengambil keputusan berbasis data sesuai dengan kondisi kesehatan aktual peralatan [6].

Berbagai penelitian telah berhasil menunjukkan potensi sinergis antara IoT dan ML dalam penerapan CBM. Elvis dan Habeeb [14] mengusulkan sebuah model pemeliharaan prediktif yang memanfaatkan sensor IoT untuk memantau kondisi mesin secara berkelanjutan dan menggunakan algoritma ML untuk memprediksi degradasi komponen. Pendekatan mereka menekankan aspek skalabilitas dan penerapan di dunia nyata, sehingga dapat menjadi model acuan bagi implementasi industri. Demikian pula, Zhou dan Zhang [6] mengembangkan sistem pemeliharaan prediktif cerdas untuk peralatan konstruksi, yang menunjukkan bahwa penggabungan data multi-sensor melalui model ML secara signifikan meningkatkan kemampuan deteksi kesalahan serta menurunkan biaya pemeliharaan.

Martins dan Costa [10] mengeksplorasi arsitektur pemeliharaan prediktif berbasis IoT yang dirancang khusus untuk peralatan konstruksi, dengan mengintegrasikan aliran data sensor ke dalam classifier ML guna meningkatkan kemampuan deteksi dini anomali. Temuan mereka menegaskan pentingnya sinkronisasi antara pemilihan sensor, pra-pemrosesan data, dan penyyetelan model untuk memaksimalkan kinerja prediktif. Selain itu, Temer dan Pehl [15] menganalisis evolusi kerangka kerja pemantauan cerdas, dan menunjukkan bahwa sinergi IoT–ML tidak hanya mengoptimalkan waktu operasi peralatan (equipment uptime), tetapi juga memungkinkan penerapan strategi pemeliharaan adaptif dalam lingkungan industri yang dinamis dan kompleks.

Dengan demikian, integrasi IoT dan ML dalam sistem CBM merepresentasikan pergeseran paradigma menuju ekosistem pemeliharaan cerdas (intelligent maintenance ecosystems). Sinergi ini memberdayakan organisasi untuk melaksanakan intervensi proaktif, meminimalkan gangguan operasional, memperpanjang siklus hidup aset, serta meningkatkan keselamatan kerja [14], [6], [10], [15]. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas sistem industri modern, integrasi yang mulus antara IoT dan ML menjadi elemen krusial dalam menjaga keandalan serta daya saing pada sektor-sektor industri dengan tingkat dampak tinggi.

Integrasi konseptual antara IoT dan ML untuk CBM pada peralatan berat digambarkan secara ilustratif pada Gambar 2.



Gambar 2. Integrasi konseptual antara IoT dan ML untuk CBM

3.5. Kesenjangan Penelitian dan Arah Penelitian Masa Depan

Meskipun integrasi Internet of Things (IoT) dan Machine Learning (ML) telah meningkatkan kemampuan pemeliharaan prediktif secara signifikan, metode analisis keandalan tradisional dan diagnosis kesalahan (fault diagnosis) tetap memiliki peran penting untuk memastikan keterjelasan model (model interpretability) serta kepercayaan operasional (operational trust) [20]. Namun demikian, aspek-aspek tersebut masih relatif kurang dieksplorasi dalam kerangka kerja Condition-Based Maintenance (CBM) modern.

Terlepas dari berbagai kemajuan yang telah dicapai dalam integrasi IoT dan ML untuk CBM pada peralatan berat, masih terdapat sejumlah kesenjangan penelitian (research gaps) yang krusial dan perlu diatasi agar potensi penuh dari sistem pemeliharaan cerdas dapat terwujud. Masalah tersebut meliputi

1. Tantangan Kualitas dan Heterogenitas Data.

Kerangka kerja CBM saat ini sangat bergantung pada kualitas data sensor. Namun, peralatan berat di dunia nyata beroperasi dalam kondisi yang sangat bervariasi, menghasilkan data yang sering kali berisik (noisy), tidak lengkap (incomplete), dan heterogen. Sebagian besar penelitian terdahulu [14], [6], [10], [15] mengasumsikan bahwa data masukan selalu bersih dan konsisten, padahal hal tersebut jarang mencerminkan realitas operasional di lapangan. Penelitian di masa mendatang perlu mengembangkan alur pra-pemrosesan data yang tangguh (robust data preprocessing pipelines), teknik penyaringan anomali (anomaly filtering), serta strategi adaptasi domain (domain adaptation) untuk meningkatkan keandalan model di berbagai lingkungan operasional.

2. Keterbatasan Skalabilitas dan Pemrosesan Waktu Nyata

Meskipun sejumlah arsitektur IoT-ML telah diusulkan [6], [7], [12], sebagian besar masih berfokus pada implementasi berskala kecil. Penerapan CBM secara luas pada armada peralatan berat menghadapi tantangan besar terkait latensi komunikasi, konsumsi bandwidth, dan kemampuan inferensi waktu nyata.

Integrasi paradigma komputasi tepi (edge computing), seperti penerapan model TinyML [19] dan kerangka kerja edge-intelligence [12], menjadi sangat penting untuk memungkinkan pemrosesan terdesentralisasi berlatensi rendah yang dapat dilakukan langsung pada unit mesin atau di dekatnya.

3. Generalisasi dan Adaptabilitas Model

Model Machine Learning dalam sistem CBM yang ada umumnya dilatih menggunakan dataset statis [5], [16]. Namun, profil operasional peralatan berat berubah seiring waktu, menyebabkan pergeseran data (data drift) dan penurunan performa model.

Oleh karena itu, arsitektur CBM masa depan perlu mengintegrasikan kemampuan pembelajaran daring (online learning), pembaruan model secara inkremental (incremental model updates), serta pendekatan transfer learning agar model mampu beradaptasi terhadap pola operasional baru tanpa memerlukan pelatihan ulang yang ekstensif.

4. Keterbatasan Eksplorasi Pendekatan Model Hibrida

Masih terdapat kesenjangan signifikan dalam pemanfaatan model hibrida, yaitu model yang menggabungkan simulasi berbasis fisika (physics-based simulations) dengan model pembelajaran berbasis data (data-driven ML models) [14], [3], [10].

Dengan mengintegrasikan pengetahuan domain, seperti kinematika sistem hidrolik atau termodinamika pendinginan mesin, ke dalam model pembelajaran, CBM dapat mencapai tingkat interpretabilitas, keandalan, dan penjelasan kesalahan (fault explainability) yang lebih tinggi — aspek penting untuk penerapan di lingkungan industri.

5. Kekurangan Validasi dan Benchmarking

Banyak kerangka kerja CBM berbasis IoT-ML yang belum memiliki standar benchmarking lintas skenario operasional [14], [10], [11].

Penelitian ke depan perlu mengembangkan dataset publik bersama (shared public datasets) untuk pemeliharaan alat berat, menetapkan protokol evaluasi yang konsisten, serta mengadopsi teknik Explainable Artificial Intelligence (XAI) guna memvalidasi keputusan model, terutama dalam konteks yang berkaitan dengan keselamatan operasional.

6. Isu Keamanan Siber dan Privasi Data

Dengan meningkatnya konektivitas sistem CBM berbasis IoT, keamanan data dan privasi informasi menjadi perhatian utama. Hanya sedikit penelitian yang secara memadai membahas kerentanan potensial dalam jaringan sensor dan alur inferensi ML [13], [15].

Riset mendatang perlu diarahkan pada pengembangan protokol transmisi data yang aman, mekanisme verifikasi integritas berbasis blockchain, serta arsitektur federated learning untuk menjamin ketahanan (resilience) dan keandalan (trustworthiness) sistem CBM di masa depan.

3.6. Pembahasan Research Questions

RQ1: Teknologi IoT dan ML apa saja yang digunakan dalam sistem CBM?

Tinjauan ini menemukan bahwa berbagai teknologi Internet of Things (IoT) telah banyak digunakan dalam sistem Condition-Based Maintenance (CBM), di antaranya sensor getaran (vibration sensors), pemantau suhu (temperature monitors), transduser tekanan (pressure transducers), dan penganalisis kualitas oli (oil quality analyzers) [6], [7], [10].

Dari sisi Machine Learning (ML), sejumlah teknik seperti supervised classifiers (misalnya decision tree dan support vector machine), ensemble models, serta pendekatan deep learning telah diterapkan secara luas untuk mendukung diagnosis prediktif (predictive diagnostics) [5], [16], [19].

RQ2: Bagaimana teknologi-teknologi tersebut diintegrasikan dalam konteks pemeliharaan alat berat?

Integrasi IoT dan ML dilakukan melalui pemanfaatan jaringan sensor untuk mengumpulkan data operasional secara berkelanjutan dari berbagai komponen alat berat. Data tersebut kemudian diproses melalui tahap pra-pemrosesan (preprocessing) sebelum dimasukkan ke dalam model ML

yang berfungsi untuk deteksi anomali, klasifikasi kerusakan, dan prediksi umur pakai tersisa (Remaining Useful Life/RUL).

Kerangka integrasi yang digunakan bervariasi, mulai dari arsitektur terpusat berbasis cloud (cloud-based) hingga solusi desentralisasi berbasis edge intelligence [14], [6], [12].

RQ3: Apa saja tantangan dan keterbatasan yang dilaporkan dalam implementasi sistem CBM berbasis IoT dan ML?

Beberapa tantangan utama yang dilaporkan dalam implementasi sistem CBM berbasis IoT-ML mencakup: 1) Menjaga kualitas data dalam lingkungan operasional yang keras dan dinamis, 2) Mengelola latensi komunikasi dan keterbatasan bandwidth di lokasi terpencil, 3) Menyesuaikan model terhadap kondisi operasi yang berubah-ubah, 4) Mengatasi risiko keamanan siber (cybersecurity), serta 4) Kekurangan protokol evaluasi yang terstandar untuk validasi performa sistem [14], [5], [10], [12], [13].

RQ4: Apa saja isu penelitian terbuka dan arah penelitian potensial untuk masa depan?

Penelitian di masa mendatang perlu difokuskan pada pengembangan kerangka kerja CBM yang tangguh dan dapat diskalakan (robust and scalable frameworks) dengan mengintegrasikan: 1) Edge computing untuk pemrosesan data secara lokal dan efisien, 2) Federated learning guna menjaga privasi data antarperangkat, 3) Model hibrida (physics-ML models) yang menggabungkan model fisik dan pembelajaran mesin, 4) Teknik adaptasi daring (online adaptation) untuk memperbarui model secara dinamis, serta 5) Infrastruktur IoT yang aman untuk menjamin keandalan sistem.

Upaya dalam mengatasi berbagai kesenjangan tersebut akan menjadi kunci untuk membangun sistem pemeliharaan otonom yang tangguh, cerdas, dan berkelanjutan pada peralatan berat [22], [23].

4. Kesimpulan

Konvergensi teknologi Internet of Things (IoT) dan Machine Learning (ML) menandai titik penting dalam evolusi Condition-Based Maintenance (CBM) pada peralatan berat. Kajian sistematis ini menyoroti bagaimana fusi antara jaringan sensor real-time dan algoritma cerdas telah mentransformasi praktik pemeliharaan dari pendekatan reaktif menjadi disiplin yang proaktif dan prediktif, yang mampu melindungi keberlangsungan operasi industri dengan tingkat ketepatan yang belum pernah dicapai sebelumnya.

Namun, perjalanan menuju sistem pemeliharaan yang benar-benar cerdas masih jauh dari selesai. Sejumlah tantangan masih perlu diatasi, antara lain peningkatan kemampuan adaptasi model, penjaminan keamanan data dalam ekosistem IoT berskala besar, integrasi pengetahuan fisik yang spesifik terhadap domain industri, serta pengembangan kerangka pemeliharaan yang bersifat skalabel dan mampu belajar secara mandiri (self-learning frameworks). Kesenjangan-kesenjangan ini bukanlah hambatan, melainkan undangan untuk berinovasi lebih lanjut.

Masa depan CBM terletak pada pembangunan ekosistem pemeliharaan otonom dan cerdas, di mana peralatan berat mampu memantau, mendiagnosis, bahkan mengoptimalkan kinerjanya secara mandiri. Pencapaian visi ini membutuhkan kolaborasi lintas disiplin yang kuat antara bidang rekayasa mekanik, ilmu data, keamanan siber, dan desain sistem. Dengan menjembatani kesenjangan penelitian yang ada saat ini, sistem pemeliharaan cerdas di masa depan tidak hanya akan memperpanjang umur aset dan meningkatkan keselamatan operasional, tetapi juga akan menjadi fondasi bagi dunia industri yang lebih cerdas, efisien, dan berkelanjutan.

Arah ke depan sudah jelas: mentransformasikan pemeliharaan menjadi kecerdasan, dan mengubah kecerdasan menjadi dampak yang berkelanjutan.

Referensi

- [1] K. Wardani, A. Kurniawan. "Enhancing Heavy Equipment Maintenance with Artificial Intelligence," IEEE, 2023.
- [2] P. Kumar, R. Tiwari. "A review: multiplicative faults and model-based condition monitoring strategies for fault diagnosis in rotary machines," Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (Springer), 2023.
- [3] S. Al Bardan. "Advanced Failure Classification Models for Construction Machinery," DiVA Portal, 2025.
- [4] A. Kolokas, P. Mallioris, M. Koutsiantzis, C. Bialas. "Effective Machine Learning Solution for State Classification and Productivity Identification," MDPI, 2024.
- [5] R. De La Fuente, L. Radrigan, A.S. Morales. "Enhancing Predictive Maintenance in Mining Mobile Machinery through a Hierarchical Inference Network," IEEE Access, 2025.
- [6] L. Zhou, H. Zhang. "Smart Predictive Maintenance of Construction Equipment with IoT Sensors and Deep Learning," Automation in Construction, 2022.
- [7] T. Nguyen, M. Park. "Real-Time Monitoring System for Heavy Equipment Fault Detection using IoT and Deep Learning," Sensors, 2023.
- [8] V. Klathae, P. Ruangchoengchum. "The Predictable Maintenance 4.0 by Applying Digital Technology," Review of Integrative Business and Economics Research, 2019. <4>
- [9] M. Rahman, A. Islam. "Big Data Analytics in Condition Monitoring of Heavy Industrial Machinery," Procedia Manufacturing, 2020.
- [10] F. Martins, J. Costa. "IoT-Based Predictive Maintenance for Construction Heavy Machinery," Automation in Construction, 2019.
- [11] M. Horrell, L. Reynolds. "Data Science in Heavy Industry and the Internet of Things," Harvard Data Science Review, 2020.
- [12] C. Song, S. Liu, G. Han, P. Zeng, H. Yu. "Edge-intelligence-based condition monitoring of beam pumping units under heavy noise in Industrial IoT for Industry 4.0," IEEE Internet of Things Journal, 2022.
- [13] J. Becker, F. Müller, T. Frank. "Federated autoencoder for IIoT," Journal of Industrial Information Integration, 2022.
- [14] G. Elvis, A. Habeeb. "Developing a Predictive Maintenance Model Using IoT and Machine Learning," ResearchGate, 2025.
- [15] E. Temer, H.J. Pehl. "Moving Toward Smart Monitoring and Predictive Maintenance of Downhole Tools Using IIoT," OnePetro Conference, 2017.
- [16] M. Hossain, S. Ahmed. "A Comparative Study of Machine Learning Techniques for Heavy Equipment Fault Prediction," MDPI Machines, 2023.
- [17] E. Regnier, B. Hudgens. "Condition-Based Maintenance Implementation and Potential in USMC Ground Transport," DTIC, 2022.
- [18] A. Mohammed, H. Rahman, S. Omar. "ML-based CBM for electrical motors," Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023.
- [19] J. de la Fuente, R. Cañas, H. López. "TinyML for mining maintenance," Proc. IEEE Industrial Electronics Conf., 2024.
- [20] P. Odeyar, D.B. Apel, R. Hall, B. Zon, K. Skrzypkowski. "A Review of Reliability and Fault Analysis Methods for Heavy Equipment and Their Components Used in Mining," ResearchGate, 2022.
- [21] V. Klathae, P. Ruangchoengchum. "The Predictable Maintenance 4.0 by Applying Digital Technology," Review of Integrative Business and Economics Research, 2019.
- [22] S.D. Siregar. "Implementation of Maintenance Strategy and Asset Health Monitoring on Underground GBC Production Loader," ITB Digilib, 2023.
- [23] E. Regnier, B. Hudgens. "Condition-Based Maintenance Implementation and Potential in USMC Ground Transport," DTIC, 2022.