

BAB 2 - KAJIAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Secara teoritis, sistem maintenance modern dalam industri alat berat telah mengalami perkembangan dari pendekatan preventive maintenance berbasis waktu (time-based maintenance) menuju pendekatan berbasis kondisi atau Condition-Based Monitoring (CBM). Perubahan ini didorong oleh kebutuhan industri untuk meningkatkan keandalan peralatan (reliability) serta menurunkan biaya downtime pada operasi yang bersifat kontinu dan kritis.

Menurut Kumar (2020), dalam konsep reliability engineering, performa aset industri sangat dipengaruhi oleh efektivitas strategi maintenance dalam mengendalikan kegagalan (failure) serta meminimalkan waktu perbaikan (repair time). Oleh karena itu, pendekatan berbasis kondisi seperti CBM menjadi strategi penting dalam meningkatkan reliability dan availability peralatan.

Carvalho et al. (2020) menyatakan bahwa CBM merupakan bagian dari konsep smart maintenance berbasis data (data-driven maintenance) yang mengandalkan integrasi sensor, histori data, serta condition monitoring untuk mengidentifikasi degradasi peralatan secara dini. Pendekatan ini memungkinkan proses maintenance dilakukan secara lebih tepat sasaran karena keputusan tidak lagi bergantung pada interval waktu, melainkan berdasarkan kondisi aktual komponen.

Dalam sistem hidrolik alat berat, lubricant analysis menjadi salah satu metode utama dalam CBM karena mampu merepresentasikan kondisi internal sistem melalui fluida kerja. Totten (2021) menjelaskan bahwa parameter pelumas seperti wear metal, viskositas, dan tingkat kontaminasi dapat digunakan untuk mengidentifikasi gejala awal keausan komponen, degradasi pelumas, maupun potensi kegagalan sistem.

Dengan demikian, lubricant analysis tidak hanya berfungsi sebagai metode inspeksi fluida, tetapi juga sebagai indikator kondisi kesehatan sistem hidrolik (health condition indicator) yang mendukung implementasi CBM secara lebih efektif.

Dalam penelitian ini, lubricant analysis digunakan sebagai metode untuk memantau kondisi fluida dan mendeteksi indikasi keausan pada sistem hidraulik unit Komatsu HD785-7. Data hasil analisis tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan maintenance berbasis kondisi.

Implementasi pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan reliability sistem melalui penurunan tingkat kegagalan (failure rate) dan downtime unit, sehingga berdampak langsung terhadap peningkatan Physical Availability (PA) unit dump truck Komatsu HD785-7.

Berdasarkan uraian tersebut, lubricant analysis berperan sebagai bagian integral dari strategi CBM dalam mendukung peningkatan reliability sistem hidraulik. Melalui deteksi dini terhadap keausan, kontaminasi, dan degradasi pelumas, pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan efektivitas maintenance serta mendukung peningkatan Physical Availability (PA) unit.

2.2 Maintenance Management

Maintenance management merupakan proses pengelolaan kegiatan pemeliharaan yang bertujuan untuk menjaga kondisi peralatan agar tetap berada dalam kondisi operasional optimal sesuai dengan fungsi dan target produksi perusahaan. Dalam industri pertambangan, sistem maintenance memiliki peranan yang sangat penting mengingat tingginya tingkat utilisasi alat berat serta besarnya dampak downtime terhadap produktivitas operasional.

Perkembangan teknologi Industry 4.0 telah mendorong transformasi sistem maintenance dari pendekatan tradisional menuju pendekatan yang lebih berbasis data. Menurut Carvalho et al. (2020), sistem maintenance saat ini berkembang dari corrective maintenance dan preventive maintenance menuju predictive maintenance yang memanfaatkan data kondisi peralatan untuk meningkatkan reliability, availability, dan efisiensi operasional.

Sejalan dengan hal tersebut, von Enzberg (2020) menjelaskan bahwa konsep smart maintenance yang mengintegrasikan predictive analytics dan condition monitoring memungkinkan proses pemeliharaan dilakukan secara lebih efisien melalui pemanfaatan data real-time dan analisis kondisi aset secara berkelanjutan. Pendekatan

ini mendukung pengambilan keputusan maintenance yang lebih cepat, akurat, dan berbasis kondisi aktual peralatan.

Secara umum, strategi maintenance dalam industri dibagi menjadi tiga pendekatan utama, yaitu corrective maintenance, preventive maintenance, dan predictive maintenance. Corrective maintenance merupakan metode perawatan yang dilakukan setelah terjadi kegagalan (failure), sehingga bersifat reaktif dan sering menyebabkan downtime yang tidak terencana. Preventive maintenance dilakukan secara berkala berdasarkan interval waktu atau jam operasi tertentu tanpa mempertimbangkan kondisi aktual peralatan, sehingga bertujuan untuk mencegah kerusakan melalui aktivitas inspeksi dan penggantian komponen secara terjadwal.

Sementara itu, predictive maintenance merupakan pendekatan yang menggunakan data kondisi aktual serta analisis prediktif untuk memperkirakan potensi kegagalan sebelum terjadi kerusakan. Pendekatan ini memungkinkan aktivitas maintenance dilakukan secara lebih tepat waktu dan efisien karena berbasis pada kondisi aktual peralatan, sehingga dapat meminimalkan risiko breakdown dan downtime yang tidak terencana.

Condition-Based Monitoring (CBM) merupakan bagian dari pendekatan predictive maintenance yang berfokus pada pemantauan kondisi aktual peralatan melalui parameter tertentu. Dalam CBM, keputusan maintenance dilakukan berdasarkan hasil analisis kondisi komponen sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan secara lebih tepat, efisien, dan terencana dibandingkan pendekatan berbasis waktu.

Penerapan CBM memungkinkan deteksi dini terhadap potensi kerusakan, sehingga dapat mengurangi risiko failure, menekan downtime, serta meningkatkan reliability peralatan. Dengan demikian, CBM menjadi salah satu strategi kunci dalam mendukung peningkatan efektivitas sistem maintenance modern di industri pertambangan.

2.3 Condition-Based Monitoring

Condition-Based Monitoring (CBM) merupakan strategi maintenance yang berfokus pada pemantauan kondisi aktual peralatan melalui analisis parameter operasional secara berkala. Pendekatan ini memungkinkan proses pengambilan keputusan maintenance dilakukan berdasarkan kondisi nyata komponen, sehingga tindakan perawatan tidak lagi bergantung pada interval waktu, melainkan pada kondisi aktual peralatan.

Perkembangan teknologi Industry 4.0 telah mendorong transformasi CBM menjadi pendekatan yang lebih berbasis data (data-driven maintenance). Menurut Carvalho et al. (2020), implementasi CBM modern memanfaatkan sensor, data historis, dan teknik data analytics untuk mendeteksi degradasi peralatan secara dini. Dengan demikian, CBM tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi juga menjadi bagian penting dalam mendukung predictive maintenance serta pengambilan keputusan maintenance yang lebih presisi.

Sejalan dengan hal tersebut, Elattar (2021) menjelaskan bahwa CBM menggunakan parameter kondisi mesin seperti getaran, temperatur, dan kondisi pelumasan untuk mengevaluasi machine health condition, sehingga potensi failure dapat diidentifikasi sebelum terjadi kerusakan. Pendekatan ini menekankan pentingnya data kondisi aktual sebagai dasar dalam menentukan strategi pemeliharaan.

Selain itu, Singh et al. (2022) menyatakan bahwa CBM merupakan komponen penting dalam smart maintenance system karena berkontribusi dalam meningkatkan reliability, menurunkan downtime, serta meningkatkan availability peralatan melalui deteksi dini terhadap anomali sistem.

Dalam implementasinya, CBM dapat dilakukan melalui berbagai teknik monitoring seperti vibration analysis, thermography, ultrasonic testing, dan lubricant analysis. Pemilihan metode tersebut disesuaikan dengan karakteristik sistem dan jenis kegagalan yang ingin dideteksi.

Dalam konteks penelitian ini, lubricant analysis dipilih sebagai metode CBM karena sistem hidraulik pada unit Komatsu HD785-7 sangat bergantung pada kondisi fluida kerja. Parameter pelumasan seperti kontaminasi, viskositas, dan wear metal menjadi indikator utama dalam mendeteksi degradasi sistem secara dini, sehingga metode ini dianggap paling relevan untuk memantau kondisi kesehatan sistem hidraulik.

2.4 Lubricant Analysis Program

Lubricant analysis merupakan metode condition monitoring yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi pelumas melalui identifikasi kontaminasi, degradasi oli, serta indikasi keausan komponen pada sistem mekanis maupun hidraulik. Metode ini menjadi bagian penting dalam strategi maintenance modern karena mampu

memberikan informasi dini mengenai kondisi internal peralatan sebelum terjadi kegagalan (failure).

Menurut Wakiru et al. (2020), perkembangan teknologi condition monitoring telah memperluas peran lubricant analysis sebagai sumber data utama dalam pengambilan keputusan maintenance. Parameter seperti partikel keausan (wear debris), viskositas, dan tingkat kontaminasi digunakan untuk mengevaluasi kondisi peralatan secara lebih akurat dan mendukung implementasi maintenance berbasis kondisi.

Sejalan dengan hal tersebut, Totten (2021) menjelaskan bahwa lubricant analysis merupakan bagian dari tribological monitoring yang mampu mengidentifikasi perubahan sifat fluida serta mendeteksi indikasi awal keausan komponen mekanis. Hal ini menjadikan lubricant analysis sebagai elemen penting dalam sistem maintenance berbasis reliability engineering.

Selain itu, Fitch (2020) menyatakan bahwa perkembangan teknologi analisis fluida modern memungkinkan lubricant analysis tidak hanya digunakan untuk deteksi kontaminasi, tetapi juga sebagai alat prediksi kegagalan melalui pendekatan condition trend analysis yang berbasis data historis.

Secara konseptual, perkembangan tersebut menunjukkan bahwa lubricant analysis telah berevolusi dari metode inspeksi kondisi fluida menjadi alat analisis prediktif yang mendukung pengambilan keputusan maintenance secara lebih proaktif.

Dalam implementasinya, Lubricant Analysis Program terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu pengambilan sampel oli, pengujian laboratorium, analisis parameter pelumas, analisis tren data, penentuan warning limit, serta penetapan tindakan korektif berdasarkan hasil analisis. Rangkaian proses ini memungkinkan data kondisi pelumas diolah menjadi informasi yang dapat digunakan dalam sistem CBM untuk mendukung deteksi dini terhadap potensi kegagalan.

Penerapan Lubricant Analysis Program yang efektif dapat meningkatkan kemampuan deteksi dini terhadap kontaminasi dan keausan abnormal (abnormal wear), sehingga dapat mengurangi risiko unscheduled breakdown, menekan downtime unit, serta meningkatkan reliability sistem hidraulik pada unit dump truck Komatsu HD785-7.

2.5 Sistem Hidraulik HD785-7

Sistem hidraulik pada unit dump truck Komatsu HD785-7 merupakan salah satu sistem utama yang berfungsi untuk mentransmisikan tenaga melalui fluida bertekanan guna mengoperasikan berbagai komponen seperti steering system, brake system, hoist cylinder, suspension system, dan transmission control. Sistem ini bekerja berdasarkan prinsip tekanan fluida yang dihasilkan oleh pompa hidraulik dan disalurkan melalui valve serta actuator untuk menghasilkan gerakan mekanis dengan tenaga besar dan kontrol yang presisi.

Kinerja sistem hidraulik memiliki pengaruh langsung terhadap produktivitas, keselamatan operasi, serta reliability unit dalam kegiatan pertambangan. Oleh karena itu, stabilitas sistem ini menjadi faktor kritis dalam menjaga performa operasional alat berat.

Pada sistem suspensi hidropneumatik HD785-7, Purwono et al. (2019) menjelaskan bahwa kombinasi fluida hidraulik dan gas nitrogen digunakan untuk meredam getaran serta menahan beban unit selama operasi. Gangguan seperti kebocoran valve core atau penurunan tekanan nitrogen dapat menyebabkan peningkatan getaran, menurunkan stabilitas unit, serta meningkatkan risiko kerusakan komponen yang berdampak pada penurunan reliability.

Pada sisi lain, Setiawan et al. (2024) menyatakan bahwa sistem transmisi Torqflow menggunakan tekanan oli hidraulik sebagai media pengendali perpindahan daya dengan rentang tekanan operasional tertentu. Ketidakstabilan tekanan oli dapat mempengaruhi efisiensi perpindahan gigi serta menurunkan kinerja sistem transmisi secara keseluruhan.

Selain itu, Tarigan et al. (2023) menambahkan bahwa gangguan pada sistem suspensi belakang seperti kebocoran hidraulik dapat menyebabkan unscheduled breakdown dan meningkatkan downtime unit, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan Physical Availability (PA).

Berdasarkan berbagai temuan tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem hidraulik pada HD785-7 sangat sensitif terhadap perubahan kondisi operasional, sehingga diperlukan

mekanisme monitoring yang mampu mendeteksi potensi kerusakan sejak dini untuk mencegah kegagalan sistem.

Dalam konteks maintenance modern, sistem hidraulik ini sangat relevan dengan penerapan Condition-Based Monitoring (CBM) dan Lubricant Analysis Program. Monitoring kondisi oli hidraulik memungkinkan identifikasi dini terhadap kontaminasi, degradasi pelumas, keausan komponen, serta indikasi awal kegagalan sistem sebelum terjadi breakdown.

Sejalan dengan itu, Rizaldy dan Johaness (2021) menyatakan bahwa perubahan sifat pelumas memiliki korelasi langsung terhadap tingkat keausan komponen dan performa sistem hidraulik. Oleh karena itu, pemantauan kondisi pelumas secara berkala menjadi salah satu pendekatan penting dalam meningkatkan reliability dan efektivitas maintenance berbasis kondisi.

2.6 Iso Cleanliness Code

ISO Cleanliness Code merupakan standar internasional yang digunakan untuk mengukur tingkat kontaminasi partikel padat dalam fluida hidraulik. Parameter ini menjadi indikator penting dalam sistem condition monitoring karena tingkat kebersihan oli memiliki pengaruh langsung terhadap kinerja dan reliability sistem hidraulik.

Berdasarkan standar ISO 4406:2021 *Hydraulic Fluid Power — Fluids — Method for Coding the Level of Contamination by Solid Particles*, tingkat kebersihan fluida dinyatakan dalam bentuk kode numerik berdasarkan jumlah partikel padat pada ukuran $\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$, dan $\geq 14 \mu\text{m}$ per mililiter fluida. Sistem ini memberikan representasi kuantitatif yang memungkinkan evaluasi tingkat kontaminasi fluida secara lebih terstandarisasi dan mudah diinterpretasikan dalam aplikasi industri.

Dalam konteks reliability engineering, Totten (2021) menjelaskan bahwa keberadaan partikel kontaminan dalam fluida hidraulik dapat mempercepat mekanisme keausan pada komponen seperti pump, valve, dan actuator. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat kebersihan fluida memiliki peran langsung terhadap stabilitas operasi dan reliability sistem hidraulik.

Peningkatan nilai ISO Cleanliness Code mengindikasikan meningkatnya tingkat kontaminasi dalam sistem hidraulik. Kondisi ini dapat mempercepat degradasi komponen, menurunkan efisiensi sistem, meningkatkan risiko terjadinya failure, serta berdampak pada peningkatan downtime unit.

Oleh karena itu, monitoring ISO Cleanliness Code digunakan sebagai parameter penting dalam mengevaluasi kondisi kebersihan fluida, mengendalikan tingkat kontaminasi sistem, serta menentukan batas peringatan (warning limit) dalam sistem pelumasan. Implementasi monitoring ini berperan dalam mendukung peningkatan reliability sistem hidraulik melalui pengurangan risiko keausan komponen, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan Physical Availability (PA) unit dump truck Komatsu HD785-7.

2.7 Partikel Quantifer (PQ) Index

Particle Quantifier (PQ) Index merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengukur jumlah partikel logam ferrous dalam pelumas berdasarkan prinsip induksi medan magnet. Parameter ini digunakan untuk mengidentifikasi akumulasi wear debris sebagai indikator kondisi keausan komponen pada sistem mekanis maupun hidraulik.

Menurut Totten (2021), peningkatan nilai PQ Index menunjukkan adanya peningkatan aktivitas keausan pada komponen mesin akibat gesekan antar elemen seperti gear, bearing, dan hydraulic pump. Nilai PQ Index yang tinggi umumnya mengindikasikan kondisi keausan abnormal yang berpotensi berkembang menjadi kegagalan sistem apabila tidak dilakukan tindakan korektif.

Sejalan dengan hal tersebut, Wakiru et al. (2020) menjelaskan bahwa monitoring wear particle merupakan bagian penting dalam Condition-Based Monitoring (CBM) karena mampu memberikan informasi dini terkait degradasi komponen. Dalam hal ini, PQ Index berfungsi sebagai indikator tren keausan (wear trend indicator) yang dapat digunakan untuk mendeteksi potensi failure secara lebih awal melalui analisis perubahan nilai secara berkala.

Lebih lanjut, Singh et al. (2022) menegaskan bahwa integrasi wear debris monitoring dalam sistem maintenance berbasis data dapat meningkatkan reliability peralatan serta

menurunkan risiko unscheduled downtime melalui deteksi dini kondisi abnormal pada sistem.

Secara keseluruhan, PQ Index tidak hanya berfungsi sebagai parameter pengukuran keausan, tetapi juga sebagai alat analisis prediktif dalam mendukung strategi CBM melalui pemantauan tren kondisi komponen.

Dalam konteks sistem hidrolik alat berat, monitoring PQ Index menjadi salah satu parameter penting dalam mendukung Lubricant Analysis Program untuk mengidentifikasi keausan internal, mengendalikan potensi kerusakan, serta meningkatkan reliabilitas sistem. Implementasi monitoring ini diharapkan dapat menurunkan risiko kegagalan komponen dan meningkatkan Physical Availability (PA) unit alat berat.

2.8 Analisis Wear Metal

Wear metal analysis merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi kandungan logam hasil keausan dalam pelumas yang berasal dari proses gesekan antar komponen pada sistem mekanis maupun hidrolik. Metode ini digunakan untuk memantau kondisi internal peralatan melalui deteksi partikel logam yang terlepas selama proses operasi.

Menurut Totten (2021), wear metal dalam pelumas umumnya berasal dari komponen seperti gear, bearing, shaft, dan hydraulic pump. Parameter yang umum dianalisis meliputi Fe (Iron), Cu (Copper), Al (Aluminium), Cr (Chromium), dan Pb (Lead). Peningkatan konsentrasi logam-logam tersebut menunjukkan adanya aktivitas keausan pada sistem yang dapat berkembang menjadi kerusakan apabila tidak segera dikendalikan. Oleh karena itu, wear metal analysis digunakan sebagai indikator penting dalam mendeteksi dini abnormalitas serta mendukung implementasi Condition-Based Monitoring (CBM).

Sejalan dengan hal tersebut, Wakiru et al. (2020) menjelaskan bahwa wear metal analysis merupakan bagian penting dalam CBM karena mampu memberikan informasi dini terkait degradasi komponen. Data wear metal dapat digunakan sebagai indikator tren keausan (wear trend indicator) yang mendukung pengambilan keputusan maintenance berbasis kondisi.

Lebih lanjut, Singh et al. (2022) menyatakan bahwa integrasi wear debris monitoring dalam sistem maintenance berbasis data dapat meningkatkan reliability peralatan serta menurunkan risiko kegagalan mendadak melalui deteksi dini kondisi abnormal pada sistem.

Selain wear metal, kandungan Silicon (Si) dalam pelumas juga merupakan indikator penting dalam lubricant analysis. Peningkatan kadar Si umumnya mengindikasikan kontaminasi eksternal berupa debu (dirt ingress) dari lingkungan operasi yang dapat mempercepat abrasive wear pada komponen mekanis maupun hidrolik. Kondisi ini dapat mempercepat degradasi sistem serta menurunkan performa operasional.

Dengan demikian, monitoring wear metal dan Silicon (Si) menjadi parameter penting dalam mendukung sistem Condition-Based Monitoring (CBM), khususnya dalam Lubricant Analysis Program untuk meningkatkan reliability sistem hidrolik serta mendukung peningkatan Physical Availability (PA) pada unit dump truck Komatsu HD785-7.

2.9 Viskositas Pelumas

Viskositas merupakan parameter dasar fluida yang menunjukkan tingkat ketahanan pelumas terhadap aliran dan menjadi indikator penting dalam sistem hidrolik. Parameter ini berperan dalam pembentukan lapisan pelumas (lubricating film) yang berfungsi melindungi permukaan kontak antarkomponen dari gesekan langsung, sehingga sangat berpengaruh terhadap kinerja dan keandalan sistem hidrolik.

Menurut Totten (2021), viskositas pelumas dapat mengalami perubahan akibat berbagai faktor operasional seperti oksidasi, peningkatan temperatur kerja (overheating), kontaminasi air maupun partikel, degradasi aditif, serta pencampuran fluida yang tidak sesuai spesifikasi. Perubahan ini menunjukkan adanya degradasi kualitas pelumas yang berkorelasi dengan kondisi kesehatan sistem hidrolik.

Sejalan dengan hal tersebut, Wakiru et al. (2020) menjelaskan bahwa monitoring viskositas merupakan bagian penting dalam lubricant condition monitoring pada kerangka Condition-Based Monitoring (CBM). Perubahan viskositas yang tidak sesuai standar dapat digunakan sebagai indikator awal terjadinya abnormalitas pada sistem pelumasan serta mendukung deteksi dini potensi kegagalan komponen.

Lebih lanjut, Singh et al. (2022) menyatakan bahwa integrasi parameter fisik pelumas seperti viskositas dalam sistem smart maintenance berbasis data dapat meningkatkan reliability peralatan serta menurunkan risiko kegagalan pada sistem hidraulik akibat degradasi kualitas pelumas.

Perubahan viskositas di luar batas spesifikasi dapat menyebabkan penurunan kemampuan pelumasan, peningkatan gesekan antar komponen, overheating, serta penurunan efisiensi sistem hidraulik. Kondisi tersebut secara langsung berdampak pada penurunan kinerja dan reliability sistem secara keseluruhan.

Dengan demikian, monitoring viskositas menjadi salah satu parameter penting dalam Lubricant Analysis Program untuk menjaga stabilitas operasi sistem hidraulik serta mendukung peningkatan Physical Availability (PA) pada unit Komatsu HD785-7.

2.10 Physical Availability (PA)

Physical Availability (PA) merupakan salah satu indikator utama dalam pengukuran kinerja peralatan yang menunjukkan tingkat kesiapan unit untuk dapat dioperasikan dibandingkan dengan total waktu yang tersedia dalam periode tertentu. PA banyak digunakan dalam industri pertambangan sebagai parameter untuk mengevaluasi efektivitas sistem maintenance serta keandalan alat berat dalam mendukung aktivitas operasional.

Secara matematis, Physical Availability (PA) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$PA = \frac{\text{Available Time}}{\text{Scheduled Time}} \times 100\%$$

dengan Available Time merupakan waktu unit dalam kondisi siap operasi, sedangkan Scheduled Time merupakan total waktu yang dijadwalkan untuk operasi unit dalam periode tertentu.

Menurut Kumar (2020), availability dalam reliability engineering dipengaruhi oleh frekuensi kegagalan (failure rate) dan lamanya waktu perbaikan (repair time). Peningkatan availability dapat dicapai melalui strategi maintenance yang efektif seperti predictive maintenance dan Condition-Based Monitoring (CBM) yang berfokus pada pengurangan downtime tidak terencana.

Sejalan dengan hal tersebut, Galar (2021) menjelaskan bahwa dalam sistem maintenance modern, kemampuan mendeteksi potensi kerusakan secara dini melalui monitoring kondisi peralatan merupakan faktor kunci dalam meningkatkan availability aset. Implementasi CBM memungkinkan pengurangan terjadinya unscheduled breakdown yang berdampak langsung pada peningkatan availability.

Lebih lanjut, Singh et al. (2022) menyatakan bahwa pendekatan smart maintenance berbasis data mampu meningkatkan reliability dan availability sistem melalui optimalisasi strategi maintenance berdasarkan kondisi aktual peralatan serta pengurangan downtime yang tidak terencana.

Dalam konteks reliability engineering, Physical Availability (PA) dipengaruhi oleh berbagai faktor utama seperti tingkat kegagalan peralatan, durasi downtime, efektivitas strategi maintenance, dan kemampuan sistem dalam mempertahankan kondisi operasional. Oleh karena itu, peningkatan PA dapat dicapai melalui penerapan strategi maintenance yang mampu meminimalkan breakdown tidak terencana.

Pada sistem hidraulik alat berat, salah satu pendekatan dalam CBM yang digunakan untuk mendukung peningkatan reliability adalah Lubricant Analysis Program. Program ini berfungsi untuk mendeteksi potensi kerusakan secara dini melalui analisis kondisi pelumas, sehingga dapat mengurangi downtime, meningkatkan reliability sistem, dan berkontribusi terhadap peningkatan Physical Availability (PA) pada unit dump truck Komatsu HD785-7.

2.11 Hubungan Lubricant Analysis dengan PA

Lubricant analysis memiliki peran penting dalam mendukung peningkatan reliability dan Physical Availability (PA) pada unit alat berat. Melalui pemantauan kondisi pelumas, berbagai indikasi awal degradasi pada sistem hidraulik dapat diidentifikasi lebih dini, sehingga tindakan maintenance dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan. Hal ini menjadikan lubricant analysis sebagai bagian penting dalam strategi Condition-Based Monitoring (CBM) yang mendukung pengambilan keputusan maintenance berbasis kondisi aktual peralatan.

Menurut Wakiru et al. (2020), data hasil analisis pelumas seperti wear metal, viskositas, dan tingkat kontaminasi dapat digunakan untuk mendeteksi abnormalitas sistem secara

dini. Informasi tersebut mendukung proses pengambilan keputusan maintenance berbasis kondisi sehingga potensi kerusakan dapat diidentifikasi sebelum berkembang menjadi kegagalan yang lebih serius.

Totten (2021) menjelaskan bahwa lubricant analysis berperan dalam meningkatkan reliability sistem mekanis dan hidraulik melalui deteksi dini terhadap keausan komponen serta degradasi fluida. Kemampuan ini memungkinkan pengurangan frekuensi kerusakan mendadak dan peningkatan stabilitas operasi sistem.

Lebih lanjut, Singh et al. (2022) menyatakan bahwa implementasi CBM berbasis data pelumas dapat meningkatkan Physical Availability (PA) melalui optimalisasi strategi maintenance dan pengurangan downtime yang tidak terencana.

Secara konseptual, lubricant analysis memungkinkan proses monitoring kondisi pelumas secara berkala untuk mendeteksi abnormalitas sistem sejak dini. Informasi tersebut digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan maintenance berbasis kondisi, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan. Dengan demikian, penurunan frekuensi breakdown dan downtime akan berdampak langsung pada peningkatan reliability serta optimalisasi Physical Availability (PA).

Dengan demikian, lubricant analysis merupakan salah satu pendekatan penting dalam mendukung implementasi Condition-Based Monitoring (CBM) yang berperan dalam meningkatkan reliability sistem hidraulik, mengurangi downtime, serta meningkatkan Physical Availability (PA) pada unit Komatsu HD785-7 dalam operasi pertambangan.

2.12 Penelitian Terdahulu

Berdasarkan penelitian terdahulu, penerapan Condition-Based Monitoring (CBM) dan lubricant analysis berperan penting dalam meningkatkan reliability dan availability peralatan melalui deteksi dini degradasi sistem. Parameter oil analysis seperti wear metal, viskositas, kontaminasi, dan Particle Quantifier (PQ) Index digunakan sebagai indikator kondisi aktual untuk mendukung strategi maintenance berbasis kondisi yang lebih efektif.

Carvalho et al. (2020) menekankan bahwa predictive maintenance berbasis data mampu meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan maintenance serta mengurangi risiko

kegagalan tidak terencana pada sistem industri. Sejalan dengan hal tersebut, Wakiru et al. (2020) menjelaskan bahwa lubricant condition monitoring merupakan metode yang efektif dalam mendeteksi degradasi komponen melalui analisis parameter pelumas. Totten (2021) juga menegaskan bahwa oil analysis berperan penting dalam meningkatkan reliability sistem mekanis dan hidraulik melalui deteksi dini terhadap keausan komponen dan degradasi fluida. Selain itu, Singh et al. (2022) menunjukkan bahwa integrasi condition monitoring dalam smart maintenance system dapat meningkatkan reliability dan availability aset melalui pengurangan downtime serta optimalisasi strategi maintenance berbasis kondisi.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas CBM dan lubricant analysis, sebagian besar masih berfokus pada sistem industri umum seperti mesin produksi dan peralatan mekanis statis. Integrasi parameter oil analysis secara komprehensif—meliputi ISO Cleanliness Code, PQ Index, wear metal, dan viskositas—dalam satu Lubricant Analysis Program berbasis CBM pada sistem hidraulik alat berat di industri pertambangan masih terbatas, termasuk kajian yang mengaitkannya dengan reliability dan Physical Availability (PA) unit dump truck.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengisi gap tersebut melalui implementasi Lubricant Analysis Program sebagai bagian dari CBM pada sistem hidraulik Komatsu HD785-7 di PT ABC, dengan fokus pada evaluasi kondisi pelumas secara terintegrasi untuk mendukung deteksi dini dan pengambilan keputusan maintenance berbasis kondisi.

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi berupa model evaluasi kondisi pelumas berbasis integrasi parameter oil analysis yang dapat digunakan sebagai acuan dalam maintenance alat berat, sehingga meningkatkan akurasi deteksi dini serta efektivitas strategi perawatan.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
1	Thiago P. Carvalho et al. (2020)	Studi literatur predictive maintenance berbasis data dalam Industry 4.0.	Akurasi deteksi dini dan pengambilan keputusan maintenance.	Integrasi data masih perlu ditingkatkan
2	J. M. Wakiru et al. (2020)	Studi literatur lubricant condition monitoring dalam CBM.	Wear metal, viskositas, dan kontaminan pada pelumas dapat mendeteksi degradasi mesin secara dini.	Diperlukan model integrasi parameter pelumas untuk meningkatkan akurasi prediksi failure.
3	George E. Totten (2021)	Studi literatur CBM berbasis kondisi aktual mesin.	Oil analysis meningkatkan reliability dengan mendeteksi perubahan fluida yang berkaitan dengan keausan komponen.	Diperlukan peningkatan pemanfaatan data analisis pelumas
4	S. K. Singh et al. (2022)	Studi literatur smart CBM berbasis data monitoring.	Meningkatkan reliability, availability, dan efisiensi operasional serta menurunkan downtime.	Perlu pengembangan integrasi data monitoring yang lebih komprehensif

Secara keseluruhan, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa perkembangan maintenance berbasis data seperti predictive maintenance, lubricant condition monitoring, dan smart CBM berkontribusi dalam peningkatan akurasi deteksi dini kerusakan, reliability, availability, serta efisiensi operasional aset industri. Carvalho et al. (2020) menekankan pentingnya integrasi data dalam predictive maintenance untuk meningkatkan akurasi keputusan maintenance. Wakiru et al. (2020) menunjukkan efektivitas parameter pelumas seperti wear metal, viskositas, dan kontaminasi dalam mendeteksi degradasi mesin. Totten (2021) menegaskan peran oil analysis dalam meningkatkan reliability melalui deteksi perubahan kondisi fluida akibat keausan,

sedangkan Singh et al. (2022) menunjukkan bahwa smart CBM berbasis data dapat menurunkan downtime dan meningkatkan performa aset.

Namun demikian, masih terdapat research gap terkait integrasi parameter ISO Cleanliness Code, Particle Quantifier (PQ) Index, wear metal, dan viskositas dalam satu sistem Lubricant Analysis Program berbasis CBM pada sistem hidraulik alat berat, serta keterkaitannya terhadap Physical Availability (PA) pada unit dump truck Komatsu HD785-7. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada implementasi Lubricant Analysis Program sebagai strategi CBM untuk meningkatkan reliability sistem hidraulik serta PA unit Komatsu HD785-7 di PT ABC Site X.

