CONDITION BASED MONITORING IMPROVES COMPONENT DURABILITY IN HEAVY EQUIPMENT MAINTENANCE

Rahadi Kautsar Ilmi[1*], Yusep Sukrawan[2], Tatang Permana[3]

Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Universitas Pendidikan Indonesia
Jl. Dr. Setiabudhi No. 229 Bandung 40154
Correspondent e-mail: rahadikautasar@upi.edu*

***ABTRACT*/ABSTRAK**

This study aims to analyze the implementation of Condition-Based Monitoring (CBM) in heavy equipment maintenance strategies at PT XYZ, one of Indonesia's leading coal mining contractors. The research employed a qualitative method, including direct observation, interviews, and data analysis related to predictive maintenance based on CBM. The population of the study consists of heavy equipment units operated within PT XYZ, with samples including components such as magnetic plugs, filter cuts, and cylinder hoists. The instruments used include check sheets, technical interviews, and historical maintenance records. The findings indicate that CBM implementation at PT XYZ is effective in early detection of component failures through condition monitoring using sensors and data analysis. This strategy enables the company to reduce operational downtime by up to 25%, improve component durability, and extend the lifespan of heavy equipment according to factory standards. Condition-based maintenance also supports cost efficiency by minimizing unnecessary repairs. The rating system (A, B, C, X) prioritizes maintenance actions based on the severity of the component's condition.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan *Condition-Based Monitoring* (CBM) dalam strategi pemeliharaan alat berat pada PT XYZ salah satu kontraktor pertambangan batu bara terkemuka di Indonesia. Penelitian menggunakan metode kualitatif dengan observasi langsung, wawancara, serta analisis data terkait pemeliharaan prediktif berbasis CBM. Populasi penelitian adalah unit alat berat yang digunakan di lingkungan PT XYZ, dengan sampel berupa komponen seperti magnetic plug, filter cut, dan cylinder hoist. Instrumen yang digunakan meliputi check sheet, wawancara teknis, serta dokumen pemeliharaan historis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan CBM di PT XYZ efektif dalam mendeteksi kerusakan sejak dini melalui pemantauan kondisi berbasis sensor dan analisis data. Strategi ini memungkinkan perusahaan mengurangi waktu henti operasional hingga 25%, meningkatkan durabilitas komponen, serta memperpanjang masa pakai alat berat sesuai dengan standar pabrik. Pemeliharaan berbasis kondisi juga mendukung efisiensi biaya dengan mengurangi perbaikan yang tidak diperlukan. Sistem rating yang digunakan (A, B, C, X) membantu memprioritaskan tindakan pemeliharaan berdasarkan tingkat keparahan kondisi komponen.

ARTICLE INFO

Article History:
Submitted/Received
05 Nov 2024

First Revised
01 Des 2024

Accepted
20 Des 2024

Online Date
25 Des 2024

Publication Date
31 Des 2024

Keywords:
Maintenance; Conditon Based Monitoring; Heavy Equipment; Coal; Durability

Kata kunci:
Perawatan; Condition Based Monitoring; Alat berat; Batu bara; Durabilitas.

1. PENDAHULUAN

Durabilitas komponen dalam operasional alat berat memainkan peran krusial, terutama di industri yang sangat mengandalkan peralatan tersebut untuk menjalankan aktivitas sehari-hari. Komponen yang tahan lama membantu memastikan efisiensi dan efektivitas operasional, meminimalkan waktu henti tak terduga, serta menekan biaya perbaikan. Menurut laporan terbaru, rata-rata waktu henti *(downtime)* pada alat berat dapat mencapai 20-30% dari total waktu operasional tahunan, yang menyebabkan kerugian finansial hingga USD 150.000 per mesin per tahun di sektor pertambangan dan konstruksi. Salah satu pendekatan yang semakin populer untuk meningkatkan durabilitas ini adalah *Condition-Based Monitoring* (CBM), yang memungkinkan pemeliharaan dilakukan berdasarkan kondisi aktual komponen alih-alih menggunakan jadwal tetap (Poppe, *et. al*., 2018).

CBM menghadirkan metode yang lebih proaktif dibandingkan dengan pemeliharaan berbasis waktu *(Time-Based Maintenance* atau TBM*).* Dengan memanfaatkan data kondisi secara *real-time*, CBM dapat mendeteksi potensi masalah sebelum terjadi kerusakan, memungkinkan perusahaan merencanakan pemeliharaan secara lebih efektif, sekaligus mengurangi risiko kerugian besar akibat kegagalan komponen (Jonge, *et. al*., 2017). Pendekatan ini sangat penting, terutama untuk alat berat, di mana kerusakan pada komponen dapat menimbulkan dampak finansial yang signifikan dan mengganggu kelancaran operasional (Elisabeth, *et. al*., 2019).

Teknologi canggih seperti sensor getaran dan analitik data menjadi inti dari CBM. Sebagai contoh, pemantauan getaran pada komponen seperti *gearbox* dan bantalan memungkinkan deteksi dini terhadap perubahan kecil dalam pola operasional yang dapat mengindikasikan potensi masalah (Elisabeth, *et. al*., 2019). CBM tidak hanya memperpanjang umur komponen, tetapi juga meningkatkan keandalan dan ketersediaan alat berat secara keseluruhan. Lebih jauh lagi, CBM memungkinkan perusahaan untuk mengoptimalkan jadwal pemeliharaan dengan memanfaatkan prediksi yang akurat mengenai sisa umur komponen. Hasil *monitoring* CBM memungkinkan *maintenance* dan perawatan untuk dijadwalkan demi menghindari atau mencegah konsekuensi kerusakan *component* yang lebih besar *(Buma Maintenance Management System Condition Based Monitoring*-CBM, 2022).

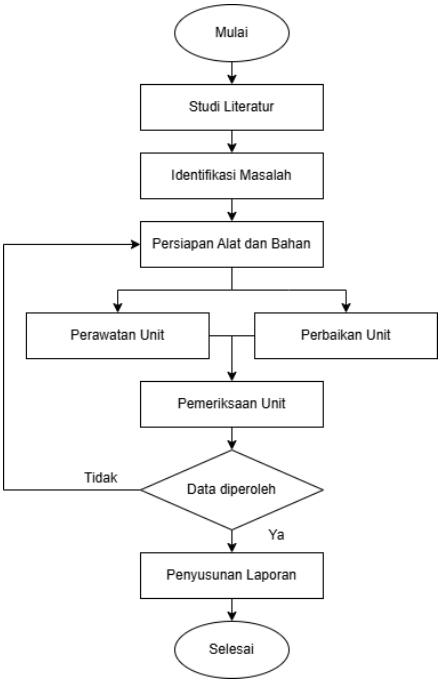
CBM sebagai *maintenance* proses memegang peranan yang sangat penting untuk proses perawatan di Plant Departemen dalam menjalankan untuk mengetahui aktivitas perawatan apa yang dibutuhkan, berapa lama lagi *component* bisa bertahan, serta kerusakan

seperti apa yang kemungkinan nanti bisa terjadi *(Buma Maintenance Management System Condition Based Monitoring-CBM,* 2022).

Secara keseluruhan, CBM adalah solusi efektif untuk meningkatkan ketahanan komponen pada alat berat. Dengan memanfaatkan teknologi pemantauan kondisi dan analisis data, perusahaan dapat mengurangi risiko kegagalan, meningkatkan keandalan, serta mengoptimalkan biaya pemeliharaan, sehingga tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga memperkuat daya saing mereka di industri yang semakin kompetitif (Zhu *et al*., 2015). Namun, masih sedikit penelitian yang secara khusus mengenai penerapan CBM untuk memprediksi kegagalan komponen secara spesifik pada alat berat dengan beban kerja tinggi dan variabilitas kondisi operasional masih sangat terbatas, sehingga membuka peluang untuk pengembagan pendekatan yang lebih akurat.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kualitatif dengan melakukan observasi langsung di PT XYZ yang mengaplikasikan metode *Condition-Based Monitoring* (CBM). Observasi dilaksanakan secara mendalam untuk menganalisis proses pemeliharaan dan operasional alat berat, khususnya terkait durabilitas komponen. Data yang diperoleh diarahkan pada penilaian performa komponen alat berat menggunakan sistem rating, yaitu A, B, C, dan X, yang menunjukkan tingkat kelayakan serta kebutuhan pemeliharaan setiap komponen.



Gambar 1. *Flowchart* penelitian.

a. Studi Literatur

Mempelajari standar operasional prosedur CBM (*Condition Based Monitoring*) yang ada di lingkungan Perusahaan Pertambangan batu bara, mempelajari cara membaca rating SOS (*Schedule Oil Sampling*), *cylinder*, *magnetic plug*, *filter cut* sesuai dengan buku panduan yang diberikan oleh pihak vendor serta membaca jurnal yang relevan dengan penelitian saat ini.

b. Identifikasi Masalah

Dalam pelaksanaan penelitian ini, penulis memerlukan data berupa sampel Rating Komponen seperti *Magnetic Plug*, *Filter Cut*, *Cylinder Hoist*. Pada unit alat berat serta informasi yang berkaitan dengan implementasi perawatan prediktif. Pengumpulan data dilakukan melalui wawancara dan observasi untuk memperoleh gambaran mendetail mengenai kondisi aktual komponen, prosedur pemeliharaan, dan teknologi yang diterapkan. Selain itu, data pendukung seperti riwayat perawatan, laporan performa alat berat, serta parameter teknis yang berkaitan dengan penerapan *Condition-Based Monitoring* (CBM) juga dikumpulkan. Seluruh data dianalisis secara komprehensif untuk memastikan validasi dan kesesuaiannya dalam menjawab pertanyaan penelitian.

c. Persiapan Alat dan Bahan

Mempersiapkan berbagai peralatan alat dan bahan untuk melakukan perawatan atau perbaikan unit, seperti *toolbox*, papan SOS, papan *magnetic plug*, dan papan *filter cut*.

d. Perawatan, Perbaikan, dan Pemeriksaan Unit

Pada proses ini, dilakukan perawatan seperti pengambilan sampel oli, *magnetic plug*, dan filter. Perbaikan meliputi mengganti oli, mengganti komponen yang sudah rusak, dan mengganti filter. Pemeriksaan dilakukan setelah proses perawatan dan perbaikan selesai yang bertujuan untuk memastikan kondisi unit sudah aman dan siap untuk dipakai kembali.

3. HASIL PENELITIAN

Hasil penelitian mengungkapkan bahwa penerapan CBM di perusahaan pertambangan batu bara secara signifikan berkontribusi dalam meningkatkan daya tahan komponen alat berat. Berdasarkan evaluasi terhadap komponen seperti *magnetic plug*, *filter cut*, dan *cylinder hoist*, CBM terbukti mampu mendeteksi potensi kerusakan lebih awal melalui sistem pemantauan berbasis sensor. Sebagai ilustrasi, *magnetic plug* dengan kategori "A" menunjukkan adanya partikel halus yang masih dalam batas keausan normal, sedangkan kategori "X" mengindikasikan kerusakan parah yang ditandai oleh pecahan logam besar. Hal

ini menunjukkan kelebihan CBM dalam memprioritaskan tindakan perbaikan berdasarkan tingkat kerusakan, sehingga mampu mencegah kerusakan lebih lanjut yang dapat menyebabkan gangguan operasional.

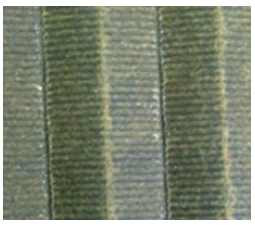
Selain itu, analisis menunjukkan bahwa sistem penilaian kondisi (A, B, C, X) efektif dalam memberikan informasi yang jelas mengenai status komponen, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih akurat dalam proses pemeliharaan. Penelitian ini juga mengungkapkan bahwa penggunaan CBM dapat mengurangi waktu henti operasional hingga 25% dan meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan. Dengan demikian, implementasi CBM tidak hanya memperpanjang umur komponen sesuai standar pabrik, tetapi juga secara signifikan mengurangi biaya pemeliharaan yang tidak perlu. Rincian hasil penelitian ini dapat ditemukan pada tabel 1, 2, dan 3, yang menjelaskan kondisi dan kategori masing-masing komponen secara terperinci.

Tabel 1. *Magnetic plug.*

Kondisi Magnetic Plug	Rating	Keterangan
	A	Pada permukaan magnet hanya terlihat butiran halus berwarna abu abu , tidak ada butiran logam yang mengkilap
	B	Jumlah butiran pada permukaan magnet lebih banyak, sudah mulai terlihat butiran halus mengkilap yang berasal dari keausan permukaan *bearing* dan *rollers*
	C	Pada permukaan *magnetic* telah terkumpul butiran keausan logam yang cukup banyak dan mulai terdapat pecahan logam yang berukuran besar

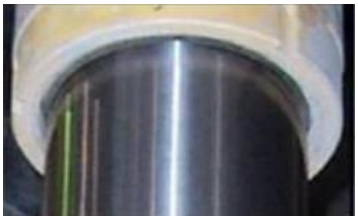
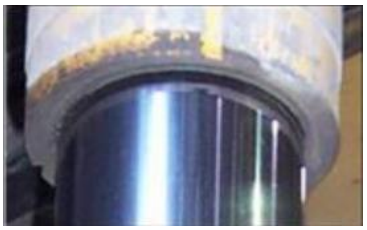
Kondisi Magnetic Plug	Rating	Keterangan
	X	Pada permukaan *magnetic* terdapat banyak pecahan logam yang berukuran besar besar

Tabel 2. *Filter cut.*

Kondisi Filter Cut	Rating	Keterangan
	A	Tidak ada partikel yang ditemukan atau ada sedikit partikel halus yang ditemukan. Partikel tersebut menunjukkan kondisi yang normal untuk keausan komponen atau kondisi setelah penggantian komponen.
	B	Jumlah partikel halus lebih banyak dari rating A. Biasanya ini terjadi ketika umur Component sudah hampir mendekati waktunya penggantian atau ada peningkatan keausan pada komponen.
	C	Rating ini menunjukan adanya suatu tanda-tanda kejanggalan/abnormal di dalam suatu *component*, yang biasanya ditandai oleh ditemukannya partikel besar / kasar di dalam filter atau *screen* dalam jumlah yang kecil. Partikel bisa berupa metal ataupun non metal.

Kondisi Filter Cut	**Rating**	**Keterangan**
	X	Pada permukaan filter *element* telah terkumpul butiran keausan logam yang cukup banyak dan mulai terdapat pecahan logam yang berukuran besar.

Tabel 3. *Cylinder hoist.*

Kondisi Filter Cut	Rating	Keterangan
	A	Tidak ada tanda kebocoran internal dan juga *external*. *Cylinder* atau Strut beroperasi secara normal. Tidak ada tanda kerusakan pada *rod cylinder* dan area *cylinder head*. Secara keseluruhan *cylinder* dan atau strut tampak bersih.
	B	Menunjukan kondisi *cylinder* atau strut meneteskan oli dan tampak lembab. Menunjukkan tumpukan debu menempel pada area kebocoran.
	C	Menunjukan keberadaan kebocoran lebih besar dari Rating B dan atau kerusakan kecil *chrome*/keausan/pitting pada *Rod Cylinder*
	X	Menunjukkan kebocoran lebih besar dengan mengalirnya oli dan atau kerusakan parah pada *chrome* berupa *scoring* atau *pitting*.

4. PEMBAHASAN

Dalam dunia pertambangan dan industri penggunaan alat berat sudah tidak asing lagi karena dengan menggunakan alat berat tersebut efisiensi tenaga lebih besar, sehingga mempersingkat waktu suatu pekerjaan. Alat berat adalah suatu alat yang berfungsi untuk

mengangkut atau memindahkan material dalam kapasitas besar dan dalam waktu relatif singkat (Sarmidi, *et. al*., 2023). PT XYZ merupakan salah satu kontraktor pertambangan batu bara terbesar dan independen di Indonesia. PT XYZ di Indonesia memiliki pangsa pasar sekitar 15%, melalui penyediaan jasa pertambangan bagi beberapa perusahaan tambang terbesar dan terlama di industri batu bara Indonesia, serta beberapa pemain baru yang memiliki potensi pertumbuhan yang tinggi di masa depan.

PT.XYZ dalam pengoperasiannya mengunakan beberapa mesin-mesin yang baru dan mesin yang sudah tua. Dengan dua kategori mesin tersebut ketika proses operasi berlangsung secara tidak langsung mempengaruhi hasil kinerja alat (Syarifudin & Putra, 2021). Manajemen pemeliharaan merupakan faktor terpenting dalam menjaga keberlanjutan peralatan di industri manufaktur maupun industri jasa. Perawatan peralatan penunjang proses produksi maupun proses jasa dilakukan secara berkala agar tidak terjadi gangguan dalam persiapan, proses, maupun pasca produksi (Rislamy, *et. al*., 2020).

Perawatan dapat diartikan sebagai serangkaian aktivitas yang bertujuan untuk menjaga fasilitas tetap dalam kondisi optimal dan siap digunakan sesuai kebutuhan. Dengan kata lain, perawatan merupakan upaya untuk memastikan bahwa fasilitas produksi berada pada tingkat performa atau kemampuan produksi yang diinginkan. Selain itu, perawatan juga mencakup berbagai tindakan yang dilakukan untuk mempertahankan, memperbaiki, atau mengembalikan sistem ke kondisi yang sesuai dengan standar yang ditentukan (Abidin, *et. al*., 2021).

Perawatan Perawatan alat berat menjadi aspek yang sangat penting dalam industri modern, terutama dalam kaitannya dengan peningkatan durabilitas komponen. Perawatan yang tepat pada alat berat dapat mengurangi kemungkinan kerusakan serta memperpanjang umur operasional mesin, yang berdampak pada peningkatan efisiensi dan penurunan biaya perbaikan. Sedangkan yang dimaksud dengan penggunaan biaya seoptimal mungkin adalah suatu usaha memperoleh manfaat yang semaksimal mungkin dari semua biaya yang timbul dari pengoperasian alat yang digunakan (Noor, 2020). Salah satu pendekatan yang semakin banyak diadopsi adalah *Condition-Based Maintenance* (CBM), di mana data kondisi aktual komponen digunakan untuk menentukan waktu yang paling sesuai untuk melakukan perawatan atau penggantian (Alaswad & Xiang, 2017).

Agar alat berat dapat digunakan secara efisien, penting untuk memahami kemampuan alat, jenis alat, keterbatasannya, serta biaya operasional yang dibutuhkan. Di samping itu, ketahanan atau durabilitas komponen alat berat juga menjadi aspek krusial yang tidak boleh

diabaikan. Tingkat produktivitas alat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis alat, metode kerja, kondisi medan, dan kemampuan komponen untuk bertahan dalam beban kerja yang tinggi. Dengan memastikan durabilitas komponen tetap terjaga, proses penyelesaian pekerjaan dapat dilakukan secara lebih optimal, sekaligus mengurangi risiko kerusakan yang berpotensi menyebabkan gangguan operasional atau *downtime* (Fran Ewal, *et. al*., 2021).

Memilih peralatan berat yang tepat sangat krusial dalam proses produksi. Kinerja peralatan berat dianggap unggul apabila mampu menghasilkan produksi maksimum dengan biaya minimum. Oleh karena itu, pemilihan peralatan berat yang tepat menjadi faktor penting dalam mencapai keberhasilan pada proyek atau perusahaan (Bagaskara, *et. al*., 2023). Pendekatan *predictive maintenance* atau perawatan prediktif memanfaatkan teknologi pemantauan kondisi untuk memperkirakan kapan komponen akan mengalami kegagalan. Dengan menggunakan analisis prediktif berbasis data *real-time*, perusahaan dapat merencanakan perawatan sebelum terjadi kerusakan, sehingga mengurangi waktu henti serta biaya perbaikan. Teknologi ini juga memungkinkan identifikasi dini terhadap potensi masalah, sehingga kerusakan yang lebih serius dapat dicegah dan keandalan alat berat dapat ditingkatkan (Mohammed & Rantatalo, 2020).

Berbeda dengan perawatan prediktif, *preventive maintenance* atau perawatan preventif dilakukan berdasarkan jadwal tertentu tanpa mempertimbangkan kondisi sebenarnya dari komponen. Pendekatan ini, meskipun dapat membantu mencegah kerusakan mendadak, sering kali menyebabkan tindakan perawatan yang tidak diperlukan, yang dapat meningkatkan biaya operasional (Goyal & Pabla, 2015). Namun, ketika dikombinasikan dengan CBM, perawatan preventif dapat dioptimalkan untuk mengurangi intervensi yang tidak perlu dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan (Alaswad & Xiang, 2017).

Penerapan CBM dalam pemeliharaan alat berat telah terbukti efektif dalam meningkatkan keandalan alat berat sekaligus menekan biaya perawatan. Dengan teknologi seperti analisis getaran dan pemantauan berbasis sensor, perusahaan dapat mendeteksi masalah sebelum menjadi serius (Yudha, *et. al*., 2019). Hal ini memungkinkan jadwal perawatan yang lebih terorganisir serta mengurangi waktu henti yang tidak direncanakan. Perawatan adalah suatu usaha yang dilakukan untuk mengembalikan kondisi unit ke nilai baku / standard sesuai manualnya agar unit dapat bekerja kembali secara maksimal sesuai dengan umur unit (Saptaindra Sejati, 2018). Prinsip pemeliharaan fasilitas produksi adalah menjaga tingkat konsistensi dalam mengoptimalkan produksi dan kesiapan fasilitas tanpa mengesampingkan keselamatan (Pranowo, 2019). *Maintenance* dapat diartikan sebagai

serangkaian aktivitas yang diperlukan untuk mempertahankan dan menjaga suatu produk atau sistem agar tetap berada dalam kondisi yang ekonomis, efisien, aman, dan pengoperasian yang optimal (Nurcahyo, 2024).

Pemeliharaan *preventive* dengan observasi, yaitu *condition based maintenance* yang memiliki pengertian pemeliharaan prediktif yang mencakup penilaian kondisi fisik, analisis, dan kemungkinan tindakan pemeliharaan berikutnya (Nurcahyo, 2024). *Predictive maintenance* adalah suatu usaha pemeliharaan yang dilakukan sesuai dengan kondisi *actual performance* dan memaksimalkan usia komponen atau alat sesuai dengan beban kerja yang diterima (Saptaindra Sejati, 2018). *Predictive maintenance* adalah perawatan Strategi yang memprediksi kapan suatu *equipment*/komponen akan mengalami *failure/fail*. Prediksi tersebut didasarkan pada kondisi komponen/*equipment* yang dievaluasi berdasarkan data yang dikumpulkan melalui penggunaan berbagai sensor dan teknik pemantauan kondisi berdasarkan *Condition Based Monitoring* (*Buma Maintenance Management System Condition Based Monitoring*-CBM, 2022).

Condition-Based Monitoring (CBM) sebagai bagian dari Perawatan adalah suatu proses memantau parameter kondisi yang menjadi indikasi dari kerusakan yang sedang terjadi pada suatu *component* (*Buma Maintenance Management System Condition Based Monitoring*-CBM, 2022). Penerapan CBM semakin dimungkinkan oleh kemajuan teknologi sensor dan sistem informasi, yang mendukung pengumpulan data kondisi secara *real-time*. Teknologi ini memungkinkan identifikasi dini terhadap kondisi tidak normal yang berpotensi menjadi masalah, sehingga langkah perbaikan dapat dilakukan secara tepat waktu untuk mencegah kerusakan yang lebih serius. Penelitian mengungkapkan bahwa pemantauan kondisi secara *real-time* mampu meningkatkan tingkat ketersediaan peralatan serta menekan biaya perbaikan dengan mendeteksi dan menangani potensi masalah sebelum berkembang menjadi kerusakan besar (Alla, *et. al*., 2020).

5. KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan *Condition-Based Monitoring* (CBM) sebagai strategi pemeliharaan alat berat di PT XYZ salah satu kontraktor pertambangan batu bara terkemuka di Indonesia. Dari hasil penelitian dan analisis, beberapa poin utama dapat dirangkum sebagai berikut: Meningkatkan Durabilitas Komponen CBM memungkinkan perusahaan memaksimalkan atau meningkatkan masa pakai komponen alat

berat melalui perawatan prediktif yang didasarkan pada kondisi aktual komponen. Dengan strategi ini, alat berat dapat berfungsi sesuai standar operasional pabrik dan mampu menjalankan beban kerja secara optimal. Efektivitas CBM dalam Pemeliharaan Alat Berat Penerapan CBM di PT XYZ menunjukkan hasil yang positif dalam mengidentifikasi potensi kerusakan komponen sejak awal melalui penggunaan teknologi sensor dan analisis data kondisi komponen. Pendekatan ini mampu mengurangi waktu henti operasional, meningkatkan keandalan alat berat, dan menekan biaya pemeliharaan yang tidak diperlukan.

6. REFERENSI

Abidin, M. R., Dahda, S. S., & Andesta, D. (2021). Perencanaan Penjadwalan Perawatan Mesin *Wheel Loader* Dengan Pendekatan *Reliability Centered Maintenance* di PT Swadaya Graha. *JUSTI (Jurnal Sistem Dan Teknik Industri)*, *2*, 119–130.

Alaswad, S., & Xiang, Y. (2017). *A Review On Condition Based Maintenance Optimization Models For Stochastically Deteriorating System*. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, *157*, 54–63.

Alla, H. R., Hall, R., & Apel, D. B. (2020). *Perfomance Evaluation Of Near Real-Time Condition Monitoring In Haul Trucks*. *International Journal of Mining Science and Technology*, *30*(6), 909–915.

Bagaskara, F. S., Aditya, M. R., Aldyansyah, D., Aji, D. M., Sitanggang, F. A., Khairi, M. M., & Paundra, F. (2023). Perawatan Mesin Alat Berat *Wheel Loader* PT. XYZ. *Jurnal Teknik Mesin*, *20*(1), 18–23.

Buma Maintenance Management System Condition Based Monitoring-CBM. (2022).

Elisabeth, K., John, L., Lars, H., Magnus, K., & Jing, L. (2019). *Vibration-based Condition Monitoring of Heavy Duty Machine Driveline Parts: Torque Converter, Gearbox, Axles and Bearings*. *International Journal of Prognostics and Health Management*.

Fran Ewal, O., Indrayadi, M., & Rafie. (2021). Analisa Produktivitas Alat Berat Pada Pekerjaan Peningkatan Jalan Simpang Manis Raya-Sekujam Timbai. *JeLAST : Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil, Dan Tambang*, *8*.

Goyal, D., & Pabla, B. (2015). *Condition Based Maintenance of Machine Tools*. *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology*, *10*, 24–35.

Jonge, B., Teunter, R., & Tinga, T. (2017). *The Influence of Practical Factors On The Benefits of Condition-Based Maintenance Over Time-Based Maintenance*. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, *158*, 21–30.

Mohammed, O., & Rantatalo, M. (2020). *Gear Fault Models and Dynamics-based Modelling For Gear Fault Detection*. *Engineering Failure Analysis*, *117*, 104798.

Noor, I. (2020). Perancangan *Preventive Maintenance* Alat Berat di PT Kalimantan Prima Persada. *JURNAL JIEOM*, *03*, 17–21.

Nurcahyo, R. (2024). *Manajemen Pemeliharaan Preventif (*Preventive Maintenance*) -Teori dan Aplikasi*. https://www.researchgate.net/publication/382268871.

Poppe, J., Boute, R., & Lambrecht, M. (2018). *A Hybrid Condition-Based Maintenance Policy For Continuously Monitored Components With Two Degradation Thresholds*. *Eur. J. Oper. Res.*, *268*, 515–532.

Pranowo, I. D. (2019). *Sistem dan Manajemen Pemeliharaan*.

Rislamy, A. F., Mahbubah, N. A., & Widyaningrum, D. (2020). Analisis Risiko Kerusakan Pada Alat Berat Grab Dengan Metode *Failure Mode and Effect Analysis* (Study Kasus: PT Siam Maspion Terminal Gresik). *PROFISIENSI : Jurnal Program Studi Teknik Industri*, *8*(1), 36–43.

Saptaindra Sejati, P. T. (2018). *PPM Excellent Maintenance*.

Sarmidi, S., Yulius Mases, & Prananda, R. A. (2023). Identifikasi Risiko Pengoperasian *Bulldozer* Di Area *Live Stockpile* OPB 4 PT. Bukit Asam, Tbk. *Jurnal Ilmiah Teknik Dan Sains*, *1*(2), 61–68.

Syarifudin, A., & Putra, J. T. (2021). Analisa Risiko Kegagalan Komponen Pada Excavator Komatsu 150LC Dengan Metode FTA dan FMEA di PT. XY. *Jurnal InTent*, *4*(2).

Yudha, M., Surjandari, I., & Zulkarnain. (2019). *Feature Extraction o Condition Monitoring Data on Heavy Equipment's Component Using Principal Component Analysis (PCA)*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *598*.

Zhu, Q., Peng, H., & Houtum, G. (2015). *A Condition-Based Maintenance Policy For Multi-Component Systems With a High Maintenance Setup Cost*. *OR Spectrum*, *37*, 1007–1035.