

Strategi Pemeliharaan Berbasis CBM+ pada Mesin TPE331 untuk Meningkatkan Keandalan Operasional: Studi Kasus Pesawat CASA 212-200 di PT NTP

¹Agita Ramadhani, ²Gita Amperiawan, ³Maykel Manawan, ⁴Erzi Agson Gani, ⁵M Zainal Furqon

¹²³⁴ Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

¹²³⁴ IPSC Sentul, Bogor 16810

¹agita.ramadhani@tp.idu.ac.id, ²gitaamperiawan66@gmail.com, ³maykel.manawan@idu.ac.id,

⁴erzi.agsongani@gmail.com, ⁵muhammad.furqon@tp.idu.ac.id

Abstract

Aircraft engine maintenance strategies have evolved from schedule-based approaches toward condition-driven systems that emphasize actual component health conditions. The TPE331 turboprop engine used on the CASA 212-200 aircraft is critical in supporting both military and civil aviation operations. However, its maintenance process faces challenges related to high operational intensity, diverse operating environments, spare part availability, and turnaround time. This research was conducted at PT Nusantara Turbin dan Propulsi (NTP) to analyze the existing maintenance system and to propose the implementation of Condition-Based Maintenance Plus (CBM+) as an optimization strategy. The research employed a qualitative descriptive approach using maintenance records, engine performance parameters, and operational cost data. The results show that CBM+ implementation has the potential to reduce unexpected downtime, improve cost efficiency by approximately 8–12%, and enhance fleet readiness through early detection of component degradation. This research demonstrates that CBM+ provides not only technical benefits but also strategic value in supporting the transformation of the national MRO industry toward data-driven maintenance practices.

Keywords: CASA 212-200, Condition-Based Maintenance Plus (CBM+), maintenance management, operational efficiency, TPE331

Abstrak

Strategi pemeliharaan mesin pesawat telah berkembang dari pendekatan berbasis jadwal menuju sistem yang menekankan kondisi aktual komponen. Mesin turboprop TPE331 yang digunakan pada pesawat CASA 212-200 memiliki peran penting dalam mendukung operasi penerbangan militer maupun sipil. Namun, proses pemeliharaannya masih menghadapi berbagai tantangan yang berkaitan dengan intensitas penggunaan yang tinggi, variasi lingkungan operasi, ketersediaan suku cadang, serta waktu tunggu perawatan. Penelitian ini dilakukan di PT Nusantara Turbin dan Propulsi (NTP) dengan tujuan menganalisis sistem pemeliharaan yang berjalan serta mengusulkan penerapan *Condition-Based Maintenance Plus* (CBM+) sebagai strategi optimalisasi perawatan. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan memanfaatkan data pemeliharaan, parameter kinerja mesin, dan biaya operasional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan CBM+ berpotensi mengurangi *downtime* yang tidak terduga, meningkatkan efisiensi biaya pemeliharaan sekitar 8–12%, serta meningkatkan kesiapan operasional armada melalui deteksi dini degradasi komponen. Penelitian ini menunjukkan bahwa CBM+ tidak hanya memberikan manfaat teknis, tetapi juga nilai strategis dalam mendukung transformasi industri MRO nasional menuju praktik pemeliharaan berbasis data.

Kata Kunci: *Condition-Based Maintenance Plus* (CBM+), manajemen pemeliharaan, TPE331, CASA 212-200, efisiensi operasional

1. Pendahuluan

Industri penerbangan meliputi berbagai aktivitas ekonomi strategis, salah satunya adalah sektor MRO (*Maintenance, Repair, and Overhaul*), yang diperkirakan memiliki omzet tahunan sebesar \$78,5 miliar [1] dan mewakili sekitar 11% dari pengeluaran biaya maskapai penerbangan [2]. Melihat besarnya dampak sektor ini terhadap biaya dan profitabilitas maskapai, terdapat minat yang substansial dalam upaya peningkatan efisiensi MRO pesawat. Pemeliharaan pesawat merupakan salah satu aktivitas operasional yang paling kritis dalam siklus hidup pesawat. Optimalisasi pemeliharaan pesawat diperlukan untuk menjaga keandalan, keselamatan, dan kelayakan terbang setiap pesawat dengan biaya serendah mungkin [3]. Pemeliharaan pesawat merupakan suatu rekayasa sistem yang kompleks, mencakup aspek perencanaan penerbangan, penugasan armada, perutean pemeliharaan, penugasan kru, pemesanan komponen cadangan, penjadwalan peralatan dukungan darat, dan manajemen ketidakpastian [4]. Kompleksitas tersebut menuntut pendekatan pemeliharaan yang adaptif dan berbasis data.

PT Nusantara Turbin Propulsi (NTP) merupakan salah satu perusahaan strategis nasional yang bergerak di bidang perawatan dan perbaikan mesin pesawat udara, baik untuk keperluan militer maupun sipil. Sebagai perusahaan penyedia jasa MRO, PT NTP memiliki peran vital dalam mendukung ketersediaan dan kesiapan operasional armada udara, terutama dalam pemeliharaan mesin pesawat untuk TNI dan industri sipil di Indonesia. Mesin Honeywell TPE331 merupakan mesin turboprop yang terbukti andal dan efisien, serta banyak digunakan pada pesawat angkut ringan seperti CASA 212-200. Mesin ini telah menjadi pilihan utama baik di lingkungan militer seperti TNI Angkatan Udara maupun oleh operator sipil di berbagai negara, termasuk kawasan Asia Tenggara [5]. Dalam perspektif akademis dan industri, penelitian tentang optimasi proses MRO pada mesin turboprop seperti TPE331 memiliki signifikansi yang tinggi, mengingat kompleksitas sistem pemeliharaannya dan dampaknya terhadap operasional penerbangan nasional.

Dalam praktiknya, pemeliharaan mesin pesawat di Indonesia masih menghadapi sejumlah tantangan, terutama terkait keterbatasan ketersediaan suku cadang impor, tingginya biaya logistik, serta lamanya waktu pengadaan. Laporan Kementerian Perhubungan tahun 2021 menunjukkan bahwa keterbatasan tersebut berdampak langsung pada kesiapan operasional pesawat dan efektivitas pemeliharaan [6]. Masalah ini juga ditemukan dalam pemeliharaan mesin TPE331, yang masih bergantung pada dukungan *Original Equipment Manufacturer* (OEM). Selain itu, waktu tunggu perawatan atau *turnaround time* (TAT) yang relatif tinggi menjadi kendala tersendiri, terutama ketika fasilitas *overhaul* belum sepenuhnya terintegrasi dan mandiri, sehingga berdampak pada efisiensi operasional pesawat CASA 212-200.

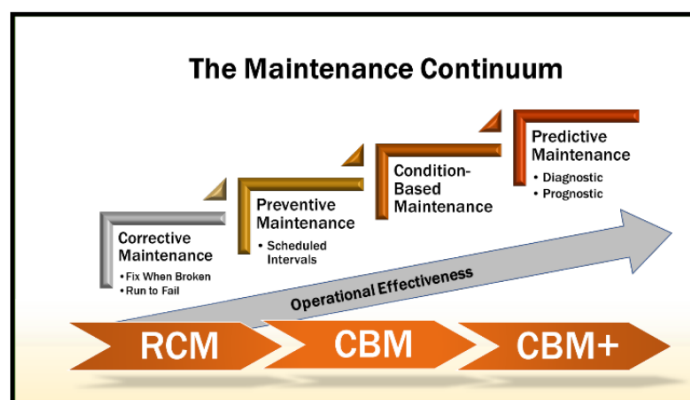
Di sisi lain, tren global dalam sistem perawatan pesawat telah bergeser dari pendekatan berbasis jadwal menuju pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*). Pendekatan ini memanfaatkan data operasional dan parameter kinerja mesin untuk mendeteksi degradasi komponen secara dini, sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan secara tepat waktu dan presisi. Pendekatan ini terbukti mampu menurunkan biaya operasional dan meminimalkan *downtime* pesawat [7]. Implementasi pemeliharaan prediktif pada sistem kritis pesawat, seperti roda pendaratan, juga telah menunjukkan potensi besar dalam mengoptimalkan biaya dan praktik pemeliharaan [8–9]. Pemeliharaan berbasis kondisi adalah strategi efisien yang dapat memulihkan kesiapan operasional sistem dengan mengembalikan

kondisi sistem [10]. Melalui pendekatan *Prognostics and Health Management* (PHM), sisa masa pakai komponen dapat diprediksi secara lebih akurat, sehingga perencanaan penggantian atau perbaikan dapat dilakukan secara efisien dan berbasis kondisi aktual [11,12].

Saat ini PT NTP masih banyak menggunakan pendekatan pemeliharaan terjadwal, yaitu sistem pemeliharaan berdasarkan interval waktu atau jam pengoperasian mesin. Pendekatan ini relatif aman, namun tidak selalu efisien karena perawatan dilakukan meskipun kondisi komponen masih layak pakai. Dampaknya, biaya pemeliharaan menjadi tinggi dan potensi *downtime* pesawat meningkat. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penerapan *Condition-Based Maintenance Plus* (CBM+) sebagai pendekatan modern dalam manajemen pemeliharaan menjadi relevan, karena memungkinkan pengambilan keputusan perawatan yang tepat waktu dan presisi berdasarkan parameter performa teknis mesin, seperti temperatur, tekanan, vibrasi, dan konsumsi bahan bakar.

CBM+ merupakan pengembangan dari konsep *Condition-Based Maintenance* (CBM) dan *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) yang mengintegrasikan data operasional, teknologi sensor, serta sistem analitik untuk mengubah data mentah menjadi informasi kondisi komponen, sistem, dan armada secara komprehensif. Pendekatan ini menggunakan prinsip rekayasa sistem untuk mendukung proses pengambilan keputusan dalam akuisisi, pemeliharaan, dan operasi sistem, serta memfasilitasi pengembangan strategi pemeliharaan yang optimal di seluruh tingkat pemeliharaan (Gambar 1). Dengan demikian, CBM+ berpotensi meningkatkan efektivitas operasional, ketersediaan material, dan kesiapan armada secara menyeluruh [8].

CBM dan teknologi pendukungnya terbukti andal dalam membantu teknisi pemeliharaan mengidentifikasi kondisi komponen secara akurat dan menentukan tindakan pemeliharaan hanya ketika kebutuhan tersebut benar-benar diperlukan. Dalam konteks pemeliharaan berbasis CBM, definisi rencana pemeliharaan optimal untuk armada pesawat terbang bergantung pada integrasi yang efisien dari prediksi probabilistik kondisi kesehatan komponen dan kedatangan stokastik tugas pemeliharaan korektif, dengan pertimbangan tugas pemeliharaan preventif sebagaimana didefinisikan dalam *Maintenance Planning Document* (MPD)[13]. CBM merupakan kebijakan yang menggunakan informasi kondisi kesehatan sistem dan struktur untuk mengidentifikasi intervensi pemeliharaan optimal dari waktu ke waktu, sehingga meningkatkan efisiensi operasi pemeliharaan [14]. Keuntungan utama dari implementasi CBM meliputi pengurangan pemeliharaan yang tidak perlu, peningkatan ketersediaan pesawat, peningkatan keselamatan penerbangan, serta penurunan biaya pemeliharaan jangka panjang. Dengan integrasi data sensor, teknik *machine learning* untuk prognostik, *Internet of Things* (IoT), serta konsep *digital twin*, CBM+ menjadikan sistem pemeliharaan lebih responsif dan adaptif dalam mendukung kesiapan armada [15–17].



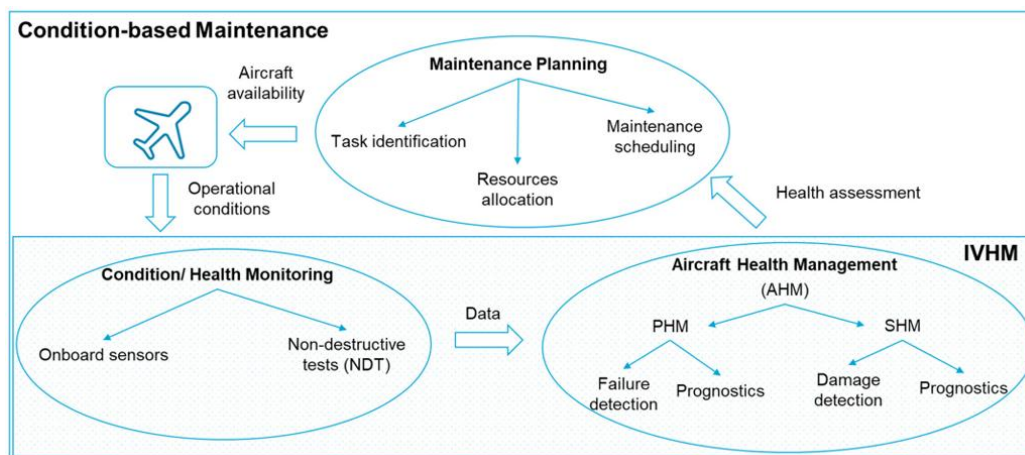
Gambar 1. Rangkaian Pemeliharaan [8]

Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah membahas efektivitas CBM dalam meningkatkan keandalan mesin pesawat, kajian yang secara khusus mengintegrasikan konsep CBM+ dengan karakteristik teknis mesin TPE331 dalam konteks industri MRO nasional masih sangat terbatas. Selain itu, sejumlah tantangan implementasi CBM+ pada fasilitas MRO dalam negeri, seperti keterbatasan suku cadang, ketergantungan pada OEM, serta belum optimalnya pemanfaatan data kinerja mesin. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi aktual proses pemeliharaan mesin TPE331 di PT NTP, mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan inefisiensi dalam proses pemeliharaan dan kesiapan operasional, serta mengusulkan model implementasi CBM+ yang adaptif, berbasis data, dan aplikatif bagi PT NTP untuk meningkatkan efektivitas pemeliharaan mesin TPE331.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif yang bertujuan memahami proses pemeliharaan mesin TPE331 secara mendalam berdasarkan fenomena yang terjadi di lingkungan PT NTP. Data diperoleh melalui observasi langsung terhadap proses perawatan dan *overhaul*, wawancara semi-terstruktur dengan teknisi bersertifikat, supervisor pemeliharaan, dan manajer produksi, serta telaah dokumentasi terkait riwayat perawatan dan standar OEM. Validasi data dilakukan melalui triangulasi sumber dan metode untuk memastikan kredibilitas informasi. Selain itu, penelitian ini mengkaji parameter teknis mesin yang relevan dengan penerapan CBM+, seperti suhu operasi, tekanan oli, tingkat vibrasi, dan analisis sisa minyak, untuk merumuskan strategi pemeliharaan berdasarkan kondisi yang sesuai dengan karakteristik operasional PT NTP.

CBM merupakan pendekatan pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan pengamatan terhadap kondisi operasional mesin atau peralatan yang dipelihara. CBM mengandalkan data yang dikumpulkan melalui berbagai alat pengukuran kondisi seperti sensor untuk mendeteksi kondisi perangkat, seperti getaran, suhu, tekanan, dan parameter lainnya, guna menentukan kapan pemeliharaan atau perbaikan perlu dilakukan [10]. Menurut Mobley, CBM sebagai proses pemantauan kondisi peralatan melalui sensor atau metode lainnya untuk menentukan kebutuhan pemeliharaan, perbaikan, atau penggantian berdasarkan data aktual. Dalam konteks manajemen pemeliharaan, CBM memantau parameter kondisi yang mengindikasikan terjadinya degradasi atau kerusakan pada suatu komponen. CBM juga didefinisikan sebagai sebuah kebijakan yang memperhitungkan manajemen siklus hidup aset sebagai bagian dari armada pesawat yang tujuannya untuk memaksimalkan ketersediaan pesawat dalam operasinya dengan mempertimbangkan waktu terbaik untuk melakukan pemeliharaan yang disajikan dalam Gambar 2 [17].

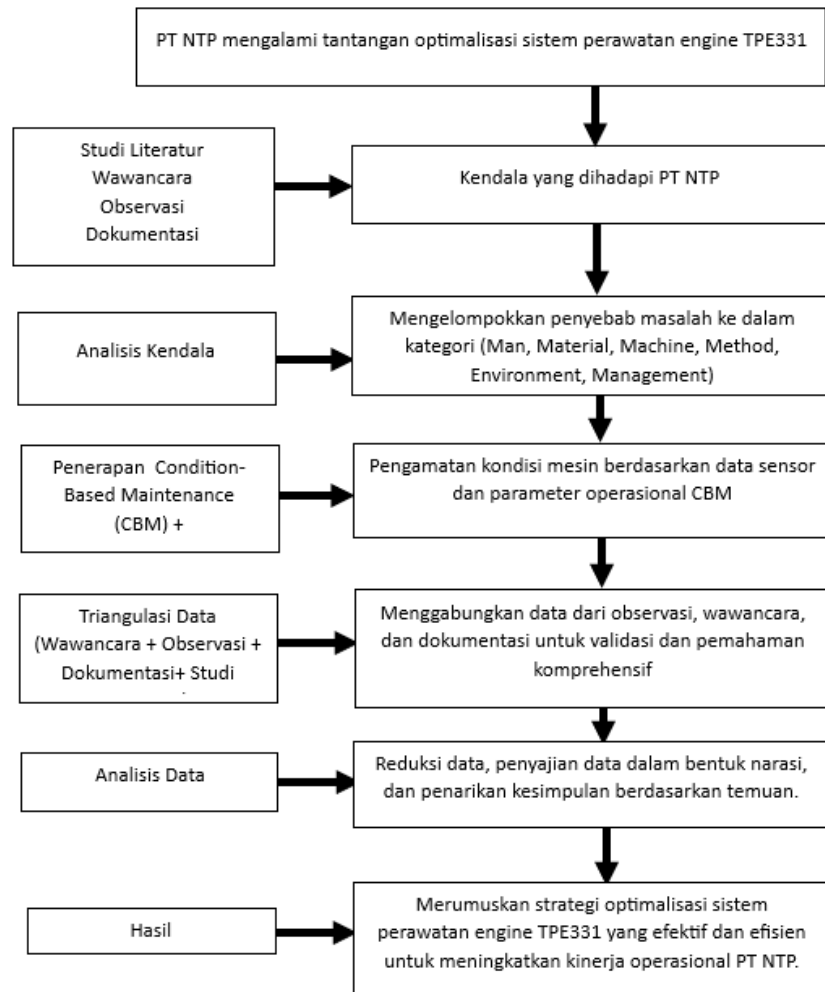


Gambar 2. Kerangka Kerja CBM [17]

Gambar 2 menunjukkan kerangka kerja CBM yang terintegrasi dengan *Integrated Vehicle Health Management* (IVHM) dalam mendukung pengambilan keputusan perawatan pesawat. Tiga elemen penting yang mendefinisikan CBM pada Gambar 2 sebagai berikut :

1. *Condition/Health Monitoring*, yang melibatkan pengumpulan informasi secara langsung dan tidak langsung mengenai kondisi kesehatan aset. Informasi ini dikumpulkan melalui sinyal dari sensor yang dipasang di pesawat atau dengan menggunakan uji non-destruktif (NDT) 'off-board', seperti inspeksi visual, emisi akustik, atau pengujian penetrasi cair. Data yang dihasilkan digunakan untuk pemantauan yang berkelanjutan atau periodik dan menghasilkan indikator kondisi yang menggambarkan kondisi kesehatan aset.
2. *Aircraft Health Management* (AHM) atau IVHM, yang merupakan proses memanfaatkan data pemantauan kondisi pesawat, data operasional, dan data peristiwa untuk menilai kondisi kesehatan serta memprediksi penurunan kesehatan aset seiring waktu. Pendekatan manajemen kesehatan di penerbangan umumnya dibagi menjadi aplikasi sistem dan struktur. Yang pertama direalisasikan di bidang *Prognostics and Health Management* (PHM), yang mencakup metode untuk mendeteksi kegagalan dan prognostik selanjutnya. Aplikasi struktural diwakili dalam *Structural Health Monitoring* (SHM), yang mencakup deteksi kerusakan, identifikasi, dan prognostik. Kedua konsep tersebut merujuk pada kemampuan menggunakan satu atau beberapa indikator kondisi kesehatan dan teknik berbasis fisika atau data untuk mendiagnosis keadaan yang salah dan *Remaining Useful Life* (RUL) dari sistem atau elemen struktural masing-masing. Dalam beberapa aplikasi, AHM juga diperluas untuk mencakup lapisan preskriptif yang menyarankan momen terbaik untuk melakukan pemeliharaan pada komponen tertentu yang sedang dipantau.
3. *Maintenance Planning*, adalah proses penjadwalan pemeliharaan pesawat berdasarkan penilaian kesehatan dan prediksi, ketersediaan sumber daya yang tersedia untuk melakukan pemeliharaan, serta tujuan memaksimalkan ketersediaan armada. Elemen ini mencakup identifikasi (1) tindakan pemeliharaan mana yang mungkin diperlukan, (2) kapan tindakan ini mungkin diperlukan, (3) dan sumber daya mana yang diperlukan untuk perencanaan dan pelaksanaan tindakan yang dihadapi. Dua aspek penting dalam proses ini adalah kombinasi persyaratan yang berbeda untuk tindakan pemeliharaan yang berbeda dan memenuhi batasan pengelompokan tugas untuk menghasilkan jadwal pemeliharaan yang efisien untuk armada pesawat. Jadwal pemeliharaan dan rencana yang dihasilkan akhirnya menghasilkan ketersediaan pesawat. Ketika pesawat telah dipelihara dan kembali beroperasi, pemanfaatan pesawat di bawah berbagai kondisi dan dalam berbagai lingkungan menghasilkan masukan untuk pemantauan kondisi, menutup loop.

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 [18]. Observasi dilaksanakan secara mendalam untuk menganalisis proses pemeliharaan dan operasional mesin TPE331 pada pesawat CASA 212-200, khususnya terkait durabilitas komponen. Data yang diperoleh diarahkan pada rumusan strategi optimalisasi sistem perawatan mesin TPE331 yang efektif dan efisien untuk meningkatkan kinerja operasional PT NTP berdasarkan temuan, yang menunjukkan tingkat kelayakan serta kebutuhan pemeliharaan setiap komponen.



Gambar 3. Metode Penelitian

Metode penelitian ini mengikuti alur sistematis yang dimulai dari identifikasi masalah hingga hasil akhir (Gambar 3). Tahap awal penelitian difokuskan pada identifikasi permasalahan utama, yaitu tantangan PT NTP dalam mengoptimalkan sistem perawatan mesin TPE331 yang berdampak pada kecepatan dan kesiapan operasional. Identifikasi ini dilakukan berdasarkan laporan gangguan dan keterlambatan perawatan, temuan awal terkait ketidakefisienan jadwal pemeliharaan lapangan serta ketergantungan pada perawatan berbasis waktu (*time-based maintenance*) yang belum sepenuhnya memanfaatkan data kondisi aktual mesin. Pengumpulan data dilakukan dari berbagai sumber untuk memperoleh gambaran menyeluruh terhadap sistem perawatan yang berjalan. Studi literatur mencakup manual perawatan dan *Maintenance Planning Document* (MPD) mesin TPE331, publikasi ilmiah terkait CBM dan CBM+ pada mesin pesawat turboprop, standar perawatan dan kejelasan (keandalan & ketersediaan) dalam industri penerbangan serta laporan internal dan kebijakan pemeliharaan PT NTP. Tujuan tahap ini adalah membangun landasan teoritis serta kerangka konsep penerapan CBM+. Selanjutnya dilakukan wawancara secara semi-terstruktur terhadap pemangku kepentingan kunci yang terlibat langsung dalam sistem perawatan mesin TPE331, yang meliputi teknisi perawatan mesin TPE331, untuk memperoleh informasi teknis terkait prosedur perawatan rutin dan non-rutin, jenis gangguan yang sering terjadi, dan juga pengalaman lapangan dalam mendeteksi degradasi mesin. Wawancara juga dilakukan kepada supervisor pemeliharaan untuk menggali sistem penjadwalan perawatan, pengambilan keputusan pemeliharaan, dan juga kendala menerapkan perawatan berbasis kondisi. Yang

terakhir, wawancara dilakukan kepada *reliability engineer*, untuk memahami evaluasi mesin, analisis tren kegagalan serta kesesuaian pelaksanaan perawatan dengan standar.

Selanjutnya dilakukan observasi secara langsung terhadap aktivitas perawatan mesin TPE331 di fasilitas PT NTP. Data yang diobservasi secara rinci meliputi alur proses perawatan mesin (inspeksi, pemecahan masalah, pemeliharaan korektif dan preventif), penggunaan dan peralatan inspeksi dan pemantauan, implementasi pencatatan data kondisi mesin, interaksi antara teknisi, sistem monitoring, dan prosedur kerja, serta waktu henti (*downtime*) dan respon terhadap indikasi mesin tidak normal. Dokumentasi data yang dikaji yang dilakukan meliputi buku catatan mesin, catatan perawatan dan perintah kerja, riwayat data kegagalan komponen, serta laporan pemantauan tren dan kinerja mesin.

Data tersebut kemudian dianalisis dengan mengelompokkan penyebab masalah ke dalam enam kategori utama. Pertama yaitu *man*, yang berkaitan dengan kompetensi pekerja dan beban kerja masing-masing pekerja. Kedua, material yang berkaitan dengan ketersediaan dan kualitas suku cadang. Ketiga, mesin yang melibatkan analisis mengenai kondisi dan usia mesin atau komponen. Keempat yaitu metode, diperlukan pengkajian prosedur dan sistem perawatan. Kelima, *environment* yaitu lingkungan kondisi operasional dan lingkungan kerja serta terakhir adalah manajemen yang meliputi kebijakan, perencanaan, dan dukungan organisasi. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan pemetaan akar masalah dilakukan secara komprehensif dan sistematis.

Tahap selanjutnya adalah analisis penerapan CBM+, yang berfokus pada pengamatan kondisi mesin berbasis data aktual. Parameter CBM+ yang dianalisis meliputi data sensor mesin (suhu, tekanan, dan getaran), tren performa mesin seperti perubahan EGT, torsi, dan RPM, serta parameter operasional selama fase *start-up*, *cruise*, dan *shutdown*, serta indikasi awal degradasi komponen kritis. Analisis ini digunakan untuk memahami pola degradasi mesin secara *real-time* dan membandingkannya dengan praktik perawatan konvensional.

Untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas hasil penelitian, dilakukan triangulasi data dengan mengombinasikan hasil wawancara, temuan observasi lapangan, dokumentasi data dan studi literatur. Triangulasi ini memastikan konsistensi informasi serta mengurangi potensi bias dari satu sumber data saja. Selanjutnya analisis data dilakukan melalui reduksi data untuk menyaring informasi yang relevan, penyajian data dalam bentuk narasi analitis, penciptaan pola hubungan antara kendala perawatan dan penerapan CBM+, serta penarikan makna dan kesimpulan berdasarkan temuan empiris. Tahap akhir penelitian ini adalah menyusun strategi optimalisasi sistem perawatan mesin TPE331 yang lebih efektif dan efisien, berbasis kondisi aktual mesin, untuk meningkatkan keandalan, ketersediaan, dan kinerja operasional PT NTP secara keseluruhan.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian diawali dengan penyajian temuan utama dari wawancara mendalam dengan teknisi senior, *engineer*, dan supervisor pemeliharaan PT NTP, serta observasi langsung pada aktivitas pemeliharaan mesin TPE331 di *workshop*. Berdasarkan hasil wawancara teridentifikasi bahwa proses pemeliharaan masih menghadapi sejumlah kendala krusial, seperti keterbatasan ketersediaan suku cadang impor, lamanya *lead time* pengadaan, kompleksitas teknis mesin, hingga beban administrasi dan sertifikasi yang memperpanjang siklus perawatan. Selain itu, observasi menunjukkan bahwa prosedur pemeliharaan masih sangat bergantung pada inspeksi manual dan interval perawatan berbasis waktu, sehingga sering terjadi *downtime* tidak terencana akibat degradasi komponen yang tidak terdeteksi. Temuan awal ini menjadi dasar untuk mengidentifikasi akar permasalahan melalui pendekatan kategorisasi yaitu *Man*, *Material*, *Machine*, *Method*, *Management*, serta *Environment* sekaligus menjadi landasan untuk menganalisis bagaimana CBM+ dapat

menawarkan solusi yang lebih tepat, adaptif, dan efisien dalam pengelolaan pemeliharaan mesin TPE331 di PT NTP.

Berdasarkan kompilasi data pemeliharaan yang dihimpun PT NTP selama tiga tahun terakhir, rata-rata *downtime* mesin TPE331 akibat ketidaksiapan komponen mencapai 18–27% dari total waktu perawatan. Simulasi penerapan CBM+ melalui parameter monitoring vibrasi dan suhu menunjukkan potensi penurunan *downtime* hingga 12–15% dengan penerapan sistem alarm dini (*early warning*). Selain itu, analisis biaya menunjukkan bahwa penggantian komponen berdasarkan tingkat keausan yang diukur mampu mengurangi biaya pemeliharaan sebesar 8–12% dibandingkan skema pemeliharaan berbasis interval tetap. Temuan ini memperkuat bahwa CBM+ memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan efisiensi teknis maupun operasional. Hasil observasi dan wawancara yang menunjukkan bahwa secara umum sistem perawatan dan *overhaul* mesin TPE331 di PT NTP dapat dilihat dalam Tabel 1.

Berdasarkan hasil pengolahan menunjukkan bahwa penerapan CBM+ pada perawatan mesin TPE331 di NTP dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 1. Hasil Sistem Perawatan dan *Overhaul* Mesin TPE331

Indikator	Variabel	Deskripsi Kesesuaian dengan Observasi & Wawancara	Hasil
Prosedur Perawatan	<i>Scheduled Maintenance</i>	Prosedur perawatan rutin dijalankan sesuai manual OEM dan interval waktu/jam terbang yang ditetapkan Honeywell.	Sesuai
Prosedur Perawatan	<i>Hot Section Inspection</i>	HSI dilakukan setiap 2.500–3.500 jam, meliputi pembongkaran dan inspeksi komponen panas utama mesin.	Sesuai
Prosedur Perawatan	<i>Overhaul</i>	Proses <i>overhaul</i> menyeluruh dilakukan setiap 5.000–7.000 jam, dengan pembongkaran total dan inspeksi detail.	Sesuai
Sumber Daya Manusia	Kompetensi & Lisensi	Teknisi telah memiliki lisensi, sertifikasi, dan COMA sesuai bidang tugasnya; pelatihan dilakukan berkala.	Sesuai
Fasilitas & Peralatan	<i>Test Cell & Workshop</i>	Fasilitas <i>test cell</i> dan <i>workshop</i> lengkap, mampu mendukung seluruh proses perawatan dan pengujian mesin TPE331.	Sesuai
Dokumentasi & Standar Mutu	SOP & Dokumentasi	SOP tersedia dan digunakan, namun terdapat beberapa inkonsistensi dalam dokumentasi hasil perawatan.	Perlu Perbaikan
Pengelolaan <i>Spare Part</i>	Ketersediaan & Pengadaan	Pengelolaan <i>spare part</i> cukup baik, namun terkadang terjadi keterlambatan pengadaan yang dapat menghambat proses MRO.	Perlu Perbaikan
Lingkungan Kerja	Ergonomi & Keamanan	Lingkungan kerja cukup aman, namun ruang kerja sempit dan kebisingan tinggi masih menjadi tantangan.	Perlu Perbaikan
Sistem Monitoring	<i>Condition Monitoring</i>	Belum sepenuhnya berbasis CBM; monitoring masih dominan manual dan periodik.	Perlu Optimalisasi

Tabel 2. Hasil Penerapan CBM+ pada Perawatan Mesin TPE331

No	Kategori	Temuan Utama	Rekomendasi CBM
1	Man	Kompetensi teknis belum optimal	Implementasi <i>Digital Competency Management System</i> (DCMS) untuk pelacakan pelatihan, sertifikasi, dan lisensi personel berbasis waktu dan kebutuhan.
2	Man	Lisensi personel perlu monitoring berkala	Otomatisasi pengingat lisensi & integrasi <i>dashboard</i> lisensi dengan sistem manajemen personel.
3	Material	Spare part tidak selalu tersedia, pengadaan tergantung OEM	Implementasi e-logistik prediktif berbasis data pemakaian & <i>wear rate</i> dari sensor mesin untuk stok spare part preventif.
4	Material	Beberapa material sulit didapat tepat waktu	Kembangkan <i>database critical parts</i> dan buat perjanjian SLA dengan pemasok kunci berdasarkan histori data kerusakan mesin.
5	Machine	Kalibrasi alat uji tergantung OEM	Adopsi sistem kalibrasi prediktif dengan alarm dari data sensor penggunaan alat uji (jam pakai, deviasi pengukuran).
6	Machine	Fasilitas pengujian	Tambahkan integrasi sensor IoT pada fasilitas uji untuk akuisisi data kondisi aktual mesin selama uji.
7	Method	Pemeliharaan masih terjadwal (bukan berdasarkan kondisi)	Migrasi ke sistem CBM <i>Planner</i> yang mengubah jadwal perawatan berdasarkan sinyal kesehatan aktual mesin, seperti <i>vibration</i> , <i>temperature</i> , dan <i>oil pressure</i> .
8	Method	<i>Overhaul</i> sesuai dokumen pabrikan	Integrasikan <i>historical trend analysis</i> ke proses <i>overhaul</i> untuk mengurangi penggantian komponen yang belum rusak.
9	Environment	Kondisi K3 dan kebersihan perlu peningkatan	Pasang sensor kualitas udara dan suhu di area kerja, serta gunakan indikator visual untuk menjaga lingkungan kondusif.
10	Management	Sistem manajemen mutu	Tingkatkan sistem menjadi CBM <i>Dashboard</i> terintegrasi: status mesin, <i>due date</i> CBM, histori perawatan, dan analisis prediktif.
11	Management	Fokus pelanggan	Tambahkan fitur laporan kesehatan mesin <i>real-time</i> untuk pelanggan secara periodik (via <i>app/email</i>) sebagai bentuk transparansi dan kepercayaan.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terhadap sistem perawatan mesin TPE331 di PT Nusantara Turbin dan Propulsi (NTP), hasil analisis penelitian sebagai berikut:

a. Sistem Perawatan dan *Overhaul* Mesin TPE331 di PT NTP

Penelitian menemukan bahwa PT NTP telah menerapkan sistem perawatan mesin TPE331 sesuai standar internasional, yang mencakup:

- 1) *Scheduled maintenance* dengan interval perawatan berkala mengikuti standar Honeywell, meliputi pemeriksaan visual, penggantian filter, dan inspeksi umum mesin.
- 2) *Hot Section Inspection* (HSI) yang dilakukan setiap 2.500-3.500 jam terbang (tergantung varian), mencakup pembongkaran bagian *hot section* dan inspeksi komponen kritis seperti *nozzle* dan *turbine blade*.

- 3) *Overhaul* dilaksanakan setiap 5.000-7.000 jam terbang dengan pembongkaran total mesin, inspeksi menyeluruh menggunakan *Non-Destructive Testing* (NDT), dan perakitan ulang sesuai manual OEM.
- 4) Pengujian mesin di fasilitas *test cell* untuk memastikan performa sesuai standar Honeywell setelah perawatan.
- b. Identifikasi Faktor Penghambat Efisiensi dalam Proses Pemeliharaan
Penelitian mengidentifikasi beberapa faktor yang menghambat efisiensi proses pemeliharaan mesin TPE331 yaitu dalam pengendalian persediaan yang menyebabkan keterlambatan pengiriman suku cadang dan berpotensi menghambat proses perawatan.
- c. Model Optimalisasi Perawatan Berbasis Kondisi (CBM+)
Penelitian menghasilkan model optimalisasi perawatan berbasis kondisi (CBM+) yang relevan dengan karakteristik operasional PT NTP :
 - 1) Pemasangan sensor pada komponen kritis mesin TPE331 untuk pemantauan kondisi secara *real-time* dengan *thresholds* khusus untuk parameter seperti vibrasi, temperatur, dan tekanan.
 - 2) Penerapan algoritma prediktif untuk menganalisis data kondisi mesin dan memprediksi potensi kegagalan sebelum terjadi.
 - 3) Matriks *decision-making* untuk menentukan *timing* optimal perawatan berdasarkan data kondisi dan pertimbangan operasional.
 - 4) Optimasi manajemen dengan berfokus pada kepuasan pelanggan
- d. Langkah-langkah Implementasi CBM+ di PT NTP
 - 1) Pengumpulan Data
Pemasangan sensor dilakukan pada peralatan kritis untuk memantau kondisi operasional, seperti suhu, getaran, tekanan, dan kelembaban. Kemudian menggunakan sistem manajemen data untuk mengumpulkan dan menyimpan data dari sensor secara *real-time*.
 - 2) Analisis Data
Analisis perangkat lunak analisis untuk memantau tren data dari sensor. Identifikasi pola yang menunjukkan penurunan kinerja atau potensi kerusakan. Pengembangan model prediktif diperlukan untuk memperkirakan kapan peralatan mungkin mengalami kegagalan berdasarkan data historis dan kondisi saat ini.
 - 3) Penjadwalan Pemeliharaan
Pemeliharaan berdasarkan kondisi dilakukan hanya ketika data menunjukkan bahwa peralatan memerlukan perhatian. Ini dapat mengurangi waktu henti yang tidak perlu sehingga memfokuskan upaya pemeliharaan pada peralatan yang paling kritis untuk operasi dan layanan NTP.
 - 4) Pelatihan dan Pengembangan SDM
Pelatihan diberikan kepada karyawan tentang cara menggunakan sistem monitoring dan analisis data dengan memastikan mereka memahami pentingnya CBM dalam meningkatkan kualitas pelayanan, serta membentuk tim pemeliharaan yang terlatih dalam teknik CBM dan analisis data untuk memastikan pemeliharaan dilakukan secara efektif.
 - 5) Evaluasi dan Umpan Balik
Secara berkala evaluasi kinerja sistem CBM dan dampaknya terhadap kualitas pelayanan. Metrik yang digunakan untuk evaluasi seperti waktu henti, biaya pemeliharaan, dan kepuasan pelanggan. Selanjutnya, mengumpulkan umpan balik dari pelanggan mengenai kualitas layanan dan respons terhadap masalah yang muncul. Informasi ini digunakan untuk meningkatkan proses CBM.

Beberapa manfaat implementasi CBM di NTP diantaranya yaitu dengan pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan kondisi, keandalan peralatan meningkat, yang berdampak positif pada kualitas pelayanan. Dampak positif lainnya yaitu mengurangi biaya pemeliharaan dan penggantian komponen yang tidak perlu, serta mengurangi *downtime*. Dengan layanan yang lebih andal dan responsif, kepuasan pelanggan dapat meningkat, yang berkontribusi pada loyalitas pelanggan.

Pembahasan menunjukkan bahwa meskipun PT NTP telah menerapkan prosedur pemeliharaan sesuai standar Honeywell, sebagian proses masih bersifat reaktif karena keterbatasan kondisi data *real-time*. Sistem perawatan yang dominan berdasarkan jadwal membuat penggantian komponen sering dilakukan sebelum tingkat degradasinya benar-benar kritis, sehingga biaya perawatan menjadi lebih tinggi. Penerapan CBM+ menawarkan pendekatan yang lebih presisi melalui pemanfaatan sensor dan analisis data kesehatan mesin, sehingga keputusan pemeliharaan dapat dilakukan pada waktu yang tepat. Hal ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang pentingnya komunikasi teknologi monitoring dan algoritma prediktif untuk mengurangi perawatan tidak terjadwal dan meningkatkan kesiapan armada. Penelitian ini juga menegaskan bahwa keberhasilan CBM+ tidak hanya bergantung pada teknologi, tetapi juga pada kesiapan SDM, perbaikan manajemen, serta integrasi sistem data yang lebih baik. Dengan demikian, keseluruhan hasil penelitian mengarah pada rekomendasi bahwa penerapan CBM+ secara komprehensif ditambah dukungan IoT, *big data analytics*, dan *digital twin* dapat menjadi strategi optimal untuk meningkatkan *availability*, *reliability*, serta efisiensi biaya pemeliharaan mesin TPE331, sekaligus memperkuat daya saing operasional PT NTP di masa depan.

Oleh karena itu, CBM didefinisikan sebagai pemeliharaan yang dilakukan sesuai kebutuhan seperti yang ditunjukkan oleh sistem pemantauan kondisi, yang mengurangi praktik pemeliharaan dengan melakukan tindakan bila hanya diperlukan, sehingga dapat menghemat biaya pemeliharaan dan meningkatkan konsistensi. Dengan munculnya revolusi industri keempat, muncul kemajuan baru di bidang pemeliharaan yaitu pemeliharaan prediktif yang selanjutnya dikembangkan menjadi pemeliharaan preskriptif [19-20]. Pemeliharaan ini melampaui sekadar prediksi kegagalan menjadi perencanaan pemeliharaan yang proaktif dan cerdas. Tidak hanya memantau kondisi kesehatan, tujuannya adalah memungkinkan mesin mengambil keputusan sendiri dan membimbing pengguna menuju solusi. CBM adalah bidang penelitian yang luas. Efektivitas dan dampaknya pada lingkungan industri telah banyak diakui dan dibuktikan melalui berbagai proyek penelitian empiris dalam berbagai konteks [21]. Operasi pemeliharaan untuk sistem manufaktur skala besar seperti pada PT NTP biasanya melibatkan kemandirian struktural. Yang mana pemeliharaan mesin individu dapat menyebabkan berhentinya mesin di sekitarnya. Kebijakan pemeliharaan biasanya terkait dengan tingkat persediaan. Dengan tingkat persediaan yang lebih tinggi, produsen dapat menanggung kerugian produksi yang lebih besar, sehingga memungkinkan lebih banyak operasi pemeliharaan. CBM mencakup serangkaian sistem perangkat keras dan perangkat lunak yang bersifat otomatis tanpa menyebabkan gangguan pada operasi sehari-hari sistem yang bersangkutan [22]. Implementasi CBM+ di PT NTP merupakan keputusan yang tepat karena sesuai dengan implementasi CBM+ yang merupakan pendekatan yang hemat biaya dengan memanfaatkan data *real-time* dan analitik canggih untuk secara proaktif menangani potensi kegagalan peralatan [23] serta solusi yang menjanjikan untuk meminimalkan waktu henti [24]. Selain itu monitoring terhadap kondisi mesin dapat menghindari pemborosan tenaga kerja, material, dan sumber daya keuangan yang disebabkan oleh perawatan yang berlebihan [25].

Kendala yang paling signifikan adalah keterbatasan ketersediaan suku cadang yang masih sangat bergantung pada impor, sehingga menyebabkan waktu pengadaan yang lama dan biaya yang tinggi. Selain itu, kompleksitas teknis mesin TPE331 menuntut keahlian

husus dari teknisi serta penggunaan peralatan khusus yang tidak selalu tersedia secara optimal. Proses administratif dan sertifikasi juga menjadi faktor yang memperlambat siklus pemeliharaan akibat regulasi yang ketat dan dokumentasi yang rinci. Implementasi CBM+ terbukti mampu meningkatkan efisiensi dan kualitas layanan pemeliharaan dengan melakukan perawatan berdasarkan kondisi aktual mesin secara *real-time*, sehingga dapat mengurangi *downtime* yang tidak terduga, mengoptimalkan biaya pemeliharaan, serta meningkatkan keandalan sistem. Langkah-langkah implementasinya meliputi pemasangan sensor monitoring, pengumpulan dan analisis data secara *real-time*, penjadwalan pemeliharaan berbasis kondisi, pelatihan sumber daya manusia, serta evaluasi dan umpan balik dari pelanggan. Model ini sesuai dengan karakteristik operasional PT NTP dan mampu mengatasi tantangan yang dihadapi dalam perawatan mesin TPE331.

CBM+ pada perawatan mesin TPE331 di PT NTP tidak hanya mampu mengatasi kendala operasional seperti keterbatasan suku cadang dan lamanya *turnaround time*, tetapi juga memberikan landasan teknis dan strategis bagi transformasi sistem pemeliharaan berbasis data di lingkungan industri MRO nasional. Melalui penelitian ini, teridentifikasi lima poin kunci implementasi CBM+ yang paling relevan bagi PT NTP, yaitu *condition monitoring real-time* melalui pemasangan sensor vibrasi, temperatur dan tekanan oli memberikan status kesehatan mesin secara langsung untuk mendeteksi indikasi awal degradasi komponen. Yang kedua adalah PHM dengan algoritma prediktif mampu mengestimasi RUL, sehingga keputusan penggantian komponen tidak lagi berbasis interval tetap, melainkan berdasarkan *wear-out* aktual. Ketiga, *maintenance planning* berbasis data melalui penggunaan CBM *planner* dan *dashboard* integratif dapat mengubah pola perawatan dari “*time-based*” menjadi “*condition-based*”, sehingga mengurangi *unnecessary maintenance* hingga 8–12%. Keempat, integrasi data historis dan tren keausan ke dalam proses *overhaul*, sehingga penggantian komponen dapat disesuaikan dengan kondisi aktual dan bukan semata karena rekomendasi OEM, sehingga berdampak pada efisiensi biaya perawatan. Terakhir adalah peningkatan kapabilitas organisasi melalui DCMS, IoT *integration* pada *test cell*, serta *e-logistics* prediktif dapat mengatasi *bottleneck* pengadaan *spare part*, khususnya komponen impor yang bersifat kritikal.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kendala utama dalam perawatan mesin TPE331 di PT NTP meliputi keterbatasan ketersediaan suku cadang impor, kompleksitas teknis mesin yang menuntut kompetensi dan peralatan khusus, serta proses administratif dan sertifikasi yang memperpanjang siklus pemeliharaan. Penerapan CBM+ terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem perawatan melalui pemantauan kondisi aktual mesin secara *real-time* dan pengambilan keputusan berbasis data. Implementasi CBM+ berpotensi menurunkan *downtime* sebesar 12–15%, mengurangi biaya pemeliharaan hingga 8–12%, serta meningkatkan *readiness* pesawat CASA 212-200. Model CBM+ yang dikembangkan, yang mencakup *condition monitoring*, *prognostics*, perencanaan pemeliharaan berbasis data, dan penguatan kapabilitas organisasi, dinilai sesuai dengan karakteristik operasional PT NTP. Penelitian ini juga memperkuat arah transformasi PT NTP menuju MRO berbasis digital sesuai tren global *predictive maintenance* dan memberikan model awal implementasi CBM+ yang dapat direplikasi pada mesin lain atau skala armada yang lebih besar. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memecahkan persoalan teknis jangka pendek, tetapi juga memberikan *roadmap* jangka panjang dalam digitalisasi sistem pemeliharaan di industri pertahanan dan penerbangan nasional.

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu mengembangkan model implementasi CBM+ yang lebih komprehensif melalui integrasi algoritma prognostik berbasis *machine learning* untuk memprediksi sisa umur komponen secara lebih akurat, serta memperluas kajian pada

tingkat armada guna memberikan dampak CBM+ terhadap pemeliharaan pemeliharaan pesawat dalam skala yang lebih besar. Integrasi CBM+ dengan teknologi digital seperti IoT, *big data* analitik, dan *digital twin* juga menjadi peluang penting untuk meningkatkan efisiensi operasional dan efisiensi perawatan mesin TPE331 di masa mendatang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Nusantara Turbine and Propulsion atas dukungan dan kerja sama yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini, serta kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam penyediaan data dan informasi yang dibutuhkan.

Daftar Referensi

- [1] J. M. Berger, "MRO forecast and market trends," presented at the IATA MCC202, Lima, Peru, Oct. 2022. [Online]. Available: https://www.iata.org/contentassets/3f8981eb437e4e16808639bc9d19d5c7/mcc202_day01_0930-1015_mro-forecast-and-mkt-trends_alton_berger.pdf. [Accessed: July 23, 2025].
- [2] International Air Transport Association (IATA), *Airline Maintenance Cost Executive Commentary (FY2020 Data)*, IATA, Rep. FY2023 MCX. [Online]. Available: https://www.iata.org/contentassets/bf8ca67c8bcd4358b3d004b0d6d0916f/fy2023-mcx-report_public.pdf. [Accessed: Aug. 31, 2025].
- [3] Y. Hu, X. Miao, J. Zhang, J. Liu, and E. Pan, "Reinforcement learning-driven maintenance strategy: A novel solution for long-term aircraft maintenance decision optimization," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 153, Art. no. 107056, doi: [10.1016/j.cie.2020.107056](https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107056).
- [4] J. Van den Bergh, P. De Bruecker, J. Beliën, and J. Peeters, "Aircraft maintenance operations: State of the Art," FEB@HUB, Brussels, Belgium, Res. Paper 2013/09, 2013. [Online]. Available: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Aircraft%20maintenance%20operation%20state%20of%20the%20art&author=J.%20Van%20den%20Bergh&publication_year=2013.
- [5] Honeywell Aerospace, "TPE331 turboprop engine," [Online]. Available: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/engines/tpe331-turboprop-engine>. [Accessed: May 20, 2025].
- [6] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, *Laporan tahunan kementerian perhubungan 2021*, 2021. [Online]. Available: https://ppid.dephub.go.id/fileupload/informasi-setiap-saat/20241021182941.2021_LAPTAH_KEMENHUB_2021.pdf. [Accessed: Aug. 29, 2025].
- [7] K. R. Patibandla, "Predictive maintenance in aviation using artificial intelligence," *J. Artif. Intell. Gen. Sci. (JAIGS)*, vol. 4, no. 1, pp. 325–333, 2024, doi: [10.60087/jaigs.v4i1.214](https://doi.org/10.60087/jaigs.v4i1.214).
- [8] I. Stanton, K. Munir, A. Ikram, and M. El-Bakry, "Predictive maintenance analytics and implementation for aircraft: Challenges and opportunities," *Syst. Eng.*, vol. 26, no. 2, pp. 216–237, 2022, doi: [10.1002/sys.21651](https://doi.org/10.1002/sys.21651).
- [9] P. Manco, M. Caterino, R. Macchiaroli, M. Rinaldi, and M. Fera, "Aircraft maintenance: Structural health monitoring influence on costs and practices," *Macromol. Symp.*, vol. 396, no. 1, Art. no. 2000302, 2021, doi: [10.1002/masy.202000302](https://doi.org/10.1002/masy.202000302).
- [10] S. Tan, Q. Hu, C. Guo, D. Zhu, E. Dong, and F. Zhang, "Operational readiness-oriented condition-based maintenance and spare parts optimization for multi-state systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 264, 2025, doi: [10.1016/j.res.2025.111367](https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111367).

- [11] T. H. Hsu, Y. J. Chang, H. K. Hsu, T. T. Chen, and P.W. Hwang, "Predicting the remaining useful life of landing gear with prognostics and health management (PHM)," *Aerospace*, vol. 9, no. 8, Art. no. 462, 2022, doi: [10.3390/aerospace9080462](https://doi.org/10.3390/aerospace9080462).
- [12] G. Petrone et al., "An innovative health monitoring system for aircraft landing gears," in *Proc. 8th Eur. Workshop Struc. Health Monit. (EWSHM)*, Bilbao, Spain, 2016, pp. 235–244.
- [13] I. Tseremoglou and B. F. Santos, "Condition-based maintenance scheduling of an aircraft fleet under partial observability: A Deep Reinforcement Learning approach," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 241, 2024, doi: [10.1016/j.ress.2023.109582](https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109582).
- [14] W. J. C. Verhagen, B. F. Santos, F. Freeman, P. van Kessel, D. Zarouchas, T. Loutas, R. C. K. Yeun, and I. Heiets, "Condition-based maintenance in aviation: Challenges and opportunities," *Aerospace*, vol. 10, no. 9, 2023, doi: [10.3390/aerospace10090762](https://doi.org/10.3390/aerospace10090762).
- [15] Q. Feng, X. Bi, X. Zhao, Y. Chen, and B. Sun, "Heuristic hybrid game approach for fleet condition-based maintenance planning," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 157, pp. 166–176, 2017, doi: [10.1016/j.ress.2016.09.005](https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.09.005).
- [16] Z. Li, J. Guo, and R. Zhou, "Maintenance scheduling optimization based on reliability and prognostics information," in *Proc. Annu. Rel. Maintainab. Symp. (RAMS)*, Tucson, AZ, USA, 2016, pp. 1–5, doi: [10.1109/RAMS.2016.7448069](https://doi.org/10.1109/RAMS.2016.7448069).
- [17] W. J. C. Verhagen et al., "Condition-based maintenance in aviation: Challenges and opportunities," *Aerospace*, vol. 10, no. 9, Art. no. 762, 2023, doi: [10.3390/aerospace10090762](https://doi.org/10.3390/aerospace10090762).
- [18] H. R. Alla, R. Hall, and D. B. Apel, "Performance evaluation of near real-time condition monitoring in haul trucks," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 6, pp. 909–915, 2020, doi: [10.1016/j.ijmst.2020.05.024](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.024).
- [19] K. Matyas, T. Nemeth, K. Kovacs, and R. Glawar, "A procedural approach for realizing prescriptive maintenance planning in manufacturing industries," *CIRP Ann.*, vol. 66, no. 1, pp. 461–464, 2017, doi: [10.1016/j.cirp.2017.04.007](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.007).
- [20] J. Lee, J. Ni, J. Singh, B. Jiang, M. Azamfar, and J. Feng, "Intelligent maintenance systems and predictive manufacturing," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 142, no. 11, Art. no. 110805, 2020, doi: [10.1115/1.4047856](https://doi.org/10.1115/1.4047856).
- [21] E. Quatrini, F. Costantino, G. Di Gravio, and R. Patriarca, "Condition-based maintenance: An extensive literature review," *Machines*, vol. 8, no. 2:31, 2020, doi: [10.3390/machines8020031](https://doi.org/10.3390/machines8020031).
- [22] S. Fu and N. P. Avdelidis, "Prognostic and health management of critical aircraft systems: A review," *Sensors*, vol. 23, no. 19: 8124, 2023. doi: [10.3390/s23198124](https://doi.org/10.3390/s23198124).
- [23] H. Cao, J. Yu, and F. Duan, "Condition-based maintenance in complex degradation systems: A review of modeling evolution, multi-component systems, and maintenance strategies," *Machines*, vol. 13, no. 8, Art. No. 714, 2025, doi: [10.3390/machines13080714](https://doi.org/10.3390/machines13080714).
- [24] I. S. Qulub, "Implementation of Condition-Based Maintenance (CBM) with FMEA approach to improve productivity of the auto insert machine in electronic component manufacturing," *J. Appl. Res. Technol. Eng. (JARTE)*, vol. 6, no. 2, pp. 11–22, 2025, doi: [10.4995/jarte.2025.22952](https://doi.org/10.4995/jarte.2025.22952).
- [25] F. Xue, G. Jin, L. Tan, C. Zhang, and Y. Yu, "Predictive maintenance programs for aircraft engines based on remaining useful life estimation," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 19957, 2025, doi: [10.21203/rs.3.rs-6732629/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6732629/v1).