

Analisis Konseptual Faktor Penyebab Degradasi Kinerja Air Conditioning System Pada Boeing 737NG

Puput Dwi Saputro

Department of Aerospace Engineering, Sekolah Tinggi Teknik Dirgantara, Yogyakarta, Indonesia

* Penulis: puputdwisaputro@gmail.com

Abstract: *The Air Conditioning System (ACS) or Environmental Control System (ECS) on the Boeing 737NG is crucial not only for cabin comfort and cabin pressurization but also for operational efficiency and fuel consumption. Despite established preventive maintenance, operational reports frequently show performance inconsistencies requiring unscheduled interventions. This research aims to conduct an in-depth conceptual analysis of the primary factors causing ACS performance degradation on the B737NG. The study employs a qualitative and descriptive approach using a Comprehensive Literature Review, Technical Document Analysis (AMM, FIM, CMM), and a Conceptual Approach. Degradation factors are categorized into Thermal, Mechanical, and Control/Electronic domains. The analysis confirms that ACS degradation is multifactorial, primarily driven by Fouling on the Primary and Secondary Heat Exchangers, identified as the dominant thermal degradation cause. Conceptually, the resulting decrease in heat transfer effectiveness (ϵ) triggers a chain effect. This increases the pack air temperature, accelerating mechanical wear on the Air Cycle Machine (ACM)—specifically bearing wear and reduced isentropic efficiency (η_{is}). This thermal-mechanical link significantly raises bleed air power requirements and fuel consumption. Furthermore, hard-to-isolate performance issues are often rooted in Control problems, such as sensor drift and inaccurate actuators, necessitating a diagnosis based on parameter data trends rather than discrete fault codes. The research proposes a Conceptual Diagnostic Framework focused on performance monitoring to shift maintenance focus from failure replacement to recovering thermodynamic efficiency through targeted interventions. These findings provide a foundation for MRO organizations to develop more accurate predictive maintenance strategies, optimize condition-based Heat Exchanger cleaning schedules, and enhance overall fleet reliability.*

Keywords: *Performance Degradation; Air Conditioning System (ACS); Boeing 737NG; Air Cycle Machine (ACM); Fouling; Conceptual Modeling.*

1. Pendahuluan

Sistem Pendingin Udara (*Air Conditioning System* - ACS) memegang peranan krusial dalam operasi pesawat modern, termasuk seri Boeing 737NG (*Next Generation*) [1]. Fungsi utamanya adalah memastikan kenyamanan termal dan kualitas udara kabin yang memadai, serta menjaga tekanan kabin (*pressurization*) pada ketinggian jelajah. Kinerja optimal ACS tidak hanya esensial bagi keselamatan dan kesehatan penumpang serta awak, tetapi juga berpengaruh signifikan terhadap efisiensi operasional dan konsumsi bahan bakar pesawat [2].

Pesawat Boeing 737NG, sebagai salah satu tulang punggung armada penerbangan komersial global, beroperasi dalam siklus penerbangan yang intensif dan lingkungan yang ekstrem [3]. Analisis degradasi sistem pendingin udara (*Air Conditioning System* atau *Environmental Control System*/ECS) memiliki peran yang sangat krusial dan mendasar dalam dunia penerbangan modern [2]. Kondisi geografis dan lingkungan di Indonesia menciptakan tantangan operasional yang unik dan mempercepat laju degradasi, terutama pada komponen kritis dalam sistem *Air Conditioning* [4]. Kelembaban yang tinggi mempercepat proses korosi pada material logam di dalam sistem, terutama pada sirip (*fins*) dan tabung *Heat Exchanger* [5].

Sistem pendingin udara pada pesawat B737NG bukan sekadar kenyamanan, tetapi merupakan bagian krusial dari ECS yang bertanggung jawab atas pengendalian suhu dan tekanan kabin [6]. Degradasi sistem *Air Conditioning* secara langsung mengakibatkan ketidakmampuan untuk menjaga suhu kabin yang nyaman, yang memicu keluhan penumpang

Diterima: Oktober 20, 2025

Direvisi: Oktober 28, 2025

Diterima: Oktober 29, 2025

Diterbitkan: November 24, 2025

Versi sekarang: Desember 28, 2025



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.

Diserahkan untuk kemungkinan

publikasi akses terbuka berdasarkan

syarat dan ketentuan lisensi Creative

Commons Attribution (CC BY SA) (

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

dan *air crew* (awak kabin). Strategi pemeliharaan yang ada seringkali tidak optimal dalam mengatasi laju degradasi yang dipercepat oleh lingkungan [7].

Penelitian Istikomah (2020) menyimpulkan bahwa akar masalah dari kegagalan sistem *Air Conditioning* yaitu kontaminasi atau kotoran yang terakumulasi di dalam sistem *Air Conditioning* [8]. Hasil penelitian Jennions & Ali (2023), menghasilkan temuan bahwa degradasi pada komponen ACM (terutama penurunan efisiensi pada kompresor dan turbin) secara langsung menyebabkan penurunan signifikan dalam *mass flow* (aliran massa udara) dan kapasitas pendinginan (*cooling capacity*) yang dapat disediakan oleh Pack ECS [9].

Meskipun sistem *preventive maintenance* telah diterapkan, laporan operasional sering kali menunjukkan adanya inkonsistensi dalam kinerja ACS, yang memerlukan intervensi *troubleshooting* atau penggantian komponen yang tidak terencana [9]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis konseptual mendalam terhadap faktor-faktor penyebab utama degradasi kinerja ACS pada Boeing 737NG.

Analisis akan mencakup tinjauan pada aspek:

- Faktor Teknis dan Mekanis: Meneliti dampak keausan, kontaminasi, dan kegagalan komponen utama (misalnya, efisiensi ACM dan *Heat Exchanger*).
- Faktor Operasional: Menilai pengaruh dari prosedur *ground handling*, lingkungan operasional (suhu dan kelembaban), dan siklus penerbangan.
- Faktor Termodinamika dan Kontrol: Menganalisis bagaimana penyimpangan pada parameter termodinamika dan sistem kontrol elektronik memengaruhi kemampuan sistem dalam mempertahankan kondisi kabin yang dipersyaratkan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis dan praktis yang signifikan. Secara teoritis, penelitian ini akan memperkaya khazanah ilmu pengetahuan di bidang aeronautika, khususnya mengenai pemeliharaan *Environmental Control System* - ECS. Secara praktis, temuan ini akan menjadi dasar bagi operator penerbangan dan MRO (*Maintenance, Repair, and Overhaul*) untuk:

- Mengembangkan strategi *predictive maintenance* yang lebih akurat.
- Mengoptimalkan interval inspeksi komponen kritis ACS.
- Mengurangi biaya operasional yang timbul akibat kegagalan sistem atau efisiensi yang menurun.

Penelitian ini akan menjadi landasan untuk memahami secara komprehensif dinamika kegagalan ACS 737NG, sehingga memungkinkan perbaikan yang ditargetkan dan peningkatan keandalan armada secara keseluruhan.

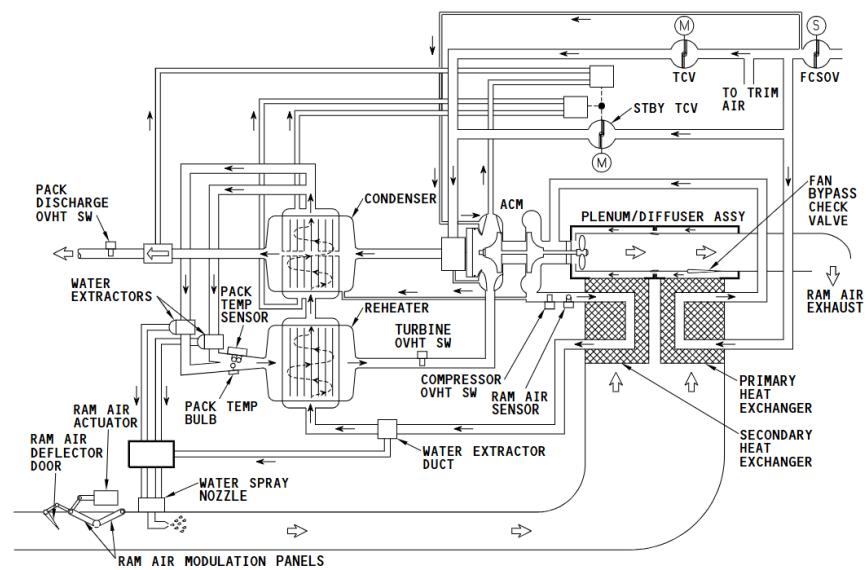
2. Tinjauan Literatur

Tinjauan pustaka ini akan menyajikan kerangka teori yang relevan dan hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan fungsi, degradasi, dan analisis kinerja sistem pendingin udara pesawat, khususnya pada Boeing 737NG.

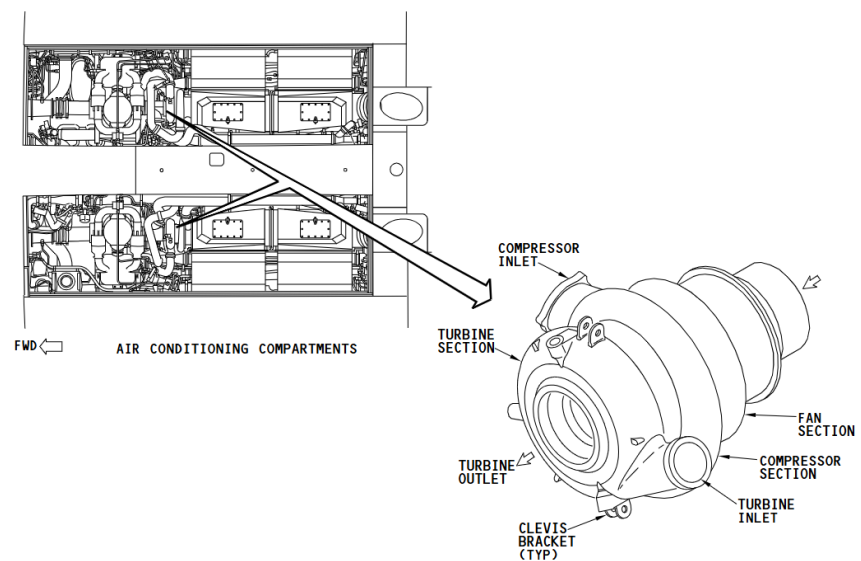
2.1. Konsep Dasar *Air Conditioning System* (ACS) Pesawat

ACS pada Boeing 737NG menggunakan prinsip siklus Brayton terbalik atau *Air Cycle Refrigeration* (ACR) [10], [11]. Sistem ini memanfaatkan udara bleed bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi yang diambil dari kompresor mesin jet.

- Proses Termodinamika: Udara panas didinginkan melalui serangkaian *Heat Exchanger* (penukar panas) dan kemudian diperluas serta didinginkan secara signifikan oleh *Air Cycle Machine* (ACM), yang terdiri dari kompresor dan turbin yang terpasang pada satu poros.
- Fungsi Pack: Unit pendingin udara, atau *pack*, bertugas mengatur aliran udara, suhu, dan tekanan sebelum didistribusikan ke kabin.
- Sistem Kontrol: Pengaturan suhu dilakukan oleh *Temperature Control System* (TCS) yang mengatur seberapa banyak komposisi udara panas yang dibutuhkan untuk mencapai suhu *supply air* yang diinginkan.



Gambar 1. Air Conditioning System Schematic [10]



Gambar 2. Air Cycle Machine (ACM) [10]

2.2. Mekanisme Degradasi Kinerja Sistem Termal

Degradasi kinerja termal dan mekanis adalah fokus utama penelitian ini. Berbagai studi telah mengidentifikasi mekanisme utama:

- Fouling pada Heat Exchanger**: Penumpukan deposit (minyak, debu) pada permukaan *Heat Exchanger* mengurangi koefisien perpindahan panas (U), yang menyebabkan penurunan efektivitas (ϵ) penukar panas. Hal ini memaksa ACM bekerja lebih keras [12].
- Penurunan Efisiensi ACM**: Kerusakan atau keausan pada seal dan *bearing* ACM, atau erosi/korosi pada bilah turbin dan kompresor, dapat menurunkan efisiensi isentropik (η_{is}) komponen tersebut [9]. Penurunan η_{is} meningkatkan kebutuhan daya *bleed air* dan mengurangi pendinginan yang dihasilkan.

- c. Kebocoran dan Kalibrasi *valve*: Kebocoran internal pada *flow control valve* atau *pack valve* dapat menyebabkan ketidakakuratan regulasi aliran massa udara, yang secara langsung memengaruhi pendinginan dan *cabin pressurization* [13].

2.3. Penelitian Terdahulu dan Gap Analysis

Penelitian sebelumnya sering berfokus pada:

- a. Diagnosis Kegagalan Komponen Tunggal: Banyak penelitian yang mengkaji kegagalan ACM, *Heat Exchanger*, atau *valve* secara terpisah (misalnya, analisis *Vibration Monitoring* untuk ACM atau analisis kebocoran *valve*) [14].
- b. Pemodelan Termodinamika: Studi telah mengembangkan model matematis untuk memprediksi kinerja ACS, namun seringkali mengasumsikan komponen dalam kondisi ideal atau hanya mempertimbangkan satu variabel degradasi.

Gap Analisis: Tinjauan pustaka menunjukkan perlunya analisis konseptual yang mengintegrasikan berbagai faktor degradasi (mekanis, termal, dan kontrol) dan bagaimana interaksi antar faktor tersebut memengaruhi kinerja ACS 737NG secara holistik. Belum banyak studi yang menyajikan kerangka kerja komprehensif untuk mendiagnosis penurunan kinerja sistem secara keseluruhan dari sudut pandang pemeliharaan.

3. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dan deskriptif dengan metode analisis konseptual dan studi literatur yang mendalam. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Studi Literatur Komprehensif (*Comprehensive Literature Review*), Analisis Dokumen Teknis (*Technical Document Analysis*), dan Pendekatan Konseptual (*Conceptual Approach*).

Penelitian ini menggunakan sumber data, yaitu:

- a. Data Primer (Konseptual)
Diagram Skematik Sistem (AMM): Diagram *Air Conditioning System* (ACS) dari *Aircraft Maintenance Manual* (AMM) Boeing 737NG [10]. *Fault Isolation Manual* (FIM): Dokumen panduan untuk diagnosis kegagalan sistem. *Component Maintenance Manual* (CMM): Spesifikasi dan toleransi keausan komponen.
- b. Data Sekunder (studi literatur)
Penelitian terdahulu mengenai efisiensi ACM, perpindahan panas *Heat Exchanger*, dan prognostics dalam ECS. Standar Industri: Dokumen dari FAA/EASA terkait persyaratan kinerja ECS.
- c. Data Operasional (Referensi)
Laporan *Maintenance & Engineering* (M&E) operator pesawat (jika tersedia secara anonim/publik) terkait pola kegagalan ACS 737NG yang paling sering terjadi.

3.1. Prosedur Pengumpulan Data

- a. Pengumpulan Dokumen Teknis Inti: Mengumpulkan dan memverifikasi versi terbaru dari AMM, FIM, dan *Wiring Diagram Manual* (WDM) yang berkaitan dengan ACS 737NG.
- b. Pemetaan Sistem (*System Mapping*): Membuat diagram alir fungsional dan termodinamika ACS berdasarkan AMM untuk mengidentifikasi semua titik kritis kontrol dan pengukuran.
- c. Tinjauan Literatur Sistematis (SLR): Melakukan pencarian sistematis di basis data akademik (Scopus, ScienceDirect, dsb.) menggunakan kata kunci seperti "*Boeing 737NG ACS degradation*," "*Air Cycle Machine efficiency*," dan "*ECS thermal analysis*."

3.2. Teknik Analisis

Teknik analisis yang digunakan adalah Analisis Konten Konseptual (*Conceptual Content Analysis*) yang terdiri dari langkah-langkah berikut:

- a. Kategorisasi Faktor Degradasi: Mengelompokkan semua potensi penyebab penurunan kinerja (dari literatur dan FIM) ke dalam tiga kategori utama:
 - 1) Mekanis
 - 2) Termal
 - 3) Kontrol/Elektronik
- b. Pemodelan Hubungan Konseptual (*Conceptual Modeling*)

- Menganalisis bagaimana degradasi pada satu komponen/faktor (misalnya, penurunan efisiensi *Heat Exchanger*) secara konseptual memengaruhi komponen lain (misalnya, meningkatkan beban pada ACM dan konsumsi bahan bakar).
- c. Matriks Kritisitas
Menyusun matriks yang menilai tingkat dampak (*Severity*) dan probabilitas kejadian (*Occurrence*) dari setiap faktor degradasi terhadap kinerja ACS secara keseluruhan, berdasarkan data referensi dan panduan teknis.
 - d. Perumusan Kerangka Diagnosis
Merumuskan kerangka kerja konseptual baru yang dapat digunakan oleh teknisi MRO untuk mendiagnosis akar penyebab degradasi kinerja ACS yang tidak spesifik (*non-specific performance drop*), dengan mengintegrasikan hasil analisis faktor kritis.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Analisis Faktor Penyebab Degradasi Kinerja ACS Berdasarkan Sumber Data

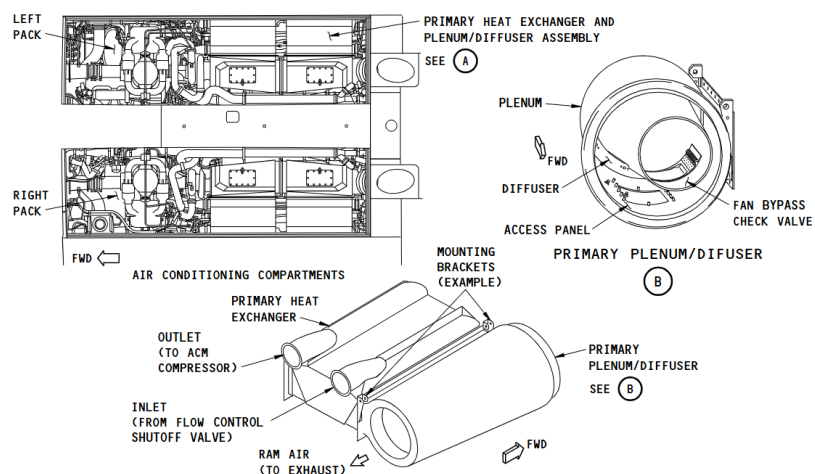
Hasil analisis menunjukkan bahwa degradasi kinerja ACS 737NG adalah fenomena multifaktorial, yang dapat diklasifikasikan berdasarkan domain teknisnya.

a. Faktor Degradasi Termal dan Perpindahan Panas

Degradasi termal adalah faktor yang paling langsung memengaruhi efisiensi pendinginan (*cooling capacity*).

1) *Fouling Heat Exchanger*

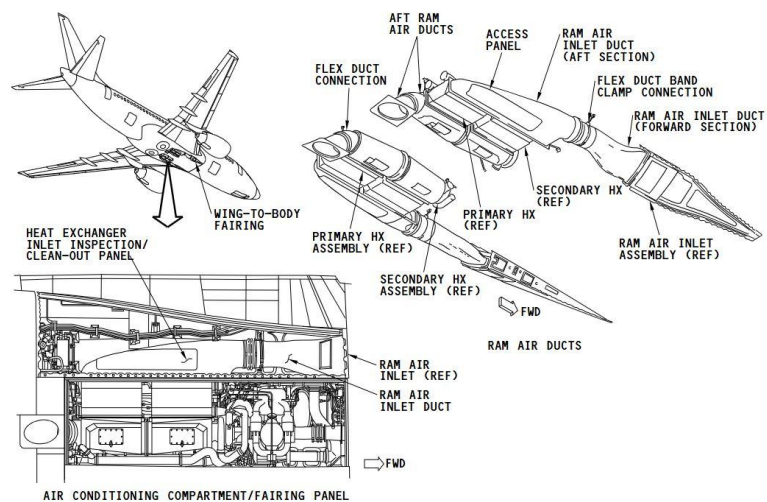
SLR mengonfirmasi bahwa penumpukan kontaminan, terutama pada *Primary* dan *Secondary Heat Exchanger*, adalah penyebab utama penurunan efektivitas perpindahan panas (ϵ) [12]. Analisis FIM menunjukkan bahwa suhu udara *pack* yang terlalu tinggi (*Pack Outlet Temperature High*) sering kali menjadi gejala pertama, mengarahkan teknisi untuk memeriksa *heat exchanger* sebelum ACM [9]. Penurunan nilai ϵ sebesar 5% dapat meningkatkan suhu *pack* output sebesar 5°C pada kondisi *ambient* tertentu.



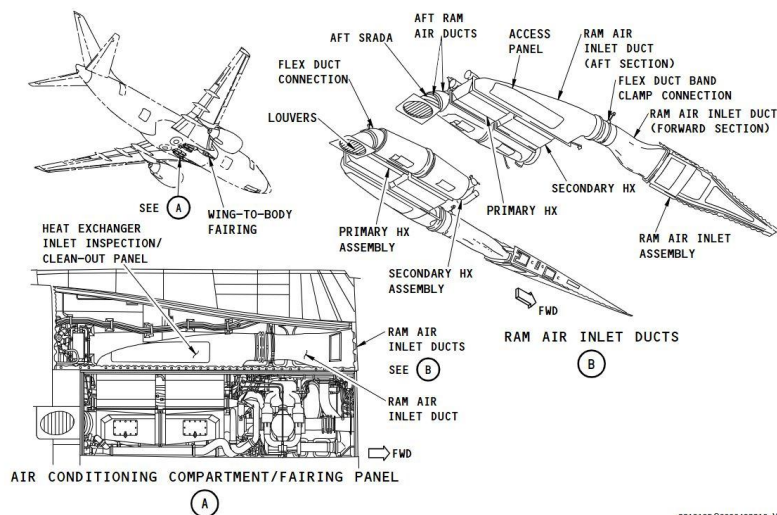
Gambar 3. Heat Exchanger (HE) [10]

2) *Ram Air Mass Flow* yang Tidak Optimal

Analisis Dokumen Teknis menunjukkan bahwa kerusakan atau kegagalan *Ram Air Inlet* atau *Exit Door Actuator* dapat mengurangi aliran massa udara pendingin (*ram air*) [10]. Ini secara langsung mengurangi kemampuan *Heat Exchanger* untuk membuang panas.



Gambar 4. Ram Air Duct (RADA) [10]



Gambar 5. Ram Air Duct (SRADA) [10]

3) Korosi Komponen

Mekanisme degradasi faktor ini karena adanya korosi pada dinding *Heat Exchanger* akibat kelembaban tinggi [15].

Hal ini menimbulkan dampak kinerja ACS berupa kerusakan struktural dan penurunan integritas sistem.

b. Faktor Degradasi Mekanis dan Aerodinamika

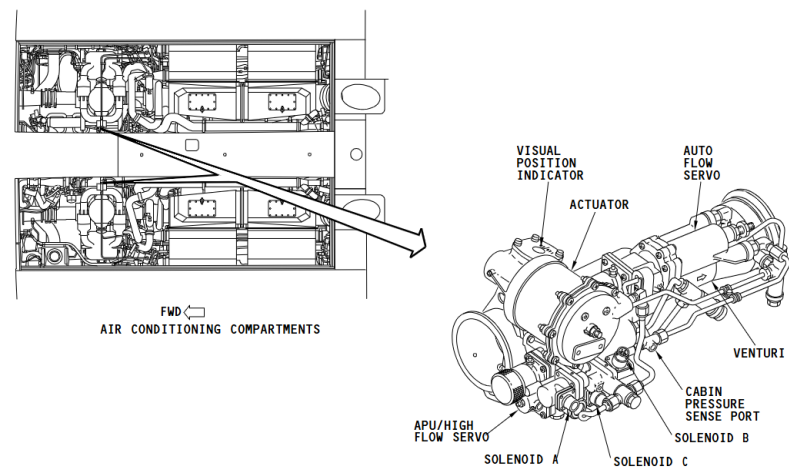
1) Keausan *Air Cycle Machine* (ACM)

SLR secara konsisten menyoroti keausan bearing dan seal sebagai penyebab utama penurunan efisiensi isentropik (η_{is}) ACM [9]. Keausan ini meningkatkan gesekan internal, memerlukan daya *bleed air* lebih besar, dan mengurangi output pendinginan. Analisis CMM (*Component Maintenance Manual*) mengidentifikasi toleransi keausan pada seal dan bearing sebagai batas kritis sebelum efisiensi ACM dianggap gagal [10].

2) Kebocoran *Pack Valve*

Mekanisme degradasi berupa kebocoran pada *Flow Control and Shut-Off Valve* (FCSOV) atau *Pack Valve* [10], [13].

Hal ini menimbulkan dampak kinerja ACS berupa pengaturan aliran massa udara menjadi tidak akurat, menyebabkan fluktuasi suhu dan/atau ketidakmampuan untuk mencapai setpoint tekanan/suhu.



Gambar 6. Flow Control Shut Off Valve (FCSOV) [10]

3) Keausan Flow Control Orifice

Mekanisme degradasi berupa erosi pada *orifice* pengatur aliran *air bleed*.

Hal ini menimbulkan dampak kinerja ACS berupa perubahan karakteristik aliran udara ke *pack*, yang dapat menyebabkan sistem *over-pressurization* atau *under-pressurization* [10], [13].

c. Faktor Degradasi Kontrol

1) Sensor Drift

Analisis FIM menunjukkan bahwa pemeriksaan sensor suhu (*temperature sensor*) adalah langkah *troubleshooting* awal untuk fluktuasi suhu kabin yang tidak dapat dijelaskan oleh kegagalan mekanis mayor [10]. Pendekatan Konseptual menekankan bahwa *drift* pada sensor suhu kabin dapat mengirimkan sinyal umpan balik (*feedback*) yang salah ke ACS Controller, menyebabkan sistem bereaksi berlebihan (*over-compensate*) dan menghasilkan ketidaknyamanan termal meskipun komponen mekanis ACS baik-baik saja [11].

2) Kegagalan Control Valve Actuator

Kegagalan pada *actuator Trim Air Valve* atau *Bypass Valve* mencegah sistem kontrol memodulasi campuran udara panas dan dingin secara tepat [10], [11]. Ini adalah faktor kritis dalam menyebabkan ketidakseragaman suhu antara zona kabin (*zone temperature differences*).

4.2. Pembahasan Konseptual: Interaksi dan Efek Berantai Degradasi

Inti dari analisis konseptual ini adalah memahami bagaimana faktor-faktor di atas berinteraksi dan menyebabkan efek berantai (*domino effect*) yang memperburuk kinerja ACS secara keseluruhan.

a. Keterkaitan Termal-Mekanis (Fouling dan ACM)

Model konseptual ini menunjukkan interaksi Termal-Mekanis sebagai berikut:

- 1) *Fouling* (Termal): Penurunan ϵ pada *Heat Exchanger*.
- 2) Peningkatan Suhu *Pack Inlet*: Udara yang masuk ke ACM menjadi lebih panas.
- 3) Kompensasi Sistem (Kontrol): ACS Controller mencoba mencapai suhu setpoint dengan memerintahkan ACM berputar lebih cepat.
- 4) Akselerasi Keausan (Mekanis): Peningkatan kecepatan ACM dan suhu operasi termal mempercepat *bearing wear* dan menurunkan η ACM.

- 5) Peningkatan Konsumsi Bahan Bakar: Kebutuhan daya *bleed air* yang lebih tinggi untuk menjalankan ACM yang kurang efisien dan lebih cepat, menghasilkan penalti *fuel burn*.

Model ini secara konseptual menghubungkan masalah perawatan termal (pembersihan) dengan biaya operasional (bahan bakar) dan pemeliharaan (keandalan ACM) [9], [12].

b. Kritisitas Faktor Kontrol dalam Diagnosis

- a) Degradasi Kinerja vs. Kegagalan Kritis: Faktor kontrol/sensor cenderung menyebabkan degradasi kinerja (kenyamanan yang buruk, fluktuasi suhu) daripada kegagalan kritis (seperti *pack trip*) [16], [17]. Analisis FIM menunjukkan bahwa masalah *intermittent* atau "suhu tidak stabil" adalah yang paling sulit diisolasi karena tidak meninggalkan fault code yang jelas, sering kali memerlukan penggunaan Pendekatan Konseptual untuk menelusuri data parameter penerbangan [10].
- b) Diagnosis Berbasis Parameter: Untuk mengatasi *sensor drift*, diperlukan analisis tren parameter (misalnya, membandingkan tren T_{sensor} pada kondisi *Ground Idle* standar antar pesawat) untuk mengidentifikasi pergeseran yang tidak disebabkan oleh kegagalan mekanis [18].

4.3. Kerangka Konseptual Diagnosis Kinerja ACS 737NG

Berdasarkan analisis faktor kritis, diusulkan sebuah kerangka konseptual untuk pemeliharaan yang berfokus pada *performance monitoring* daripada *failure detection* semata:

a. Tingkat 1: Pemantauan Parameter Kinerja Utama

Fokus pada tiga parameter utama yang dapat diakses melalui data penerbangan atau *built-in test equipment* (BITE):

- a) *Pack Output Temperature* ($T_{\text{pack,out}}$)
Harus konsisten pada kondisi operasi yang sama. Peningkatan $T_{\text{pack,out}}$ menunjukkan degradasi termal (*fouling* atau kebocoran ram air).
- b) *ACM Speed / Vibration Signature*
Kenaikan abnormal menunjukkan masalah mekanis (*bearing wear* atau *imbalance*).
- c) *Trim Air Valve Position vs. Cabin Setpoint*
Ketidaksesuaian yang signifikan mengindikasikan masalah kontrol (sensor atau aktuator).

b. Tingkat 2: Cross-Reference Troubleshooting

Menggunakan matriks korelasi untuk menghubungkan symptom (misalnya, *low pack output* dan *high EGT*) dengan akar penyebab yang paling mungkin (misalnya, *fouling Heat Exchanger* yang meningkatkan beban *bleed air*).

Implikasi Konseptual: Penelitian ini mengalihkan fokus *maintenance* dari sekadar mengganti komponen yang gagal (*failure replacement*) menjadi memulihkan efisiensi termodinamika melalui intervensi yang ditargetkan (misalnya, membersihkan *heat exchanger* untuk mencegah percepatan keausan ACM).

5. Penutup

Berdasarkan Studi Literatur Komprehensif, Analisis Dokumen Teknis, dan Pendekatan Konseptual, penelitian ini menyimpulkan bahwa degradasi kinerja ACS pada Boeing 737NG merupakan hasil dari interaksi kompleks antara faktor termal, mekanis, dan kontrol. Tiga temuan utama adalah:

- a. Faktor Termal sebagai Pemicu Utama: *Fouling* (penumpukan deposit) pada *Primary* dan *Secondary Heat Exchanger* diidentifikasi sebagai penyebab degradasi termal yang dominan. Secara konseptual, penurunan efektivitas perpindahan panas (ϵ) akibat *fouling* menjadi pemicu efek berantai yang meningkatkan suhu udara *pack* dan mempercepat keausan komponen hilir.
- b. Keterkaitan Degradasi Termal dan Mekanis: Terdapat hubungan timbal balik yang kritis antara domain termal dan mekanis. Peningkatan suhu operasi yang disebabkan oleh *fouling* menuntut *Air Cycle Machine* (ACM) bekerja pada kecepatan yang lebih

- tinggi dan beban yang lebih besar, yang secara langsung mengakselerasi keausan mekanis (*bearing wear* dan penurunan efisiensi isentropik (η_{is})) dan meningkatkan konsumsi daya *bleed air*.
- c. Kritisitas Faktor Kontrol dalam Diagnosis: Degradasi kinerja yang sulit diisolasi sering kali disebabkan oleh kesalahan pada sistem kontrol, khususnya *sensor drift* dan aktuator yang tidak akurat. Faktor-faktor ini menyebabkan sistem memberikan output yang salah (misalnya, *over-cooling* atau *under-cooling*) meskipun komponen mekanis ACS berfungsi normal, menekankan perlunya diagnosis berbasis tren data parameter daripada sekadar kode *fault* diskrit.

Secara keseluruhan, analisis konseptual ini menyediakan kerangka kerja yang menjelaskan bagaimana masalah pemeliharaan minor (seperti *fouling*) dapat berkembang menjadi penalti operasional yang signifikan (peningkatan biaya bahan bakar dan perbaikan ACM yang mahal).

Berdasarkan kesimpulan di atas, diajukan saran-saran berikut untuk operator pesawat dan organisasi *Maintenance, Repair, and Overhaul* (MRO):

- a. Bidang Perawatan (MRO)
 - 1) Optimasi Jadwal Pembersihan *Heat Exchanger*: MRO disarankan untuk menggeser prosedur pembersihan *Heat Exchanger* dari jadwal berbasis waktu kalender (*time-based*) menjadi berbasis kondisi dan lingkungan operasional (*condition-based*), terutama untuk pesawat yang beroperasi di lingkungan berdebu atau lembab.
 - 2) Implementasi *Predictive Maintenance* (PdM) pada ACM: Mengadopsi teknologi pemantauan getaran (*vibration monitoring*) atau analisis tren kecepatan/suhu ACM untuk mendeteksi penurunan η_{is} atau bearing wear pada tahap awal, sebelum terjadi kegagalan katastrofik.
 - 3) Kalibrasi dan Verifikasi Sensor Suhu: Menetapkan prosedur yang lebih ketat untuk memverifikasi akurasi dan kalibrasi sensor suhu kabin dan *pack* secara periodik guna meminimalisir masalah *sensor drift* yang menyebabkan diagnosis yang keliru.
- b. Penelitian Selanjutnya
 - 1) Pemodelan Kuantitatif Keterkaitan Faktor: Disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan yang melibatkan pemodelan termodinamika kuantitatif yang memasukkan variabel *fouling* (misalnya, R_f) dan η_{is} ACM untuk memprediksi secara matematis besaran penurunan kinerja dan penalti fuel burn pada kondisi operasional yang berbeda.
 - 2) Analisis Fleet Data: Melakukan studi empiris menggunakan data operasional (parameter data) dari armada B737NG yang besar untuk memvalidasi kerangka kerja diagnostik konseptual yang diusulkan dalam penelitian ini.

Referensi

- [1] A. A. Alhallaj, "Analisa Kelayakan Komponen Temperature Control Valve Yang Terdapat Pada Sistem Air Conditioning Pesawat Boeing 737-800," Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, 2024.
- [2] D. H. Nugroho, Sofiah, Yuniar, and A. I. A. Pramito, *Sistem Utilitas*, Pertama. Bandung: Widina Media Utama, 2025.
- [3] R. Mawla, A. Farras, Z. Nuurul, and H. Prayitno, "Analisis Perkembangan Teknologi Boeing 737 Terhadap Masa Depan Dunia Penerbangan Sipil," *J. Penelit.*, vol. 9, no. 4, 2024.
- [4] L. O. Dzakir *et al.*, *Sistem Energi: Konsep, Teknologi, dan Implementasi Berkelanjutan*, Pertama. Agam: Yayasan Tri Edukasi Ilmiah, 2025.
- [5] R. Harfi, "Analysis Corrosion & Prediction Materials Age Remained Fin TUBubeE," *J. Ilm. Tek.*, vol. 1, no. 2, pp. 41–53, 2022.
- [6] B. R. Ristiawan and D. Wicaksono, "Analysis And Solutions For Decreasing The Effectiveness Of The Air Conditioning System On The Boeing 737-900 ER," *Tek. STTKDJ. Tek. Elektron. ENGINE*, vol. 11, no. 1, pp. 41–46, 2025.

-
- [7] Y. Fisco, L. Magriasti, and Y. Yulhendri, "Efisiensi Alokasi SDA dan Degradasi Lingkungan Serta Aktifitas Ekonomi," *Iltizam J. Ekon. dan Keuang. Islam*, vol. 1, no. 2, pp. 15–38, 2025.
- [8] A. Istikomah, "The Failure Of Air Conditioning System In B737NG Aircraft," *Vortex*, vol. 1, no. 1, pp. 17–22, 2020.
- [9] I. Jennions and F. Ali, "Evaluation of Component Level Degradation in the Boeing 737-800 Air Cycle Machine," *J. Therm. Sci. Eng. Appl.*, vol. 15, no. 3, 2023.
- [10] Boeing, "ATA Chapter 21 (Air Conditioning and Pressurization)," in *Boeing 737NG Aircraft Maintenance Manual (AMM)*, 1956.
- [11] I. Moir and A. Seabridge, *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [12] I. Jennions and F. Ali, "Assessment of Heat Exchanger Degradation in a Boeing 737-800 Environmental Control System," *J. Therm. Sci. Eng. Appl.*, vol. 13, no. 6, 2021.
- [13] Boeing, "ATA Chapter 36 (Pneumatic)," in *Boeing 737NG Aircraft Maintenance Manual (AMM)*, 1956.
- [14] D. Y. Muhammad, "Analisis Reliability Air Cycle Machine (ACM) Boeing 737-900ER Menggunakan Metode Failure Mode And Effect Analysis (FMEA) dan Metode Weibull," Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto, 2023.
- [15] R. Kant, P. S. Chauhan, G. Bhatt, and S. Bhattacharya, "Corrosion Monitoring and Control in Aircraft: A Review," in *Sensors for Automotive and Aerospace Applications*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018, pp. 39–53.
- [16] Boeing, "ATA Chapter 21 (Troubleshooting and Fault Isolation)," 1956.
- [17] Boeing, "ATA 21 Air Conditioning System - B737 NG," in *ATA*, 1956.
- [18] S. Fu and N. P. Avdelidis, "Prognostic and Health Management of Critical Aircraft Systems and Components: An Overview," *Sensors*, vol. 23, no. 19, 2023.