

ANALISIS KEGAGALAN *FUEL FILTER CLOGGING* PADA MESIN GE90-115B PADA PESAWAT BOEING 777-300ER MENGGUNAKAN PENDEKATAN *ROOT CAUSE ANALYSIS*

*Dhafin Rahmat Ramdhani¹, Norman Iskandar², Sulardjaka²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: dhafinramdhani54@gmail.com

Abstrak

Fuel filter merupakan salah satu komponen kritis pada sistem bahan bakar mesin GE90 yang berfungsi menyaring kontaminan sebelum bahan bakar dialirkan menuju komponen presisi tinggi, seperti *Hydromechanical Unit* (HMU) dan *fuel nozzle*. Penyumbatan (*clogging*) pada *fuel filter* dapat menyebabkan peningkatan *differential pressure*, menurunkan efektivitas filtrasi, serta berpotensi mengganggu kontinuitas suplai bahan bakar dan performa mesin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor penyebab *fuel filter clogging* pada mesin GE90 menggunakan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA). Metode penelitian yang digunakan adalah deskriptif kualitatif melalui studi literatur dan analisis dokumentasi berdasarkan diagram *Engine Fuel Distribution Functional Description* Boeing 777 AMM Chapter 73-11-00. Identifikasi akar penyebab dilakukan menggunakan diagram fishbone yang mengelompokkan faktor penyebab ke dalam enam kategori, yaitu *Material*, *Machine*, *Method*, *Man*, *Environment*, dan *Measurement*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor *material* merupakan penyebab dominan terjadinya *fuel filter clogging*, yang meliputi kontaminasi partikel padat, air bebas, mikroorganisme, serta produk degradasi bahan bakar. Faktor lain seperti keausan komponen sistem bahan bakar, ketidaksesuaian prosedur pemeliharaan, kesalahan manusia, kondisi lingkungan, dan keterbatasan sistem pemantauan turut mempercepat terjadinya penyumbatan filter. Hasil analisis menunjukkan bahwa mekanisme *fuel filter clogging* diawali oleh akumulasi kontaminan pada media filter yang menyebabkan penurunan porositas dan permeabilitas media, sehingga meningkatkan *differential pressure* dan akhirnya menyebabkan penyumbatan filter. Oleh karena itu, pengendalian kualitas bahan bakar, penerapan pemeliharaan preventif, dan implementasi *Condition-Based Maintenance* (CBM) direkomendasikan untuk meningkatkan keandalan sistem bahan bakar mesin GE90.

Kata kunci: ge90; *fuel filter clogging*; sistem bahan bakar; *root cause analysis*; diagram fishbone

Abstract

The *fuel filter* is a critical component in the GE90 engine fuel system that functions to remove contaminants before fuel is delivered to high-precision components such as the *Hydromechanical Unit* (HMU) and *fuel nozzles*. *Fuel filter clogging* may increase *differential pressure*, reduce filtration effectiveness, and potentially disrupt fuel supply continuity and engine performance. This study aims to analyze the causes of *fuel filter clogging* in the GE90 engine using a *Root Cause Analysis* (RCA) approach. A qualitative descriptive method was employed through literature review and documentation analysis based on the Boeing 777 Aircraft Maintenance Manual (AMM) Chapter 73-11-00, specifically the *Engine Fuel Distribution Functional Description*. Root causes were identified using a fishbone diagram, which categorized contributing factors into six groups: *Material*, *Machine*, *Method*, *Man*, *Environment*, and *Measurement*. The results indicate that the material factor is the dominant cause of *fuel filter clogging*, including contamination by solid particles, free water, microorganisms, and fuel degradation products. Additional contributing factors include fuel system component wear, inadequate maintenance procedures, human errors, environmental conditions, and limitations in monitoring systems. The analysis reveals that the clogging mechanism begins with contaminant accumulation on the filter media, leading to reduced porosity and permeability, increased *differential pressure*, and ultimately filter blockage. Therefore, fuel quality control, preventive maintenance implementation, and the adoption of *Condition-Based Maintenance* (CBM) are recommended to enhance the reliability of the GE90 fuel system.

Keywords : ge90; *fuel filter clogging*; fuel system; *root cause analysis*; fishbone diagram

1. Pendahuluan

Mesin GE90 yang diproduksi oleh General Electric GE Aerospace merupakan salah satu mesin turbofan *high bypass ratio* terbesar yang digunakan pada armada Boeing 777-200 dan 777-300. Mesin ini dirancang untuk menghasilkan tingkat keandalan, efisiensi bahan bakar, dan performa operasional yang sangat tinggi. Untuk mencapai performa tersebut, sistem bahan bakar pada GE90 harus mampu menyediakan aliran bahan bakar secara kontinu, stabil, dan bebas dari kontaminasi. Berdasarkan diagram *Engine Fuel Distribution Functional Description* pada *Aircraft Maintenance Manual (AMM)* Boeing 777, bahan bakar dari tangki pesawat dipompa menuju *main fuel pump*, kemudian melewati *boost stage*, *fuel filter*, *Hydromechanical Unit (HMU)*, *Fuel Metering Valve (FMV)*, dan akhirnya disalurkan menuju *fuel nozzle* sebelum diinjeksikan ke ruang bakar. Keberadaan *fuel filter* menjadi sangat penting karena komponen ini berfungsi sebagai garis pertahanan utama terhadap masuknya partikel asing ke dalam komponen-komponen presisi tinggi pada sistem bahan bakar.

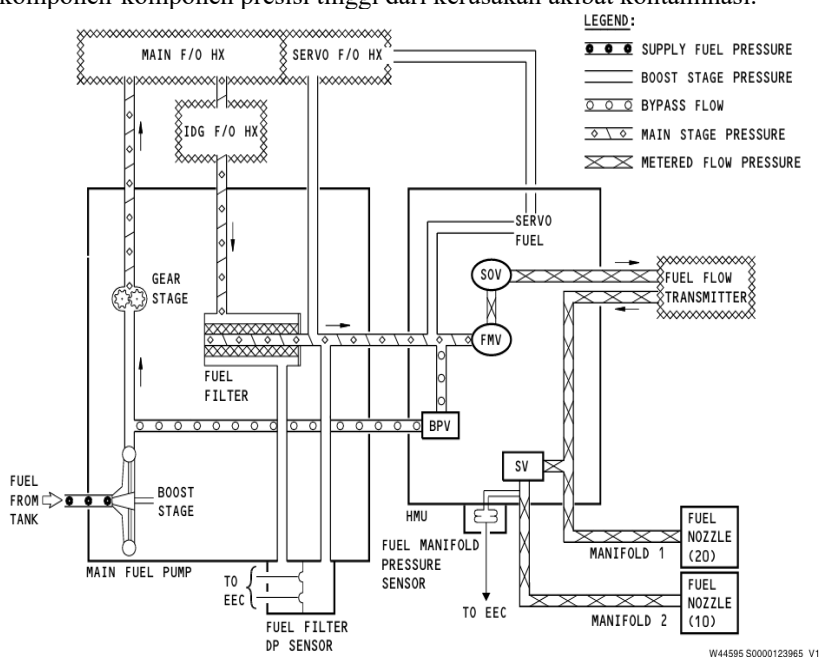
Pada mesin turbofan modern seperti GE90, toleransi manufaktur komponen hidromekanik sangat kecil sehingga keberadaan partikel kontaminan dalam jumlah sedikit sekalipun dapat menimbulkan gangguan operasional. Penyumbatan *fuel filter* (*fuel filter clogging*) dapat menyebabkan peningkatan *pressure drop* di sepanjang sistem bahan bakar, aktivasi *bypass valve*, penurunan efektivitas penyaringan, serta berpotensi menyebabkan ketidakstabilan aliran bahan bakar menuju *fuel nozzle*. Apabila kondisi ini tidak terdeteksi dan tidak segera ditangani, maka dapat menimbulkan *fuel starvation*, penurunan performa mesin, peningkatan *engine exhaust gas temperature (EGT)*, bahkan dalam kondisi ekstrem dapat menyebabkan *engine flameout* di udara. Oleh karena itu, pemahaman mengenai akar penyebab penyumbatan *fuel filter* pada mesin GE90 memiliki arti penting dalam upaya meningkatkan keselamatan penerbangan dan keandalan operasional mesin.

Seiring berkembangnya teknologi penerbangan, isu kontaminasi bahan bakar semakin menjadi perhatian karena bahan bakar aviasi modern tidak hanya rentan terhadap kontaminasi partikel padat, tetapi juga terhadap air, mikroorganisme, senyawa kimia tertentu, serta produk degradasi bahan bakar. Kontaminasi bahan bakar jet masih menjadi salah satu faktor utama yang dapat memicu kegagalan sistem bahan bakar dan penyumbatan filter pada mesin pesawat. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis faktor-faktor penyebab *fuel filter clogging* pada mesin GE90 menggunakan pendekatan *Root Cause Analysis (RCA)* yang divisualisasikan melalui diagram fishbone sehingga dapat diperoleh rekomendasi pemeliharaan yang lebih efektif.

2. Dasar Teori

2.1 Sistem Distribusi Bahan Bakar Mesin GE90

Sistem distribusi bahan bakar pada mesin GE90 dirancang untuk menjamin tersedianya aliran bahan bakar dengan tekanan dan laju aliran yang sesuai dengan kebutuhan pembakaran pada berbagai kondisi operasi mesin. Sistem ini memegang peranan yang sangat penting karena keberhasilan proses pembakaran di dalam ruang bakar sangat bergantung pada kontinuitas suplai bahan bakar yang bersih, stabil, dan terukur secara presisi. Pada mesin turbofan modern seperti GE90, perubahan kondisi operasi mesin yang terjadi selama fase *start-up*, *take-off*, *climb*, *cruise*, hingga *landing* menyebabkan kebutuhan bahan bakar selalu berubah secara dinamis. Oleh karena itu, sistem bahan bakar harus mampu menyesuaikan jumlah bahan bakar yang disuplai sesuai dengan perintah dari sistem kontrol mesin tanpa mengalami keterlambatan respons ataupun gangguan aliran. Selain berfungsi menyalurkan bahan bakar, sistem distribusi bahan bakar juga berperan dalam menjaga kualitas bahan bakar melalui proses filtrasi, mengatur tekanan sistem, menyediakan bahan bakar untuk kebutuhan servo, serta melindungi komponen-komponen presisi tinggi dari kerusakan akibat kontaminasi.



ENGINE FUEL DISTRIBUTION - FUNCTIONAL DESCRIPTION

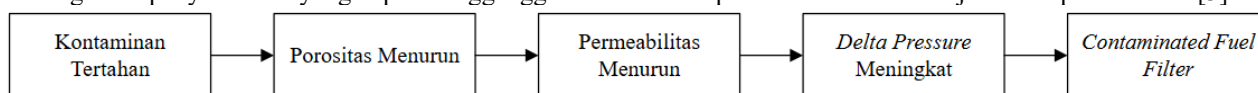
Gambar 1. Engine Fuel Distribution

Berdasarkan *Aircraft Maintenance Manual* Boeing, bahan bakar dari tangki pesawat pertama kali masuk ke *main fuel pump* yang terdiri atas *boost stage* dan *gear stage*. *Boost stage* berfungsi meningkatkan tekanan awal bahan bakar sehingga mampu memenuhi kebutuhan suplai sistem, sedangkan *gear stage* menghasilkan tekanan yang lebih tinggi untuk mendukung operasi *Hydromechanical Unit* (HMU). Sebelum memasuki HMU, bahan bakar harus melewati *fuel filter* yang berfungsi menyaring partikel padat, serpihan logam, endapan, maupun kontaminan lainnya yang dapat merusak komponen sistem bahan bakar.

Filter bahan bakar pada GE90 memiliki peranan vital karena HMU, FMV, dan *fuel nozzle* merupakan komponen dengan toleransi yang sangat kecil dan sensitif terhadap kontaminasi. Ketika media filter mulai tersumbat, maka perbedaan tekanan (*differential pressure*) antara sisi hulu dan hilir filter akan meningkat. Apabila tekanan diferensial melebihi batas tertentu, maka *bypass valve* (BPV) akan terbuka untuk mempertahankan kontinuitas aliran bahan bakar menuju mesin. Walaupun mekanisme ini mampu mencegah terjadinya gangguan suplai bahan bakar, terbukanya BPV mengakibatkan bahan bakar tidak lagi melewati proses filtrasi sehingga meningkatkan risiko kerusakan komponen hilir.

2.2 Mekanisme Terjadinya Fuel Filter Clogging

Fenomena *fuel filter clogging* terjadi ketika kontaminan yang terbawa oleh aliran bahan bakar terakumulasi pada media filter sehingga menyebabkan berkurangnya luas penampang efektif aliran bahan bakar. Akumulasi kontaminan tersebut menyebabkan penurunan porositas media filter, yang selanjutnya menurunkan permeabilitas dan meningkatkan nilai *differential pressure* antara sisi hulu dan hilir filter [6]. Apabila kondisi ini berlangsung secara terus-menerus, maka filter akan mengalami penyumbatan yang dapat mengganggu kontinuitas suplai bahan bakar menuju sistem pembakaran [3].



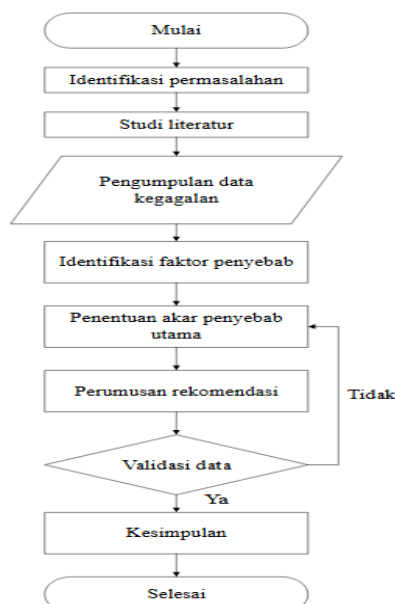
Gambar 2. Mekanisme Kegagalan Fuel Filter

Gambar 2 di atas menunjukkan mekanisme terjadinya *fuel filter clogging* akibat akumulasi kontaminan pada media filter. Kontaminan yang tertahan pada permukaan filter menyebabkan penurunan porositas media, sehingga kemampuan filter untuk meloloskan aliran bahan bakar (*permeabilitas*) ikut menurun. Penurunan permeabilitas tersebut meningkatkan *differential pressure* (*delta pressure*) antara sisi hulu dan hilir filter. Apabila kondisi ini berlangsung secara terus-menerus, filter akan mengalami kontaminasi atau penyumbatan (*contaminated fuel filter*) yang dapat mengurangi efektivitas penyaringan serta berpotensi mengganggu kontinuitas suplai bahan bakar ke sistem mesin.

Pruski dan Sprynsky menyatakan bahwa "*Special attention is focused on the threats of fuel contamination with solid particles/trace elements, water, microorganisms, and fatty acid methyl esters (FAME)*" [3]. Pernyataan tersebut menunjukkan bahwa kontaminasi bahan bakar merupakan faktor utama yang berkontribusi terhadap terjadinya penyumbatan *fuel filter* pada sistem bahan bakar pesawat.

3. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kualitatif dengan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA). Data penelitian diperoleh melalui studi dokumentasi terhadap diagram *Engine Fuel Distribution Functional Description* pada Boeing 777 AMM Chapter 73 serta kajian literatur yang berkaitan dengan kontaminasi bahan bakar, mekanisme penyumbatan filter, dan sistem bahan bakar pesawat [2], [3].



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian.

Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi konfigurasi sistem distribusi bahan bakar GE90 berdasarkan diagram fungsional sistem. Selanjutnya dilakukan identifikasi faktor-faktor yang berpotensi menyebabkan *fuel filter clogging* berdasarkan hasil studi literatur. Faktor-faktor tersebut kemudian dianalisis menggunakan pendekatan RCA dan divisualisasikan dalam bentuk diagram fishbone yang terdiri atas enam kategori utama, yaitu *Material*, *Machine*, *Method*, *Man*, *Environment*, dan *Measurement*. Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab secara sistematis sehingga dapat dirumuskan tindakan perbaikan dan pencegahan yang tepat [7].

Setelah faktor penyebab diidentifikasi, dilakukan analisis hubungan kausal antara masing-masing faktor dengan fenomena penyumbatan filter. Hasil analisis tersebut kemudian digunakan untuk menyusun diagram fishbone yang menggambarkan akar penyebab (*root causes*) secara komprehensif. Pendekatan RCA dipilih karena metode ini mampu membantu organisasi pemeliharaan dalam menentukan tindakan korektif dan preventif secara lebih efektif dibandingkan hanya berfokus pada gejala kerusakan yang muncul.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Analisis Sistem Distribusi Bahan Bakar GE90

Berdasarkan diagram *Engine Fuel Distribution Functional Description* pada Boeing 777 AMM Chapter 73-11-00, diketahui bahwa *fuel filter* pada mesin GE90 terletak setelah *boost stage* pada *main fuel pump* dan sebelum *Hydromechanical Unit* (HMU). Posisi tersebut menunjukkan bahwa seluruh bahan bakar yang berasal dari tangki pesawat harus melewati *fuel filter* sebelum memasuki komponen-komponen presisi tinggi seperti HMU, *Fuel Metering Valve* (FMV), dan *fuel nozzle* [1]. Konfigurasi ini menegaskan bahwa *fuel filter* berfungsi sebagai komponen proteksi utama terhadap masuknya partikel asing yang dapat menyebabkan kerusakan pada sistem bahan bakar.

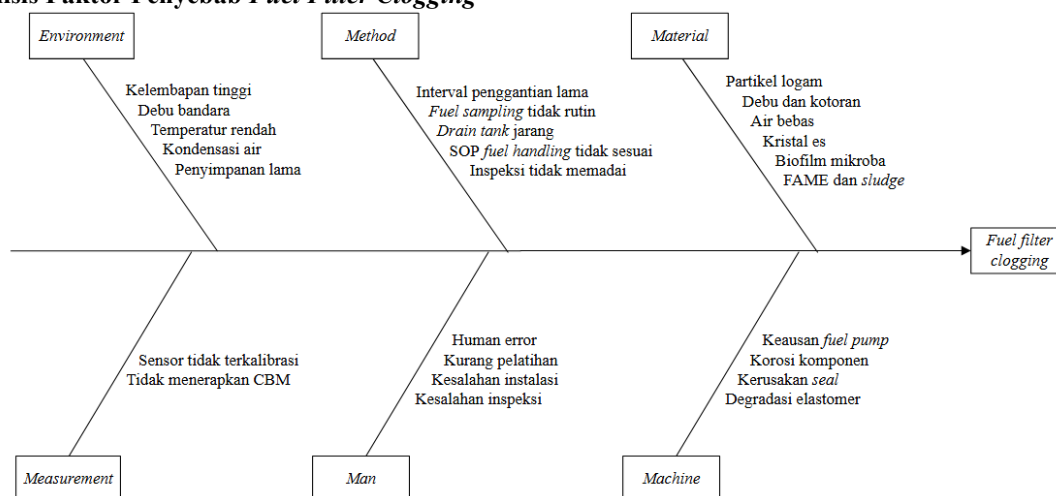
Keberadaan *fuel filter* sangat penting karena sistem bahan bakar pada mesin turbofan modern beroperasi pada tekanan tinggi dan memiliki toleransi komponen yang sangat kecil. Oleh karena itu, akumulasi kontaminan pada media filter akan meningkatkan hambatan aliran bahan bakar yang selanjutnya menyebabkan peningkatan *differential pressure* (ΔP) antara sisi hulu (*upstream*) dan hilir (*downstream*) filter [2]. Apabila nilai ΔP melebihi batas operasi yang ditentukan, maka *Bypass Valve* (BPV) akan terbuka untuk menjaga kontinuitas suplai bahan bakar menuju ruang bakar [1]. Meskipun mekanisme ini mampu mencegah terjadinya gangguan aliran bahan bakar, bahan bakar yang melewati BPV tidak lagi mengalami proses filtrasi sehingga meningkatkan risiko kerusakan komponen hilir.

4.2 Mekanisme Terjadinya Fuel Filter Clogging

Berdasarkan hasil kajian literatur, mekanisme terjadinya *fuel filter clogging* diawali dengan tertahannya kontaminan pada permukaan media filter. Akumulasi kontaminan secara bertahap menyebabkan penurunan porositas media filter sehingga kemampuan media dalam meloloskan aliran bahan bakar (*permeabilitas*) mengalami penurunan [3]. Penurunan permeabilitas ini akan meningkatkan resistansi aliran bahan bakar dan menghasilkan kenaikan *differential pressure* pada filter.

Fenomena tersebut sejalan dengan penelitian Heiden dkk. yang menyatakan bahwa akumulasi material tidak larut pada media filtrasi merupakan salah satu penyebab utama terjadinya penyumbatan filter (*filter blockage*) [4]. Semakin besar jumlah kontaminan yang tertahan, maka semakin kecil luas penampang efektif aliran bahan bakar sehingga kondisi *fuel filter clogging* tidak dapat dihindari. Apabila kondisi ini berlangsung secara terus-menerus tanpa tindakan pemeliharaan, maka efisiensi sistem bahan bakar akan menurun dan berpotensi menyebabkan gangguan performa mesin [5].

4.3 Analisis Faktor Penyebab Fuel Filter Clogging



Gambar 4. Fish Bone Diagram Fuel Filter Clogging.

Berdasarkan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA) menggunakan diagram fishbone, diperoleh enam kategori utama penyebab *fuel filter clogging*, yaitu *Material*, *Machine*, *Method*, *Man*, *Environment*, dan *Measurement*.

a. Faktor Material

Faktor material merupakan penyebab dominan terjadinya penyumbatan *fuel filter*. Kontaminan berupa partikel padat dapat berasal dari korosi tangki bahan bakar, serpihan logam akibat keausan *fuel pump*, degradasi seal, debu lingkungan, maupun residu proses manufaktur [3]. Partikel-partikel tersebut akan tertahan pada media filter dan membentuk lapisan endapan (*filter cake*) yang menyebabkan peningkatan *pressure drop*.

Pruski dan Sprynskyy menyatakan bahwa kontaminasi bahan bakar aviasi umumnya berasal dari partikel padat, air, mikroorganisme, dan *Fatty Acid Methyl Esters* (FAME) yang berpotensi menyebabkan penyumbatan filter dan gangguan operasi mesin [3]. Selain itu, keberadaan senyawa FAME dalam bahan bakar dapat meningkatkan pembentukan endapan yang mempercepat proses *clogging* [4].

b. Faktor Machine

Faktor mesin berkaitan dengan kondisi komponen internal sistem bahan bakar. Keausan pada *main fuel pump*, korosi internal pipa, kerusakan seal, serta degradasi komponen elastomer dapat menghasilkan partikel logam maupun partikel non-logam yang terbawa bersama aliran bahan bakar [1]. Partikel hasil keausan tersebut kemudian tertahan pada media filter dan mempercepat terjadinya penyumbatan.

Selain itu, aktivasi *Bypass Valve* (BPV) yang terlalu sering dapat menjadi indikasi bahwa media filter telah mengalami peningkatan hambatan aliran yang signifikan. Apabila kondisi ini tidak segera ditindaklanjuti, maka komponen-komponen hilir seperti HMU dan *fuel nozzle* berisiko mengalami kerusakan akibat masuknya kontaminan [1].

c. Faktor Metode

Faktor metode berhubungan dengan pelaksanaan prosedur pemeliharaan dan penanganan bahan bakar. Interval penggantian *fuel filter* yang terlalu panjang, tidak dilaksanakannya *fuel sampling* secara rutin, serta kurangnya kegiatan *water draining* pada tangki bahan bakar dapat meningkatkan risiko terjadinya kontaminasi [6]. Selain itu, prosedur *fuel handling* yang tidak sesuai standar juga memungkinkan masuknya partikel asing ke dalam sistem bahan bakar.

Menurut ATA Specification 103, pengawasan kualitas bahan bakar melalui proses penyaringan, pengambilan sampel, dan pengendalian kandungan air merupakan langkah penting dalam menjaga keandalan sistem bahan bakar pesawat [6]. Oleh karena itu, ketidakpatuhan terhadap prosedur tersebut dapat mempercepat terjadinya *fuel filter clogging*.

d. Faktor Man

Faktor manusia (*human factor*) turut berkontribusi terhadap terjadinya penyumbatan *fuel filter*. Kesalahan teknis selama proses pemasangan filter, ketidaksesuaian pelaksanaan prosedur inspeksi, maupun kurangnya kompetensi personel dalam mendeteksi gejala awal penyumbatan filter dapat menyebabkan gangguan pada sistem bahan bakar [7]. Selain itu, kelalaian dalam menjaga kebersihan selama aktivitas pemeliharaan dapat menimbulkan kontaminasi sekunder pada sistem.

Dalam industri penerbangan, faktor manusia diketahui sebagai salah satu penyebab utama terjadinya kesalahan pemeliharaan (*maintenance error*) yang dapat mempengaruhi keandalan sistem pesawat [7]. Oleh karena itu, peningkatan kompetensi teknis dan kepatuhan terhadap prosedur pemeliharaan menjadi aspek yang sangat penting.

e. Faktor Environment

Faktor lingkungan meliputi kondisi operasi dan lingkungan penyimpanan bahan bakar. Kelembapan udara yang tinggi dapat meningkatkan pembentukan kondensat air di dalam tangki bahan bakar [8]. Air bebas yang terdapat di dalam sistem kemudian berpotensi membentuk kristal es pada temperatur rendah selama fase *cruise*.

Ugbeh-Johnson dkk. menjelaskan bahwa perilaku air dalam sistem bahan bakar pesawat masih menjadi perhatian utama karena pembentukan es dapat menghambat aliran bahan bakar dan menyebabkan gangguan operasi mesin [5]. Selain itu, lingkungan bandara yang berdebu dan penyimpanan bahan bakar dalam jangka waktu lama juga dapat meningkatkan jumlah kontaminan pada sistem bahan bakar [3].

f. Faktor Measurement

Faktor pengukuran berkaitan dengan sistem pemantauan kondisi *fuel filter*. Tidak tersedianya pemantauan *differential pressure* secara berkala, sensor tekanan yang tidak terkalibrasi, serta tidak adanya analisis tren data kondisi filter dapat menyebabkan penyumbatan tidak terdeteksi pada tahap awal [9]. Akibatnya, *fuel filter* dapat terus digunakan hingga mencapai kondisi kritis yang berpotensi mengganggu operasi mesin.

Penerapan *Condition-Based Maintenance* (CBM) melalui pemantauan parameter operasi seperti *fuel pressure*, *differential pressure*, dan *fuel flow* dapat membantu mendeteksi indikasi awal penyumbatan filter sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan secara tepat waktu [9].

4.4 Hasil Analisis Root Cause Analysis (RCA)

Hasil analisis RCA menunjukkan bahwa faktor material merupakan penyebab utama terjadinya *fuel filter clogging* pada mesin GE90. Kontaminasi berupa partikel padat, air, mikroorganisme, dan produk degradasi bahan bakar memiliki pengaruh langsung terhadap penurunan porositas media filter. Faktor tersebut diperparah oleh kondisi komponen sistem bahan bakar, ketidaksesuaian prosedur pemeliharaan, faktor lingkungan, serta keterbatasan sistem pemantauan kondisi filter.

Berdasarkan hasil analisis fishbone, hubungan sebab-akibat terjadinya *fuel filter clogging* dapat dijelaskan sebagai berikut: kontaminasi bahan bakar menyebabkan akumulasi partikel pada media filter, akumulasi tersebut menurunkan porositas dan permeabilitas media, selanjutnya meningkatkan *differential pressure*, dan pada akhirnya menyebabkan terjadinya penyumbatan filter. Apabila kondisi tersebut tidak segera ditangani, maka performa sistem bahan bakar dan keandalan mesin GE90 dapat mengalami penurunan secara signifikan.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis sistem distribusi bahan bakar GE90 dan kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *fuel filter* merupakan salah satu komponen kritis dalam sistem bahan bakar mesin GE90 yang berfungsi untuk melindungi komponen-komponen presisi tinggi, seperti *Hydromechanical Unit* (HMU), *Fuel Metering Valve* (FMV), dan *fuel nozzle*, dari kontaminasi bahan bakar [1]. Keandalan *fuel filter* sangat menentukan kontinuitas suplai bahan bakar dan kestabilan proses pembakaran pada seluruh rentang operasi mesin. Oleh karena itu, gangguan pada *fuel filter*, khususnya berupa penyumbatan (*fuel filter clogging*), dapat menurunkan performa sistem bahan bakar dan berpotensi mempengaruhi keselamatan operasi penerbangan [2].

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mekanisme terjadinya *fuel filter clogging* diawali oleh tertahannya kontaminan pada media filter yang kemudian menyebabkan penurunan porositas dan permeabilitas media filter. Kondisi tersebut mengakibatkan meningkatnya *differential pressure* (ΔP) antara sisi hulu dan hilir filter hingga akhirnya menyebabkan penyumbatan filter [3]. Apabila kondisi ini terus berlangsung, maka dapat terjadi penurunan efektivitas filtrasi, aktivasi *Bypass Valve* (BPV), serta peningkatan risiko kerusakan komponen hilir akibat masuknya kontaminan ke dalam sistem bahan bakar [1].

Berdasarkan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA), diperoleh enam kategori utama penyebab *fuel filter clogging*, yaitu *Material*, *Machine*, *Method*, *Man*, *Environment*, dan *Measurement*. Dari keenam kategori tersebut, faktor material merupakan akar penyebab (*root cause*) yang paling dominan, terutama dalam bentuk kontaminasi partikel padat, air bebas, pertumbuhan mikroorganisme, serta produk degradasi bahan bakar [4]. Selain itu, faktor lain seperti keausan komponen sistem bahan bakar, ketidaksesuaian prosedur pemeliharaan, kesalahan manusia, kondisi lingkungan operasi, dan keterbatasan sistem pemantauan juga turut mempercepat terjadinya penyumbatan filter [5].

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa permasalahan *fuel filter clogging* pada mesin GE90 bersifat multifaktor sehingga penanganannya harus dilakukan secara komprehensif. Upaya mitigasi yang direkomendasikan meliputi peningkatan pengawasan kualitas bahan bakar, pelaksanaan *fuel sampling* dan *water draining* secara berkala, penggantian *fuel filter* sesuai interval yang ditetapkan, peningkatan kompetensi personel pemeliharaan, serta penerapan *Condition-Based Maintenance* (CBM) melalui pemantauan parameter operasi sistem bahan bakar [2], [6]. Implementasi tindakan-tindakan tersebut diharapkan dapat meningkatkan keandalan sistem bahan bakar, mengurangi risiko kegagalan komponen, dan mendukung keselamatan serta efisiensi operasi pesawat Boeing 777 yang menggunakan mesin GE90.

6. Daftar Pustaka

- [1] Boeing Commercial Airplanes, *777-200/300 Aircraft Maintenance Manual, Chapter 73-11-00: Engine Fuel Distribution Functional Description*. Seattle, WA, USA: Boeing, 2015.
- [2] J. D. Mattingly, *Elements of Gas Turbine Propulsion*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2006.
- [3] D. Pruski and M. Sprynsky, "Jet Fuel Contamination: Forms, Impact, Control, and Prevention," *Energies*, vol. 17, no. 17, p. 4267, 2024, doi: 10.3390/en17174267.
- [4] J. Ugbeh-Johnson, M. Carpenter, C. Williams, J. F. Pons, and D. McLaren, "Complexities Associated with Nucleation of Water and Ice from Jet Fuel in Aircraft Fuel Systems: A Critical Review," *Fuel*, vol. 310, p. 122329, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122329.
- [5] Y. Wang, Y. Zhao, Y. Zhang, et al., "Water Behavior of Current Jet Fuel versus Operating Conditions: Storage Time, Temperature, Relative Humidity and Anti-Icing Agent," *Fuel*, vol. 309, p. 122088, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122088.
- [6] R. W. Heiden, S. Schober, and M. Mittelbach, "Solubility Limitations of Residual Steryl Glucosides, Saturated Monoglycerides and Glycerol in Commercial Biodiesel Fuels as Determinants of Filter Blockages," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 98, no. 12, pp. 1143-1165, 2021, doi: 10.1002/aocs.12547.
- [7] Air Transport Association, *ATA Specification 103: Standards for Jet Fuel Quality Control at Airports*. Washington, DC, USA: ATA, 2019.
- [8] A. Kanki, J. Anca, and T. Chidester, *Crew Resource Management*, 3rd ed. London, UK: Academic Press, 2019.
- [9] A. Heng, S. Zhang, A. C. C. Tan, and J. Mathew, "Rotating Machinery Prognostics: State of the Art, Challenges and Opportunities," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, no. 3, pp. 724-739, 2009, doi: 10.1016/j.ymssp.2008.06.009.
- [10] R. K. Mobley, *Maintenance Engineering Handbook*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.