

KAJIAN MEKANISME *FUEL FILTER CLOGGING* PADA ENGINE CFM56-5B DAN IMPLIKASINYA TERHADAP PERAWATAN PREVENTIF

*Sandi Hanggara Yudha Utama¹, Norman Iskandar², Ismoyo Haryanto²

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: sandihggra04@gmail.com

Abstrak

Fuel filter merupakan komponen penting pada sistem bahan bakar *engine* CFM56-5B karena berfungsi menahan partikel padat, produk korosi, dan *debris* agar tidak terbawa menuju komponen pengatur aliran dan *fuel nozzle*. Salah satu gangguan yang dapat terjadi pada komponen ini adalah *fuel filter clogging*, yaitu penyumbatan media filter akibat akumulasi kontaminan sehingga luas pori efektif berkurang dan tekanan diferensial meningkat. Artikel ini bertujuan menyusun kajian teknis mengenai alur terjadinya *fuel filter clogging*, sumber kontaminan, dampaknya terhadap sistem bahan bakar, serta implikasinya terhadap perawatan preventif. Metode yang digunakan adalah studi literatur dengan pendekatan deskriptif-kualitatif terhadap referensi sistem bahan bakar pesawat, kontaminasi bahan bakar, *wear debris*, dan *preventive maintenance*. Kontribusi artikel ini adalah penyusunan kerangka konseptual yang menghubungkan sumber kontaminan, pembentukan deposit pada filter, kenaikan *differential pressure*, potensi bypass, dan konsekuensi terhadap komponen *downstream*. Kajian ini diposisikan sebagai dasar konseptual untuk penelitian lanjutan mengenai evaluasi interval penggantian *fuel filter* berbasis analisis reliabilitas, analisis *debris*, dan pertimbangan perawatan preventif secara lebih kuantitatif.

Kata kunci: cfm56-5b; *clogging*; *fuel filter*; perawatan preventif; sistem bahan bakar

Abstract

The fuel filter is an important component in the CFM56-5B engine fuel system because it retains solid particles, corrosion products, and debris before fuel is delivered to flow-control components and fuel nozzles. One disturbance that may occur in this component is fuel filter clogging, a condition in which contaminants accumulate on the filter medium, reduce the effective pore area, and increase differential pressure. This article aims to provide a technical review of the fuel filter clogging sequence, contaminant sources, effects on the fuel system, and implications for preventive maintenance. The method used is a descriptive qualitative literature review covering aircraft fuel systems, fuel contamination, wear debris, and preventive maintenance concepts. The contribution of this article is a conceptual framework that links contaminant sources, deposit formation on the filter, differential pressure increase, possible bypass operation, and consequences for downstream components. This review is positioned as a conceptual basis for further research on fuel filter replacement interval evaluation using reliability analysis, debris analysis, and preventive maintenance considerations in a more quantitative framework.

Keywords : cfm56-5b; *clogging*; *fuel filter*; *fuel system*; *preventive maintenance*

1. Pendahuluan

Engine CFM56-5B merupakan *engine turbofan* yang digunakan pada pesawat keluarga Airbus A320-200 dan memiliki sistem bahan bakar yang berperan dalam mengatur suplai bahan bakar sesuai kebutuhan operasi *engine*. Pada sistem tersebut, *fuel filter* menjadi komponen penting karena berfungsi menahan partikel dan *debris* sebelum bahan bakar melewati komponen pengatur aliran yang memiliki celah kerja relatif presisi [1], [2].

Salah satu gangguan yang dapat terjadi pada sistem filtrasi bahan bakar adalah *fuel filter clogging*. *Clogging* dapat dipahami sebagai kondisi ketika kontaminan tertahan dan terakumulasi pada media filter sehingga menurunkan luas pori efektif. Akumulasi tersebut menyebabkan hambatan aliran meningkat dan memunculkan kenaikan *differential pressure* antara sisi masuk dan sisi keluar filter [3], [4].

Pada sistem bahan bakar pesawat, *clogging* tidak selalu disebabkan oleh satu faktor tunggal. Kontaminan dapat berasal dari faktor eksternal, misalnya partikel padat, air, mikroorganisme, atau kontaminasi selama penyimpanan dan proses *fueling* [3]-[5]. Selain itu, partikel juga dapat berasal dari faktor internal, misalnya *wear debris*, produk korosi,

atau degradasi material dari komponen sistem bahan bakar [6].

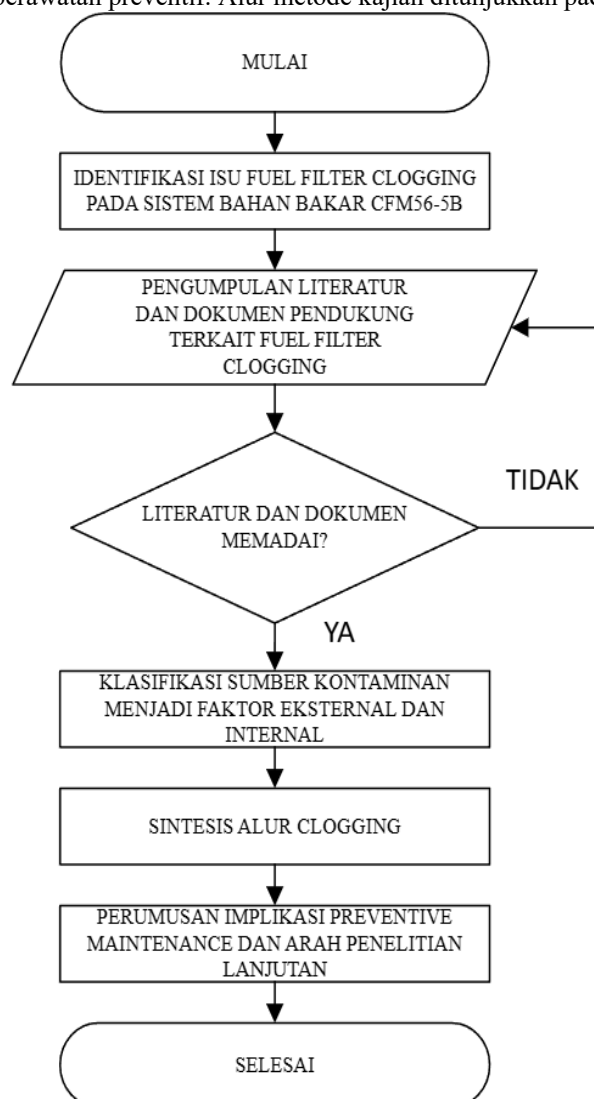
Kajian ini penting karena fuel filter berada pada jalur yang berhubungan langsung dengan komponen downstream seperti fuel pump, HMU, fuel metering valve, servo valve, dan fuel nozzle. Jika hambatan filter meningkat, sistem dapat mengalami kenaikan differential pressure dan pada kondisi tertentu bypass valve dapat terbuka untuk menjaga kontinuitas aliran bahan bakar. Kondisi tersebut mencegah fuel starvation, tetapi berpotensi mengurangi efektivitas filtrasi.

Artikel ini disusun sebagai kajian teknis dasar mengenai mekanisme fuel filter clogging pada engine CFM56-5B. Kontribusi utama artikel ini adalah menyusun kerangka konseptual yang menghubungkan sumber kontaminan, proses akumulasi pada media filter, kenaikan differential pressure, potensi bypass, dampak terhadap komponen downstream, serta implikasinya terhadap preventive maintenance. Kerangka tersebut penting sebagai dasar pemahaman awal sebelum dilakukan evaluasi yang lebih mendalam terhadap pola kegagalan, karakter debris, dan strategi penggantian preventif fuel filter berdasarkan kondisi operasi aktual. Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi penelitian lanjutan yang lebih kuantitatif dalam menentukan kebijakan perawatan fuel filter yang lebih efektif dan sesuai dengan karakteristik sistem bahan bakar engine CFM56-5B.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Metode yang digunakan adalah studi literatur dengan pendekatan deskriptif-kualitatif. Literatur dipilih berdasarkan relevansi terhadap sistem bahan bakar pesawat, kontaminasi avtur, filtrasi, *wear debris*, *fuel filter clogging*, dan konsep *preventive maintenance*. Referensi yang digunakan mencakup artikel jurnal, buku perawatan dan reliabilitas, serta training material yang relevan dengan sistem bahan bakar *engine CFM56-5B* [1]-[10].

Kajian dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu identifikasi isu *fuel filter clogging*, pengumpulan referensi, klasifikasi sumber kontaminan, penyusunan alur mekanisme *clogging*, analisis dampak teknis terhadap *fuel system*, dan perumusan implikasi terhadap perawatan preventif. Alur metode kajian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir metode kajian literatur.

Ruang lingkup kajian difokuskan pada penyusunan pemahaman konseptual mengenai mekanisme fuel filter clogging pada sistem bahan bakar engine CFM56-5B. Fokus tersebut meliputi identifikasi fungsi fuel filter, klasifikasi sumber kontaminan, alur terbentuknya penyumbatan, dampak terhadap komponen downstream, serta implikasinya terhadap strategi perawatan preventif. Pembahasan konseptual ini diperlukan agar hubungan sebab-akibat antara kontaminan, peningkatan differential pressure, potensi bypass, dan risiko operasional dapat dipahami secara sistematis sebelum dikembangkan ke tahap evaluasi berbasis data. Dengan demikian, kajian ini berperan sebagai fondasi awal bagi penelitian lanjutan yang dapat menganalisis pola kegagalan, karakter debris, dan kesesuaian interval penggantian fuel filter secara lebih kuantitatif.

Tabel 1. Ruang lingkup kajian dan keluaran yang diharapkan.

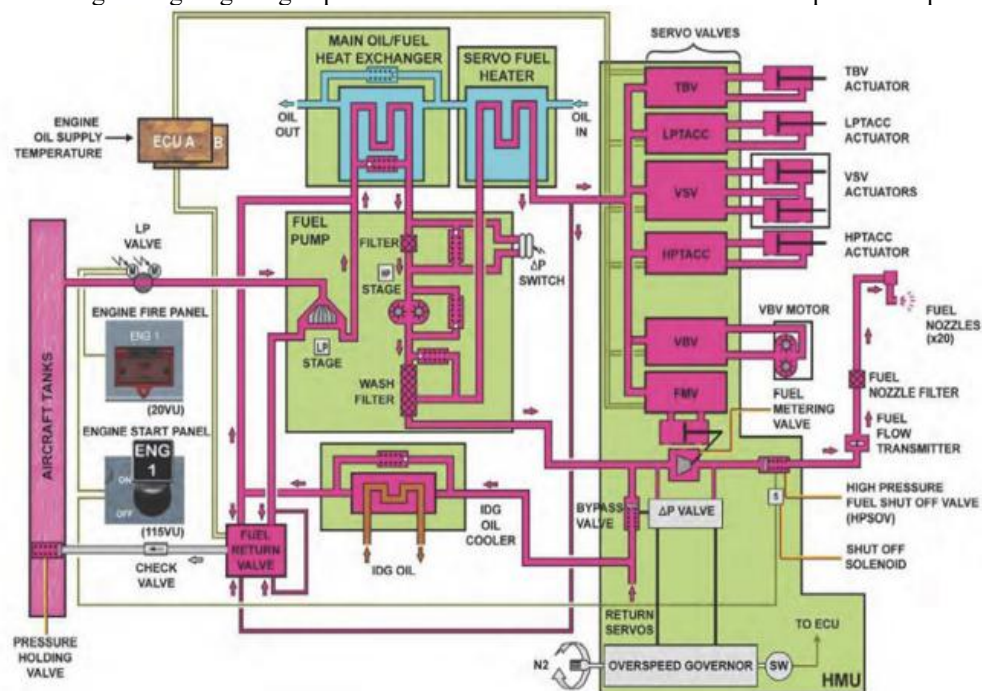
Aspek kajian	Fokus pembahasan	Keluaran
Sistem bahan bakar	Posisi <i>fuel filter</i> pada jalur suplai bahan bakar	Konteks fungsi filter terhadap komponen <i>downstream</i>
Sumber kontaminan	Faktor eksternal dan internal	Klasifikasi penyebab <i>clogging</i>
Mekanisme <i>clogging</i>	Akumulasi partikel, deposit, kenaikan <i>differential pressure</i> , dan bypass	Alur sebab-akibat penyumbatan
Perawatan preventif	Inspeksi, pemantauan indikasi, dan evaluasi interval	Implikasi strategi maintenance
Penelitian lanjutan	Analisis reliabilitas, analisis <i>debris</i> , dan evaluasi interval	Arah pengembangan studi kuantitatif

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Fungsi Fuel Filter pada Sistem Bahan Bakar Engine CFM56-5B

Fuel filter berfungsi sebagai penghalang awal terhadap partikel yang terbawa oleh bahan bakar sebelum aliran melewati komponen presisi. Dalam sistem bahan bakar *engine turbofan*, bahan bakar tidak hanya digunakan sebagai sumber energi pembakaran, tetapi juga melewati jalur pengaturan aliran, aktuatur, dan penukar panas. Oleh karena itu, kebersihan bahan bakar berpengaruh terhadap kestabilan suplai, respons sistem kontrol, dan keandalan operasi *engine* secara umum.

Secara konseptual, aliran bahan bakar bergerak dari *aircraft tanks* menuju *fuel pump*, melewati *oil/fuel heat exchanger* dan *fuel filter*, kemudian diteruskan ke sisi tekanan tinggi, *HMU*, *fuel metering valve*, dan *fuel nozzles*. Pada jalur ini, posisi *fuel filter* berada sebelum beberapa komponen *downstream* yang sensitif terhadap partikel sehingga performa filter berhubungan langsung dengan proteksi sistem bahan bakar. Skema sistem dapat dilihat pada Gambar 2.



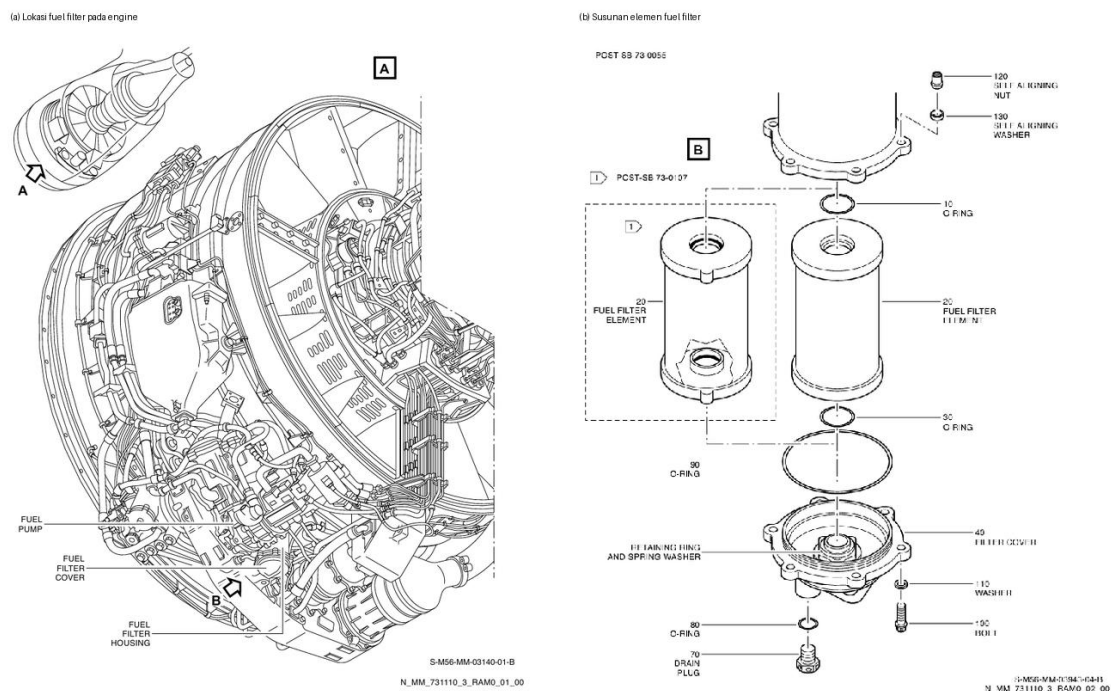
Gambar 2. Skema sistem bahan bakar *engine turbofan* sebagai konteks posisi *fuel filter* [7].

Skema pada Gambar 2 memperlihatkan bahwa sistem bahan bakar memiliki jalur utama menuju ruang bakar dan jalur balik untuk resirkulasi. Bahan bakar yang dibypass dari *HMU* serta aliran balik dari servo dapat digunakan untuk membantu pendinginan *IDG oil* melalui *IDG oil cooler* sebelum kembali menuju *fuel pump inter-stage*. Alur resirkulasi tersebut menunjukkan bahwa kebersihan bahan bakar tetap penting, baik pada jalur utama maupun jalur pendukung.

3.2 Posisi dan Komponen Utama Fuel Filter

Dari sisi instalasi, fuel filter housing merupakan bagian dari area fuel pump assembly pada engine. Posisi tersebut menunjukkan bahwa fuel filter bukan komponen yang berdiri sendiri, melainkan berada di dalam rangkaian suplai bahan bakar yang berdekatan dengan fuel pump, jalur aliran utama, dan komponen pengatur aliran. Penempatan ini membuat fuel filter berperan sebagai komponen proteksi awal sebelum bahan bakar diteruskan menuju komponen downstream yang lebih sensitif. Oleh karena itu, apabila terjadi peningkatan hambatan aliran akibat akumulasi kontaminan pada filter, kestabilan suplai bahan bakar menuju komponen seperti metering valve, servo valve, dan fuel nozzle dapat ikut terpengaruh.

Komponen utama pada rakitan fuel filter meliputi filter element, filter cover, O-ring, drain plug, bolt, dan washer. Filter element merupakan bagian utama yang berfungsi menahan partikel kontaminan agar tidak terbawa lebih jauh ke sistem bahan bakar. Sementara itu, O-ring dan filter cover berperan menjaga sealing agar tidak terjadi kebocoran setelah proses pelepasan maupun pemasangan kembali. Bolt dan washer digunakan untuk memastikan filter cover terpasang dengan kuat dan merata, sedangkan drain plug berfungsi sebagai jalur pengeluaran bahan bakar residual sebelum filter dibuka. Dengan demikian, pekerjaan pada fuel filter tidak hanya berkaitan dengan penggantian elemen filter, tetapi juga mencakup pengendalian bahan bakar sisa, pencegahan kebocoran, dan pemastian integritas sealing setelah pemasangan. Lokasi dan susunan komponen filter ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Lokasi *fuel filter* dan susunan komponen filter pada *engine CFM56-5B* [7].

Informasi lokasi dan komponen pada Gambar 3 penting untuk memahami hubungan antara fenomena *clogging* dan aktivitas perawatan. Ketika filter mengalami penyumbatan, tindakan perawatan tidak hanya mengganti media filter, tetapi juga memastikan kondisi sealing, pengendalian residual fuel, serta pemeriksaan kebocoran setelah pemasangan sesuai dokumen perawatan yang berlaku.

3.3 Sumber Kontaminan Penyebab *Clogging*

Sumber kontaminan penyebab *clogging* dapat diklasifikasikan menjadi faktor eksternal dan faktor internal. Faktor eksternal berkaitan dengan kontaminan yang masuk bersama bahan bakar dari rantai suplai, penyimpanan, distribusi, atau proses fueling. Faktor internal berkaitan dengan partikel yang terbentuk di dalam sistem akibat keausan, korosi, atau degradasi material komponen.

Air dan mikroorganisme perlu diposisikan dengan hati-hati dalam pembahasan. Pada konteks *fuel filter*, partikel padat dan *debris* merupakan kontaminan yang secara langsung tertahan pada media filter. Sementara itu, air dan

mikroorganisme lebih tepat dipahami sebagai faktor kontaminasi yang dapat mendukung pembentukan deposit, biofilm, sludge, atau produk korosi pada kondisi tertentu [3]-[5].

Tabel 2. Klasifikasi sumber kontaminan penyebab *fuel filter clogging*.

Kelompok	Contoh kontaminan	Mekanisme masuk/terbentuk	Dampak terhadap filter
Eksternal	Partikel padat, debu, pasir halus	Terbawa dari penyimpanan, distribusi, atau proses fueling	Menyumbat pori media filter dan meningkatkan <i>differential pressure</i>
Eksternal	Air dan mikroorganisme	Air memungkinkan pertumbuhan mikroba pada kondisi tertentu	Membentuk deposit, biofilm, atau sludge yang tertahan pada filter
Internal	Wear <i>debris</i> logam	Pelepasan partikel akibat gesekan atau keausan komponen sistem bahan bakar	Menambah beban partikel dan dapat menjadi indikasi degradasi komponen
Internal	Produk korosi dan degradasi material	Terbentuk akibat reaksi kimia, kelembaban, penuaan seal, atau pelepasan coating	Menghasilkan partikel halus yang mempercepat penyumbatan

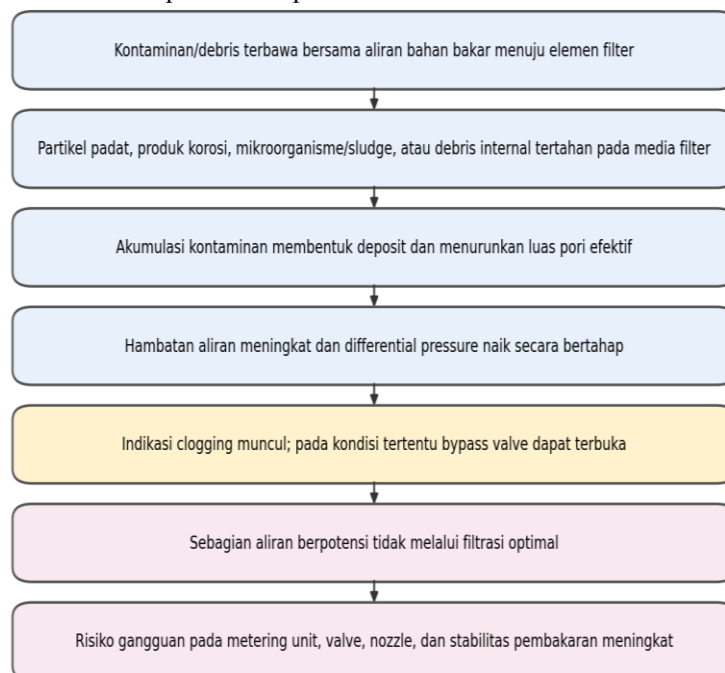
Klasifikasi tersebut membantu membedakan pendekatan perawatan yang diperlukan. Jika kontaminan didominasi faktor eksternal, pengendalian perlu difokuskan pada kualitas bahan bakar, proses fueling, dan penyimpanan. Jika kontaminan mengarah pada faktor internal, evaluasi perlu mempertimbangkan kemungkinan degradasi komponen sistem bahan bakar dan pembacaan karakter *debris*.

3.4 Alur Terjadinya Fuel Filter Clogging

Fuel filter clogging terjadi secara bertahap. Tahap awal dimulai ketika bahan bakar membawa kontaminan menuju elemen filter. Media filter menahan partikel tersebut sehingga bahan bakar yang keluar dari filter menjadi lebih bersih. Pada fase ini, filter masih dapat bekerja normal karena pori media belum tertutup secara signifikan.

Tahap berikutnya adalah akumulasi kontaminan. Partikel yang tertahan membentuk deposit atau cake layer pada permukaan dan struktur media filter. Lapisan tersebut mengurangi luas pori efektif dan meningkatkan hambatan aliran. Akibatnya, tekanan pada sisi masuk filter menjadi lebih tinggi dibandingkan sisi keluar. Perbedaan tekanan ini disebut *differential pressure* dan menjadi indikator utama meningkatnya beban kontaminan pada filter.

Pada tahap lanjut, *differential pressure* dapat mencapai batas kerja tertentu. Pada beberapa sistem, *bypass valve* dapat terbuka untuk menjaga kontinuitas suplai bahan bakar. Fungsi *bypass* penting untuk mencegah *fuel starvation*, tetapi kondisi ini membawa konsekuensi karena sebagian aliran dapat tidak melewati filtrasi optimal. Dengan demikian, *clogging* tidak hanya menjadi persoalan pada elemen filter, tetapi juga dapat meningkatkan risiko paparan kontaminan ke komponen *downstream*. Alur tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Alur terjadinya *fuel filter clogging* dan dampaknya terhadap komponen *downstream*.

Tabel 3. Tahapan mekanisme *clogging* dan indikator teknisnya.

Tahap	Mekanisme	Indikator teknis	Makna perawatan
Awal filtrasi	Kontaminan mulai tertahan pada media filter	Tidak selalu muncul indikasi gangguan	Filter masih bekerja normal
Akumulasi deposit	Partikel membentuk lapisan deposit atau cake layer	Hambatan aliran mulai meningkat	Perlu pemantauan kondisi filter
Kenaikan <i>differential pressure</i>	Tekanan sisi masuk lebih tinggi dari sisi keluar	Indikasi <i>clogging</i> dapat muncul	Kebutuhan inspeksi meningkat
Bypass potensial	Bypass valve dapat terbuka pada batas tertentu	Sebagian aliran tidak tersaring optimal	Risiko paparan <i>downstream</i> meningkat

3.5 Dampak *Clogging* terhadap Sistem Bahan Bakar

Dampak utama *clogging* adalah meningkatnya hambatan aliran bahan bakar. Pada kondisi ringan, sistem masih dapat mempertahankan aliran sesuai kebutuhan operasi. Namun, pada kondisi lebih berat, kenaikan *differential pressure* dapat menimbulkan peringatan, meningkatkan kebutuhan troubleshooting, dan memerlukan penggantian elemen filter. Dampak ini menjadi penting karena sistem bahan bakar *engine* bekerja sebagai rangkaian yang saling berhubungan.

Jika bypass terjadi, kontinuitas suplai bahan bakar tetap dapat dipertahankan, tetapi efektivitas filtrasi menurun. Partikel halus yang tidak tertahan dapat terbawa menuju komponen *downstream*. Dalam konteks sistem bahan bakar, komponen seperti metering valve, *servo valve*, dan *fuel nozzle* memiliki fungsi presisi sehingga keberadaan partikel dapat meningkatkan risiko gangguan aliran, respons aktuator, atau kualitas atomisasi bahan bakar.

Tabel 4. Dampak teknis *fuel filter clogging* terhadap sistem bahan bakar.

Area terdampak	Dampak langsung	Risiko lanjutan
Elemen filter	Luas pori efektif berkurang dan hambatan aliran meningkat	Filter beroperasi mendekati batas kemampuan filtrasi
Sistem tekanan	Differential pressure meningkat	Indikasi <i>clogging</i> muncul dan inspeksi diperlukan
Jalur bypass	Sebagian aliran dapat tidak melewati filtrasi optimal	Partikel berpotensi mencapai komponen <i>downstream</i>
Komponen <i>downstream</i>	Valve/nozzle lebih terpapar kontaminan	Risiko gangguan aliran meningkat

Dari sisi perawatan, *clogging* perlu dipandang sebagai gejala sistem, bukan sekadar kerusakan lokal pada filter. Penggantian elemen filter memang menyelesaikan hambatan aliran jangka pendek, tetapi tidak selalu menjawab pertanyaan mengenai sumber kontaminan. Oleh karena itu, dokumentasi temuan saat removal dan pencatatan kondisi filter menjadi penting sebagai dasar evaluasi jangka panjang.

3.6 Implikasi terhadap Line Maintenance dan Perawatan Preventif

Pada level *line maintenance*, indikasi *fuel filter clogging* umumnya ditindaklanjuti berdasarkan peringatan sistem monitoring dan dokumen perawatan yang berlaku. Secara prinsip, penanganan mencakup pengamanan sistem, akses ke area filter, pengendalian bahan bakar residual, penggantian elemen filter dan sealing, serta pemeriksaan kebocoran setelah pemasangan. Dalam artikel ini, penjelasan tersebut tidak dimaksudkan sebagai prosedur kerja, tetapi sebagai konteks teknis bahwa *clogging* berdampak langsung pada aktivitas perawatan.

Perawatan preventif pada *fuel filter* bertujuan mencegah filter tetap digunakan ketika beban kontaminan sudah tinggi. Strategi preventif dapat dilakukan melalui inspeksi visual saat filter dilepas, pemantauan indikasi *differential pressure*, kontrol kualitas bahan bakar, pemeriksaan air atau partikel, dan dokumentasi *debris*. Informasi tersebut dapat digunakan untuk membedakan apakah pola *clogging* lebih dominan dipengaruhi kontaminasi eksternal atau degradasi internal.

Tabel 5. Kerangka tindakan *preventive maintenance* pada *fuel filter*.

Aspek perawatan	Tujuan	Contoh penerapan
Inspeksi filter	Menilai deposit, <i>debris</i> , atau perubahan visual pada media filter	Dokumentasi kondisi filter saat removal
Pemantauan indikasi	Mendeteksi peningkatan hambatan aliran	Observasi <i>differential pressure</i> atau indikasi

	sebelum menjadi gangguan serius	<i>clogging</i>
Kontrol kualitas bahan bakar	Mengurangi peluang kontaminasi eksternal masuk ke sistem	Pemeriksaan air, partikel, kebersihan fueling, dan penyimpanan
Pembacaan <i>debris</i>	Mengidentifikasi kemungkinan degradasi internal	Klasifikasi partikel dan pencatatan jenis <i>debris</i>
Evaluasi interval	Menyesuaikan penggantian dengan kondisi aktual operasi	Peninjauan riwayat gangguan, inspeksi, dan kebijakan maintenance

Interval penggantian yang terlalu panjang dapat meningkatkan peluang filter beroperasi mendekati kondisi *clogging*. Sebaliknya, interval yang terlalu pendek dapat meningkatkan frekuensi perawatan tanpa manfaat teknis yang sebanding. Oleh karena itu, keputusan interval ideal perlu mempertimbangkan kondisi operasi, riwayat gangguan, indikasi tekanan diferensial, hasil inspeksi filter, karakter *debris*, serta pertimbangan biaya dan operasional [8]-[10].

3.7 Arah Penelitian Lanjutan

Kajian konseptual ini belum cukup untuk menentukan kapan *fuel filter* sebaiknya diganti karena keputusan interval penggantian memerlukan data historis, pola kegagalan, bukti fisik kondisi filter, dan pertimbangan ekonomi-operasional. Oleh sebab itu, artikel ini diposisikan sebagai pendahuluan bagi penelitian lanjutan yang lebih kuantitatif.

Sebagai penerus dari kajian ini, penelitian lanjutan yang sedang dikerjakan oleh penulis diarahkan pada analisis reliabilitas dan evaluasi interval penggantian *fuel filter* pada *engine CFM56-5B* pesawat *Airbus A320-200*. Penelitian lanjutan tersebut mengembangkan pembahasan dari level konseptual menuju evaluasi berbasis data dengan menggunakan riwayat operasi *fuel filter*, analisis pola kegagalan, pemeriksaan kualitas bahan bakar, pembacaan *debris*, dan evaluasi strategi penggantian preventif.

Tabel 6. Hubungan kajian konseptual dengan penelitian lanjutan.

Kajian saat ini	Keterbatasan	Penelitian lanjutan
Menjelaskan fungsi filter dan jalur bahan bakar	Belum menggunakan data historis operasi	Menggunakan data operasi aktual <i>fuel filter</i>
Mengklasifikasikan sumber kontaminan	Belum menentukan dominasi penyebab	Memadukan <i>fuel quality</i> dan <i>wear debris analysis</i>
Menyusun alur <i>clogging</i>	Belum menghitung probabilitas kegagalan	Menggunakan <i>reliability engineering</i> dan <i>Weibull Analysis</i>
Membahas implikasi perawatan	Belum menetapkan interval penggantian	Mengevaluasi interval preventif berbasis data dan biaya

4. Kesimpulan

- Fuel filter clogging* merupakan proses bertahap yang diawali oleh masuknya kontaminan ke sistem bahan bakar, tertahannya partikel pada media filter, pembentukan deposit, penurunan luas pori efektif, dan kenaikan *differential pressure*. Pada kondisi tertentu, kenaikan tekanan diferensial dapat memicu terbukanya *bypass valve* untuk mempertahankan kontinuitas aliran bahan bakar.
- Sumber kontaminan dapat berasal dari faktor eksternal dan internal. Faktor eksternal meliputi partikel padat, air, mikroorganisme, dan kontaminasi rantai suplai bahan bakar. Faktor internal meliputi *wear debris*, produk korosi, dan degradasi material dari komponen sistem bahan bakar.
- Dampak *clogging* tidak terbatas pada elemen filter, tetapi dapat berhubungan dengan kestabilan aliran bahan bakar, potensi paparan kontaminan pada komponen *downstream*, dan peningkatan aktivitas *line maintenance*. Oleh karena itu, *clogging* perlu dipandang sebagai gejala sistem yang membutuhkan evaluasi teknis lebih lanjut.
- Perawatan preventif *fuel filter* perlu mempertimbangkan inspeksi filter, pemantauan indikasi *differential pressure*, kontrol kualitas bahan bakar, pencatatan *debris*, dan evaluasi interval penggantian. Pendekatan ini membantu membedakan tindakan korektif jangka pendek dari evaluasi preventif jangka panjang.
- Kajian ini dapat digunakan sebagai fondasi awal bagi penelitian lanjutan yang menganalisis reliabilitas *fuel filter*, mengevaluasi karakter *debris*, dan menilai kesesuaian interval penggantian preventif terhadap kondisi operasi aktual *engine CFM56-5B*.

5. Daftar Pustaka

- [1] Fedele, L., Di Vito, L., & Ramundo, F. E., 2020, "Increasing efficiency in an aeronautical *engine* through maintenance evaluation and upgrades: Analysis of the *reliability* and performance improvements under financial issues," *Energies*, 13(12), 3059. <https://doi.org/10.3390/en13123059>.
- [2] Pohya, A. A., Wehrspohn, J., Meissner, R., & Wicke, K., 2021, "A modular framework for the life cycle based evaluation of aircraft technologies, maintenance strategies, and operational decision making using discrete event simulation," *Aerospace*, 8(7), 187. <https://doi.org/10.3390/aerospace8070187>.
- [3] Pruski, D., & Sprynskyy, M., 2024, "Jet Fuel Contamination: Forms, Impact, Control, and Prevention," *Energies*, 17(17), 4267. <https://doi.org/10.3390/en17174267>.
- [4] Behbahani-Pour, M. J., & Radice, G., 2017, "Fuel Contamination on the Large Transport Airplanes," *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 6(4), 200. <https://doi.org/10.4172/2168-9792.1000200>.
- [5] Gómez-Bolívar, J., Warburton, M. P., Mumford, A. D., Mujica-Alarcón, J. F., Anguilano, L., Onwukwe, U., Barnes, J., Chronopoulou, M., Ju-Nam, Y., Thornton, S. F., Rolfe, S. A., & Ojeda, J. J., 2024, "Spectroscopic and Microscopic Characterization of Microbial Biofouling on Aircraft Fuel Tanks," *Langmuir*, 40(7), 3429-3439. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c02803>.
- [6] Hong, W., Cai, W., Wang, S., & Tomovic, M. M., 2018, "Mechanical *wear debris* feature, detection, and diagnosis: A review," *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(5), 867-882. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.11.016>.
- [7] GMF AeroAsia, 2018, "*CFM56-5B* Engine Fuel System," Training Manual.
- [8] Dhillon, B. S., 2006, "Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers," CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781420006780>.
- [9] Mobley, R. K., 2002, "An Introduction to Predictive Maintenance," 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Boston. <https://shop.elsevier.com/books/an-introduction-to-predictive-maintenance/mobley/978-0-7506-7531-4>
- [10] Nakagawa, T., 2005, "Maintenance Theory of Reliability," Springer, London. <https://doi.org/10.1007/1-84628-221-7>.