

**ANALISIS KEANDALAN *FUEL METERING UNIT* PADA *ENGINE*
TRENT 700 PESAWAT AIRBUS A330-300 DI PT.GMF AEROASIA**

TUGAS AKHIR

Karya tulis sebagai salah satu syarat lulus pendidikan

Program Studi Diploma IV Teknik Pesawat Udara Angkatan ke-17

Oleh:

MUHAMAD GILAM YUDHA PRATAMA

NIT : 16022230008



**PROGRAM STUDI TEKNIK PESAWAT UDARA
POLITEKNIK PENERBANGAN INDONESIA CURUG
AGUSTUS 2026**

ABSTRAK

ANALISIS KEANDALAN *FUEL METERING UNIT* PADA *ENGINE TRENT 700* PESAWAT AIRBUS A330-300 DI PT.GMF AEROASIA

Oleh

MUHAMAD GILAM YUDHA PRATAMA

NIT. 16022230008

Program Studi D.IV Teknik Pesawat Udara

Fuel Metering Unit (FMU) merupakan komponen utama sistem bahan bakar *engine* Rolls-Royce Trent 700 yang berfungsi mengatur dan mengukur aliran bahan bakar menuju *combustion chamber* sesuai perintah *Engine Electronic Controller* (EEC). Selama periode 2023 sampai 2025 tercatat 55 kejadian *unscheduled removal* FMU P/N 702-03 pada armada Airbus A330-300 di PT GMF AeroAsia, Tbk yang berdampak pada keterlambatan penerbangan dan meningkatnya biaya perawatan. Penelitian ini bertujuan menentukan nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) FMU, mengidentifikasi modus kegagalan yang menjadi prioritas penanganan, serta menyusun usulan perbaikan untuk meningkatkan keandalan komponen. Penelitian menggunakan metode *mixed methods*. Analisis kuantitatif dilakukan dengan distribusi Weibull dua parameter melalui *median rank regression* terhadap data *Time to Failure* (TTF) yang diperoleh dari *Time Since Installation* komponen, sedangkan analisis kualitatif dilakukan dengan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) berdasarkan kuesioner dan wawancara terhadap empat *Aircraft Maintenance Engineer*. Hasil penelitian menunjukkan nilai *shape parameter* (β) sebesar 2,0137 dan *scale parameter* (η) sebesar 7.400,81 FH dengan koefisien determinasi 0,9748, sehingga FMU berada pada fase *wear-out*. Nilai MTTF diperoleh sebesar 6.558,02 *flight hours* dengan *reliability* tersisa 45,66 persen pada titik tersebut, dan sebanyak 34 unit atau 61,8 persen mengalami kegagalan sebelum mencapai MTTF. Analisis FMEA menempatkan modus kegagalan *electrical connector protective broken* sebagai prioritas utama dengan *Risk Priority Number* (RPN) 168, diikuti *Housing Adjuster crack* (105), *HP fuel inlet broken* (64), dan *Heatshield scratches* (48). Berdasarkan konsep *B-Life*, penelitian ini mengusulkan interval *preventive maintenance* 2.400 FH (*B10 life*) untuk mempertahankan keandalan minimum 90 persen, disertai *detailed visual inspection* konektor beserta *protective cover*, verifikasi nilai *torque backshell*, pemeriksaan *Non-Destructive Test* pada *Housing Adjuster*, dan *leak check* setelah pemasangan, sehingga angka *unscheduled removal* FMU dapat ditekan.

Kata Kunci: *Fuel Metering Unit* (FMU); *Reliability*; Rolls-Royce Trent 700; Distribusi Weibull; *Mean Time to Failure* (MTTF); *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA); *Risk Priority Number* (RPN); *B-Life*.

ABSTRACT

RELIABILITY ANALYSIS OF THE FUEL METERING UNIT ON THE TRENT 700 ENGINE OF THE AIRBUS A330-300 AT PT. GMF AEROASIA

By

MUHAMAD GILAM YUDHA PRATAMA

NIT. 16022230008

Bachelor of Applied Science in Aircraft Engineering Technology

The Fuel Metering Unit (FMU) is a primary component of the fuel system of the Rolls-Royce Trent 700 engine, which regulates and meters fuel flow to the combustion chamber in accordance with commands from the Engine Electronic Controller (EEC). During the 2023 to 2025 period, 55 unscheduled removals of the FMU P/N 702-03 were recorded on the Airbus A330-300 fleet at PT GMF AeroAsia, Tbk, resulting in flight delays and increased maintenance costs. This study aims to determine the Mean Time to Failure (MTTF) of the FMU, to identify the failure modes that require priority treatment, and to formulate improvement proposals to enhance component reliability. A mixed-methods approach was applied. The quantitative analysis used a two-parameter Weibull distribution estimated through median rank regression of Time to Failure (TTF) data derived from the Time Since Installation of each component, while the qualitative analysis used Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) based on questionnaires and interviews with four Aircraft Maintenance Engineers. The results show a shape parameter (β) of 2.0137 and a scale parameter (η) of 7,400.81 FH with a coefficient of determination of 0.9748, indicating that the FMU is in the wear-out phase. The MTTF was found to be 6,558.02 flight hours, at which point the remaining reliability is 45.66 percent, and 34 units or 61.8 percent failed before reaching the MTTF. The FMEA identified electrical connector protective broken as the top priority with a Risk Priority Number (RPN) of 168, followed by Housing Adjuster crack (105), HP fuel inlet broken (64), and Heatshield scratches (48). Based on the B-Life concept, this study proposes a preventive maintenance interval of 2,400 FH (B10 life) to maintain a minimum reliability of 90 percent, combined with detailed visual inspection of the connector and its protective cover, verification of the backshell torque value, Non-Destructive Testing of the Housing Adjuster, and a leak check after installation, so that the rate of unscheduled removals of the FMU can be reduced.

Key Word: Fuel Metering Unit (FMU); Reliability; Rolls-Royce Trent 700; Weibull Distribution; Mean Time to Failure (MTTF); Failure Mode and Effect Analysis (FMEA); Risk Priority Number (RPN); B-Life.

PENGESAHAN PEMBIMBING

Tugas Akhir : “ANALISIS KEANDALAN *FUEL METERING UNIT* PADA *ENGINE TRENT 700* PESAWAT AIRBUS A330-300 DI PT.GMF AEROASIA ” telah diperiksa dan disetujui untuk diuji sebagai salah satu syarat lulus pendidikan Program Studi Diploma IV Teknik Pesawat Udara Angkatan ke-17, Politeknik penerbangan Indonesia Curug-Tangerang.



Nama : Muhamad Gilam Yudha Pratama

NIT : 16022230008

PEMBIMBING I

LILIES ESTHI RIYANTHI, S.SiT, MT

Penata Tk. I (III/d)

NIP. 19820720 200502 2 001

PEMBIMBING II

ABDAN MUGHNI SYAFA'AT

Penata Muda(III/a)

NIP. 20010528 202310 1 002

KETUA PROGRAM STUDI TEKNIK
PESAWAT UDARA

ANDRI KURNIAWAN, S.ST., MT.

Penata Tk. I (III/d)

NIP. 198605152009121006

PENGESAHAN PENGUJI

Tugas Akhir : “ANALISIS KEANDALAN *FUEL METERING UNIT* PADA *ENGINE TRENT 700* PESAWAT AIRBUS A330-300 DI PT.GMF AEROASIA ” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Tugas Akhir Program Studi Diploma IV Teknik Pesawat Udara Angkatan Ke-17, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug – Tangerang. Tugas akhir ini telah dinyatakan LULUS Program Diploma IV pada tanggal 19 Agustus 2026.

KETUA

SEKRETARIS



BHIMA SHAKTI ARRAFAT, S.ST, MS.ASM

Penata (III/c)

NIP. 199102222010121002



DODY HERDIANTO, S.Tr.T

Penata Muda (III/a)

NIP. 200112232023101003

ANGGOTA



ABDAN MUGHNI SYAFA'AT, S.Tr.T

Penata Muda (III/a)

NIP. 20010528 2023101002

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muhamad Gilam Yudha Pratama
NIT : 16022230008
Program Studi : Diploma IV Teknik Pesawat Udara

Menyatakan bahwa tugas akhir berjudul “ANALISIS KEANDALAN *FUEL METERING UNIT* PADA *ENGINE* TRENT 700 PESAWAT AIRBUS A330-300 DI PT.GMF AEROASIA ” merupakan karya asli saya bukan merupakan hasil plagiarisme. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya, dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi berupa pencabutan gelar akademik dari Politeknik Penerbangan Indonesia (PPI) Curug. Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa paksaan dari pihak manapun.

Tangerang, 19 Agustus 2026



Muhamad Gilam Yudha Pratama

PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR

Tugas akhir D.IV yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada pengarang dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Politeknik Penerbangan Indonesia Curug. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin pengarang dan harus disertai dengan kaidah ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Sitasi hasil penelitian Tugas Akhir ini dapat ditulis dalam bahasa Indonesia sebagai berikut:

Gilam, Y. P (2026)

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh tugas akhir haruslah seizin Ketua Program Studi Teknik Pesawat Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug.

Dipersembahkan Kepada
Ayahanda dan Ibunda Tercinta

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah SWT. Berkat kelimpahan rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Diploma IV Teknik Pesawat Udara angkatan ke-17.

Selama penyusunan tugas akhir ini penulis memahami bahwa sebuah proses tidak bisa dilakukan secara instan. Setiap permasalahan membutuhkan jalannya masing-masing untuk meraih sebuah solusi. Begitu juga hikmah yang penulis ambil selama penyusunan tugas akhir ini. Setiap proses tidaklah selalu memiliki pintu yang mudah dibuka. Tanpa bantuan Allah SWT dan semua orang yang menjadi pendukung penulis setiap waktu, mungkin pintu itu tidak pernah terbuka. Setiap bantuan dan hiburan yang diberikan kepada penulis mampu membuat penulis melangkah untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas akhir ini tidak mungkin terselesaikan tanpa adanya dukungan, bantuan, dan bimbingan dari berbagai pihak selama proses penyusunan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan bimbingan

1. Bapak Sugiri, Ibu Lamini, Hendro , Arkhan memberikan doa dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan pendidikan di Politeknik Penerbangan Indonesia Curug.
2. Capt. Megi Hudi Helmiadi, S.Si.T., M.A. Selaku Direktur Politeknik Penerbangan Indonesia.
3. Bapak Triadi Nuryanto, S.E.,M.M Tr. Selaku Kepala Bagian Adminstrasi Akademik dan Ketarunaan.
4. Andri Kurniawan Selaku Ketua Program Studi Teknik Pesawat Udara.
5. Ibu Lilies Esthi Riyanti, S.siT, M.T Selaku Pembimbing I dan Mas Abdan Mughni Syafa'at, S.Tr,T Selaku Pembimbing II yang senantiasa membimbing dan mengarahkan hingga tugas akhir ini selesai.
6. Para Dosen Pendidikan dan staff Program Studi Teknik Pesawat Udara.
7. Seluruh Keluarga yang telah memberikan doa dan dukungan serta menjadi semangat bagi penulis dalam setiap kegiatan.
8. Mas Ariski Nugroho, selaku Mentor, atas bimbingan, ilmu, dan arahnya.

9. M.Abrori Ibrahim , selaku rekan yang membantu Memberikan saran Judul Tugas Akhir
10. Refina Vania , Selaku orang yang spesial di hidup saya
11. Teman – Teman Dari Program Studi D-IV Teknik Pesawat Udara Angkatan Ke-17 dan Adik-Adik Teknik Pesawat Udara Angkatan 18,19 dan 20.

Tangerang, 19 Agustus 2026



Muhamad Gilam Yudha Pratama

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	ix
BAB I Pendahuluan	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	4
C. Identifikasi Masalah	4
D. Tujuan Penelitian	5
E. Batasan Penelitian.....	5
F. Sistematika Penulisan	6
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Pesawat Airbus A330-300.....	7
B. <i>Engine</i> Rolls-Royce Trent 700.....	7
C. <i>Fuel System</i> Airbus A330-300	9
D. <i>Fuel Metering Unit</i>	10
1. Fuel Metering Valve	11
2. Pressure Raising and Shut-Off Valve (PRSOV)	11
3. Overspeed Valve	11
E. Perawatan Pesawat Udara	12
F. Program Perawatan.....	13
1. Preventive Maintenance	13
2. Corrective Maintenance.....	14
G. Keandalan	14
H. Indeks Keandalan.....	15
I. Distribusi dan Parameter Weibull.....	16
1. Scale parameter (η).....	16
2. Shape parameter (β).....	17
3. Location Parameter (γ)	18

J. Nilai Time to Failure (TTF)	19
K. Perhitungan Parameter Distribusi Weibull.....	20
1. Adjusted Rank	20
2. Benard's Median Rank	21
3. Regresi Linier	21
4. Penentuan Parameter β dan η	22
5. Fungsi Gamma.....	23
6. Mean Time to Failure (MTTF)	24
7. Reliability	24
8. Failure Rate.....	25
9. Cumulative Distribution Function (CDF).....	25
L. Prediksi Umur Pakai Menggunakan <i>B-Life</i>	26
M. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	27
N. Penelitian Terdahulu	32
BAB III	36
METODOLOGI PENELITIAN	36
A. Metode Penelitian	36
B. Waktu, Tempat, & Obejek Penelitian	37
C. Sumber dan Jenis Data	38
D. Teknik Pengumpulan Data.....	38
1. Teknik pengumpulan data kuantitatif	38
2. Teknik Pengumpulan Data Kualitaitaif	38
a. Observasi lapangan.....	38
b. Wawancara.....	39
c. Studi Literatur.....	39
E. Teknik Pengolahan Data	39
1. Pendekatan Kuantitatif dengan distribusi Weibull.....	39
2. Pendekatan Kualitatif dengan menggunakan FMEA	40
F. Diagram Alir	42
BAB IV	43
HASIL DAN PEMBAHASAN	43
A. Pengolahan Data Awal Kegagalan <i>Fuel Metering Unit</i>	43
B. Menentukan dan Menghitung Nilai Parameter Distribusi Weibull.....	47

1. Menentukan Nilai Adjusted Rank.....	47
2. Menentukan Nilai Median Rank.....	48
3. Menentukan Nilai X dan Y	49
4. Menentukan Nilai Regresi Linier	50
5. Menentukan Nilai Shape parameter (β) dan Scale parameter (η).....	53
6. Nilai fungsi Gamma.....	53
C. Menghitung dan Analisis <i>Mean Time to Failure</i> (MTTF)	55
D. Analisis <i>Reliability</i> dan <i>Cumulative Distribution Function</i>	55
E. Analisis <i>Failure Rate</i>	59
F. Perbandingan Kegagalan <i>Fuel Metering Unit</i> terhadap Nilai MTTF.....	61
G. Analisis <i>B-Life</i> dan Prediksi Umur Pakai	63
H. Analisis Failure Mode and Effect Analysis (FMEA).....	65
1. Perhitungan Risk Priority Number (RPN).....	67
2. FMEA pada Kegagalan Fuel Metering Unit.....	69
I. Usulan Interval <i>Preventive Maintenance</i>	73
BAB V	72
KESIMPULAN DAN SARAN	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 <i>Engine rotors and modules</i> Rolls-Royce Trent 700	8
Gambar II.2 <i>Engine</i> Rolls-Royce Trent 700	9
Gambar II.3 Komponen utama <i>fuel system</i>	10
Gambar II.4 <i>Fuel system</i> Rolls-Royce Trent 700	10
Gambar II.5 <i>Fuel Metering Unit system</i>	12
Gambar II.6 Kurva bak mandi (<i>bathtub curve</i>)	15
Gambar II.7 Grafik pengaruh <i>scale parameter</i>	17
Gambar II.8 Grafik pengaruh <i>shape parameter</i>	18
Gambar III.1 Diagram alir penelitian	38
Gambar IV.1 Grafik regresi linier Weibull <i>Fuel Metering Unit</i>	48
Gambar IV.2 Grafik <i>reliability Fuel Metering Unit</i>	51
Gambar IV.3 Grafik CDF (<i>unreliability</i>) <i>Fuel Metering Unit</i>	51
Gambar IV.4 Grafik <i>Failure Rate Fuel Metering Unit</i>	53
Gambar IV.5 Persentase kegagalan FMU terhadap nilai MTTF	55
Gambar IV.6 Perbandingan nilai <i>B-Life Fuel Metering Unit</i>	57
Gambar IV.7 Nilai <i>Risk Priority Number</i> tiap modus kegagalan FMU	60

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Kategori tingkat kegagalan berdasarkan nilai RPN	27
Tabel II.2 Penelitian terdahulu.....	29
Tabel IV.1 Jumlah <i>fault</i> pada <i>Fuel Metering Unit</i> periode 2023–2025	40
Tabel IV.2 Ringkasan data <i>time to failure Fuel Metering Unit</i>	41
Tabel IV.3 Total perhitungan regresi linier	47
Tabel IV.4 Nilai rata-rata X dan Y	47
Tabel IV.5 Distribusi parameter Weibull <i>Fuel Metering Unit</i>	48
Tabel IV.6 Nilai <i>reliability</i> dan CDF <i>Fuel Metering Unit</i> per interval waktu	50
Tabel IV.7 Nilai <i>Failure Rate Fuel Metering Unit</i> per interval waktu	52
Tabel IV.8 Rekapitulasi kegagalan FMU terhadap nilai MTTF	54
Tabel IV.9 Hasil perhitungan <i>B-Life Fuel Metering Unit</i>	56
Tabel IV.10 Rekapitulasi penilaian <i>Severity, Occurrence, dan Detection</i>	58
Tabel IV.11 <i>Risk Priority Number</i> modus kegagalan <i>Fuel Metering Unit</i>	59
Tabel IV.12 FMEA <i>worksheet</i> kegagalan pada <i>Fuel Metering Unit</i>	61
Tabel IV.13 Usulan interval perawatan berdasarkan <i>B-Life</i>	65
Tabel IV.14 Usulan interval dan jenis tindakan perawatan <i>Fuel Metering Unit</i>	66

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Surat Permohonan Penelitian dan Pengumpulan Data	71
Lampiran B Surat Keterangan Pelaksanaan Penelitian PT GMF AeroAsia, Tbk.....	72
Lampiran C Komponen dan Kerusakan <i>Fuel Metering Unit</i>	73
Lampiran D AMM Task 73-21-52-000-802-A <i>Removal of the Fuel Metering Unit</i>	76
Lampiran E AMM Task 73-21-52-400-802-A <i>Installation of the Fuel Metering Unit</i>	81
Lampiran F Data Kegagalan <i>Fuel Metering Unit</i>	86
Lampiran G <i>Maintenance Data Report (MDR)</i>	91
Lampiran H <i>Authorised Release Certificate</i>	92
Lampiran I <i>Repair Report Fuel Metering Unit</i>	93
Lampiran J Perhitungan <i>Median Rank</i> Data Kegagalan.....	94
Lampiran K Perhitungan Regresi Linier Nilai X dan Y	96
Lampiran L Perhitungan <i>Reliability</i> dan Laju Kegagalan	98
Lampiran M Instrumen Wawancara Validasi Ahli.....	101
Lampiran N Kuesioner Penilaian FMEA (<i>Severity, Occurrence, Detection</i>).....	107
Lampiran O Lembar Wawancara FMEA dan Biodata Narasumber	114
Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (<i>Severity, Occurrence, Detection</i>)	134
Lampiran Q Bukti Dokumentasi Wawancara di PT GMF AeroAsia.....	161
Lampiran R Triangulasi Data Penelitian	163
Lampiran S Hasil <i>Turnitin</i>	165

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali
AME	<i>Aircraft Maintenance Engineer</i>	36
AMM	<i>Aircraft Maintenance Manual</i>	13
AMO	<i>Approved Maintenance Organization</i>	1
AOG	<i>Aircraft on Ground</i>	58
CASR	<i>Civil Aviation Safety Regulation</i>	1
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>	21
EASA	<i>European Union Aviation Safety Agency</i>	13
ECAM	<i>Electronic Centralised Aircraft Monitoring</i>	57
EEC	<i>Engine Electronic Controller</i>	2
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>	13
FADEC	<i>Full Authority Digital Engine Control</i>	9
FH	<i>Flight Hours</i>	41
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>	3
FMU	<i>Fuel Metering Unit</i>	2
FOHE	<i>Fuel/Oil Heat Exchanger</i>	10
GMF	<i>Garuda Maintenance Facility</i>	2
HP	<i>High Pressure</i>	8
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>	1
LP	<i>Low Pressure</i>	8
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i>	67
MPD	<i>Maintenance Planning Document</i>	13
MRO	<i>Maintenance, Repair, and Overhaul</i>	34
MTOW	<i>Maximum Take-Off Weight</i>	7
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>	4
NDT	<i>Non-Destructive Test</i>	55

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali
P/N	<i>Part Number</i>	4
PRSOV	<i>Pressure Raising and Shut-Off Valve</i>	12
PT	Perseroan Terbatas	2
RCFA	<i>Root Cause Failure Analysis</i>	36
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>	14
RPN	<i>Risk Priority Number</i>	3
Tbk	Terbuka	3
TSI	<i>Time Since Installation</i>	37
TTF	<i>Time to Failure</i>	73

LAMBANG	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
A	Konstanta atau intercept pada persamaan regresi linier	43
B	Koefisien atau slope pada persamaan regresi linier	43
B _x	B <i>life</i> , umur operasi saat X% populasi diperkirakan telah gagal	21
e	Bilangan Euler sebesar 2,718281828	20
F(t)	Probabilitas kumulatif kegagalan (<i>Cumulative Distribution Function</i>)	21
i	Urutan kegagalan atau nilai <i>Adjusted Rank</i>	19
ln	Logaritma natural dengan bilangan dasar e	20
MR	<i>Median Rank</i> , estimasi probabilitas kegagalan kumulatif	19
n	Jumlah data kegagalan yang digunakan dalam regresi	19
R(t)	Probabilitas komponen tetap berfungsi sampai waktu t	21
R ²	Koefisien determinasi regresi linier	44

LAMBANG	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
S, O, D	<i>Severity, Occurrence</i> , dan <i>Detection</i> pada analisis FMEA	54
t	Waktu operasi komponen dalam <i>flight hours</i>	20
X	Hasil transformasi probabilitas kumulatif kegagalan	20
$\bar{X}$	Nilai rata-rata variabel X	43
Y	Hasil transformasi logaritma natural waktu kegagalan	20
$\bar{Y}$	Nilai rata-rata variabel Y	43
β	<i>Shape parameter</i> atau parameter bentuk distribusi Weibull	16
η	<i>Scale parameter</i> atau umur karakteristik komponen	17
Γ	Fungsi gamma yang digunakan dalam perhitungan MTTF	20
$\lambda(t)$	Laju kegagalan komponen pada waktu t	49
Σ	Operator penjumlahan seluruh nilai data	20

BAB I

Pendahuluan

A. Latar Belakang

Dalam dunia penerbangan perawatan menjadi aspek yang sangat penting. Perawatan (*maintenance*) adalah kegiatan memeriksa dan menganalisis peralatan secara teratur untuk memastikan alat tetap berfungsi baik dan usianya lebih Panjang (Siswanto, 2017) . Secara umum, perawatan dibagi menjadi dua jenis, yaitu *preventive maintenance* yang bertujuan mencegah kerusakan sejak dini agar tidak terjadi kegagalan yang lebih serius dan menimbulkan kerugian, serta *corrective maintenance* yang dilakukan setelah terjadi kerusakan untuk memperbaiki peralatan sehingga dapat berfungsi kembali dengan kondisi seperti baru (Ninny Siregar & Munthe, 2019). Pelaksanaan perawatan tersebut meliputi kegiatan inspeksi rutin, tindakan perbaikan, penggantian komponen, pengelolaan dan pencatatan data teknis, serta pengawasan oleh organisasi perawatan yang berwenang dalam hal ini adalah *Civil Aviation Safety Regulation* (CASR).

Civil Aviation Safety Regulation (CASR) merupakan peraturan keselamatan penerbangan sipil yang diberlakukan di Indonesia dan disusun dengan mengacu pada standar internasional yang ditetapkan oleh International Civil Aviation Organization (ICAO) (Seto Mamadlo, 2025). Sebagai regulasi utama dalam pengawasan keselamatan penerbangan, CASR dirancang untuk memastikan bahwa seluruh kegiatan operasi, pemeliharaan, serta pengelolaan pesawat udara memenuhi persyaratan kelaikudaraan yang diakui secara global. Dalam kerangka tersebut, CASR Part 43 secara khusus mengatur aspek pemeliharaan pesawat udara, termasuk penentuan personel atau organisasi yang berwenang melakukan perawatan serta tata cara pelaksanaan *maintenance* agar sesuai dengan standar keselamatan dan kelaikudaraan yang telah ditetapkan.

Selanjutnya, dalam melaksanakan perawatan pesawat udara CASR Part 145 mengatur mengenai persyaratan dan standar bagi *Approved Maintenance Organization* (AMO) . Aturan ini mencakup berbagai aspek, seperti struktur organisasi, fasilitas yang harus tersedia, kompetensi personel, sistem kualitas, prosedur inspeksi, serta pengelolaan dokumen teknis yang diperlukan agar sebuah AMO dapat memperoleh dan mempertahankan persetujuan dari otoritas penerbangan (Juniar et al., 2023). Dengan demikian, pesawat dapat dipastikan kembali dalam kondisi laik terbang, sekaligus mendukung terciptanya budaya keselamatan yang konsisten dalam industri penerbangan.

PT. GMF AeroAsia Tbk merupakan salah satu AMO terbesar di Asia Tenggara, yang memiliki kapabilitas serta sertifikasi yang telah diakui sesuai CASR Part 145, GMF mampu untuk melaksanakan berbagai jenis perawatan pesawat, termasuk jenis pesawat *wide-body* Airbus A330 (Maharani et al., 2025). Pesawat Airbus A330 memiliki ukuran fuselage lebih besar serta kapasitas angkut tinggi sehingga prosedur perawatannya lebih kompleks. Pesawat *wide-body* Airbus A330 merupakan pesawat komersial yang banyak digunakan untuk melayani rute penerbangan jarak menengah hingga jarak jauh.

Pesawat Airbus A330 umumnya dilengkapi dengan mesin Rolls-Royce Trent 700, yaitu mesin turbofan tiga-*spool* yang dirancang untuk menghasilkan daya dorong tinggi dengan tingkat efisiensi bahan bakar dan stabilitas pembakaran yang optimal. Untuk mendukung karakteristik tersebut, sistem bahan bakar pada mesin Trent 700 memiliki peran yang sangat krusial, karena berfungsi memastikan suplai bahan bakar yang tepat, stabil, dan terkontrol pada seluruh rentang operasi mesin.

Selama tiga tahun terakhir tercatat sebanyak 55 kejadian kegagalan pada salah satu sistem bahan bakar pesawat Airbus A330 yang dilengkapi mesin Rolls-Royce Trent 700. Jumlah kegagalan yang relatif tinggi tersebut mengindikasikan adanya permasalahan krusial yang berpengaruh langsung terhadap tingkat keandalan operasional pesawat. Selain itu, kondisi ini juga dapat berdampak pada keterlambatan penerbangan, pembatalan operasi, meningkatnya biaya pemeliharaan, serta menurunnya aspek keselamatan.

Sistem bahan bakar pada pesawat Airbus A330 yang menggunakan mesin Rolls-Royce Trent 700 memiliki beberapa komponen utama yang berperan penting dalam menjamin kinerja mesin yang optimal, salah satunya adalah *Fuel Metering Unit* (FMU). FMU berfungsi sebagai komponen utama dalam pengaturan dan pengukuran aliran bahan bakar menuju ruang bakar sesuai dengan perintah dari *Engine Electronic Controller* (EEC). Ketepatan kerja FMU sangat menentukan kestabilan putaran mesin, efisiensi pembakaran, serta keandalan operasi pesawat secara keseluruhan.

Kerusakan pada *Fuel Metering Unit* (FMU) pada pesawat Airbus A330 termasuk dalam daftar *airworthy item* atau komponen yang tidak dibolehkan untuk gagal dan tidak beroperasi, yang mengharuskan dilakukannya tindakan perbaikan dalam batas waktu operasional yang ditentukan sebelum pesawat dinyatakan tidak laik operasi. Mengingat peran FMU yang sangat krusial dalam sistem bahan bakar dan pengendalian mesin, tingginya frekuensi kegagalan komponen ini menimbulkan kesenjangan antara kondisi

operasional di lapangan dengan tuntutan industri penerbangan untuk mencapai tingkat keandalan, efisiensi, dan prediktabilitas yang optimal.

Kegagalan FMU juga secara langsung menyebabkan terjadinya *unscheduled removal*, yang tidak hanya berdampak pada ketepatan waktu penerbangan, tetapi juga meningkatkan biaya operasional secara signifikan. Permasalahan utama yang teridentifikasi adalah bahwa meskipun PT GMF Aeroasia Tbk menghadapi kegagalan *Fuel Metering Unit* (FMU) secara berulang, hingga saat ini belum tersedia nilai keandalan (*reliability value*) yang terukur secara komprehensif serta belum diketahui secara pasti faktor penyebab utama kegagalan tersebut.

Kondisi ini menyebabkan strategi pemeliharaan yang diterapkan cenderung bersifat reaktif, bukan preventif maupun prediktif. Oleh karena itu, diperlukan analisis keandalan yang sistematis terhadap FMU guna mengidentifikasi pola kegagalan dan merumuskan strategi perawatan yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Demi memastikan keandalan FMU tetap terjaga, diperlukan sebuah pendekatan analitis yang mampu mengidentifikasi pola kegagalan komponen, memprediksi umur pakai, serta menilai tingkat risiko berdasarkan karakteristik statistik dari data kerusakan. Salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam analisis keandalan adalah analisis distribusi Weibull. Metode ini memungkinkan peneliti untuk menentukan parameter bentuk (*Shape parameter*), skala (*Scale parameter*), serta tingkat kegagalan komponen, sehingga dapat menggambarkan kerusakan apakah bersifat *infant mortality*, *random failure*, atau *wear-out*. Hasil analisis Weibull ini menjadi dasar dalam menentukan interval perawatan yang optimal, strategi mitigasi risiko, serta rekomendasi tindakan perbaikan yang lebih tepat dan berbasis data.

Untuk melengkapi analisis keandalan tersebut, penelitian ini juga menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi kegagalan yang dapat terjadi pada FMU. FMEA merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan (*failure mode*), penyebab kegagalan, dampak kegagalan terhadap sistem, serta tingkat risiko yang ditimbulkan. Penilaian dalam FMEA dilakukan berdasarkan tiga parameter utama yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D), yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN). Nilai RPN digunakan untuk menentukan prioritas tindakan perbaikan dan mitigasi risiko pada komponen yang memiliki tingkat kegagalan tertinggi.

Melalui kombinasi metode Weibull dan FMEA, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai tingkat keandalan FMU sekaligus mengidentifikasi mode kegagalan yang paling kritis pada mesin Rolls-Royce Trent 700. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar dalam penyusunan strategi pemeliharaan yang lebih efektif, efisien, dan berbasis risiko sehingga mampu meningkatkan keselamatan penerbangan, mengurangi frekuensi *unscheduled removal*, serta menekan biaya operasional pemeliharaan.

Oleh karena itu, penelitian yang berjudul “**Analisis Keandalan *Fuel Metering Unit* (FMU) pada Pesawat Airbus A330 Menggunakan Metode Weibull dan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA)**” dilakukan untuk memberikan gambaran teknis mengenai tingkat keandalan FMU, mengidentifikasi mode kegagalan yang memiliki risiko tertinggi, serta menyusun rekomendasi perbaikan yang dapat digunakan dalam upaya peningkatan keselamatan dan efisiensi pemeliharaan pesawat.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai kegagalan *mean timen to failure* (MTTF) pada *Fuel Metering Unit* P/N 702-03?
2. Modus kegagalan apa yang menjadi prioritas utama kegagalan *Fuel Metering Unit* P/N 702-03 berdasarkan *Risk Priority Number* (RPN) menggunakan metode FMEA ?
3. Bagaimana usulan perbaikan dalam mempengaruhi keandalan *Fuel Metering Unit* PN berdasarkan hasil analisis FMEA?

C. Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang penelitian, maka penulis merumuskan beberapa permasalahan utama sebagai berikut:

1. Frekuensi kegagalan *Fuel Metering Unit* (FMU) P/N 702-03 pada *engine Rolls-Royce Trent 700* yang digunakan pada pesawat Airbus A330-300 tergolong tinggi, sehingga menimbulkan *unscheduled removal*, peningkatan biaya perawatan, serta berpotensi mengganggu aspek keselamatan dan ketepatan waktu operasional penerbangan.

2. belum tersedia parameter keandalan yang dihitung secara kuantitatif, seperti *Mean Time to Failure* (MTTF), dan belum diketahui secara jelas pola kegagalan komponen apakah termasuk kategori *infant mortality*, *random failure*, atau *wear-out*.
3. pemeliharaan yang diterapkan masih bersifat reaktif dan belum berbasis pada pendekatan prediktif.
4. Belum adanya penerapan metode analisis yang terintegrasi antara distribusi Weibull sebagai alat untuk mengkaji karakteristik kegagalan secara statistik dengan pendekatan FMEA

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini Adalah

1. Mengetahui nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) dari *Fuel Metering Unit* (FMU) PN untuk melihat seberapa lama komponen tersebut dapat beroperasi sebelum mengalami kerusakan.
2. Mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi Kegagalan *Fuel Metering Unit* (FMU) dengan menggunakan metode FMEA,
3. Menyusun usulan perbaikan yang dapat dilakukan untuk Memahami Faktor yang menyebabkan kegagalan *Fuel Metering Unit* P/N 702-03 berdasarkan hasil analisis FMEA.

E. Batasan Penelitian

Untuk menjaga fokus penelitian, batasan-batasan berikut ditetapkan:

1. Komponen yang dikaji hanya *Fuel Metering Unit* (FMU) Selama Tahun 2022-2025.
2. Objek penelitian adalah *engine Rolls-Royce Trent 700* pada pesawat Airbus A330-300.
3. Data yang digunakan merupakan data historis dan record perawatan dari PT GMF Aero Asia Tbk.
4. Analisis keandalan meliputi perhitungan MTTF serta analisis FMEA digunakan untuk menyusun tindakan perbaikan dan kontrol proses. Penelitian tidak membahas detail desain internal FMU secara mendalam.

F. Sistematika Penulisan

Struktur penulisan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Bab I : Pendahuluan — Latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan, definisi istilah, dan sistematika penulisan.

Bab II : Tinjauan Pustaka — Teori *engine* Rolls-Royce Trent 700, FMU, metrik keandalan dengan mencari nilai MTTF, metode FMEA , dan penelitian terkait.

Bab III : Metodologi — Sumber dan prosedur pengumpulan data, teknik analisis keandalan FMEA.

Bab IV : Hasil dan Pembahasan — Hasil perhitungan keandalan menggunakan weibull , analisis FMEA, Menentukan *Risk Priority Number* dan rekomendasi perbaikan.

Bab V : Kesimpulan dan Saran — Ringkasan temuan, rekomendasi untuk GMF Aero Asia, dan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pesawat Airbus A330-300

Airbus A330-300 merupakan pesawat komersial berbadan lebar (*wide-body*) bermesin ganda (*twin-engine*) yang dirancang untuk operasi jarak menengah hingga jarak jauh (D. M. Setiawan et al., 2019). Konfigurasi badan lebar dengan lorong ganda (*twin aisle*) memungkinkan pesawat ini mengangkut penumpang dalam jumlah besar dengan tingkat kenyamanan kabin yang lebih baik dibandingkan pesawat lorong tunggal, sekaligus mempertahankan efisiensi konsumsi bahan bakar pada rute *medium-haul* maupun *long-haul* (Airbus, 2023).

Dari sisi struktur, A330-300 memiliki *fuselage* berdiameter besar serta desain sayap dengan *high aspect ratio* yang dioptimalkan untuk menghasilkan gaya angkat tinggi dan performa aerodinamis yang stabil pada berbagai fase penerbangan, mulai dari *take-off* hingga *cruise* (Airbus, 2023). Seiring perkembangan desain dan sertifikasi, *Maximum Take-Off Weight* (MTOW) pesawat ini meningkat dari sekitar 212 ton pada awal produksi menjadi hingga 242 ton pada varian yang lebih baru, sehingga jangkauan terbang dan kapasitas *payload* bertambah tanpa mengorbankan efisiensi bahan bakar secara signifikan (Arifin et al., 2019).

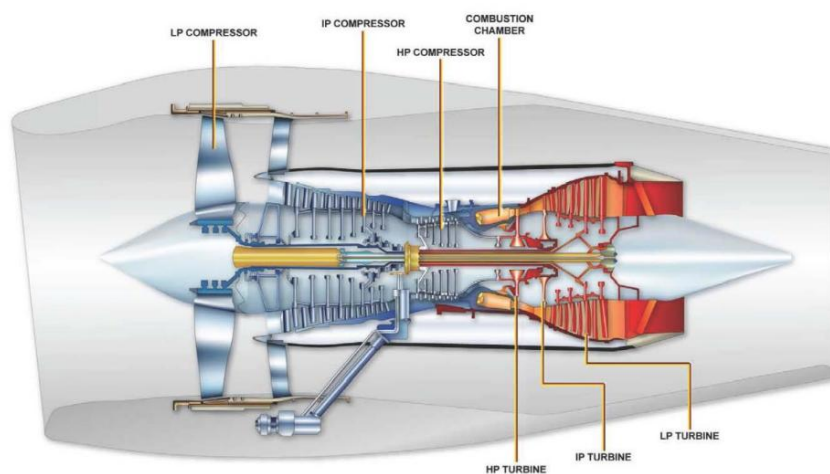
Dari aspek sistem propulsi, Airbus A330 menggunakan dua mesin *turbofan* yang dipasang di bawah sayap kiri dan kanan (*underwing mounted engines*). Salah satu mesin yang paling umum digunakan pada varian A330-200 dan A330-300 adalah Rolls-Royce Trent 700, yaitu mesin *turbofan* tiga poros (*three-shaft high bypass turbofan*) (Airbus, 2018). Kombinasi desain aerodinamis yang matang dengan mesin *turbofan* tiga poros menjadikan Airbus A330-300 dikenal sebagai pesawat *wide-body* dengan keseimbangan optimal antara performa, efisiensi, dan keandalan operasional.

B. Engine Rolls-Royce Trent 700

Rolls-Royce Trent 700 merupakan mesin *turbofan* high-bypass tiga poros yang dikembangkan khusus untuk memenuhi kebutuhan performa pesawat Airbus A330 (Airbus, 2018). Mesin ini memiliki tiga poros, yaitu low pressure (LP), intermediate pressure (IP), dan high pressure (HP). Konsep desain tersebut memberikan keunggulan berupa peningkatan efisiensi termal, kestabilan operasional mesin, serta fleksibilitas

performa pada berbagai kondisi penerbangan. Dari sisi performa, Trent 700 berada pada kelas daya dorong sekitar 68.000 sampai 72.000 lbf yang dirancang untuk mendukung operasi pesawat *wide-body* pada rute jarak menengah hingga jauh (Airbus, 2018). Rasio *bypass* yang tinggi menjadi faktor dominan dalam meningkatkan efisiensi mesin, sehingga konsumsi bahan bakar spesifik (*specific fuel consumption*) dapat ditekan tanpa mengorbankan daya dorong. Penelitian mengenai mesin *turbofan* modern menunjukkan bahwa konfigurasi high-bypass secara signifikan berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi dan pengurangan emisi gas buang (Ida Farida, 2025).

Sebagai mesin generasi modern, Trent 700 dilengkapi dengan *Full Authority Digital Engine Control* (FADEC) yang berfungsi sebagai sistem kendali utama seluruh parameter mesin. FADEC mengatur aliran bahan bakar, kecepatan putaran *spool*, serta batas operasi mesin secara otomatis agar mesin bekerja pada kondisi yang aman dan optimal. Keberadaan FADEC juga meningkatkan keandalan *engine* melalui proteksi terhadap *over-temperature*, *over-speed*, serta kondisi abnormal lain yang berpotensi merusak mesin (Airbus, 2018).



Gambar II.1 Engine rotors and modules Rolls-Royce Trent 700
(Sumber: Training Manual Airbus A330)



Gambar II.2 Engine Rolls-Royce Trent 700

(Sumber: Dokumen Pribadi)

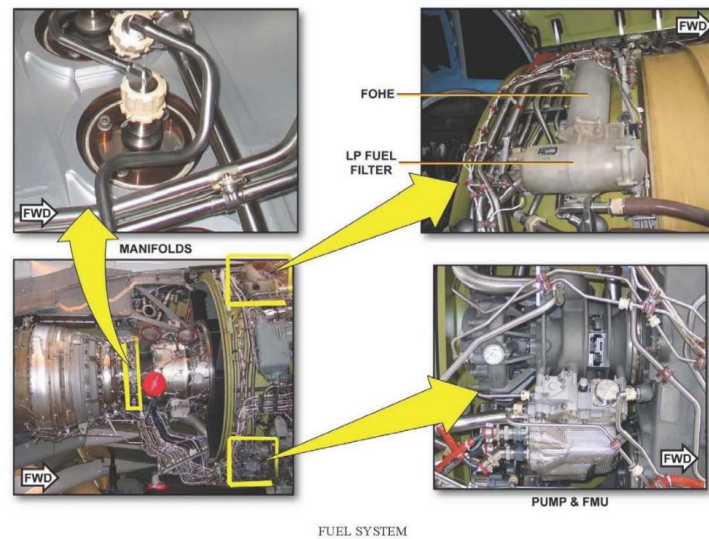
C. Fuel System Airbus A330-300

Fuel system pada pesawat merupakan sistem vital yang berfungsi menyuplai bahan bakar ke mesin dalam jumlah, tekanan, dan laju aliran yang tepat pada seluruh kondisi operasi penerbangan (Airbus, 2018). Sistem ini harus mampu bekerja secara andal mulai dari proses *engine start*, *take-off*, *climb*, *cruise*, hingga *shutdown*, dengan tetap menjaga kestabilan suplai bahan bakar meskipun terjadi perubahan ketinggian, temperatur, dan kebutuhan daya mesin. Keandalan *fuel system* sangat penting karena gangguan kecil sekalipun dapat berdampak langsung terhadap performa mesin dan keselamatan penerbangan.

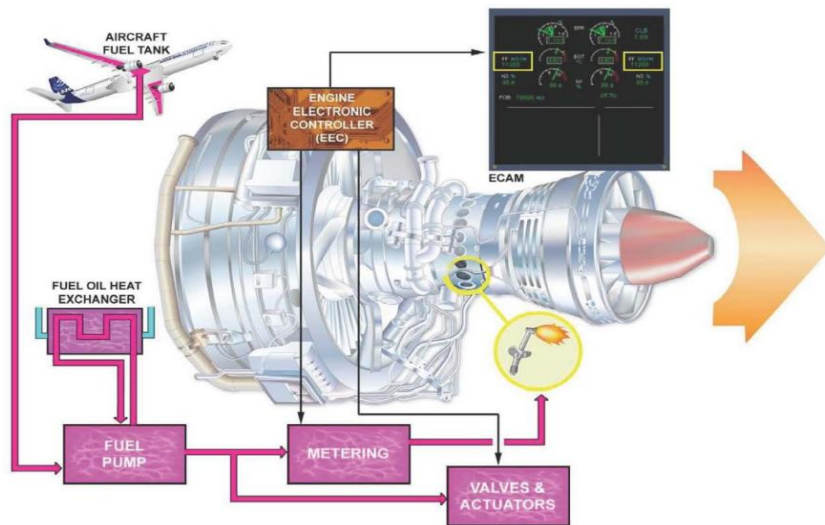
Komponen utama fuel system terpasang pada beberapa lokasi yang berbeda. *Fuel/Oil Heat Exchanger* (FOHE) dan *Low Pressure* (LP) *Fuel Filter* terletak pada sisi kanan *fan case* dan berfungsi menyaring bahan bakar serta mengatur temperaturnya dengan memanfaatkan panas oli. *LP Fuel Pump*, *HP Fuel Pump*, dan *Fuel Metering Unit* (FMU) terpasang pada *accessory gearbox* dan berfungsi menaikkan tekanan bahan bakar serta mengatur jumlah aliran sesuai kebutuhan *engine*. Adapun *primary* dan *secondary fuel manifold* beserta *fuel spray nozzles* berada pada *engine core*, yang bertugas mendistribusikan dan mengatomisasi bahan bakar ke dalam ruang bakar (Airbus, 2018).

Aliran bahan bakar dikontrol secara presisi oleh FMU yang dikendalikan oleh *Engine Electronic Controller* (EEC) berdasarkan parameter operasional seperti *N1*, *N2*, *temperatur*, dan *thrust demand*. Bahan bakar selanjutnya didistribusikan melalui *primary* dan *secondary fuel manifold* menuju *fuel spray nozzles* pada *combustion chamber*, tempat

bahan bakar diatomisasi dan dicampur dengan udara bertekanan tinggi untuk menghasilkan proses pembakaran yang stabil dan efisien (Airbus, 2018).



Gambar II.3 Komponen utama *fuel system*
(Sumber: Training Manual Airbus A330)



Gambar II.4 *Fuel system* Rolls-Royce Trent 700
(Sumber: Training Manual Airbus A330)

D. Fuel Metering Unit

Fuel Metering Unit (FMU) merupakan komponen utama dalam *engine fuel system* yang bertugas mengatur aliran bahan bakar menuju *combustion chamber* sesuai perintah FADEC dengan akurasi tinggi untuk menjaga kestabilan operasional mesin. FMU beroperasi berdasarkan prinsip mekanis-*elektrohidraulik*, yaitu sinyal elektrik dari sistem

kontrol mesin diubah menjadi aksi pengaturan aliran bahan bakar secara mekanis melalui katup dan regulator tekanan pada unit tersebut (Airbus, 2018). FMU juga bertanggung jawab mempertahankan tekanan bahan bakar yang sesuai sebelum dialirkan ke ruang bakar sehingga pembakaran tetap stabil pada berbagai fase penerbangan, mulai dari *idle*, *take-off*, *climb*, *cruise*, hingga *descent* (Jin & Li, 2022).

EEC mengontrol tiga torque motor pada FMU yang mengoperasikan tiga *servo-valve* internal. Kedua *channel* EEC juga menerima umpan balik posisi dari dua *resolver* yang memonitor posisi *metering valve* serta *microswitch* yang memonitor posisi PRSOV, sehingga sistem kontrol bahan bakar bekerja secara presisi, redundan, dan aman (Airbus, 2018). Ketiga katup internal tersebut dijelaskan sebagai berikut.

1. Fuel Metering Valve

Fuel Metering Valve berfungsi mengatur laju aliran bahan bakar yang dialirkan menuju ruang bakar. Posisi katup dimodulasi secara kontinu oleh *torque motor* berdasarkan perintah EEC, kemudian diverifikasi melalui umpan balik *resolver* agar *fuel flow* aktual sesuai dengan *fuel flow* yang diperintahkan.

2. Pressure Raising and Shut-Off Valve (PRSOV)

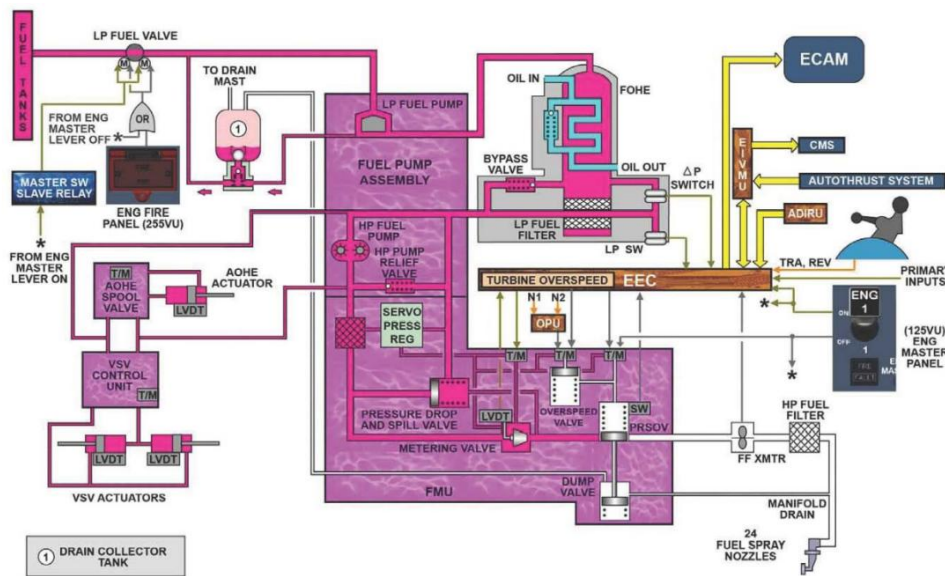
PRSOV berfungsi memulai dan menghentikan aliran bahan bakar menuju *combustion chamber* sekaligus menjaga tekanan minimum pada sisi hilir *metering valve*. Katup ini akan menutup pada saat *engine shutdown* maupun pada kondisi abnormal tertentu sebagai bagian dari fungsi proteksi *engine*.

3. Overspeed Valve

Overspeed Valve berfungsi menutup PRSOV apabila terdeteksi kondisi *overspeed* pada *engine*. Katup ini merupakan lapisan proteksi terakhir yang bekerja secara independen untuk mencegah kerusakan mesin akibat putaran berlebih.

Fungsi utama FMU dapat disimpulkan meliputi tiga aspek kritis. Pertama, mengontrol jumlah *fuel flow* yang dibutuhkan *engine* berdasarkan kebutuhan *thrust* sehingga suplai tidak berlebih (*overfueling*) maupun kurang (*underfueling*). Kedua, menjaga tekanan bahan bakar pada level yang sesuai melalui mekanisme penyeimbang tekanan dan regulator internal. Ketiga, mengatur distribusi bahan bakar yang memasok *combustion chamber* agar pembakaran berlangsung seragam dan konsisten pada setiap *nozzle*.

Posisi FMU yang terpasang pada *accessory gearbox* menyebabkan komponen ini menerima beban getaran *engine* secara terus-menerus, sekaligus terpapar temperatur tinggi dan fluktuasi tekanan bahan bakar selama operasi. Kondisi tersebut menjadikan FMU rentan terhadap kegagalan, baik akibat keausan mekanis, degradasi material pelindung konektor, maupun kelelahan (*fatigue*) pada bagian *housing*. Oleh karena itu, analisis keandalan terhadap FMU menjadi penting untuk memahami karakteristik kegagalan komponen sekaligus sebagai dasar penentuan strategi perawatan yang lebih efektif. Dokumentasi kondisi fisik dan komponen FMU yang digunakan pada pesawat Airbus A330-300 dapat dilihat pada Lampiran C.



Gambar II.5 Fuel Metering Unit system
(Sumber: Training Manual Airbus A330)

E. Perawatan Pesawat Udara

Perawatan (*maintenance*) adalah pelaksanaan seluruh kegiatan yang bertujuan memastikan kelaikan udara pesawat tetap terjaga secara berkelanjutan, yang mencakup salah satu atau kombinasi dari *overhaul*, *inspection*, *replacement*, *defect rectification*, *modification*, dan *repair* (Indonesia, 2006). Perawatan pesawat udara bertujuan memastikan pesawat selalu berada dalam kondisi siap operasi (*serviceable*) guna mendukung kelancaran kegiatan penerbangan serta memberikan jaminan penerbangan yang aman dan nyaman bagi pengguna jasa (Driyono, 2019).

Menurut Mora (2012), perawatan pesawat udara umumnya diklasifikasikan berdasarkan interval waktu yang sejenis ke dalam kelompok pekerjaan tertentu yang dikenal sebagai

clustering. Pengelompokan ini bertujuan mempermudah pelaksanaan perawatan agar lebih efektif dan efisien, yaitu sebagai berikut.

1. *Flight Hours*, merupakan interval inspeksi yang didasarkan pada jumlah jam operasional suatu pesawat udara.
2. *Flight Cycle*, merupakan interval inspeksi yang didasarkan pada jumlah lepas landas dan pendaratan yang dilakukan pesawat udara. Satu kali lepas landas dan pendaratan dihitung sebagai satu *cycle*.
3. *Calendar Time*, merupakan interval inspeksi yang dilakukan sesuai dengan jadwal kalender tertentu.

Pada penelitian ini, satuan interval yang digunakan adalah *flight hours* karena umur operasi *Fuel Metering Unit* tercatat dalam satuan jam operasi pesawat, sehingga paling representatif untuk menggambarkan beban kerja komponen selama masa pemakaian.

F. Program Perawatan

Perawatan pesawat udara pada dasarnya memiliki jadwal yang telah ditentukan selama masa operasionalnya. Hal ini disebabkan setiap komponen pesawat memiliki batas usia pakai tertentu sehingga perlu dilakukan penggantian secara berkala untuk menjaga kinerja dan keselamatan. Menurut Mora (2012), klasifikasi program perawatan dapat dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu perawatan *preventive* dan *corrective*.

1. Preventive Maintenance

Preventive maintenance merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kegagalan pada komponen sebelum komponen tersebut mengalami kerusakan. Perawatan *preventive* dibagi menjadi dua jenis sebagai berikut.

- a. *Hard Time*, merupakan perawatan yang dilakukan berdasarkan batas waktu dari umur maksimum suatu komponen pesawat. Dengan kata lain, perawatan ini merupakan perawatan pencegahan dengan cara mengganti komponen meskipun komponen tersebut belum mengalami kerusakan.

- b. *On Condition*, merupakan perawatan yang memerlukan inspeksi untuk menentukan kondisi suatu komponen. Tindakan selanjutnya ditentukan berdasarkan hasil inspeksi tersebut. Apabila terdapat gejala kerusakan, komponen dapat diganti bila alasan teknik dan ekonominya memenuhi.

2. *Corrective Maintenance*

Corrective maintenance dikenal pula dengan nama *condition monitoring*, yaitu perawatan yang dilakukan setelah ditemukan kerusakan pada suatu komponen dengan cara memperbaiki komponen tersebut. Apabila perbaikan tidak dapat dilakukan dengan alasan teknik maupun ekonomi, maka harus dilakukan penggantian komponen.

Kondisi yang terjadi pada *Fuel Metering Unit* selama periode penelitian menunjukkan bahwa penanganan komponen masih bersifat *corrective*, yaitu komponen baru ditangani setelah terjadi kegagalan yang berujung pada *unscheduled removal*. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk memberikan dasar kuantitatif bagi pergeseran strategi perawatan dari *corrective* menuju *preventive*.

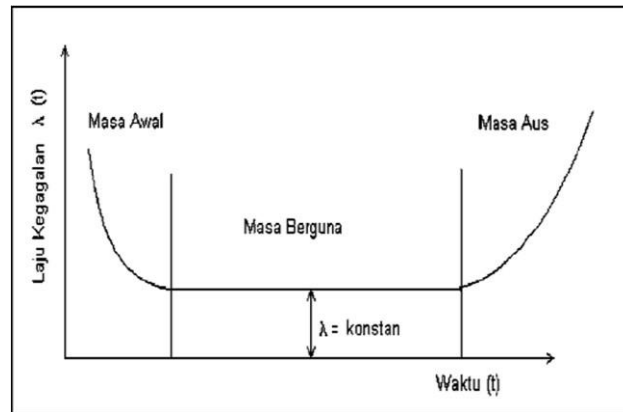
G. Keandalan

Keandalan (*reliability*) adalah kemampuan suatu sistem, komponen, atau produk untuk berfungsi sesuai dengan yang diharapkan tanpa mengalami kegagalan dalam periode waktu tertentu dan pada kondisi tertentu. Menurut Verhagen dan Boer (2018), keandalan memiliki peran krusial dalam industri penerbangan karena berkaitan langsung dengan keselamatan penerbangan dan efisiensi operasional. Biaya perawatan pesawat dapat mencapai 10 sampai 15 persen dari total biaya operasional maskapai, sehingga analisis keandalan menjadi sangat penting untuk mengoptimalkan strategi perawatan.

Keandalan suatu komponen atau sistem dapat direpresentasikan dalam bentuk kurva bak mandi (*bathtub curve*), yaitu kurva yang menunjukkan perubahan laju kegagalan terhadap waktu (F. Setiawan et al., 2020). Kurva ini terdiri atas tiga tahapan sebagai berikut.

1. Masa awal (*early life*) dengan laju kegagalan yang menurun.
2. Masa berguna (*useful life*) dengan laju kegagalan yang relatif konstan.
3. Masa aus (*wear-out period*) yang ditandai dengan meningkatnya laju kegagalan akibat bertambahnya umur operasi komponen.

Ketiga fase tersebut dalam analisis Distribusi Weibull dapat diidentifikasi melalui nilai *Shape parameter* (β), sehingga posisi suatu komponen pada kurva bathtub dapat ditentukan secara kuantitatif tanpa harus menunggu seluruh populasi komponen mengalami kegagalan.



Gambar II.6 Kurva bak mandi (*bathtub curve*)

(Sumber: (Abernethy, 2015))

H. Indeks Keandalan

Menurut Priyanta (2000), pemilihan indeks keandalan yang digunakan harus disesuaikan dengan karakteristik sistem dan tujuan analisis yang dilakukan. Beberapa parameter yang umum digunakan dalam pengukuran keandalan meliputi hal berikut.

1. Perkiraan jumlah kegagalan yang dapat terjadi dalam periode tertentu.
2. Rata-rata selang waktu antar kegagalan.
3. Laju kegagalan suatu proses.
4. Rata-rata durasi waktu henti peralatan atau sistem.
5. Nilai ekspektasi kerugian yang timbul akibat kegagalan.
6. Nilai ekspektasi kehilangan *output* proses yang disebabkan oleh kegagalan tersebut.

Indikator tersebut dapat dianalisis menggunakan pendekatan teori reliabilitas dengan syarat kondisi operasi dari komponen atau sistem yang diteliti telah memenuhi ketentuan yang dipersyaratkan. Pada penelitian ini, indeks keandalan yang digunakan meliputi *Mean Time to Failure* (MTTF), *reliability* $R(t)$, *Cumulative Distribution Function* (CDF), *Failure Rate* $\lambda(t)$, dan *B-life*

I. Distribusi dan Parameter Weibull

Distribusi Weibull memiliki peranan penting dalam analisis keandalan (*reliability*) dan pemeliharaan (*maintainability*). Distribusi ini banyak diterapkan untuk mengidentifikasi karakteristik kegagalan karena perubahan nilai parameternya memungkinkan Weibull menyesuaikan diri dengan berbagai pola data, bahkan dapat menyerupai karakteristik distribusi probabilitas lainnya (Ota, 2016). Kesesuaian penggunaan Distribusi Weibull dapat diamati melalui pola data kegagalan pada grafik Weibull. Apabila titik-titik data membentuk kecenderungan garis lurus, maka distribusi tersebut dinilai sesuai untuk memodelkan data kegagalan (Abernethy, 2015).

Berdasarkan jumlah parameternya, Distribusi Weibull dibedakan menjadi Weibull dua parameter dan Weibull tiga parameter. Menurut Abernethy (2015), Weibull dua parameter merupakan model yang paling umum digunakan dalam analisis umur pakai atau *life data analysis*. Hal tersebut disebabkan sebagian besar data kegagalan komponen tidak memiliki periode minimum tertentu yang menjamin komponen bebas dari kegagalan pada awal pengoperasian, sehingga nilai parameter lokasi (γ) dianggap nol. Penelitian ini menggunakan Distribusi Weibull dua parameter karena data kegagalan *Fuel Metering Unit* tidak menunjukkan adanya *minimum life* yang signifikan, dengan nilai *Time to Failure* terendah sebesar 1.098 FH dan sebaran data yang kontinu sejak awal periode operasi. Dengan demikian, parameter yang diestimasi hanya terdiri atas *Shape parameter* (β) dan *Scale parameter* (η).

Selain itu, Abernethy (2015) menyatakan bahwa metode standar untuk sampel berukuran 2 sampai 100 data dengan nilai β yang belum diketahui adalah Distribusi Weibull dua parameter menggunakan *Median Rank regression*. Jumlah data kegagalan pada penelitian ini sebanyak 55 data sehingga berada tepat pada rentang tersebut. Kedua parameter Distribusi Weibull dijelaskan sebagai berikut.

1. *Scale parameter* (η)

Scale parameter (η) merupakan parameter yang mempengaruhi persebaran distribusi, apakah akan terpusat atau menyebar. Nilai η selalu lebih besar dari nol dan disebut juga sebagai *characteristic life*, yaitu umur operasi ketika sekitar 63,2 persen populasi komponen diperkirakan telah mengalami kegagalan (Rahmawati & Mulyani, 2020). Semakin besar nilai η , semakin panjang waktu operasi yang dapat dicapai sebelum mayoritas kegagalan mulai terjadi.

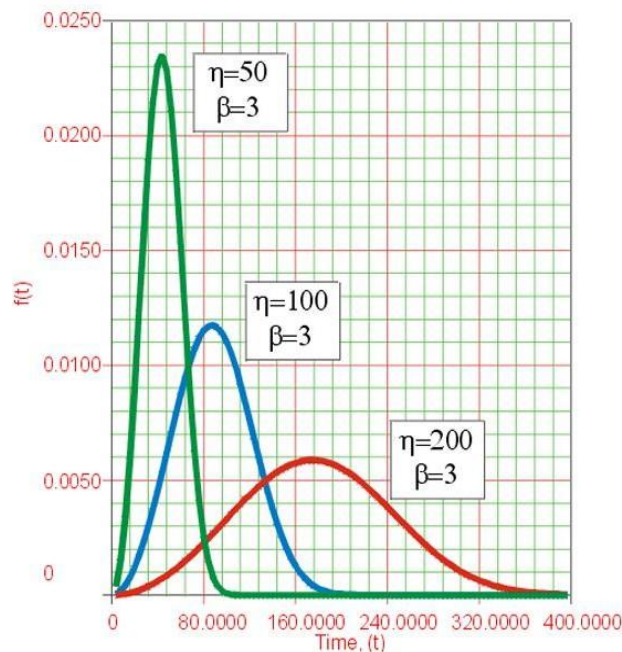
Apabila parameter lain dianggap konstan, peningkatan nilai *Scale parameter* akan menyebabkan kurva distribusi bergeser ke arah kanan dengan tinggi kurva yang menurun, namun tetap mempertahankan bentuk dan lokasinya (Ota, 2016). Untuk memastikan bahwa nilai η benar-benar merepresentasikan usia kegagalan komponen, diperlukan perhitungan *Mean Time to Failure* (MTTF), karena ketika nilai β lebih besar dari satu maka nilai η akan lebih besar daripada MTTF.

Gambar II.7 Grafik pengaruh *Scale parameter*

(Sumber: Ota (2016))

2. *Shape parameter* (β)

Shape parameter (β) merupakan parameter yang menjelaskan bentuk dari *Probability Density Function* (PDF) sehingga menentukan apakah distribusi akan berbentuk luas atau sempit. Nilai *Shape parameter* mempengaruhi pola distribusi dan menentukan karakteristik kerusakan yang paling sering terjadi. Menurut Abernethy (2015), nilai β diinterpretasikan sebagai berikut.



- a. Apabila $\beta < 1$, tingkat kerusakan akan menurun seiring berjalannya waktu. Kondisi ini dikenal sebagai *early life failure*, yaitu laju kegagalan mengikuti pola kurva *bathtub* yang menurun. Hal ini umumnya disebabkan oleh tegangan awal yang tidak sesuai, cacat produksi, kesalahan perakitan, maupun kesalahan pada saat perbaikan.

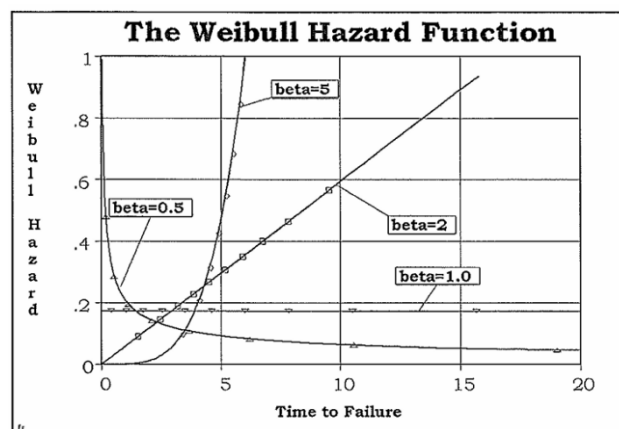
- b. Apabila $\beta = 1$, tingkat kerusakan bersifat konstan sehingga laju kegagalan tidak berubah terhadap waktu. Kondisi ini menunjukkan kegagalan terjadi secara acak (*random*), yang umumnya disebabkan oleh *human error*, kesalahan dalam proses perawatan, atau aktivitas lain yang merusak.
- c. Apabila $1 < \beta < 4$, tingkat kerusakan akan meningkat seiring waktu. Kondisi ini mengikuti pola kurva *bathtub* pada fase *wear-out*, yaitu laju kegagalan yang semakin tinggi. Hal ini biasanya disebabkan oleh korosi, erosi, dan proses keausan lainnya.

Gambar II.8 Grafik pengaruh Shape parameter

(Sumber: Abernethy (2015))

3. Location Parameter (γ)

Selain kedua parameter di atas, Distribusi Weibull tiga parameter juga mengenal



location parameter atau *minimum life* (γ) yang menjelaskan permulaan dari pemakaian suatu alat. Apabila nilai γ sama dengan nol, maka distribusi akan berubah menjadi Weibull dua parameter. Parameter ini disebutkan untuk memberikan gambaran lengkap mengenai variasi bentuk Distribusi Weibull. Penelitian ini tidak menggunakan parameter tersebut karena data kegagalan *Fuel Metering Unit* yang dianalisis tidak menunjukkan adanya periode bebas kegagalan yang signifikan, sehingga $\gamma = 0$ dan distribusi yang digunakan adalah Weibull dua parameter dengan β dan η sebagai satu-satunya parameter yang diestimasi.

J. Nilai Time to Failure (TTF)

Time to Failure (TTF) merupakan waktu operasi suatu komponen yang dihitung sejak komponen mulai digunakan sampai mengalami kegagalan. Data TTF menjadi data dasar dalam analisis Distribusi Weibull karena digunakan untuk menggambarkan umur kegagalan komponen (Attanayake & Ratnayake, 2023). Dalam Distribusi Weibull, data tersebut digunakan untuk menentukan urutan kegagalan serta mengestimasi *Shape parameter* (β) dan *Scale parameter* (η). Satuan TTF dapat berupa jam operasi, siklus, jarak tempuh, atau parameter umur lain yang sesuai dengan karakteristik penggunaan komponen.

Dalam pencatatan umur komponen pesawat dikenal beberapa parameter umur operasi, antara lain *Time Since Installation* (TSI) dan *Time Since New* (TSN). TSI menunjukkan waktu operasi yang terakumulasi sejak komponen dipasang pada pesawat hingga komponen dilepas atau sampai waktu pengamatan dilakukan. Sementara itu, TSN menunjukkan total waktu operasi yang telah dicapai komponen sejak kondisi baru, sehingga nilainya tetap terakumulasi meskipun komponen pernah dilepas, diperbaiki, atau dipasang kembali (EASA, 2021).

Penelitian ini menggunakan nilai TSI sebagai TTF karena analisis difokuskan pada lama operasi *Fuel Metering Unit* sejak dipasang pada *engine* hingga mengalami kegagalan dan dilakukan *unscheduled removal*. Penggunaan TSI memungkinkan setiap periode pemasangan komponen diperlakukan sebagai satu interval operasi tersendiri. Pendekatan serupa digunakan oleh (Rahmawati & Mulyani, 2020) yang menyatakan bahwa usia komponen selama dipasang pada pesawat dapat digunakan sebagai *failure time* dalam analisis Distribusi Weibull. Dengan demikian, hubungan antara TTF dan TSI dalam penelitian ini dinyatakan sebagai $TTF = TSI$.

Hubungan tersebut berlaku karena satu kejadian kegagalan didefinisikan sebagai berakhirnya periode operasi komponen sejak pemasangan hingga dilakukan *unscheduled removal*. Nilai TTF yang diperoleh selanjutnya diurutkan dari nilai terkecil hingga terbesar untuk digunakan dalam perhitungan *Adjusted Rank*, *Median Rank*, regresi linier, serta estimasi parameter Distribusi Weibull.

K. Perhitungan Parameter Distribusi Weibull

Estimasi parameter Distribusi Weibull dari data kegagalan dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan. Pertama, data waktu kegagalan dan data *suspended* apabila tersedia diurutkan dari nilai terkecil hingga terbesar untuk menentukan nilai *Adjusted Rank*. Kedua, nilai *Adjusted Rank* dikonversi menjadi *Median Rank* menggunakan *Benard's approximation* sebagai estimasi probabilitas kumulatif kegagalan. Ketiga, nilai *Median Rank* dan waktu kegagalan ditransformasikan secara logaritmik agar fungsi Weibull yang semula bersifat *nonlinier* dapat dinyatakan dalam bentuk regresi linier. Keempat, konstanta A dan koefisien B hasil regresi digunakan untuk menghitung *Shape parameter* (β) dan *Scale parameter* (η). Kelima, kedua parameter tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan MTTF, *reliability*, *Failure Rate*, CDF, dan *B-life*. Tahapan tersebut dijabarkan sebagai berikut.

1. *Adjusted Rank*

Adjusted Rank merupakan nilai urutan kegagalan yang telah disesuaikan untuk memperhitungkan keberadaan data tersensor atau *suspended*. Data tersensor adalah unit yang belum mengalami kegagalan sampai akhir periode pengamatan atau unit yang mengalami kegagalan akibat modus kegagalan lain. Walaupun tidak diplot sebagai titik kegagalan, data tersebut tetap harus diperhitungkan dalam penentuan urutan probabilitas kegagalan. Abernethy (2015) menjelaskan bahwa pengabaian data *suspended* dapat menghasilkan estimasi yang terlalu pesimistis karena umur operasi unit yang masih bertahan tidak ikut diperhitungkan. Apabila seluruh data merupakan data kegagalan, nilai *Adjusted Rank* akan sama dengan urutan data kegagalan biasa. Perhitungan *Adjusted Rank* dilakukan menggunakan Persamaan (2.1).

$$\begin{aligned} & \text{Adjusted Rank} \\ &= \frac{(\text{Reverse Rank}) \times (\text{Previous Adjusted Rank}) + (N + 1)}{(\text{Reverse Rank}) + 1} \quad (2.1) \end{aligned}$$

Keterangan:

i = Nilai *Adjusted Rank*

Reverse Rank = Peringkat terbalik, yaitu peringkat yang dihitung dari urutan paling rendah ke paling tinggi

Previous Adjusted Rank = Nilai *Adjusted Rank* hasil perhitungan sebelumnya

N = Jumlah sampel

2. Benard's *Median Rank*

Median Rank merupakan estimasi probabilitas kumulatif kegagalan atau *unreliability* pada setiap data kegagalan yang telah diurutkan. Park dan Bahn (2016) menjelaskan bahwa *Median Rank* dapat diperlakukan sebagai kumpulan titik *unreliability* yang digunakan untuk mengestimasi Distribusi Weibull melalui analisis regresi. *Median Rank* merupakan salah satu *plotting position* yang paling umum digunakan dalam estimasi parameter Weibull dengan metode kuadrat terkecil. Nilai *Median Rank* dihitung menggunakan Persamaan (2.2).

$$BMR = \frac{(i - 0.3)}{(n + 0.4)} \quad (2.2)$$

Keterangan:

BMR : Benard's *Median Rank*

i : Urutan kegagalan

n : Jumlah sampel

3. Regresi Linier

Fungsi Distribusi Weibull pada bentuk awalnya bersifat *nonlinier*, sehingga data waktu kegagalan dan *Median Rank* perlu ditransformasikan agar membentuk hubungan garis lurus. Metode *Ordinary Least Squares* digunakan untuk mengestimasi parameter Weibull dengan menyesuaikan model regresi linier terhadap data yang telah ditransformasikan (Birgoren, 2025). Penelitian ini menggunakan konvensi regresi X on Y menurut Abernethy (2015), yaitu transformasi probabilitas sebagai variabel X

dan logaritma waktu kegagalan sebagai variabel Y, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.3) dan Persamaan (2.4).

$$X = \ln [\ln (1 / (1 - \text{Median Rank of } Y))] \quad (2.3)$$

$$Y = \ln (\text{failure time}) \quad (2.4)$$

Keterangan:

- X : Transformasi probabilitas kumulatif kegagalan
Y : Transformasi logaritma natural waktu kegagalan
Median Rank of Y : Nilai Median Rank yang berpasangan dengan Y
ln : Operator logaritma natural dengan bilangan dasar e
e : Bilangan Euler sebesar 2,718281828

Pasangan nilai X dan Y selanjutnya digunakan untuk membentuk persamaan regresi linier $Y = A + BX$, dengan nilai konstanta A dan koefisien B diestimasi menggunakan metode kuadrat terkecil melalui Persamaan (2.5) dan Persamaan (2.6).

$$A = \bar{Y} - B\bar{X} \quad 2.5$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}} \quad 2.6$$

Keterangan:

- A : Intercept atau
B : Slope atau koefisien regresi
 $\bar{X}$: Rata-rata nilai X
 $\bar{Y}$: Rata-rata nilai Y
n : Jumlah data kegagalan

4. Penentuan Parameter β dan η

Distribusi Weibull dua parameter ditentukan oleh *Shape parameter* (β) dan *Scale parameter* (η). Parameter β menggambarkan bentuk distribusi serta kecenderungan perubahan laju kegagalan, sedangkan η merupakan *characteristic life* (Abernethy, 2015). Estimasi parameter Distribusi Weibull dilakukan berdasarkan *Cumulative Distribution Function* (CDF), yang bentuk awalnya bersifat nonlinier:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad 2.7$$

Agar diperoleh hubungan linier, dilakukan transformasi logaritma natural pada kedua ruas persamaan sebanyak dua kali, menghasilkan bentuk:

$$\text{Ln}\{-\text{Ln}(1 - F(t))\} = -\beta \text{Ln}(\eta) + \beta \text{Ln}(t) \quad 2.8$$

Dengan mengikuti konvensi pada persamaan (3) dan (4), dimana $Y = \ln(\text{failure time})$ diperlakukan sebagai variabel terikat, maka persamaan tersebut disusun menjadi:

$$\ln(t) = \frac{1}{\beta} \ln\{-\ln(1-F(t))\} + \ln(\eta) \quad 2.9$$

Sehingga diperoleh hubungan $B = 1/\beta$ dan $A = \ln(\eta)$. Dengan demikian, nilai *Shape parameter* dan *Scale parameter* Distribusi Weibull dihitung melalui persamaan:

$$\beta = \frac{1}{B}$$

$$\eta = e^A$$

Keterangan:

β	: <i>Shape parameter</i>
η	: <i>Scale parameter</i>
A	: Konstanta regresi
B	: Koefisien regresi

5. Fungsi Gamma

Fungsi Gamma dalam distribusi Weibull berfungsi sebagai alat bantu matematis untuk menghitung momen-momen statistik, seperti nilai harapan (mean) dan varians, tanpa harus melakukan pengintegralan rumit secara berulang. Saat menghitung nilai

ekspektasi dari fungsi kepadatan peluang (PDF) Weibull, bentuk integral yang dihasilkan secara matematis ekuivalen dengan definisi integral Euler tipe kedua, yaitu fungsi Gamma sebagaimana di tunjukan persamaan (2.9).

$$\Gamma(1 + 1/\beta) \quad (2.9)$$

6. Mean Time to Failure (MTTF)

Mean Time to Failure (MTTF) merupakan estimasi waktu rata-rata yang digunakan untuk memprediksi kapan suatu sistem atau komponen akan mengalami kegagalan dan tidak lagi dapat beroperasi sebagaimana mestinya (Abernethy, 2015). Nilai MTTF ditentukan berdasarkan parameter Distribusi Weibull sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.10).

$$MTTF = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Keterangan:

MTTF : *Mean Time to Failure*

β : *Shape parameter*

η : *Scale parameter*

Γ : Fungsi gamma

: Ketika $\beta = 1$, maka nilai MTTF sama dengan η

: Ketika $\beta > 1$, maka nilai MTTF lebih kecil dari η

: Ketika $\beta < 1$, maka nilai MTTF lebih besar dari η

7. Reliability

Reliability merupakan tingkat keandalan suatu sistem dalam menjalankan fungsinya sesuai yang diharapkan, yang dinyatakan dalam bentuk fungsi matematis untuk menggambarkan hubungan antara peluang keandalan terhadap waktu. Karena berbentuk fungsi probabilitas, nilai *reliability* berada pada rentang 0 hingga 1 ($0 < R < 1$)(Abernethy, 2015), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.10).

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.11)$$

Keterangan:

$R(t)$	: <i>Reliability</i> pada waktu t
e	: Bilangan Euler sebesar 2,718281828
t	: Waktu operasi
β	: <i>Shape parameter</i>
η	: <i>Scale parameter</i>

8. *Failure Rate*

Failure Rate merupakan banyaknya kegagalan yang terjadi pada suatu sistem atau komponen dalam period waktu tertentu, dengan syarat komponen tersebut masih mampu bertahan sampai waktu tersebut (Abernethy, 2015). Pola *Failure Rate* sangat dipengaruhi oleh nilai *Shape parameter*, sehingga bentuk kurvanya dapat menurun, konstan, atau meningkat sesuai fase kegagalan komponen. Perhitungan *Failure Rate* ditunjukkan pada Persamaan (2.12).

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.12)$$

Keterangan:

$\lambda(t)$	: <i>Failure Rate</i> pada waktu t
t	: Waktu yang akan dihitung probabilitasnya
β	: <i>Shape parameter</i>
η	: <i>Scale parameter</i>

9. *Cumulative Distribution Function (CDF)*

Cumulative Distribution Function (CDF) merupakan probabilitas kumulatif bahwa suatu komponen telah mengalami kegagalan sampai waktu operasi tertentu. Dalam analisis keandalan, fungsi ini disebut juga sebagai fungsi ketidakandalan atau *unreliability*. Nilai CDF berada pada rentang nol sampai satu dan meningkat seiring bertambahnya waktu operasi. CDF digunakan untuk mengetahui peluang kegagalan pada umur operasi tertentu, menentukan *B-Life*, serta menjadi dasar dalam mengevaluasi interval perawatan komponen (Abernethy, 2015). Perhitungan CDF ditunjukkan pada Persamaan (2.11).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.13)$$

Keterangan:

F(t)	: <i>Cumulative Distribution Function</i>
t	: Waktu operasi
β	: <i>Shape parameter</i>
η	: <i>Scale parameter</i>

L. Prediksi Umur Pakai Menggunakan *B-Life*

B-Life merupakan perkiraan umur operasi ketika persentase tertentu dari populasi komponen telah mengalami kegagalan. Notasi B_p menunjukkan umur pada saat sebesar p persen populasi diperkirakan gagal. Sebagai contoh, B_{10} berarti 10 persen populasi komponen telah gagal sedangkan 90 persen lainnya masih dapat beroperasi. Menurut Abernethy (2015), nilai *B-Life* dapat digunakan untuk menentukan batas umur komponen berdasarkan tingkat kegagalan yang dapat diterima. Pada Distribusi Weibull dua parameter, nilai *B-Life* dihitung menggunakan Persamaan (2.14).

$$B_p = \eta \times [-\ln(R)]^{1/\beta} \quad (2.14)$$

Keterangan:

B_p	: Umur operasi pada persentase kegagalan tertentu
R(t)	: Tingkat keandalan yang ditetapkan
β	: <i>Shape parameter</i>
η	: <i>Scale parameter</i>

B-Life dan MTTF memiliki fungsi yang berbeda dalam analisis keandalan. MTTF menggambarkan rata-rata waktu operasi komponen hingga terjadi kegagalan, sedangkan *B-Life* menunjukkan batas umur operasi berdasarkan persentase kegagalan tertentu. Pada Distribusi Weibull dengan nilai β lebih besar dari satu, nilai *B-Life* akan selalu lebih kecil dibandingkan MTTF sehingga penggunaannya dinilai lebih konservatif dan lebih aman sebagai dasar penentuan interval *preventive maintenance*, khususnya untuk komponen yang bersifat safety critical.

Dalam praktiknya, nilai *B-Life* yang paling umum dijadikan acuan industri, termasuk industri penerbangan dan otomotif, adalah B_{10} Life yaitu usia komponen pada saat probabilitas kegagalan mencapai 10 persen (Abernethy, 2015). Semakin kecil indeks yang

digunakan, semakin konservatif interval yang dihasilkan. Pada Bab IV, konsep *B-Life* digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam menentukan usulan interval perawatan komponen *Fuel Metering Unit*.

M. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) adalah metode sistematis untuk mengidentifikasi dan mencegah masalah produk dan proses sebelum terjadi. FMEA difokuskan pada pencegahan cacat, peningkatan keselamatan, dan peningkatan kepuasan pelanggan. Idealnya, FMEA dilakukan pada tahap desain produk atau pengembangan proses, meskipun melakukan FMEA pada produk dan proses yang ada juga dapat menghasilkan manfaat yang substansial (Mcdermott dkk., 2008.).

Menurut (Prasetya et al., 2021) tujuan utama FMEA adalah untuk mendeteksi dan mencegah gangguan dengan mengidentifikasi risiko potensial dan mengembangkan strategi untuk mengurangi risiko tersebut. Tabel II.3 menjelaskan tentang apa yang akan dibahas pada FMEA.

Komponen	Fungsi	Mode Kegagalan	S	O	D	RPN

(Sumber : (Pasaribu et al., 2021))

Penjelasan:

1. **Komponen** : Merujuk pada bagian atau elemen dari sistem yang sedang dianalisis
2. **Fungsi**: Menjelaskan apa fungsi utama dari komponen tersebut dalam sistem
3. **Mode Kegagalan (*Failure Mode*)**: Jenis kegagalan yang terjadi
4. **Severity (Tingkat Keparahan)**: Skor 1-10 yang menunjukkan seberapa parah akibat kegagalan tersebut bisa terjadi
5. **Occurrence (Frekuensi Terjadi)**: Skor 1-10 yang menunjukkan seberapa sering kemungkinan kegagalan ini terjadi
6. **Detection (Kemungkinan terdeteksi)**: Skor 1-10 yang menunjukkan seberapa besar kemungkinan kegagalan dapat dideteksi sebelum terjadi dampak

7. RPN (*Risk Priority Number*): Angka prioritas risiko yang didapatkan dari hasil SOD

Tingkat Kerusakan (*severity*) Seberapa serius kerusakan yang dihasilkan dengan terjadinya kegagalan pada suatu sistem.

Keparahan	Tingkat keparahan	Peringkat
Bahaya, Kegagalan terjadi tanpa ada peringatan	Sangat berbahaya, berpengaruh terhadap keselamatan dan tanpa ada peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	10
Bahaya dengan tanda – tanda	Efeknya serius, berdampak terhadap keselamatan dan terdapat peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	9
Ekstrem	Berdampak terhadap performa pesawat sehingga tidak dapat dioperasikan	8
Sangat tinggi	Berpengaruh terhadap performa pesawat tetapi pesawat masih bisa dioperasikan	7
Tinggi	Pesawat bisa beroperasi tetapi, terdapat gangguan kecil dan terdapat komponen yang tidak berfungsi	6
Sedang	Berpengaruh terhadap performa pesawat serta komponen pengikutnya	5
Rendah	Pesawat tetap beroperasi dengan tanda kerusakan, sehingga membutuhkan perbaikan	4
Kecil	Pesawat bisa digunakan dengan baik namun terdapat sedikit gangguan berupa tanda kerusakan sistem	3
Sangat kecil	Pesawat dapat digunakan dengan baik namun masih ada gangguan berupa tanda kerusakan sistem yang lebih sedikit	2
Tidak ada dampak	Tidak ada dampak terhadap pesawat	1

(Sumber : (Pasaribu et al., 2021))

Frekuensi (*Occurrence*) Seberapa banyak gangguan yang dapat menyebabkan sebuah kegagalan pada pengoperasian pada sistem tersebut.

Peluang terjadi kegagalan	Tingkat kemungkinan kegagalan	Peringkat
Sangat tinggi dan ekstrem; kegagalan hampir tak terhindarkan	1 dari 2	10
Sangat tinggi; kegagalan berhubungan dengan proses yang gagal sebelumnya	1 dari 3	9
Tinggi; kegagalan terus berulang	1 dari 8	8
Relatif tinggi	1 dari 20	7
Cenderung tinggi	1 dari 80	6
Sedang	1 dari 200	5
Relatif rendah	1 dari 1000	4
Rendah	1 dari 5.000	3
Sangat rendah	1 dari 10,000	2
Hampir tidak mungkin terjadi kegagalan	1 dari 100,000	1

(Sumber : (Pasaribu et al., 2021))

Tingkat Deteksi (*Detection*) Bagaimana kegagalan operasi tersebut dapat diketahui sebelum terjadi. Tingkat deteksi juga dapat dipengaruhi dari banyaknya kontrol yang mengatur jalannya proses. Semakin banyak kontrol dan prosedur yang mengatur jalannya suatu sistem maka diharapkan tingkat deteksi dari kegagalan dapat semakin tinggi.

Kemungkinan kegagalan terdeteksi	Kriteria berdasarkan rancangan pengendalian saat ini	Peringkat
Hampir mustahil	Tidak terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	10
Sangat Kecil	Terdapat sangat sedikit kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	9

Kemungkinan kegagalan terdeteksi	Kriteria berdasarkan rancangan pengendalian saat ini	Peringkat
Kecil	Terdapat sedikit, terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	8
Sangat rendah	Terdapat kendali tetapi sangat rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	7
Rendah	Terdapat kendali tetapi rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	6
Sedang	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang/cukup untuk mendeteksi potensi kegagalan	5
Agak tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang cenderung tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	4
Tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	3
Sangat tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sangat tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	2
Hampir pasti	Kendali hampir pasti dapat mendeteksi potensi kegagalan	1

(Sumber : (Pasaribu et al., 2021))

Risk Priority Number (RPN) adalah sebuah pengukuran dari resiko yang bersifat relative, RPN diperoleh melalui hasil perkalian antara rating *Severity*, *Occurrence* dan *Detection*. RPN ditentukan sebelum mengimplementasikan rekomendasi dari tindakan perbaikan, dan ini digunakan untuk mengetahui bagian manakah yang menjadi prioritas utama berdasarkan nilai RPN tertinggi. Pada persamaan 1 menjelaskan bagaimana menghitung nilai RPN yang berkaitan terhadap tingkat keparahan, kejadian dan deteksi terlihat dibawah ini:

$$RPN = S \times O \times D \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

RPN : *Risk Priority Number* (Nilai Risiko Utama)

S: *Severity* (Tingkat keparahan)

O: *Occurrence* (Tingkat kejadian)

D: *Detection* (Kemungkinan kegagalan terdeteksi)

Nilai dari RPN digunakan untuk menentukan tingkat risiko. Dalam menentukan tingkat risiko terdapat tiga kategori risiko, yaitu risiko tinggi dengan nilai $RPN \geq 100$, risiko menengah dengan nilai RPN 50-99, dan risiko rendah dengan nilai $RPN < 50$. Risiko yang memiliki nilai RPN tinggi akan Pengelompokan tingkat kegagalan berdasarkan nilai RPN mengacu pada standar SAE J-1739 sebagaimana disajikan pada Tabel II.1.

Tabel II.1 Kategori tingkat kegagalan berdasarkan nilai RPN

No	Rentang Nilai RPN	Kategori Tingkat Kegagalan
1	1	Tidak terjadi kegagalan
2	2 – 60	Tingkat kegagalan rendah
3	61 – 200	Tingkat kegagalan sedang
4	201 – 1.000	Tingkat kegagalan tinggi

(Sumber: SAE J-1739 (1995))

Perlu diperhatikan bahwa RPN tidak dapat dijadikan satu-satunya dasar pengambilan keputusan. Modus kegagalan dengan nilai *Severity* tinggi tetap harus mendapatkan perhatian khusus meskipun frekuensi kejadiannya rendah, mengingat dampaknya berkaitan langsung dengan aspek keselamatan penerbangan.

N. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan kajian terhadap berbagai penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dan memiliki keterkaitan dengan topik tugas akhir yang diteliti. Kajian ini bertujuan memberikan dasar teoritis dan referensi ilmiah yang mendukung pelaksanaan penelitian. Melalui penelaahan penelitian terdahulu, peneliti dapat memahami metode, hasil, serta ruang lingkup penelitian sebelumnya, mengidentifikasi unsur kebaruan, menghindari pengulangan kajian yang sama, serta menunjukkan kontribusi penelitian terhadap pengembangan ilmu pengetahuan.

Berdasarkan penelitian terdahulu yang dikaji, metode Distribusi Weibull telah banyak digunakan untuk menganalisis keandalan berbagai komponen pesawat udara, seperti *nose wheel assembly*, *fuel nozzle*, *ignition leads*, *high pressure shut-off valve*, *windshield*, serta *fuel control unit*. Penelitian tersebut berhasil menentukan parameter keandalan berupa *Mean Time to Failure*, *reliability*, dan *Failure Rate* menggunakan pendekatan Distribusi Weibull. Sementara itu, metode FMEA banyak digunakan untuk memprioritaskan modus kegagalan pada sistem hidrolik maupun sistem bahan bakar pesawat.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu hanya berfokus pada perhitungan parameter keandalan dan rekomendasi perawatan secara umum, atau sebaliknya hanya melakukan analisis FMEA tanpa dasar statistik yang terukur. Hingga saat ini, penelitian yang secara khusus membahas keandalan *Fuel Metering Unit* P/N 702-03 pada *engine* Rolls-Royce Trent 700 pesawat Airbus A330-300 masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan dengan menggabungkan kedua metode dalam satu alur analisis. Hasil Distribusi Weibull digunakan untuk menyaring populasi komponen yang mengalami kegagalan sebelum mencapai MTTF, kemudian populasi tersebut dianalisis menggunakan FMEA untuk menentukan prioritas modus kegagalan. Keluaran penelitian tidak hanya berupa nilai keandalan, melainkan interval inspeksi berbasis *B-Life* yang telah disertai isi pemeriksaan yang spesifik sesuai modus kegagalan dominan. Ringkasan penelitian terdahulu disajikan pada Tabel II.2.

Tabel II.2 Penelitian terdahulu

No	Judul	Hasil Penelitian	Metode Penelitian	Persamaan	Perbedaan
1	<i>Reliability Analysis of Nose Wheel Assy ATR 72 500 (Fajar Khanif Rahmawati, n.d.)</i>	Analisis keandalan menggunakan distribusi Weibull menunjukkan bahwa karakteristik kegagalan pada komponen Nose Wheel Assy adalah early wear out (keausan dini)	Kuantitatif (weybull)	Metode penelitan menggunakan Distribusi weybull	Komponen yang diteliti yaitu Nose Wheel Assy
2	<i>Reliability of Air Separation Module Component on The nitrogen generation system of BOEING Aircraf (Kurniawan et al., n.d.)</i>	Tingkat keandalan komponen Air Separation Module dengan P/N 2030157-102 pada usia 250 jam adalah 0.969071, dan pada 200 siklus Adalah 0.951506. Keandalan ini menurun seiring bertambahnya usia komponen, terutama karena peningkatan jam terbang (<i>flight hours</i>) dan siklus penerbangan (<i>flight cycles</i>).	Kuantitatif (Weybull)	Metode penelitan menggunakan Distribusi weybull	Komponen yang diteliti yaitu Air Separation Module
3	<i>(Trail, 2018) Applying Weibull Methods In Gas Turbine Component</i>	penggunaan analisis Weibull untuk mengidentifikasi masalah dalam fuel <i>nozzle housing</i> dan metode untuk menentukan apakah tingkat keausan bantalan dorong paling sesuai	Kuantitatif (weybull)	Metode penelitan menggunakan Distribusi weybull	Perbedaan tempat penelitian, perbedaan pesawat, perbedaan komponen yang diteliti, dan perbedaan

		dengan Weibull tiga parameter atau distribusi lognormal.			'part number komponen
4	(Rachman, 2018). Analisis keandalan komponen Fuel <i>nozzle</i> pada pesawat cessna grand caravan 208b dengan metode weibull	peningkatan jam pemakaian. Menerapkan perawatan preventif dengan pemeriksaan atau penggantian periodik pada komponen Fuel <i>nozzle</i> dapat menjadi dasar pengembangan strategi perawatan. Distribusi Weibull, menganalisis data penggantian komponen selama operasional pesawat, menilai kegagalan, tingkat keandalan, dan efektivitas perawatan	Kuantitatif (weybull)	Metode penelitan menggunakan Distribusi weybull	Perbedaan tempat penelitian, perbedaan pesawat, perbedaan komponen yang diteliti, dan perbedaan part number komponen
5	(Pohl and Hermanns, 2016) <i>Physical model based reliability analysis for accelerated life testing of a fuel supply system</i>	pendekatan berbasis model diperkenalkan untuk analisis pengujian masa pakai yang efektif sebelum kegagalan.	Kuantitatif (weybull)	Metode penelitan menggunakan Distribusi weybull	Perbedaan tempat penelitian, perbedaan pesawat, perbedaan komponen yang diteliti, dan perbedaan part number komponen

6	(Fadli, Jufrizel, and Hastuti 2021) Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV dengan Metode FMEA pada Penyulang Akasia dan Lele PT PLN (Persero) ULP Kota Barat	Pada konsep dasar keandalan, memasukkan FMEA sebagai metode yang menggunakan pendekatan bottom up untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan dan dampak yang dihasilkan oleh kegagalan pada setiap bagian terhadap sebuah sistem.	FMEA		
7	Analisristianti, S (2024) Analisis keandalan <i>fuel nozzle</i> airbus 320 neo menggunakan distribusi weibull dan <i>failure mode and effect analysis</i> di pt xyz	Analisis keandalan menggunakan FMEA menunjukkan bahwa karakteristik kegagalan pada komponen	FMEA		

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *mixed methods*, yaitu kombinasi antara metode kuantitatif dan kualitatif, dengan tujuan memperoleh pemahaman yang komprehensif terhadap permasalahan yang diteliti. Pendekatan *mixed methods* dipilih karena mampu mengintegrasikan analisis numerik berbasis data statistik dengan analisis proses dan konteks operasional secara mendalam, sehingga hasil penelitian menjadi lebih utuh dan saling melengkapi (Creswell & Plano Clark, 2021).

Pendekatan kuantitatif dalam penelitian ini diterapkan melalui analisis keandalan menggunakan metode distribusi Weibull. Distribusi Weibull merupakan salah satu metode statistik yang paling banyak digunakan dalam analisis *reliability* karena fleksibilitasnya dalam memodelkan berbagai pola kegagalan, baik pada fase awal, masa pakai normal, maupun fase keausan (Kumar et al., 2020). Melalui pendekatan ini, data waktu kegagalan (*time to failure*) diolah untuk memperoleh parameter distribusi Weibull, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) sebagai indikator tingkat keandalan komponen atau sistem yang diteliti (Singh & Mahapatra, 2022).

Hasil analisis kuantitatif berupa nilai MTTF dan parameter Weibull memberikan gambaran objektif mengenai karakteristik kegagalan dan umur pakai komponen, sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi efektivitas pemeliharaan dan perencanaan perawatan selanjutnya (Rahman et al., 2023). Dengan demikian, metode Weibull tidak hanya berfungsi sebagai alat perhitungan statistik, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan dalam sistem pemeliharaan berbasis keandalan.

B. Waktu, Tempat, & Obejek Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada periode Januari hingga Desember 2025, dengan mempertimbangkan ketersediaan dan kelengkapan data kegagalan komponen yang terjadi selama kurun waktu tersebut. Pemilihan rentang waktu penelitian ini didasarkan pada tingginya frekuensi kejadian kegagalan yang dinilai representatif untuk menggambarkan kondisi aktual keandalan sistem serta memadai untuk dilakukan analisis statistik dan evaluasi pemeliharaan secara komprehensif.

Tempat pelaksanaan penelitian adalah di PT GMF AeroAsia Tbk, khususnya pada fasilitas pemeliharaan pesawat Airbus A330. Lokasi ini dipilih karena PT GMF AeroAsia merupakan perusahaan *Maintenance, Repair, and Overhaul* (MRO) yang memiliki peran strategis dalam pemeliharaan pesawat *wide-body* serta memiliki sistem pencatatan dan dokumentasi kegagalan komponen yang terstruktur, sehingga mendukung kebutuhan data penelitian.

Objek penelitian dalam tugas akhir ini adalah *Fuel Metering Unit* (FMU) yang merupakan bagian dari sistem bahan bakar mesin pesawat Airbus A330. FMU memiliki fungsi vital dalam mengatur aliran bahan bakar menuju ruang bakar sesuai dengan kebutuhan operasi mesin, sehingga tingkat keandalan komponen ini sangat berpengaruh terhadap performa mesin, keselamatan penerbangan, dan kontinuitas operasional pesawat. Fokus penelitian diarahkan pada kasus-kasus kegagalan FMU yang terjadi selama tahun 2025, dengan total 55 kejadian kegagalan yang dijadikan sebagai data utama penelitian.

Dalam penelitian ini, data kegagalan FMU dianalisis menggunakan metode distribusi Weibull untuk menentukan nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) sebagai indikator keandalan komponen. Selanjutnya, metode FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) diterapkan untuk mengidentifikasi dan menganalisis modus kegagalan beserta dampaknya secara sistematis, serta menyusun usulan perbaikan yang bertujuan untuk meningkatkan keandalan FMU. Kasus-kasus kegagalan tersebut telah menimbulkan dampak berupa kerugian materi dan keterlambatan penerbangan, sehingga hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengurangi kerugian operasional dan meningkatkan efektivitas pemeliharaan di PT GMF AeroAsia.

C. Sumber dan Jenis Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder.

Data primer diperoleh melalui kegiatan wawancara dengan personel teknis PT GMF AeroAsia, yang meliputi manajer, *engineer*, dan teknisi, serta melalui observasi langsung terhadap aktivitas perawatan pesawat. Sementara itu.

1. Data sekunder dikumpulkan dari berbagai dokumen pendukung, antara lain logbook pemeliharaan, riwayat pelepasan komponen (*removal history*), dokumen *Aircraft Maintenance Manual* (AMM), *task card*, serta laporan gangguan teknis yang berkaitan dengan objek penelitian.

D. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa metode yang disesuaikan dengan pendekatan *mixed methods*, guna mendukung analisis kuantitatif dan kualitatif secara terpadu. Teknik yang digunakan meliputi wawancara, observasi, serta studi dokumentasi, yang bertujuan untuk memperoleh data yang akurat, relevan, dan dapat dipertanggung jawabkan secara ilmiah.

1. Teknik pengumpulan data kuantitatif

Pada metode Distribusi Weibull ini menggunakan data primer berupa *historical failure* komponen *Fuel Metering Unit* P/N 702-03 pada Aircraft flight *Maintenance Log*

2. Teknik Pengumpulan Data Kualitaitaif

Selain mendukung analisis kuantitatif, data dokumentasi yang sama juga digunakan sebagai data pendukung dalam analisis kualitatif menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi modus kegagalan (*failure modes*) yang terjadi pada FMU, Data yang digunakan pada metode FMEA ini adalah data primer berupa observasi lapangan dan wawancara. Selain itu juga menggunakan data sekunder berupa studi literatur.

a. Observasi lapangan

Observasi lapangan berupa pengamatan terhadap komponen *Fuel Metering Unit* Airbus 330-300 series P/N 702-03 secara langsung.

b. Wawancara

Wawancara dibutuhkan untuk mendapatkan data-data yang mendukung penelitian penulis. Wawancara ini dilakukan kepada teknisi yang bekerja di PT GMF Aeroasia , yaitu narasumber AME Airbus 330, type rating Airbus 330 dan *narasumber experienced of engine*.

c. Studi Literatur

Studi literatur ini bertujuan untuk mencari data-data yang menunjang dan memperkuat penelitian penulis. Dalam hal ini dapat berupa pemahaman secara teoritis yang didapatkan melalui workshop report, AFML, *service bulletin*, *Engineering Instruction*, *customer connection meeting*, dan jurnal yang berkaitan dengan penelitian penulis.

E. Teknik Pengolahan Data

Teknik pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang disusun secara sistematis untuk mendukung pendekatan kuantitatif dan kualitatif. Tahapan pengolahan data difokuskan pada analisis keandalan komponen *Fuel Metering Unit* (FMU) menggunakan distribusi Weibull serta analisis akar penyebab kegagalan menggunakan FMEA

1. Pendekatan Kuantitatif dengan distribusi Weibull

a. Penentuan Komponen Kegagalan Utama FMU

Tahap awal dilakukan dengan melakukan reduksi data kegagalan FMU berdasarkan data kejadian kegagalan (*unscheduled removal*) yang terjadi selama periode penelitian. menentukan FMU sebagai komponen utama yang berkontribusi terhadap kegagalan sistem bahan bakar mesin pesawat Airbus A330. Data kegagalan yang dianalisis merupakan seluruh kejadian kegagalan FMU yang tercatat selama tahun 2025, sehingga diperoleh satu komponen utama sebagai fokus analisis keandalan

b. Penentuan Nilai *Mean Time to Failure* (MTTF)

Nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) ditentukan berdasarkan data pemeliharaan FMU yang diperoleh dari catatan perawatan pesawat.

Parameter yang digunakan dalam penentuan MTTF adalah *Time Since Installation* (TSI), yaitu waktu operasi komponen FMU sejak pemasangan terakhir hingga terjadinya kegagalan. Data TSI tersebut digunakan sebagai data utama dalam pengolahan kuantitatif untuk menggambarkan umur pakai FMU sebelum mengalami kegagalan.

- c. Perhitungan Parameter Distribusi Weibull
- Tahapan selanjutnya adalah menghitung parameter distribusi Weibull yang meliputi parameter bentuk (β) dan parameter skala (η). Nilai parameter ini digunakan untuk menentukan karakteristik pola kegagalan FMU, apakah berada pada fase kegagalan awal, fase operasi normal, atau fase keausan. Hasil perhitungan parameter Weibull selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) dan nilai *reliability* FMU. Nilai-nilai tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi tingkat keandalan FMU serta dalam penyusunan rekomendasi perbaikan pemeliharaan di masa mendatang.

2. Pendekatan Kualitatif dengan menggunakan FMEA

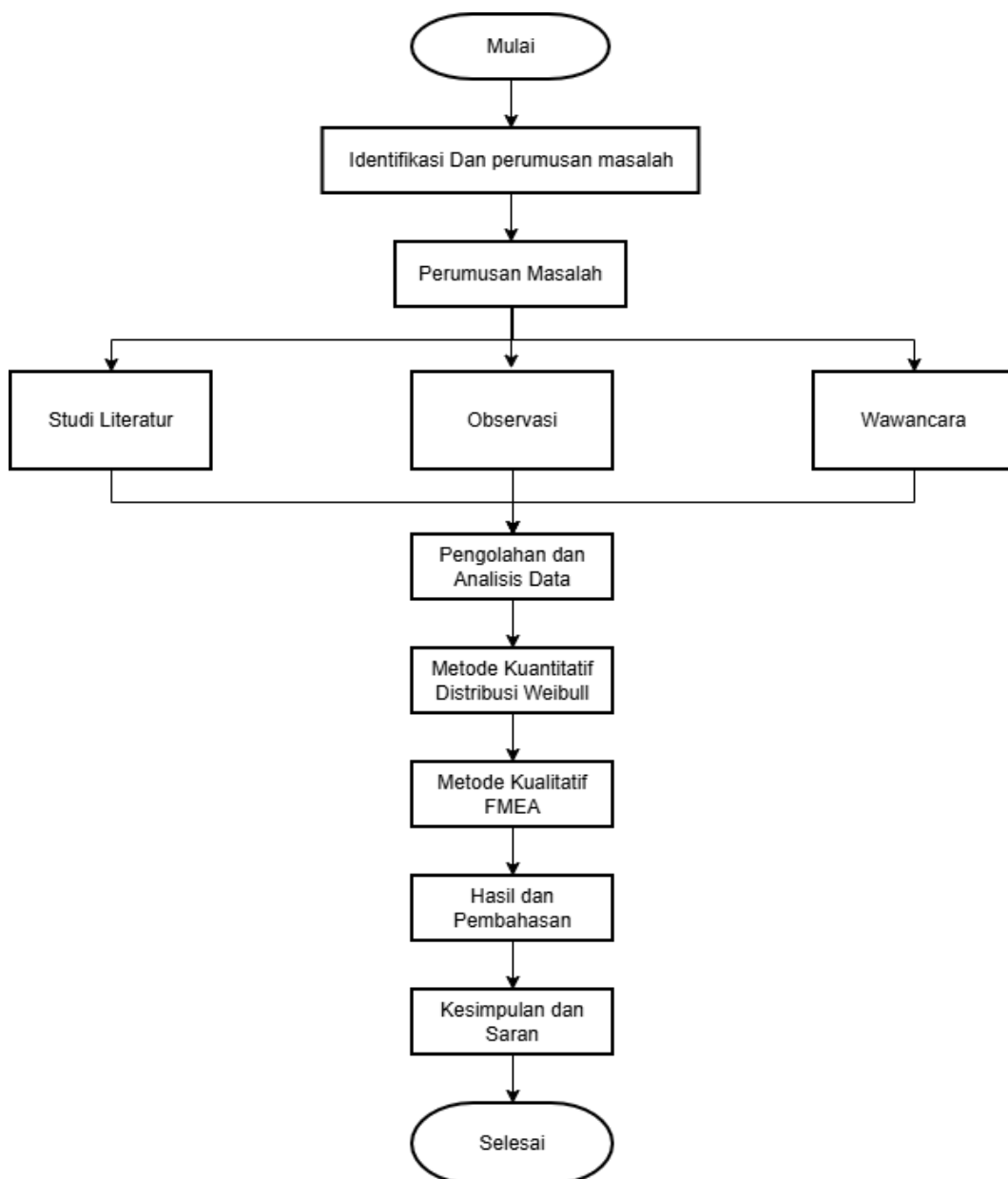
- a. Pengumpulan dan Pengukuran Data Kegagalan (*Data Collection and Failure Measurement*). Tahap ini bertujuan untuk mengumpulkan dan mengukur data yang berkaitan dengan kegagalan *Fuel Metering Unit* (FMU) guna memperoleh gambaran kondisi aktual tingkat keandalan dan performa komponen. Data yang digunakan meliputi frekuensi kegagalan, waktu kegagalan (*time to failure*), jenis kerusakan, serta data pendukung yang berasal dari *logbook* pesawat, *maintenance record*, dan laporan gangguan teknis.
- b. Analisis Akar Penyebab Kegagalan (FMEA). Tahap awal dalam metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) dilakukan dengan mengidentifikasi sistem yang menjadi objek analisis, yaitu *Fuel Metering Unit* (FMU) pada pesawat Airbus A330, serta mendefinisikan ruang lingkup analisis secara menyeluruh. Pada tahap ini ditentukan batasan sistem, fungsi utama komponen FMU dalam sistem bahan bakar mesin, serta dampak kegagalan terhadap operasional pesawat, seperti

keterlambatan penerbangan, peningkatan biaya pemeliharaan, dan potensi terganggunya keselamatan operasional penerbangan. Pendefinisian ruang lingkup ini menjadi dasar dalam penyusunan tabel FMEA secara sistematis dan terarah.

- c. Pengumpulan dan Pengukuran Data Kegagalan (*Data Collection and Failure Measurement*). Tahap ini bertujuan untuk mengumpulkan dan mengukur data yang berkaitan dengan kegagalan *Fuel Metering Unit* (FMU) guna memperoleh gambaran kondisi aktual tingkat keandalan dan performa komponen. Data yang digunakan meliputi frekuensi kegagalan, waktu kegagalan (*time to failure*), jenis kerusakan, serta data pendukung yang berasal dari *logbook* pesawat, *removal history*, *maintenance record*, dan laporan gangguan teknis. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai masukan utama dalam pengisian kolom *failure mode*, *failure effect*, dan penilaian risiko pada tabel FMEA

F. Diagram Alir

Penelitian ini dilaksanakan berdasarkan tahapan-tahapan yang telah ditetapkan dalam diagram alir penelitian. Diagram alir penelitian berperan sebagai panduan bagi penulis dalam melaksanakan seluruh proses penelitian, sekaligus sebagai acuan untuk menilai ketercapaian dan keberhasilan penelitian. Selain itu, diagram alir penelitian juga berfungsi untuk memudahkan pembaca dalam memahami alur dan keseluruhan isi laporan penelitian ini.



Gambar III.1 Diagram alir penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menyajikan hasil pengolahan dan analisis data terhadap komponen *Fuel Metering Unit* (FMU) P/N 702-03 yang digunakan pada *Engine Rolls-Royce Trent 700* pesawat Airbus A330-300 di PT GMF AeroAsia, Tbk. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan *Distribusi Weibull* dua parameter untuk karakteristik pola kegagalan komponen berdasarkan data *Time to Failure* (TTF) yang diperoleh dari data *unscheduled removal* selama periode penelitian. Pendekatan ini dipilih karena mampu memodelkan karakteristik kegagalan komponen secara kuantitatif, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi tingkat keandalan serta memprediksi umur pakai komponen secara lebih akurat.

Tahapan analisis diawali dengan pengolahan data TTF untuk memperoleh parameter *Distribusi Weibull*, yaitu *Shape parameter* (β) dan *Scale parameter* (η) melalui metode regresi linier. Parameter tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menghitung *Mean Time to Failure* (MTTF), *reliability*, *Cumulative Distribution Function* (CDF), dan (*Failure Rate*,). Hasil perhitungan MTTF kemudian dibandingkan dengan seluruh kejadian kegagalan untuk mengidentifikasi komponen yang mengalami kegagalan dini, dan kelompok kegagalan tersebut dianalisis lebih lanjut menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA).

Penyajian hasil penelitian dalam bab ini disusun secara sistematis mengikuti tahapan analisis yang telah dijelaskan pada Bab III, dimulai dari deskripsi data penelitian, pengolahan *Distribusi Weibull*, perhitungan parameter keandalan, analisis FMEA, hingga penyusunan usulan interval perawatan. Dengan pendekatan tersebut, pembahasan tidak hanya berfokus pada penyajian hasil numerik, tetapi juga memberikan interpretasi teknis mengenai perilaku kegagalan komponen serta implikasinya terhadap strategi pemeliharaan yang lebih efektif dan berbasis keandalan.

A. Pengolahan Data Awal Kegagalan *Fuel Metering Unit*

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data *unscheduled removal* komponen *Fuel Metering Unit* P/N 702-03 pada pesawat Airbus A330-300 selama periode 2023 sampai 2025. Data *unscheduled removal* digunakan sebagai dasar penelitian karena menunjukkan kejadian pelepasan komponen dari *engine* yang dilakukan di luar jadwal

perawatan terencana. Dengan demikian, data tersebut menggambarkan kegagalan aktual yang terjadi pada komponen selama masa operasi.

Komponen yang dianalisis adalah *Fuel Metering Unit* yang memiliki fungsi penting dalam mengatur aliran bahan bakar menuju *combustion chamber* sesuai perintah *Engine Electronic Controller*. Kegagalan pada komponen ini dapat mempengaruhi kinerja *engine* secara langsung, sehingga diperlukan analisis keandalan untuk mengetahui karakteristik kegagalan, rata-rata umur operasi, serta dasar penentuan interval perawatan pencegahan yang lebih tepat. Jumlah kejadian *unscheduled removal* selama periode penelitian disajikan pada Tabel IV.1.

Tabel IV.1 Jumlah fault pada *Fuel Metering Unit* periode 2023–2025

No	Tahun	Jumlah Kegagalan	Persentase (%)
1	2023	22	40,00
2	2024	22	40,00
3	2025	11	20,00
	Total	55	100,00

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Berdasarkan Tabel IV.1, terdapat 55 *fault* yang terjadi pada FMU P/N 702-03 selama periode 2023 sampai 2025, dengan seluruh *fault* memiliki *source* berupa FMU *unserviceable*. Jumlah kejadian pada tahun 2023 dan 2024 masing-masing sebanyak 22 kejadian, sedangkan pada tahun 2025 tercatat 11 kejadian. Perbedaan jumlah pada tahun 2025 dipengaruhi oleh periode pengambilan data yang belum mencakup satu tahun penuh, sehingga tidak dapat diinterpretasikan secara langsung sebagai penurunan frekuensi kegagalan.

Dalam analisis keandalan, umur operasi komponen pada saat mengalami kegagalan merupakan data yang sangat penting karena dapat digunakan untuk mengetahui pola kegagalan, tingkat keandalan, serta kecenderungan laju kegagalan komponen. Oleh karena itu, data *unscheduled removal* selanjutnya diolah menjadi data *Time to Failure*. Satuan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *flight hours* karena menunjukkan lamanya komponen bekerja selama pesawat beroperasi, sehingga lebih sesuai digunakan dalam analisis keandalan komponen pesawat. Ringkasan data TTF disajikan pada Tabel IV.2.

Berdasarkan Tabel IV.2, jumlah data kegagalan yang digunakan dalam penelitian ini

Tabel IV.2 Ringkasan data *Time to failure Fuel Metering Unit*

No	TSI	Tanggal	A/C Reg	Part Number	Serial Number
1	1.098	8 Mar 2023	PK-GHC	FMU702-03	FAC14-318
2	1.278	22 Jul 2023	PK-GPO	FMU702-03	FAC14-356
3	1.879	4 Mar 2025	PK-GPF	FMU702-03	FAC14-263
4	2.189	3 Jul 2024	PK-GPW	FMU702-03	FAC14-233
5	2.345	24 Nov 2023	PK-GHC	FMU702-03	FAC14-294
6	2.487	18 May 2023	PK-GHD	FMU702-03	FAC14-398
7	2.987	1 Mar 2023	PK-GPO	FMU702-03	FAC14-193
8	3.006	19 Jun 2024	PK-GPL	FMU702-03	FAC14-296
9	3.245	3 Apr 2024	PK-GPC	FMU702-03	FAC14-207
10	3.345	15 Jul 2023	PK-GPF	FMU702-03	FAC14-309
11	3.568	1 May 2023	PK-GPX	FMU702-03	FAC14-289
12	3.678	17 Oct 2025	PK-GPC	FMU702-03	FAC14-389
13	3.765	4 Jan 2024	PK-GPF	FMU702-03	FAC14-240
14	3.876	16 Nov 2023	PK-GPT	FMU702-03	FAC14-219
15	3.990	25 Apr 2024	PK-GPM	FMU702-03	FAC14-224
16	4.000	6 May 2023	PK-GPC	FMU702-03	FAC14-341
17	4.098	11 Jul 2025	PK-GPO	FMU702-03	FAC14-371
18	4.186	2 Nov 2023	PK-GPX	FMU702-03	FAC14-275
19	4.342	16 Nov 2024	PK-GHC	FMU702-03	FAC14-278
20	4.498	23 Jan 2024	PK-GPW	FMU702-03	FAC14-258
21	4.654	1 Apr 2023	PK-GPM	FMU702-03	FAC14-374
22	4.811	15 Dec 2024	PK-GPT	FMU702-03	FAC14-395
23	4.967	17 May 2024	PK-GPT	FMU702-03	FAC14-269
24	5.308	16 Sep 2024	PK-GPV	FMU702-03	FAC14-251
25	5.456	21 Sep 2023	PK-GPZ	FMU702-03	FAC14-327
26	5.560	9 Apr 2024	PK-GHD	FMU702-03	FAC14-336
27	5.570	26 Aug 2025	PK-GPW	FMU702-03	FAC14-352
28	5.849	13 Jan 2024	PK-GPU	FMU702-03	FAC14-311
29	6.000	13 Sep 2024	PK-GPU	FMU702-03	FAC14-387
30	6.020	19 Jul 2023	PK-GPW	FMU702-03	FAC14-231
31	6.131	20 Aug 2025	PK-GPX	FMU702-03	FAC14-299
32	6.240	2 Jan 2023	PK-GPV	FMU702-03	FAC14-247
33	6.291	18 Dec 2025	PK-GPT	FMU702-03	FAC14-266
34	6.510	18 Nov 2023	PK-GPW	FMU702-03	FAC14-382

No	TSI	Tanggal	A/C Reg	Part Number	Serial Number
35	6.871	18 Apr 2024	PK-GPV	FMU702-03	FAC14-355
36	7.032	13 Nov 2023	PK-GPM	FMU702-03	FAC14-349
37	7.194	25 Jul 2025	PK-GPU	FMU702-03	FAC14-245
38	7.356	19 Mar 2025	PK-GPL	FMU702-03	FAC14-287
39	7.518	12 Nov 2024	PK-GPX	FMU702-03	FAC14-304
40	7.681	7 Jun 2024	PK-GPF	FMU702-03	FAC14-321
41	7.845	15 Mar 2023	PK-GPT	FMU702-03	FAC14-205
42	8.009	3 Sep 2025	PK-GPM	FMU702-03	FAC14-221
43	8.074	16 May 2023	PK-GPU	FMU702-03	FAC14-212
44	9.339	14 Aug 2023	PK-GHA	FMU702-03	FAC14-198
45	10.512	10 Mar 2025	PK-GHD	FMU702-03	FAC14-333
46	11.071	20 Nov 2024	PK-GPM	FMU702-03	FAC14-360
47	11.338	4 May 2024	PK-GHA	FMU702-03	FAC14-379
48	12.005	18 Feb 2024	PK-GPO	FMU702-03	FAC14-392
49	13.017	15 Apr 2023	PK-GPL	FMU702-03	FAC14-226
50	13.341	4 Aug 2025	PK-GPV	FMU702-03	FAC14-316
51	13.909	7 Dec 2024	PK-GPZ	FMU702-03	FAC14-214
52	14.318	16 Apr 2024	PK-GPX	FMU702-03	FAC14-281
53	14.517	25 Jun 2024	PK-GPO	FMU702-03	FAC14-368
54	14.965	29 May 2023	PK-GPV	FMU702-03	FAC14-264
55	15.014	28 Nov 2023	PK-GPL	FMU702-03	FAC14-364

(Sumber: pengolahan data penulis)

adalah 55 data. Nilai TTF terendah sebesar 1.098 FH menunjukkan terdapat komponen FMU yang mengalami kegagalan pada umur operasi yang relatif rendah, sedangkan nilai TTF tertinggi sebesar 15.014 FH menunjukkan terdapat komponen yang mampu bertahan dalam waktu operasi cukup panjang sebelum mengalami kegagalan. Data lengkap mengenai *unscheduled removal* dan *Time to Failure* FMU dapat dilihat pada Lampiran F.

Rentang nilai TTF yang cukup lebar menunjukkan bahwa umur kegagalan FMU bervariasi antar unit. Variasi ini dapat terjadi karena setiap komponen tidak selalu bekerja pada kondisi yang sama, dipengaruhi oleh tingkat utilisasi pesawat, kondisi lingkungan operasi, serta beban getaran dan temperatur yang diterima komponen selama beroperasi. Oleh sebab itu, analisis tidak cukup hanya menggunakan nilai rata-rata TTF, melainkan perlu menggunakan metode statistik keandalan yang mampu menggambarkan pola kegagalan komponen secara lebih representatif.

B. Menentukan dan Menghitung Nilai Parameter Distribusi Weibull

Penentuan parameter Distribusi Weibull dilakukan menggunakan data TTF yang telah diurutkan dari nilai terkecil hingga terbesar. Data tersebut kemudian diberi rank, *reverse rank*, *Adjusted Rank*, dan *Median Rank*. Tahapan ini diperlukan untuk memperoleh probabilitas kumulatif kegagalan yang selanjutnya ditransformasikan ke dalam bentuk regresi linier. Metode standar untuk sampel berukuran 2 sampai 100 data dengan nilai β yang tidak diketahui adalah Distribusi Weibull dua parameter menggunakan X on Y *Median Rank regression* (Abernethy, 2015). Pengolahan data dilakukan sesuai Persamaan (2.1) sampai Persamaan (2.8) pada Bab II, dengan langkah sebagai berikut.

1. Menentukan Nilai *Adjusted Rank*

Nilai *Adjusted Rank* digunakan untuk menentukan urutan kegagalan yang akan dipakai dalam perhitungan *Median Rank*. Berdasarkan hasil verifikasi terhadap Aircraft Flight *Maintenance Log*, *shop report*, dan *repair report*, seluruh 55 data yang digunakan merupakan kejadian *unscheduled removal* yang disertai indikasi *fault* serta memiliki nilai *Time Since Installation* yang lengkap. Tidak terdapat data *preventive removal*, *scheduled removal*, maupun data *suspended* dalam *dataset* yang diperoleh, sehingga seluruh data diperlakukan sebagai *complete failure data*.

Karena tidak terdapat data tersensor dalam *dataset*, nilai *Adjusted Rank* sama dengan urutan kegagalan biasa, yaitu dari 1 sampai 55 setelah data TTF diurutkan dari nilai terkecil hingga terbesar. Perhitungan *Adjusted Rank* tetap ditampilkan untuk menjaga konsistensi tahapan analisis Weibull. Perhitungan menggunakan Persamaan (2.1) dengan contoh pada data kegagalan pertama adalah sebagai berikut.

$$i = [(Reverse Rank \times Previous Adjusted Rank) + (N + 1)] / (Reverse Rank + 1)$$

$$i = [(55 \times 0) + (55 + 1)] / (55 + 1)$$

$$i = 56 / 56$$

$$i = 1$$

Nilai *previous adjusted rank* pada perhitungan pertama ditetapkan sebesar 0 karena Persamaan (2.1) merupakan persamaan rekursif yang memerlukan syarat awal, sedangkan sebelum kegagalan pertama belum terdapat unit yang mengalami kegagalan

sehingga posisi peringkat kumulatifnya bernilai nol. Ketentuan $RA_0 = 0$ ini merupakan ketentuan baku dalam *median rank regression* sebagaimana dirumuskan Abernethy (2015). Dengan syarat awal tersebut dan nilai *reverse rank* pertama sebesar N , perhitungan menghasilkan *adjusted rank* pertama sebesar 1, sehingga pada data tanpa sensor nilai *adjusted rank* kembali identik dengan urutan kegagalan biasa.. Dengan nilai *reverse rank* sebesar 55 dan jumlah sampel sebanyak 55 data, diperoleh nilai *Adjusted Rank* pertama sebesar 1. Selanjutnya nilai *Adjusted Rank* mengikuti urutan kegagalan dari 1 sampai 55. Hasil perhitungan selengkapnya disajikan pada

Lampiran J.

2. Menentukan Nilai *Median Rank*

Pada tahap pengolahan data TTF, nilai *Median Rank* dihitung menggunakan pendekatan Benard's *Median Rank*. Metode ini digunakan untuk memperkirakan peluang kegagalan kumulatif dari setiap data kegagalan berdasarkan urutan waktu kegagalan yang telah disusun dari nilai terkecil hingga terbesar. Dalam analisis Distribusi Weibull, *Median Rank* memiliki peran penting karena digunakan sebagai nilai estimasi probabilitas kegagalan kumulatif atau *unreliability* yang selanjutnya dipakai dalam proses perhitungan parameter β dan η . Perhitungan menggunakan Persamaan (2.2) dengan contoh pada data kegagalan pertama ($i = 1$, $n = 55$) adalah sebagai berikut.

Diketahui:

$i =$ nilai *Adjusted Rank*

$n =$ 55 jumlah seluruh data kegagalan

Konstanta 0,3 dan 0,4 bukan merupakan hasil perhitungan, melainkan ketentuan baku pada pendekatan *Benard's Approximation* untuk *Median Rank* (Abernethy, 2015).

$$BMR = (i - 0,3) / (n + 0,4)$$

$$BMR = (1 - 0,3) / (55 + 0,4)$$

$$BMR = 0,7 / 55,4$$

$$BMR = 0,01264$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, diperoleh nilai *Median Rank* pada data kegagalan pertama sebesar 0,012635379 atau sekitar 1,26 persen. Nilai ini menunjukkan bahwa pada urutan data TTF pertama, estimasi probabilitas kumulatif terjadinya kegagalan masih sangat kecil. Semakin besar nomor urut data kegagalan, semakin meningkat pula nilai *Median Rank*, sehingga menggambarkan bertambahnya peluang kegagalan kumulatif seiring bertambahnya waktu operasi komponen. Hasil perhitungan untuk urutan kegagalan selanjutnya disajikan pada Lampiran J.

3. Menentukan Nilai X dan Y

Setelah nilai *Median Rank* diperoleh, data kemudian ditransformasikan menjadi variabel X dan Y. Transformasi ini dilakukan karena Distribusi Weibull berbentuk nonlinier, sehingga perlu diubah ke bentuk linier agar dapat dianalisis menggunakan regresi linier. Nilai X diperoleh dari transformasi *Median Rank* sebagai estimasi probabilitas kumulatif kegagalan menggunakan Persamaan (2.3), sedangkan nilai Y diperoleh dari transformasi TTF menggunakan logaritma natural sesuai Persamaan (2.4).

Perhitungan pada data kegagalan pertama dengan TTF sebesar 1.098 FH dan *Median Rank* sebesar 0,012635379 adalah sebagai berikut.

Diketahui:

$\ln$ = Operator logaritma natural dengan
bilangan dasar e

n = 55 jumlah seluruh data kegagalan

Median rank = 0,01263

Failure time = Data kegagalan pertama (1.098)

$$X = \ln [\ln (1 / (1 - \text{Median Rank}))]$$

$$X = n [\ln (1 / (1 - 0,012635379))]$$

$$X = \ln [\ln (1,012797075)]$$

$$X = \ln (0,012715884)$$

$$X = -4,364903333$$

$$Y = \ln (\text{failure time})$$

$$Y = \ln (1.098)$$

$$Y = 7,001245622$$

Berdasarkan hasil tersebut, diperoleh nilai X sebesar $-4,364903333$ dan nilai Y sebesar $7,001245622$ pada data kegagalan pertama . Selanjutnya perhitungan yang sama dilakukan pada seluruh 55 data TTF untuk digunakan dalam analisis regresi linier Weibull. Hasil perhitungan nilai X dan Y untuk seluruh data disajikan pada Lampiran K.

4. Menentukan Nilai Regresi Linier

Nilai X dan Y yang telah diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai regresi linier. Perhitungan regresi linier bertujuan memperoleh nilai konstanta A menggunakan Persamaan (2.5) dan koefisien B menggunakan Persamaan (2.6), yang selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter Weibull. Hasil total perhitungan regresi linier dari 55 data ditunjukkan pada Tabel IV.3.

Diketahui :

ΣX_i = jumlah dari keseluruhan nilai X

ΣY_i = jumlah dari keseluruhan nilai Y

ΣX_i^2 = jumlah dari keseluruhan nilai X^2

$\Sigma X_i \cdot Y_i$ = jumlah dari keseluruhan nilai $X \cdot Y$

Nilai di atas terdapat di Lampiran K

Tabel IV.3 Total perhitungan regresi linier

ΣX_i	ΣY_i	ΣX_i^2	$\Sigma X_i \cdot Y_i$
-32,3942	474,6592	96,2457	-241,2469

(Sumber: Data Pribadi)

Untuk memperoleh nilai konstanta A dibutuhkan nilai rata-rata dari X dan Y sebagaimana disajikan pada Tabel IV.4. data tersebut diperoleh pada Lampiran K yang di mana

Dari jumlah 55 data yang ada maka nilai rata-rata $\bar{X}$ dan $\bar{Y}$ adalah sebagai berikut

Diketahui:

$\bar{X}$ = jumlah dari rata-rata keseluruhan nilai X

$\bar{Y}$ = jumlah dari rata-rata keseluruhan nilai Y

Nilai di atas terdapat di Lampiran K

Tabel IV.4 Nilai rata-rata X dan Y

Average $\bar{X}$	Average $\bar{Y}$
-0,5621	8,6301

(Sumber: Data Pribadi)

Berdasarkan dari lampiran K di dapat nilai perhitungan rata-rata X adalah -0,56216798 dan nilai rata-rata Y adalah 8,630167842 terdapat di tabel IV.4 di mana , Nilai koefisien B diperoleh menggunakan Persamaan (2.5) sebagai berikut.

$$A = \bar{Y} - B \cdot \bar{X}$$

$$A = 8,6301 - (0,4966 \times (-0,5621))$$

$$A = 8,9093$$

Nilai konstanta A diperoleh menggunakan Persamaan (2.6) sebagai berikut.

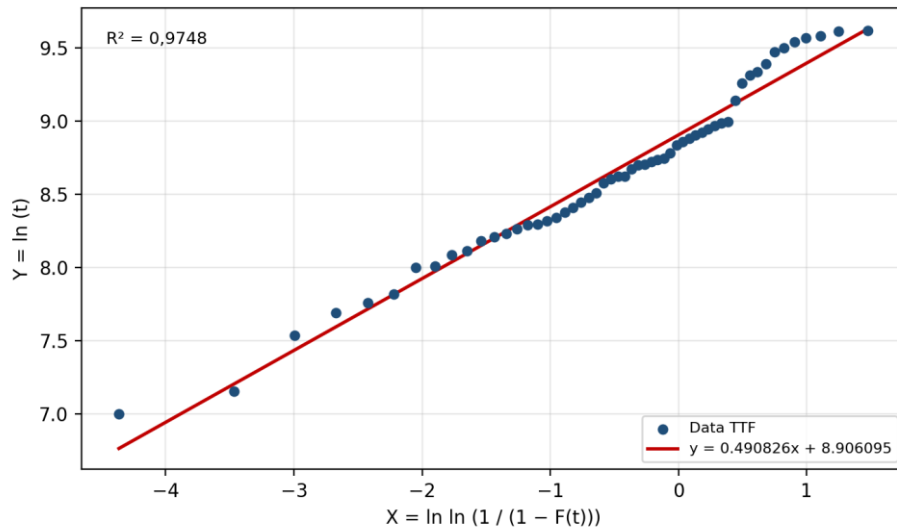
$$B = \frac{[\sum X_i Y_i - (\sum X_i \cdot \sum Y_i) / n]}{[\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2 / n]}$$

$$B = \frac{[-241,24696 - ((-32,39428893 \times 474,6592313) / 55)]}{[96,24579303 - ((-32,39428893)^2 / 55)]}$$

$$B = 38,32119059 / 77,16597566$$

$$B = 0,496607349$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai B sebesar 0,496607349 dan nilai A sebesar 8,909344592, sehingga fungsi regresi linier yang terbentuk adalah $Y = 8,909344592 + 0,496607349 X$. Kedua nilai tersebut menjadi dasar untuk menentukan *Shape parameter* dan *Scale parameter* Distribusi Weibull.



Gambar IV.1 Grafik regresi linier Weibull *Fuel Metering Unit*

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Gambar IV.1 menunjukkan hubungan antara variabel X dan Y pada data TTF *Fuel Metering Unit*. Titik-titik data yang mengikuti arah garis regresi menunjukkan bahwa Distribusi Weibull dapat digunakan untuk menggambarkan kecenderungan pola kegagalan FMU. Berdasarkan hasil regresi linier Weibull yang telah dilakukan, diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9748 dengan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,9873. Nilai tersebut menunjukkan bahwa data *Time to Failure* memiliki hubungan linier yang sangat kuat terhadap model Weibull, di mana sebesar 97,48 persen variasi data dapat dijelaskan oleh model regresi yang digunakan. Kondisi ini menunjukkan bahwa Distribusi Weibull dua parameter sangat sesuai untuk menggambarkan karakteristik kegagalan FMU P/N 702-03 , sehingga parameter β dan η yang diperoleh dapat digunakan untuk analisis keandalan selanjutnya.

5. Menentukan Nilai *Shape parameter* (β) dan *Scale parameter* (η)

Setelah nilai A dan B diperoleh, parameter Distribusi Weibull dapat dihitung. *Shape parameter* (β) diperoleh dari kebalikan nilai B menggunakan Persamaan (2.7) sebagai berikut.

Diketahui :

$$\beta = \text{Beta}$$

$$A = \text{konstanta regresi (0,4966)}$$

$$B = \text{Koefisien regres (8,9093)}$$

Nilai A dan B di dapat dari persamaan (2.7)

$$\beta = 1 / B$$

$$\beta = 1 / 0,49660$$

$$\beta = 2,01366$$

Sementara itu, *Scale parameter* (η) diperoleh dari eksponensial nilai A menggunakan Persamaan (2.8) sebagai berikut.

Diketahui :

$$e = \text{Bilangan Euler sebesar 2,718281828}$$

$$\beta = 2,013663315$$

$$A = \text{konstanta regresi (0,4966)}$$

$$\eta = e^A$$

$$\eta = (2,718281828)^{0,4966}$$

$$\eta = 7.400,80 \text{ FH}$$

6. Nilai fungsi Gamma

Nilai gamma di dapatkan dari perhitungan persamaan (2.9)

$$\Gamma = (1 + 1/\beta)$$

$$\Gamma = (1 + 1/2,01366)$$

$$\Gamma = 0,886121991$$

Tabel IV.5 Distribusi parameter Weibull *Fuel Metering Unit*

Parameter	Simbol	Hasil
Jumlah data kegagalan	n	55 data
<i>Shape parameter</i>	β	2,01366315
<i>Scale parameter</i>	η	7.400,808947 FH
Fungsi gamma	$\Gamma(1 + 1/\beta)$	0,886121991
Koefisien determinasi	R^2	0,9748

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Perhitungan lengkap mulai dari pengurutan data TTF, *Adjusted Rank*, *Median Rank*, transformasi X dan Y, regresi linier, hingga penentuan parameter β dan η dapat dilihat pada Lampiran J dan Lampiran K. Berdasarkan Tabel IV.5, nilai *Shape parameter* (β) adalah 2,013663. Nilai tersebut lebih besar dari satu, sehingga karakteristik kegagalan FMU berada pada fase *wear-out*, yaitu laju kegagalan komponen cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu operasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa kegagalan tidak bersifat konstan atau acak, melainkan dipengaruhi oleh proses degradasi dan keausan komponen selama digunakan.

Secara teknis, FMU terpasang pada *accessory gearbox* sehingga menerima beban getaran *engine* secara terus-menerus, sekaligus terpapar temperatur tinggi dan fluktuasi tekanan bahan bakar selama operasi. Kondisi tersebut menyebabkan degradasi material pelindung konektor, keausan pada bagian bergerak, penurunan kemampuan *sealing*, serta kelelahan material pada *housing*. Akumulasi kerusakan tersebut menurunkan performa komponen dan menyebabkan peluang kegagalan meningkat seiring bertambahnya jam operasi. Nilai β yang mendekati dua juga menunjukkan bahwa mekanisme kegagalan FMU didominasi oleh proses keausan bertahap akibat beban operasi berulang, bukan kegagalan yang bersifat acak maupun kegagalan akibat cacat produksi.

Nilai *Scale parameter* (η) sebesar 7.400,81 FH menunjukkan *characteristic life* komponen, yaitu umur operasi ketika sekitar 63,2 persen populasi komponen diperkirakan telah mengalami kegagalan. Karena nilai β lebih besar dari satu, maka nilai η akan lebih besar daripada nilai MTTF yang dihitung pada bagian berikutnya.

C. Menghitung dan Analisis *Mean Time to Failure* (MTTF)

Mean Time to Failure (MTTF) merupakan estimasi rata-rata waktu operasi komponen hingga mengalami kegagalan. Nilai MTTF dihitung menggunakan parameter Distribusi Weibull yang telah diperoleh, yaitu *Shape parameter* (β) dan *Scale parameter* (η). Perhitungan MTTF menggunakan Persamaan (2.10) adalah sebagai berikut.

Diketahui :

$$\eta = 7.400,808947$$

$$\beta = 2,013663315$$

$$\Gamma = 0,886121991$$

$$\text{MTTF} = \eta \times \Gamma (1 + 1/\beta)$$

$$\text{MTTF} = 7.400,808947 \times \Gamma (1 + 1/2,013663315)$$

$$\text{MTTF} = 7.400,808947 \times \Gamma (1,496607559)$$

$$\text{MTTF} = 7.400,808947 \times 0,886121991$$

$$\text{MTTF} = 6.558,02 \text{ FH}$$

$$\text{Pembulatan} = 6.558 \text{ FH}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai MTTF komponen *Fuel Metering Unit* adalah 6.558,02 FH. Nilai ini menjawab rumusan masalah pertama, yaitu rata-rata umur kegagalan komponen berdasarkan data historis terjadi pada kisaran 6.558,02 *flight hours*. Nilai MTTF tersebut lebih kecil dibandingkan nilai *Scale parameter* sebesar 7.400,81 FH, yang konsisten dengan teori bahwa pada Distribusi Weibull dengan β lebih besar dari satu, nilai MTTF akan selalu lebih kecil daripada *characteristic life*.

Namun demikian, nilai MTTF tidak sebaiknya langsung digunakan sebagai interval *preventive maintenance*, karena pada titik MTTF peluang kegagalan komponen sudah cukup besar. Oleh karena itu, nilai MTTF perlu dianalisis bersama *reliability*, CDF, dan *Failure Rate* sebagaimana dibahas pada subbab berikutnya.

D. Analisis *Reliability* dan *Cumulative Distribution Function*

Reliability $R(t)$ menunjukkan peluang komponen tetap dapat menjalankan fungsinya tanpa mengalami kegagalan sampai waktu operasi tertentu. Sebaliknya, *Cumulative*

Distribution Function $F(t)$ menunjukkan peluang komponen telah mengalami kegagalan sampai waktu operasi tersebut, dengan hubungan $F(t) = 1 - R(t)$.

Dengan menggunakan nilai t sebesar MTTF, yaitu 6.558,02 FH, nilai *reliability* dihitung menggunakan Persamaan (2.11) sebagai berikut.

Diketahui :

$$e = 2,718281828$$

$$t = 6.558,02$$

$$\eta = 7.400,808947$$

$$\beta = 2,013663315$$

$$^{\wedge} = \text{Pangkat}$$

$$R(t) = \text{Reliability}$$

$$F(t) = \text{CDF}$$

$$R(t) = e^{[-(t/\eta)^{\beta}]}$$

$$R(t) = 2,718281828^{[-(6.558,02 / 7.400,8089)^{2,0136}]}$$

$$R(t) = 2,718281828^{[-(0,8861)^{2,0136}]}$$

$$R(t) = 2,718281828^{(-0,7839)}$$

$$R(t) = 0,456614331 = 45,66\%$$

Setelah diperoleh nilai *reliability* sebesar 0,456614331 atau 45,66 persen, nilai CDF dihitung menggunakan Persamaan (2.11) sebagai berikut.

$$F(t) = 1 - e^{[-(t/\eta)^{\beta}]}$$

$$F(t) = 1 - 0,456614331$$

$$F(t) = 0,543385669 = 54,34\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada saat komponen mencapai MTTF sebesar 6.558,02 FH, nilai *reliability* adalah 45,66 persen sedangkan nilai CDF adalah 54,34 persen. Hal ini berarti pada umur operasi rata-rata kegagalan, sekitar 45,66 persen komponen diperkirakan masih mampu beroperasi dengan baik, sedangkan sekitar 54,34 persen komponen diperkirakan telah mengalami kegagalan. Temuan ini sekaligus menegaskan bahwa penggunaan MTTF sebagai interval perawatan secara

langsung tidak tepat, karena berarti membiarkan lebih dari separuh populasi komponen gagal terlebih dahulu sebelum dilakukan tindakan perawatan.

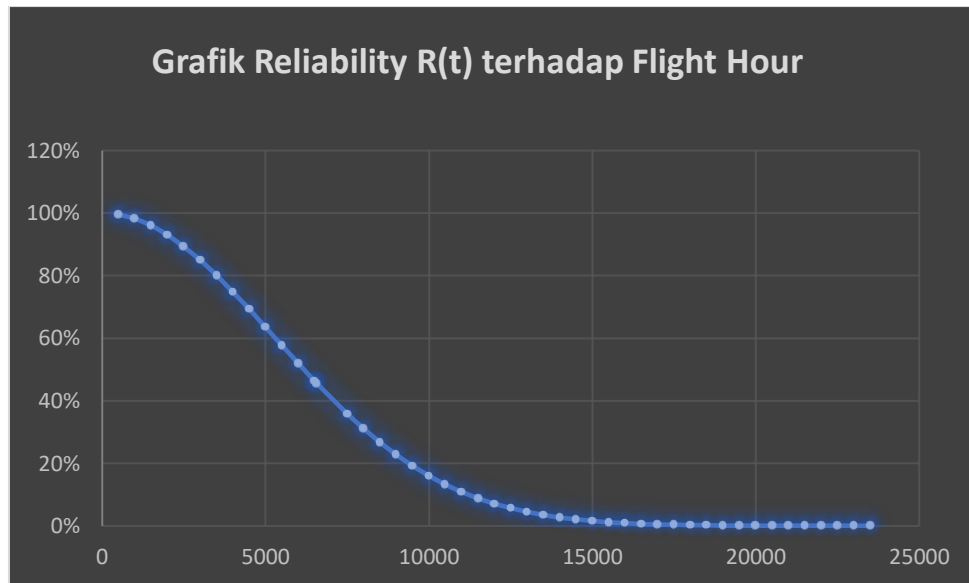
Nilai *reliability* dan CDF pada berbagai interval waktu operasi disajikan pada Tabel IV.6.

Tabel IV.6 Nilai *reliability* dan CDF *Fuel Metering Unit* per interval waktu

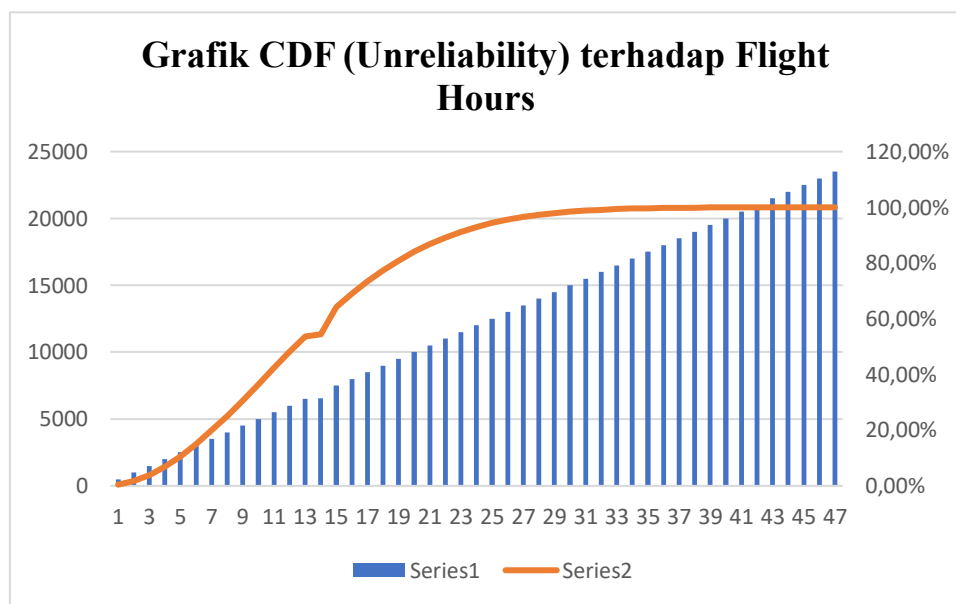
No	<i>Flight Hours</i> (FH)	<i>Reliability</i> R(t)	CDF F(t)
1	500	99,56%	0,44%
2	1.000	98,24%	1,76%
3	2.000	93,08%	6,92%
4	3.000	85,02%	14,98%
5	4.000	74,85%	25,15%
6	5.000	63,51%	36,49%
7	6.000	51,92%	48,08%
8	6.558,02	45,66%	54,34%
9	7.000	40,90%	59,10%
10	7.400,81	36,79%	63,21%
11	8.000	31,05%	68,95%
12	9.000	22,70%	77,30%
13	10.000	15,99%	84,01%
14	11.000	10,85%	89,15%
15	12.000	7,09%	92,91%
16	13.000	4,46%	95,54%
17	14.000	2,71%	97,29%
18	15.000	1,58%	98,42%

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Tabel di atas yang di beri warna adalah Nilai MTTF



Gambar IV.2 Grafik *reliability* Fuel Metering Unit
(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)



Gambar IV.3 Grafik CDF (*unreliability*) Fuel Metering Unit
(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Berdasarkan Tabel IV.6, Gambar IV.2, dan Gambar IV.3, kurva *reliability* mengalami penurunan seiring bertambahnya *flight hours* sedangkan kurva CDF mengalami peningkatan. Pada awal masa operasi, *reliability* berada mendekati 100 persen, kemudian menurun secara bertahap. Pada 4.000 FH nilai keandalan FMU masih sebesar 74,85 persen, kemudian menurun menjadi 51,92 persen pada 6.000 FH, dan hanya tersisa 15,99 persen pada 10.000 FH. Penurunan yang paling tajam terjadi pada rentang 4.000 sampai 10.000 FH,

di mana probabilitas kegagalan kumulatif meningkat dari 25,15 persen menjadi 84,01 persen. Rentang tersebut selanjutnya disebut sebagai rentang kritis operasi FMU. Perhitungan *reliability* dan CDF pada variasi *flight hours* yang lebih rinci dapat dilihat pada Lampiran

E. Analisis *Failure Rate*

Failure Rate atau laju kegagalan menunjukkan besarnya peluang suatu komponen mengalami kegagalan pada waktu operasi tertentu, dengan syarat komponen tersebut masih mampu bertahan hingga waktu tersebut. Pada Distribusi Weibull, pola *Failure Rate* sangat dipengaruhi oleh nilai *Shape parameter*. Karena nilai β lebih besar dari satu, maka *Failure Rate* meningkat seiring bertambahnya waktu operasi. Perhitungan *Failure Rate*

pada saat t sama dengan MTTF menggunakan Persamaan (2.12) adalah sebagai berikut.

Diketahui :

$$t = 6.558,02$$

$$\eta = 7.400,808947$$

$$\beta = 2,013663315$$

$$\wedge = \text{Pangkat}$$

$$\lambda(t) = \text{Failure rate}$$

$$\lambda(t) = (\beta/\eta) \times (t/\eta)^{(\beta-1)}$$

$$\lambda(t) = (2,013663315 / 7.400,808947) \times (6.558,02 / 7.400,808947)^{(2,013663315-1)}$$

$$\lambda(t) = 0,000272087 \times (0,886121991)^{1,013663315}$$

$$\lambda(t) = 0,000272087 \times 0,884659411$$

$$\lambda(t) = 0,000240704 \text{ kegagalan FH} = 0,0241\% \text{ per FH}$$

Tabel IV.7 Nilai *Failure Rate Fuel Metering Unit* per interval waktu

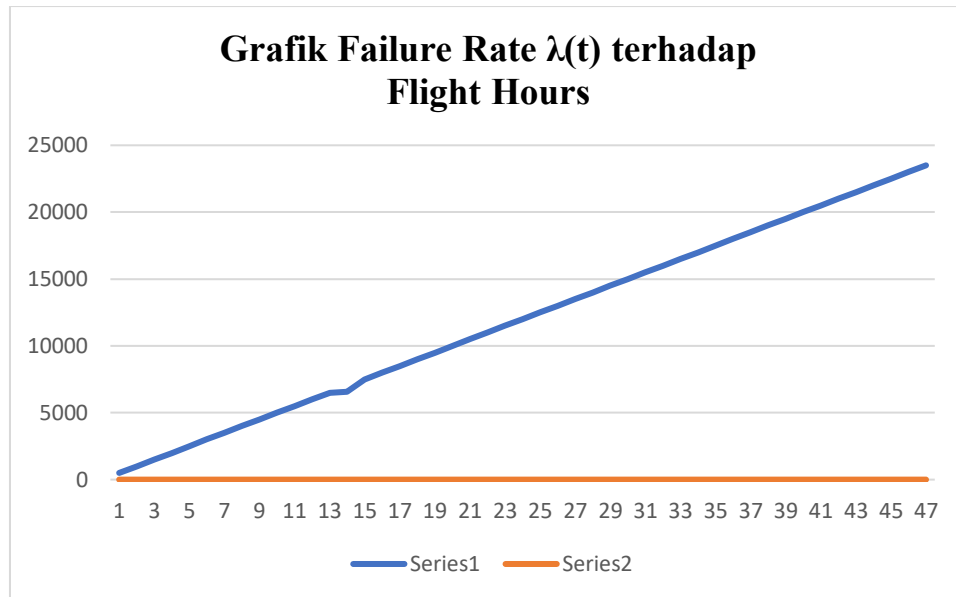
No	<i>Flight Hours</i> (FH)	<i>Failure Rate</i> $\lambda(t)$	Persen per FH
1	500	0,000018	0,0018%
2	1.000	0,000036	0,0036%
3	2.000	0,000072	0,0072%
4	3.000	0,000109	0,0109%

No	Flight Hours (FH)	Failure Rate $\lambda(t)$	Persen per FH
5	4.000	0,000146	0,0146%
6	5.000	0,000183	0,0183%
7	6.000	0,000220	0,0220%
8	6.558,02	0,000241	0,0241%
9	8.000	0,000294	0,0294%
10	10.000	0,000369	0,0369%
11	12.000	0,000444	0,0444%
12	15.000	0,000557	0,0557%

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Berdasarkan Tabel IV.7, nilai *Failure Rate* pada saat MTTF, yaitu 6.558,02 FH, adalah 0,000241 kegagalan per flight hour atau setara 0,0241 persen per FH. Secara numerik nilai tersebut terlihat kecil, namun yang lebih penting untuk dicermati bukanlah besaran mutlaknyanya, melainkan pola peningkatannya sepanjang waktu operasi. Karena nilai shape parameter (β) lebih besar dari satu, *Failure Rate* tidak bersifat konstan sebagaimana pada distribusi eksponensial, melainkan meningkat secara monoton seiring bertambahnya *flight hours*.

Peningkatan tersebut terlihat jelas dari data pada Tabel IV.7. Pada 500 FH nilai *Failure Rate* hanya 0,000018 kegagalan per FH, kemudian meningkat menjadi 0,000183 pada 5.000 FH, dan mencapai 0,000557 pada 15.000 FH. Dengan demikian, dalam rentang 500 FH sampai 15.000 FH terjadi peningkatan laju kegagalan sekitar 31 kali lipat. Pola peningkatan ini bersifat hampir linier terhadap waktu operasi, karena dengan β sebesar 2,013663 maka $\lambda(t)$ sebanding dengan t pangkat ($\beta - 1$), yaitu t pangkat 1,013663, yang secara praktis mendekati pangkat satu. Konsekuensinya, setiap penggandaan waktu operasi akan menggandakan pula laju kegagalan komponen. Hal ini dapat diverifikasi pada Tabel IV.7, yaitu dari 500 FH ke 1.000 FH nilai *Failure Rate* meningkat dari 0,000018 menjadi 0,000036, dan dari 5.000 FH ke 10.000 FH meningkat dari 0,000183 menjadi 0,000369, keduanya menunjukkan kelipatan sekitar dua kali.



Gambar IV.4 Grafik *Failure Rate Fuel Metering Unit*
(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Berdasarkan Tabel IV.7, *Failure Rate* pada saat MTTF adalah 0,000241 kegagalan per flight hour atau sekitar 0,0241 persen per FH. Secara numerik nilai tersebut terlihat kecil, namun hal yang lebih penting adalah pola peningkatannya. Karena β lebih besar dari satu, *Failure Rate* tidak bersifat konstan melainkan meningkat secara monoton, yaitu dari 0,000018 kegagalan per FH pada 500 FH menjadi 0,000557 kegagalan per FH pada 15.000 FH, atau meningkat sekitar 31 kali lipat.

Gambar IV.4 menunjukkan bahwa kurva *Failure Rate* mengalami peningkatan bertahap terhadap *flight hours*. Pola *increasing Failure Rate* ini konsisten dengan nilai β lebih besar dari satu yang mengindikasikan komponen berada pada fase *wear-out*. Implikasi teknis dari kondisi ini adalah strategi perawatan yang hanya menunggu komponen gagal menjadi kurang ideal, karena peluang terjadinya *unscheduled removal* akan semakin tinggi pada umur operasi yang lebih lanjut. Sebaliknya, penerapan *preventive maintenance* berbasis interval terbukti efektif untuk komponen dengan karakteristik seperti ini.

F. Perbandingan Kegagalan *Fuel Metering Unit* terhadap Nilai MTTF

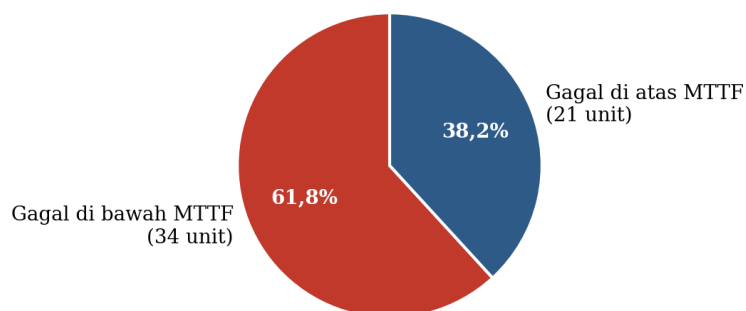
Setelah nilai MTTF diketahui sebesar 6.558,02 FH, selanjutnya dilakukan perbandingan terhadap seluruh kejadian kegagalan FMU yang tercatat selama periode 2023 sampai 2025. Perbandingan ini bertujuan mengetahui berapa banyak komponen yang mengalami

kegagalan sebelum mencapai umur rata-rata yang diperkirakan. Rekapitulasi hasil perbandingan disajikan pada Tabel IV.9.

Tabel IV.8 Rekapitulasi kegagalan FMU terhadap nilai MTTF

No	Status terhadap MTTF	Jumlah Unit	Persentase (%)
1	Gagal di bawah nilai MTTF ($< 6.558,02$ FH)	34	61,8
2	Gagal di atas nilai MTTF ($\geq 6.558,02$ FH)	21	38,2
	Total	55	100,0

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)



Gambar IV.5 Persentase kegagalan FMU terhadap nilai MTTF

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Berdasarkan Tabel IV.8 dan Gambar IV.5, sebanyak 34 unit atau 61,8 persen FMU mengalami kegagalan sebelum mencapai nilai MTTF, sedangkan 21 unit atau 38,2 persen lainnya mengalami kegagalan setelah melewati nilai MTTF. Tingginya persentase kegagalan di bawah nilai MTTF menunjukkan bahwa sebagian besar FMU tidak mencapai umur rata-rata yang seharusnya.

Temuan ini menjadi dasar bagi tahap analisis berikutnya. Kegagalan yang terjadi lebih cepat daripada umur rata-rata mengindikasikan adanya penyebab yang bersifat dapat dicegah, sehingga perlu dilakukan identifikasi lebih lanjut terhadap modus

kegagalan pada kelompok komponen tersebut menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis*.

G. Analisis *B-Life* dan Prediksi Umur Pakai

B-Life merupakan indikator umur operasi ketika sejumlah persentase tertentu dari populasi komponen diperkirakan telah mengalami kegagalan. Sebagai contoh, B10 menunjukkan umur ketika 10 persen populasi komponen diperkirakan telah gagal sehingga *reliability* yang tersisa adalah 90 persen. Dalam analisis keandalan, *B-Life* berguna sebagai dasar penentuan interval perawatan yang lebih konservatif dibandingkan MTTF.

Perhitungan *B-Life* menggunakan Persamaan (2.14) dengan contoh pada target keandalan 90 persen adalah sebagai berikut.

Diketahui :

$$\eta = 7.400,808947$$

$$\beta = 2,013663315$$

$$\Gamma = 0,886121991$$

$$R(t) = 0,60$$

$$^{\wedge} = \text{Pangkat}$$

$$B_p = \eta \times [-\ln R(t)]^{(1/\beta)}$$

$$B_{40} = 7.400,808947 \times [-\ln (0,60)]^{(1/2,013663315)}$$

$$B_{40} = 7.400,808947 \times (0,510825624)^{0,496607349}$$

$$B_{40} = 7.400,808947 \times 0,716351$$

$$B_{40} = 5.301,58 \text{ FH}$$

Perhitungan yang sama dilakukan pada beberapa tingkat keandalan lainnya. Hasil perhitungan *B-Life* komponen FMU disajikan pada Tabel IV.9.

Tabel IV.9 Hasil perhitungan *B-Life Fuel Metering Unit*

<i>B-Life</i>	Peluang Gagal	<i>Reliability</i> Tersisa	Umur Operasi (FH)
B5	5%	95%	1.693,11
B10	10%	90%	2.420,66
B15	15%	85%	3.001,98
B20	20%	80%	3.513,84
B30	30%	70%	4.435,42
B40	40%	60%	5.301,58
B50	50%	50%	6.669,24
B60	60%	40%	7.086,38
B70	70%	30%	8.115,48
B80	80%	20%	9.373,79
B90	90%	10%	11.198,46

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Berdasarkan Tabel IV.9, nilai B10 adalah 2.420,66 FH, B20 adalah 3.513,84 FH, B30 adalah 4.435,42 FH, B40 adalah 5.301,58 FH, dan B50 adalah 6.669,24 FH. Apabila dibandingkan dengan nilai MTTF sebesar 6.558,02 FH, terlihat bahwa MTTF berada di antara B50 dan B60, yaitu pada titik ketika lebih dari separuh populasi komponen diperkirakan telah gagal. Hal ini menegaskan bahwa penggunaan MTTF sebagai dasar interval penggantian secara langsung kurang konservatif, karena pada titik tersebut *reliability* komponen hanya tersisa 45,66 persen.

Oleh karena itu, prediksi umur pakai optimal dalam penelitian ini diarahkan pada nilai B40 *Life* sebesar 5.301,58 FH, atau dibulatkan ke bawah menjadi 5.300 FH, sebagai acuan awal *preventive maintenance*. Pemilihan indeks B40, dan bukan indeks yang lebih konservatif seperti B10 atau B20, didasarkan pada tiga pertimbangan berikut.

Pertama, Abernethy (2015) menyatakan bahwa pemilihan indeks *Life* ditetapkan berdasarkan tingkat kegagalan yang dapat diterima, dengan konsekuensi bahwa semakin kecil indeks yang dipilih semakin konservatif interval yang dihasilkan. Indeks B10 menghasilkan interval 2.420,66 FH, yaitu sekitar 54 persen lebih pendek dibandingkan B40, sehingga frekuensi inspeksi menjadi lebih dari dua kali lipat sepanjang umur operasi komponen. Beban inspeksi tersebut dinilai belum sebanding dengan sebaran kegagalan aktual, mengingat data kegagalan FMU pada penelitian ini terdistribusi kontinu hingga

jauh di atas 5.000 FH dan sebanyak 21 unit atau 38,2 persen justru bertahan melewati nilai MTTF.

Kedua, Fidanoglu, Ungor, Ozkol, dan Komurgoz (2017) pada penelitian penerapan Distribusi Weibull untuk estimasi umur komponen pesawat di sektor penerbangan sipil menegaskan bahwa penyusunan *task card* dan interval perawatan pada program berbasis MSG-3 harus ditetapkan berdasarkan tingkat keandalan komponen yang ditargetkan, dan bukan berdasarkan indeks yang berlaku umum. Pada penelitian tersebut, target keandalan ditetapkan terlebih dahulu sebagai masukan analisis, kemudian umur operasi yang bersesuaian dibaca dari fungsi distribusi kumulatif Weibull. Prosedur yang sama diterapkan pada penelitian ini, yaitu dengan menetapkan target keandalan minimum 60 persen sehingga diperoleh umur operasi B40 *Life* sebesar 5.301,58 FH.

Ketiga, pertimbangan empiris terhadap data penelitian. Keandalan FMU pada 5.300 FH masih sebesar 60,02 persen, sedangkan pada saat mencapai MTTF hanya tersisa 45,66 persen, sehingga interval usulan tetap menempatkan tindakan perawatan sebelum lebih dari separuh populasi komponen diperkirakan gagal. Interval berbasis B40 *Life* berada pada paruh awal rentang kritis 4.000 sampai 10.000 FH yang telah diidentifikasi melalui analisis CDF dan *B-Life*. Konsekuensi dari interval yang lebih panjang ini dikompensasi melalui pemeriksaan antara berupa functional check pada 3.500 FH (B20 *Life*) yang ditetapkan tepat sebelum rentang kritis dimulai, sehingga penurunan kondisi komponen tetap dapat terdeteksi lebih awal. Pendekatan perencanaan perawatan yang berpijak pada nilai keandalan komponen seperti ini sejalan dengan Setiawan, Sofyan, dan Putra (2020) yang menggunakan analisis *reliability* sebagai dasar perencanaan aktivitas *maintenance* komponen pesawat di PT GMF AeroAsia.

H. Analisis Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Hasil analisis distribusi Weibull menunjukkan bahwa 34 unit FMU (61,8%) mengalami kegagalan sebelum mencapai nilai MTTF dengan empat modus kegagalan sebagaimana telah diidentifikasi pada Tabel IV.1. Untuk mengetahui tingkat risiko dari setiap modus kegagalan tersebut, dilakukan Analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). FMEA merupakan teknik yang digunakan untuk menetapkan, mengidentifikasi, dan menghilangkan kegagalan potensial pada sebuah sistem, desain, maupun proses sebelum kegagalan tersebut berdampak pada pengguna, sedangkan *Risk Priority Number* (RPN) merupakan metode untuk menentukan prioritas penanganan dari kegagalan tersebut.

Penentuan tingkat risiko pada metode FMEA dilakukan melalui tiga parameter penilaian, yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). *Severity* merupakan penilaian terhadap keseriusan efek yang ditimbulkan oleh suatu kegagalan, di mana skala 10 menunjukkan kegagalan dengan efek sangat berbahaya dan skala 1 menunjukkan kegagalan yang tidak menimbulkan efek sama sekali. *Occurrence* menunjukkan seberapa sering penyebab kesalahan dari suatu kegagalan terjadi dan dinilai pada skala 1 sampai 10. *Detection* merupakan penilaian terhadap kemampuan sistem atau prosedur perawatan yang ada dalam mendeteksi penyebab masalah atau *failure mode*, di mana skala 10 berarti tidak terdapat mekanisme untuk mendeteksi kegagalan dan skala 1 berarti mekanisme deteksi hampir pasti menemukan kegagalan tersebut.

Penentuan Nilai *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*

Nilai S, O, dan D diperoleh melalui kuesioner yang diisi oleh empat narasumber *Aircraft Maintenance Engineer* (AME) pesawat Airbus A330 di PT GMF AeroAsia (Lampiran M dan Lampiran N). Nilai akhir tiap parameter merupakan pembulatan dari rata-rata penilaian keempat narasumber, sebagaimana disajikan pada Tabel IV.10.

Tabel IV.10 Rekapitulasi penilaian *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*

Potential Failure Mode	Responden	S	O	D
<i>Electrical connector protective broken</i>	Responden 1	7	6	4
	Responden 2	8	5	3
	Responden 3	6	7	5
	Responden 4	7	6	4
	Rata-rata	7	6	4
<i>Heatshield scratches</i>	Responden 1	4	4	3
	Responden 2	3	5	3
	Responden 3	5	3	4
	Responden 4	4	4	2
	Rata-rata	4	4	3
<i>Housing Adjuster Crack</i>	Responden 1	7	3	5
	Responden 2	6	2	4

Potential Failure Mode	Responden	S	O	D
	Responden 3	8	4	6
	Responden 4	7	3	5
	Rata-rata	7	3	5
<i>HP fuel inlet broken</i>	Responden 1	8	2	4
	Responden 2	7	1	3
	Responden 3	9	3	5
	Responden 4	8	2	4
	Rata-rata	8	2	4

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Berdasarkan Tabel IV.10, nilai *Severity* tertinggi diberikan pada modus kegagalan *HP fuel inlet broken* ($S = 8$) karena kegagalan tersebut menimbulkan kebocoran bahan bakar bertekanan tinggi pada area *engine* yang berpotensi menjadi *fire hazard*. Nilai *Occurrence* tertinggi diberikan pada *electrical connector protective broken* ($O = 6$), sesuai dengan frekuensi kejadiannya yang mencapai 20 unit atau 58,8% dari seluruh kegagalan di bawah MTTF. Sementara itu nilai *Detection* tertinggi terdapat pada *Housing Adjuster crack* ($D = 5$), karena keretakan awal pada *housing* berukuran sangat kecil dan umumnya baru dapat teridentifikasi melalui pemeriksaan di *shop* menggunakan metode Non-Destructive Test (NDT), bukan melalui pemeriksaan visual pada *line maintenance*.

1. Perhitungan Risk Priority Number (RPN)

Setelah nilai S, O, dan D diketahui, tahap selanjutnya adalah menghitung nilai RPN menggunakan Persamaan (2.14), yaitu perkalian antara ketiga parameter tersebut. Contoh perhitungan pada modus kegagalan *electrical connector protective broken* adalah sebagai berikut.

$$RPN = S \times O \times D$$

$$RPN = 7 \times 6 \times 4$$

$$RPN = 168$$

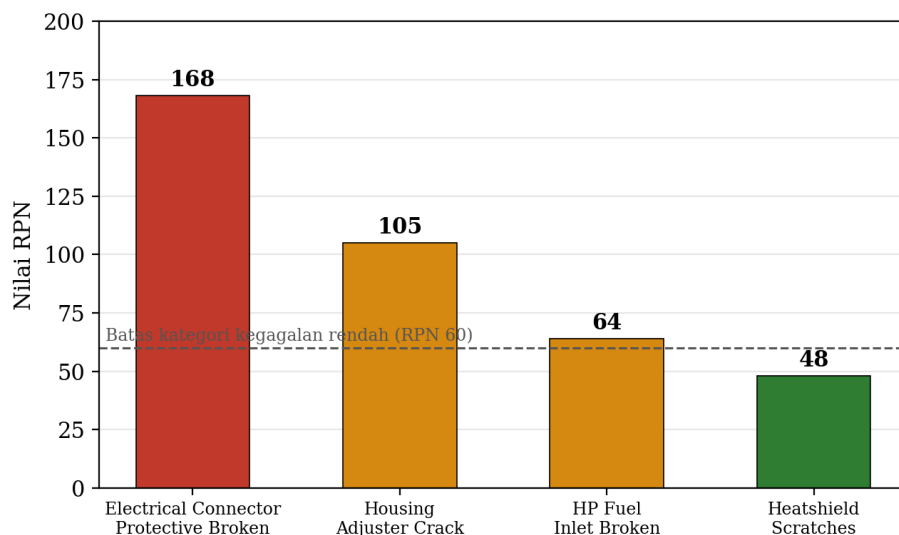
Nilai RPN berkisar antara 1 (terbaik mutlak) hingga 1.000 (terburuk mutlak) dengan pengelompokan tingkat kegagalan sebagaimana disajikan pada Tabel II.1.

Hasil perhitungan nilai RPN untuk seluruh modus kegagalan FMU beserta urutan prioritas penanganannya disajikan pada Tabel IV.11.

Tabel IV.11 Risk Priority Number modus kegagalan Fuel Metering Unit

No	Mode Kegagalan	S	O	D	RPN	Kategori	Prioritas
1	<i>Electrical connector protective broken</i>	7	6	4	168	Sedang	I
2	<i>Housing Adjuster Crack</i>	7	3	5	105	Sedang	II
3	<i>HP fuel inlet broken</i>	8	2	4	64	Sedang	III
4	<i>Heatshield scratches</i>	4	4	3	48	Rendah	IV

(Sumber: Pengolahan data pribadi)



Gambar IV.7 Nilai Risk Priority Number tiap modus kegagalan FMU

(Sumber: Data Pribadi)

Dari Tabel IV.11 dan Gambar IV.7 diketahui bahwa nilai RPN tertinggi sebesar 168 terdapat pada modus kegagalan *electrical connector protective broken*, yang termasuk dalam kategori tingkat kegagalan sedang (rentang 61–200). Modus kegagalan ini sekaligus merupakan penyebab dominan kegagalan dini FMU sebagaimana ditunjukkan pada rekapitulasi kegagalan di bawah nilai MTTF, sehingga menjadi prioritas pertama dalam penanganan. Prioritas kedua adalah *Housing Adjuster crack* dengan RPN 105, diikuti *HP fuel inlet broken* dengan RPN 64, sedangkan *Heatshield scratches* memiliki RPN terendah sebesar 48 dan tergolong tingkat kegagalan rendah.

Perlu diperhatikan bahwa *HP fuel inlet broken* memiliki nilai *Severity* tertinggi ($S = 8$) namun nilai RPN-nya relatif rendah karena frekuensi kejadiannya kecil ($O = 2$). Hal ini menunjukkan bahwa nilai RPN tidak dapat dijadikan satu-satunya dasar pengambilan keputusan, karena modus kegagalan dengan *Severity* tinggi tetap harus mendapatkan perhatian khusus meskipun jarang terjadi, mengingat dampaknya berkaitan langsung dengan aspek keselamatan penerbangan.

Kerusakan pada *protective cover electrical connector* kemungkinan besar tidak semata-mata disebabkan oleh keausan material, melainkan diawali oleh getaran *engine* yang bekerja secara terus-menerus pada area *accessory gearbox* tempat FMU terpasang. Getaran tersebut menyebabkan pelindung konektor mengalami *micro-movement* terhadap dudukannya sehingga timbul keretakan awal, yang kemudian diperparah oleh beban mekanis pada saat pelepasan dan pemasangan *harness* ketika dilakukan pekerjaan perawatan di sekitar *engine*. Apabila pelindung telah patah, fungsi *sealing* konektor akan hilang sehingga terminal terpapar kelembaban dan debris; kondisi ini menyebabkan sinyal perintah dari EEC menuju *torque motor* FMU menjadi intermittent, sehingga *fuel flow* yang dialirkan tidak sesuai dengan permintaan dan menimbulkan *fault message* serta *unscheduled removal*.

Tindakan *preventif* yang dapat dilakukan adalah menambahkan pemeriksaan kondisi konektor dan *protective cover* FMU ke dalam *task card* inspeksi terjadwal, memastikan pemasangan *backshell* sesuai nilai *torque* yang disyaratkan AMM, serta memasang *protective cap* sementara pada saat *harness* dilepas selama pelaksanaan *maintenance*. Apabila kerusakan telah terjadi, tindakan korektif yang direkomendasikan adalah penggantian *protective cover* beserta pemeriksaan kondisi terminal konektor terhadap indikasi korosi sebelum FMU dinyatakan *serviceable* kembali.

2. FMEA pada Kegagalan *Fuel Metering Unit*

Berdasarkan nilai S , O , dan D yang telah ditetapkan, disusun kegagalan menggunakan FMEA yang memuat sub komponen, mode kegagalan potensial, potensi penyebab kegagalan, potensi dampak kegagalan, nilai RPN, serta tindakan yang direkomendasikan untuk menangani kegagalan tersebut. Hasil penyusunan FMEA FMU P/N 702-03 periode 2023–2025 disajikan pada Tabel IV.12.

Tabel IV.12 FMEA worksheet kegagalan pada Fuel Metering Unit

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	S	O	D	RPN	Tindakan yang Direkomendasikan
Electrical Connector (interface FMU–EEC)	Protective cover konektor patah (<i>electrical connector protective broken</i>)	1. Getaran <i>engine</i> yang bekerja terus-menerus pada area <i>accessory gearbox</i> sehingga timbul <i>micro-movement</i> pada pelindung konektor. 2. Beban mekanis berlebih pada saat pelepasan dan pemasangan <i>harness</i> (<i>handling error</i>). 3. Degradasi material pelindung akibat <i>thermal cycling</i> sehingga material menjadi getas.	1. Fungsi <i>sealing</i> konektor hilang sehingga terminal terpapar kelembaban dan debris. 2. Sinyal perintah EEC menuju <i>torque motor</i> FMU menjadi <i>intermittent</i> sehingga <i>fuel flow</i> tidak sesuai <i>command</i>. 3. Timbul <i>fault message</i> pada ECAM dan <i>engine rollback</i> yang berujung pada <i>unscheduled removal</i>.	7	6	4	168	1. Penggantian <i>protective cover</i> konektor yang telah retak atau patah. 2. Penambahan <i>Detailed Visual Inspection</i> konektor beserta verifikasi <i>torque backshell</i> pada inspeksi terjadwal 2.400 FH. 3. Pemasangan <i>protective cap</i> sementara selama <i>harness</i> dilepas pada saat <i>maintenance</i>.

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	S	O	D	RPN	Tindakan yang Direkomendasikan
FMU Housing Adjuster	Keretakan pada Housing Adjuster (Housing Adjuster crack)	1. <i>Overtorque</i> pada saat pelaksanaan <i>adjustment fuel metering</i> . 2. <i>Fatigue</i> akibat getaran dan tekanan bahan bakar yang berfluktuasi. 3. Korosi pada permukaan <i>housing</i> akibat paparan kelembaban.	1. Kebocoran bahan bakar eksternal pada <i>body</i> FMU. 2. Setting metering bergeser sehingga <i>fuel flow</i> tidak akurat terhadap perintah EEC. 3. Penurunan performa <i>thrust</i> dan berpotensi menimbulkan <i>engine surge</i> .	7	3	5	105	1. Pemeriksaan dengan metode NDT (<i>dye penetrant</i>) pada saat <i>shop visit</i> . 2. Pengendalian nilai torque sesuai AMM pada saat pelaksanaan <i>adjustment</i> . 3. Penggantian <i>housing</i> yang telah terindikasi <i>crack</i> .
HP Fuel Inlet Port	HP fuel inlet patah atau retak (HP fuel inlet broken)	1. Tekanan bahan bakar berlebih dari <i>HP fuel pump</i> . 2. <i>Fatigue</i> pada <i>flange</i> sambungan akibat siklus tekanan yang berulang. 3. Pemasangan <i>fuel line</i> tidak sesuai prosedur AMM sehingga menimbulkan <i>pre-stress</i> .	1. Kebocoran bahan bakar bertekanan tinggi pada area <i>engine</i> yang berpotensi menjadi <i>fire hazard</i> . 2. <i>Supply</i> bahan bakar menuju <i>combustion chamber</i> terganggu. 3. Berpotensi menyebabkan <i>in-flight shut down</i> dan <i>aircraft on ground</i> (AOG).	8	2	4	64	1. Leak check setelah setiap pemasangan FMU. 2. Verifikasi <i>torque fuel line</i> sesuai AMM. 3. Penggantian <i>HP fuel inlet</i> disertai pemeriksaan tekanan keluaran <i>HP fuel pump</i> .

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	S	O	D	RPN	Tindakan yang Direkomendasikan
Heatshield FMU	Goresan dan deformasi pada Heatshield (Heatshield scratches)	1. Gesekan dengan <i>clamp</i> dan <i>bracket</i> akibat getaran <i>engine</i> . 2. Kontak dengan <i>tools</i> pada saat pelaksanaan <i>maintenance</i> di sekitar <i>engine</i> . 3. Deformasi akibat pemuaian termal (<i>thermal cycling</i>) yang berulang.	1. Fungsi proteksi termal menurun sehingga temperatur permukaan FMU meningkat. 2. Mempercepat degradasi <i>seal</i> dan o-ring pada FMU. 3. Menurunkan umur pakai komponen di sekitarnya sehingga memicu kegagalan lain.	4	4	3	48	1. Penggantian <i>Heatshield</i> yang mengalami goresan dalam. 2. Perbaikan metode pemasangan <i>clamp</i> dan <i>bracket</i> . 3. Sosialisasi prosedur <i>handling tools</i> pada area <i>engine</i> kepada teknisi.

(Sumber: Data Pribadi, diolah dari hasil wawancara narasumber)

(Referensi : (Manajemen et al., n.d.)

I. Usulan Interval *Preventive Maintenance*

Berdasarkan hasil analisis Distribusi Weibull, *Fuel Metering Unit* memiliki nilai β lebih besar dari satu sehingga menunjukkan pola kegagalan *wear-out*. Kondisi ini mendukung penerapan strategi *preventive maintenance* karena risiko kegagalan semakin meningkat seiring bertambahnya waktu operasi. Penentuan interval perawatan pada penelitian ini mengacu pada konsep *B-Life* menurut Abernethy (2015), dengan menetapkan target tingkat keandalan minimum yang ingin dicapai kemudian menghitung waktu operasi yang bersesuaian. Hasil dari perhitungan *B-Life* terdapat pada Tabel IV.9. Perbandingan interval pada beberapa target tingkat keandalan disajikan pada Tabel IV.13.

Tabel IV.13 Usulan interval perawatan berdasarkan *B-Life*

No	Target Reliability R(t)	Interval Operasi (FH)	Keterangan
1	90%	2.420,66	Sangat konservatif (B10 Life)
2	80%	3.513,84	Konservatif (B20 Life)
3	70%	4.435,42	Moderat (B30 Life)
4	60%	5.301,58	Direkomendasikan (B40 Life)

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Berdasarkan Tabel IV.13, interval inspeksi yang direkomendasikan adalah 5.300 *flight hours*, dibulatkan ke bawah dari nilai B40 *Life* sebesar 5.301,58 FH, dengan target tingkat keandalan minimum 60 persen. Pembulatan dilakukan ke bawah agar keandalan aktual pada interval usulan tetap berada di atas target, yaitu $R(5.300)$ sebesar 60,02 persen. Pemilihan interval tersebut didasarkan pada empat pertimbangan berikut.

Pertama, syarat teknis penerapan interval berbasis waktu telah terpenuhi. Fidanoglu, Ungor, Ozkol, dan Komurgoz (2017) menjelaskan bahwa nilai β yang lebih besar dari satu menunjukkan pola kegagalan *wear-out*, yaitu kondisi ketika umur komponen dapat diperkirakan sehingga perawatan terjadwal menjadi efektif, sedangkan nilai β yang mendekati satu menunjukkan kegagalan bersifat acak sehingga interval terjadwal tidak akan menurunkan laju kegagalan. Nilai β FMU sebesar 2,013663 berada pada kategori *wear-out*, sehingga penetapan interval berbasis *flight hours* secara metodologis dapat dipertanggungjawabkan.

Kedua, indeks B40 dipilih dengan mempertimbangkan keseimbangan antara jaminan keandalan dan beban perawatan. Abernethy (2015) menjelaskan bahwa indeks *B Life* ditetapkan mengikuti tingkat kegagalan yang dapat diterima, sehingga besaran indeks

menentukan seberapa konservatif interval *preventive maintenance* yang dihasilkan. Perbandingan pada Tabel IV.13 menunjukkan bahwa B10 menghasilkan interval 2.420,66 FH, yaitu sekitar 54 persen lebih pendek dibandingkan B40 sehingga frekuensi inspeksi menjadi lebih dari dua kali lipat sepanjang umur operasi komponen. Adapun B40 sebesar 5.301,58 FH memberikan pemanfaatan umur pakai yang jauh lebih optimal, dengan konsekuensi keandalan pada akhir interval berada pada 60,02 persen sehingga interval ini harus disertai pemeriksaan antara sebagaimana diuraikan pada Tabel IV.14.

Ketiga, interval berbasis B40 *Life* memberikan margin keandalan yang jauh lebih baik dibandingkan interval yang mengacu pada MTTF. Fidanoglu dkk. (2017) menegaskan bahwa interval perawatan pada program berbasis MSG-3 harus ditetapkan mengikuti tingkat keandalan komponen yang ditargetkan, bukan mengikuti rata-rata umur kegagalan. Nilai MTTF sebesar 6.558,02 FH terletak di antara B50 dan B60 dengan keandalan tersisa hanya 45,66 persen, sehingga tidak layak dijadikan dasar interval perawatan.

Keempat, interval 5.300 FH berada pada paruh awal rentang kritis 4.000 sampai 10.000 FH sebagaimana teridentifikasi pada analisis CDF dan *B-Life*. Pada 5.300 FH nilai *Failure Rate* sebesar 0,000194 kegagalan per FH, masih di bawah 0,000241 kegagalan per FH pada saat MTTF. Karena interval ini tidak lagi berada sebelum rentang kritis, penurunan kondisi komponen pada paruh pertama umur operasi diantisipasi melalui pemeriksaan antara pada 3.500 FH, sehingga risiko kegagalan tak terjadwal tetap terkendali.

Interval 5.300 FH pada Tabel IV.14 diterapkan sebagai interval berulang yang dihitung terhadap *Time Since Installation* (TSI) komponen, yaitu pada setiap kelipatan 5.300 FH sejak FMU dipasang pada *engine*. Adapun *functional check* pada 3.500 FH (B20 *Life*) berfungsi sebagai pemeriksaan antara di dalam setiap siklus interval utama, sedangkan evaluasi penggantian terencana sebelum 6.500 FH merupakan ambang umur kumulatif yang berlaku apabila komponen belum diganti pada inspeksi sebelumnya. Skema bertingkat ini menyesuaikan intensitas pemeriksaan dengan penurunan keandalan komponen, yaitu 80,14 persen pada 3.500 FH, 60,02 persen pada 5.300 FH, dan 46,30 persen pada 6.500 FH.

Usulan perawatan tidak hanya diarahkan pada penggantian komponen, tetapi juga pada pemeriksaan fungsional dan pemantauan riwayat fault sebelum komponen mencapai

batas keandalan minimum. Isi pemeriksaan pada setiap interval disusun berdasarkan prioritas modus kegagalan hasil analisis FMEA, sebagaimana disajikan pada Tabel IV.14.

Tabel IV.14 Usulan interval dan jenis tindakan perawatan *Fuel Metering Unit*

Jenis Tindakan	Interval Usulan	Keterangan
<i>Detailed Visual Inspection electrical connector dan protective cover</i>	5.300 FH (B40 Life)	Pemeriksaan utama yang diarahkan pada modus kegagalan dengan RPN tertinggi (168), disertai verifikasi nilai torque <i>backshell</i> sesuai AMM.
Pemeriksaan kondisi <i>clamp</i> dan <i>bracket harness</i> di sekitar FMU	5.300 FH (bersamaan)	Mencegah gesekan <i>harness</i> akibat <i>clamp</i> yang kendur yang mempercepat kerusakan <i>protective cover</i> konektor.
<i>Functional check</i> dan pemantauan riwayat fault	± 3.500 FH (B20 Life)	Dilakukan sebelum <i>reliability</i> turun di bawah 80% dan sebelum memasuki rentang kritis 4.000–10.000 FH, sebagai pemeriksaan antara yang mengimbangi interval utama yang lebih panjang.
Pemeriksaan NDT <i>Housing Adjuster</i>	Pada saat <i>shop visit</i>	Diarahkan pada modus kegagalan prioritas kedua (RPN 105) yang tidak dapat dideteksi melalui pemeriksaan visual pada <i>line maintenance</i> .
<i>Leak check</i> setelah pemasangan FMU	Setiap <i>installation</i>	Diarahkan pada modus kegagalan dengan <i>Severity</i> tertinggi ($S = 8$) untuk mencegah kebocoran bahan bakar bertekanan tinggi.
Evaluasi penggantian terencana	Sebelum ± 6.500 FH	Dipertimbangkan sebelum mendekati MTTF apabila terdapat indikasi degradasi, <i>repetitive fault</i> , atau temuan abnormal.
<i>Corrective action</i>	Saat fault terkonfirmasi	Penggantian tetap mengikuti prosedur AMM, disertai penerapan <i>Hold Item List</i> sesuai MEL apabila komponen pengganti tidak tersedia.

(Sumber: Pengolahan data penulis 2026)

Usulan interval perawatan tersebut disusun berdasarkan hasil perhitungan parameter Weibull pada Lampiran J dan Lampiran K, hasil perhitungan *reliability* , CDF, PDF, dan *Failure Rate* pada Lampiran L, serta hasil analisis FMEA pada Tabel IV.11 dan Tabel IV.12. Hasil ini menjawab rumusan masalah ketiga penelitian.

Penggantian terencana tidak harus langsung dilakukan pada interval 5.300 FH apabila hasil pemeriksaan menunjukkan kondisi komponen masih baik. Namun apabila ditemukan *repetitive fault*, indikasi valve tidak merespons perintah EEC, atau gejala penurunan performa *fuel flow*, maka penggantian komponen dapat dipertimbangkan lebih awal. Dengan demikian, strategi perawatan yang disarankan berbasis keandalan sekaligus berbasis kondisi komponen, sehingga lebih fleksibel dibandingkan penggantian yang hanya berdasarkan rata-rata umur kegagalan.

Dengan penerapan interval perawatan tersebut, diharapkan kegagalan FMU yang selama ini terjadi pada rentang di bawah MTTF sebanyak 61,8 persen dari total kejadian dapat dideteksi lebih dini melalui *scheduled maintenance*, sehingga jumlah *unscheduled removal*, keterlambatan penerbangan, serta biaya perawatan yang timbul akibat kegagalan FMU dapat ditekan secara signifikan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan terhadap komponen *Fuel Metering Unit* (FMU) *Part Number* 702-03:K0131 pada *engine* Rolls-Royce Trent 700 pesawat Airbus A330-300 di PT GMF AeroAsia, Tbk, maka diperoleh kesimpulan yang menjawab rumusan masalah penelitian sebagai berikut:

1. Nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) komponen *Fuel Metering Unit* *Part Number* 702-03:K0131 adalah sebesar 6.558,02 *Flight Hours*. Nilai tersebut diperoleh melalui pendekatan distribusi Weibull dua parameter terhadap 55 data *unscheduled removal* periode 2023–2025, dengan *Shape parameter* (β) sebesar 2,013663 dan *Scale parameter* (η) sebesar 7.400,81 FH. Nilai β yang lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa karakteristik kegagalan FMU berada pada fase wear-out, yaitu laju kegagalan meningkat seiring bertambahnya waktu operasi. Pada saat komponen mencapai usia MTTF, nilai *reliability* tersisa sebesar 45,66% dan nilai *Cumulative Distribution Function* sebesar 54,34%. Hasil perbandingan terhadap data aktual menunjukkan sebanyak 34 unit (61,8%) mengalami kegagalan sebelum mencapai nilai MTTF dan 21 unit (38,2%) setelah melewati nilai MTTF.
2. Berdasarkan analisis *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), modus kegagalan yang menjadi prioritas utama adalah patahnya protective cover pada electrical connector FMU (*electrical connector protective broken*) dengan nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi sebesar 168 dan tergolong kategori tingkat kegagalan sedang. Prioritas berikutnya berturut-turut adalah keretakan pada *Housing Adjuster* dengan RPN 105, patahnya *HP fuel inlet* dengan RPN 64, serta goresan pada *Heatshield* dengan RPN 48 yang tergolong kategori rendah. Modus kegagalan *protective cover konektor* menjadi prioritas utama karena memiliki nilai *Occurrence* tertinggi, yaitu paling sering terjadi, sekaligus berdampak langsung pada

terganggunya sinyal perintah dari *Engine Electronic Controller* menuju *torque motor* FMU.

3. Usulan perbaikan berdasarkan hasil analisis FMEA berpengaruh terhadap peningkatan keandalan FMU melalui dua bentuk tindakan. Pertama, penetapan interval perawatan terjadwal berdasarkan konsep *B life*, yaitu *B10 life* sebesar 2.420,66 FH yang dibulatkan menjadi 2.400 *Flight Hours*. Dengan interval tersebut, keandalan FMU dapat dipertahankan pada tingkat minimum 90%, jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa perawatan terjadwal yang hanya menyisakan keandalan sebesar 45,66% pada saat komponen mencapai usia MTTF. Kedua, penerapan tindakan korektif dan preventif pada setiap modus kegagalan, meliputi penambahan *task Detailed Visual Inspection* kondisi *electrical connector* beserta *protective cover* ke dalam task card inspeksi, pencantuman dan verifikasi nilai torque backshell konektor, pemeriksaan keretakan *Housing Adjuster* menggunakan metode *Non-Destructive Test* pada saat *shop visit*, pelaksanaan *leak check* setelah pemasangan FMU, serta pelaksanaan training dan supervisi prosedur handling electrical harness kepada teknisi. Penerapan usulan tersebut diharapkan menurunkan angka *unscheduled removal* sehingga keandalan FMU meningkat.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Bagi Perusahaan

- a. Menambahkan item pemeriksaan kondisi *electrical connector* beserta *protective cover* FMU ke dalam task card inspeksi terjadwal dengan interval 2.400 *Flight Hours* melalui proses *reliability program review*, sehingga keretakan awal dapat terdeteksi sebelum berkembang menjadi kerusakan total.

- b. Mencantumkan nilai *torque backshell* konektor secara eksplisit pada task card serta memastikan pelaksanaannya diverifikasi oleh *inspector*, mengingat pemasangan yang tidak sesuai merupakan salah satu penyebab dominan kegagalan.
- c. Melaksanakan training dan sosialisasi prosedur handling electrical harness pada area *engine* kepada teknisi baru secara recurrent, disertai supervisi oleh senior teknisi/AME pada saat pekerjaan *removal* dan *installation* FMU.
- d. Melakukan pemantauan berkelanjutan (*continuous monitoring*) terhadap nilai MTTF dan *reliability* FMU setiap periode tertentu, sehingga efektivitas penerapan interval inspeksi yang diusulkan dapat dievaluasi secara terukur.

2. Bagi Penelitian Selanjutnya

- a. Menggunakan rentang data yang lebih panjang serta menambahkan data suspension (komponen yang masih beroperasi) agar estimasi parameter Weibull yang dihasilkan lebih representatif terhadap kondisi populasi komponen sesungguhnya.
- b. Membandingkan hasil estimasi parameter menggunakan metode *Median Rank* regression dengan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) atau distribusi Weibull tiga parameter, guna menguji ketepatan model terhadap data kegagalan yang digunakan.
- c. Menambahkan analisis biaya (*cost-benefit analysis*) terhadap usulan interval perawatan, sehingga dapat diketahui perbandingan antara biaya pelaksanaan *scheduled maintenance* dengan biaya yang ditimbulkan akibat *unscheduled removal*.
- d. Memperbanyak jumlah responden pada penilaian FMEA serta mempertimbangkan penggunaan metode pembobotan seperti Fuzzy FMEA atau *Analytical Hierarchy Process* (AHP), guna mengurangi subjektivitas dalam penentuan nilai *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*.

- e. Melakukan penelitian serupa terhadap komponen lain pada *fuel system Engine* Rolls-Royce Trent 700, sehingga diperoleh gambaran keandalan sistem bahan bakar secara menyeluruh.
- e. Melakukan penelitian serupa terhadap komponen lain pada *fuel system Engine* Rolls-Royce Trent 700, sehingga diperoleh gambaran keandalan sistem bahan bakar secara menyeluruh.

Daftar Pustaka

- Abernethy, R. B. (2015). *The new Weibull handbook* (5th ed.). Robert B. Abernethy.
- Agustian, E. S. (2023). Kajian *maintenance* pesawat penumpang di Indonesia. *Jurnal Teknik SILITEK*, 3(1).
- Airbus. (2018). *Airbus A330 (RR RB211 Trent 700) training manual 71–80 powerplant (RR Trent 700)*. Airbus S.A.S.
- Airbus. (2023). *A330 aircraft characteristics: Airport and maintenance planning*. Airbus S.A.S.
- Arifin, M., & Vania, F. (2019). *Analisis pengurangan emisi CO₂ pada perkembangan desain pesawat udara*. Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma.
- Farida, I., Prasetyo, K., Bahri, E. I., Sari, N. H. M., & Fauzi, A. H. (2025). *Analisis tren efisiensi bahan bakar dalam industri penerbangan: Studi data performance pesawat*.
- Febrina, W., & Yusrizal. (2025). Analisis kerusakan pompa menggunakan metode *preventive maintenance*. *Jurnal Smartech*, 1(1), 8–12.
- Jin, X., & Li, W. (2022). Performance degradation *Detection* method of aeroengine fuel metering device. *Nonlinear Engineering*, 11(1), 339–346. <https://doi.org/10.1515/nleng-2022-0034>
- Juniar, V., Dewi, P., & Yudianto, K. (2023). Analisis kinerja *certifying staff* guna memenuhi regulasi CASR Part 145 di PT Batam Aero Teknik. *Jurnal Ground Handling Dirgantara*, 5(1).
- Kurniawan, W. (n.d.). *Reliability of air separation module components on the nitrogen generation system of Boeing aircraft*. Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta.
- Maharani, A. D., Christya Rahayu, H., & Rekarti, E. (2025). Implikasi implementasi strategi *defense industry (military)* terhadap kinerja keuangan PT Garuda Maintenance Facility Aero Asia Tbk. *Jurnal Ekonomi Manajemen Sistem Informasi*, 6(3). <https://doi.org/10.38035/jemsi.v6i3>
- Prasetya, R. Y., Suhermanto, & Muryanto. (2021). Implementasi FMEA dalam menganalisis risiko kegagalan proses produksi berdasarkan RPN. *Performa: Media Ilmiah Teknik Industri*, 20(2), 133. <https://doi.org/10.20961/performa.20.2.52219>

- Rahman, A. B. S. P., Arifin, M., & Fairuza, S. (2024). Pengembangan laboratorium virtual untuk pelatihan perencanaan pemeliharaan pesawat terbang. *Jurnal Mahasiswa Dirgantara*, 3(1), 37–47.
<https://doi.org/10.35894/jmd.v3i1.121>
- Rahmawati, F. K. (n.d.). *Reliability analysis of nose wheel assy*.
- Ramasahayam, U. R. (2024). *Revolutionizing aircraft maintenance*.
- ReliaSoft Corporation. (2015). *Accelerated life testing reference*. ReliaSoft Corporation.
- Setiawan, D. M., Mahmudah, N., & Putra, E. L. (2019). Analisis panjang *runway* untuk pendaratan dan *take-off* pesawat Airbus A330-200 dan A330-300. *Semesta Teknika*, 22(1). <https://doi.org/10.18196/st.221233>
- Setiawan, F., Sofyan, E., & Putra, D. C. M. (2020). Analisis *reliability* sistem *starter valve* untuk merencanakan aktivitas *maintenance* pada pesawat Boeing 737 Next Generation di PT GMF AeroAsia. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, 6(2).
- Seto Mamadlo, A. (2025). *Aspek hukum dalam keselamatan penerbangan pesawat udara di lingkungan Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut*. Iuris Studia: Jurnal Kajian Hukum.
- Siregar, H. N., & Munthe, S. (2019). Analisa perawatan mesin *digester* dengan metode *reliability centered maintenance* pada PTPN II Pagar Merbau. *Journal of Industrial and Manufacture Engineering*.
<http://ojs.uma.ac.id/index.php/jime>
- Siswanto, E. (2017). Aplikasi pemeliharaan *preventive* mesin produksi dengan metode “*smart maintenance*” untuk efisiensi perusahaan Lucky Olympic Kediri. *Jurnal Revitalisasi: Jurnal Ilmu Manajemen*, 6(1).
- Susilo, T., Kurniawan, A. S., & Basuki, M. H. (2017). *Studi perhitungan efektivitas derate thrust engine Rolls-Royce Trent 700 pada pesawat Airbus A330-300*.
- Wibowo, C. N., Pratama, R. A., & Nugraha, A. A. T. (2026). Analisis kegagalan *surge control valve* pada APU model GTCP331-350 pesawat Airbus A330 series di PT GMF AeroAsia Tbk. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 14(1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8459>

Lampiran A Surat Permohonan Penelitian dan Pengumpulan Data



KEMENTERIAN PERHUBUNGAN
BADAN PENGEMBANGAN SUMBER DAYA MANUSIA PERHUBUNGAN
POLITEKNIK PENERBANGAN INDONESIA CURUG

JL. RAYA PLP CURUG
TANGERANG 15820

Telp. (021) 598-2203/04/05
Fax. (021) 598-2234

email : ppi@ppicurug.ac.id
website : www.ppicurug.ac.id

Nomor : LT.404/2/16/PPIC/2026
Klasifikasi : -
Lampiran : 1 (satu) Lampiran
Hal : Permohonan Penelitian dan
Pengumpulan Data untuk
Penyusunan Tugas Akhir Program
Studi Teknik Pesawat Udara
Program Sarjana Terapan
Angkatan Ke - 17

Curug, 26 Juni 2026

Yth. Learning Center Unit PT. GMF Aeroasia Tbk.

Dengan hormat, disampaikan bahwa berdasarkan Kalender Akademik Program Studi Teknik Pesawat Udara Program Sarjana Terapan Angkatan Ke 17 - Politeknik Penerbangan Indonesia Curug – Tangerang saat ini sedang melaksanakan Kegiatan Belajar Mengajar pada semester VIII (delapan), dimana terdapat proses penyusunan Tugas Akhir.

Sehubungan dengan hal tersebut, guna mendukung data untuk Penyusunan Tugas Akhir tersebut, maka dengan ini kami mohon kiranya dapat diperkenankan bagi beberapa Taruna/i Program Studi Diploma IV Teknik Pesawat Udara (daftar nama sebagaimana terlampir) untuk melakukan penelitian dan pengumpulan data pada perusahaan yang Bapak/Ibu pimpin :

Program Studi : Program Studi Teknik Pesawat Udara Program Sarjana
Terapan Angkatan Ke - 17
Terjadwal : 29 Juni s.d 02 Agustus 2026
Tujuan & Maksud : Penelitian & Pengumpulan Data untuk Penyusunan Tugas
Akhir

Demikian disampaikan, atas perhatian dan perkenannya diucapkan terima kasih.

Direktur,



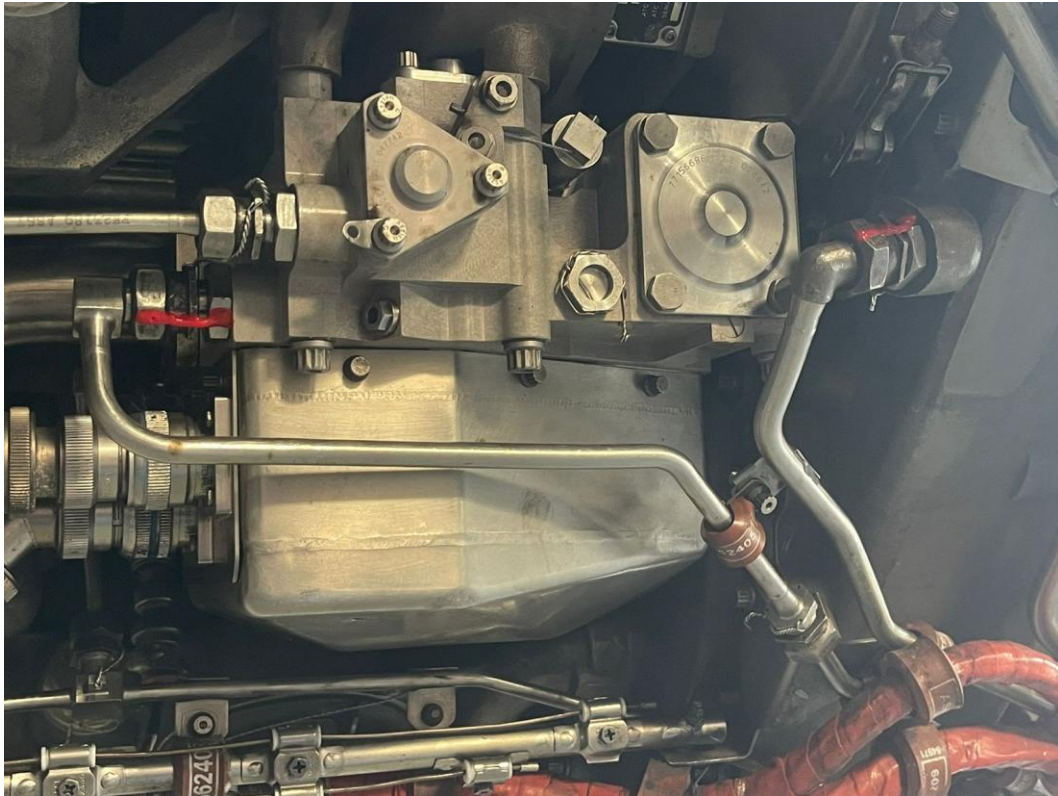
Capt. Megi H. Helmiadi
NIP. 197411211999031002

Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh Balai Besar Sertifikasi Elektronik (BSrE), Badan Siber dan Sandi Negara (BSSN).

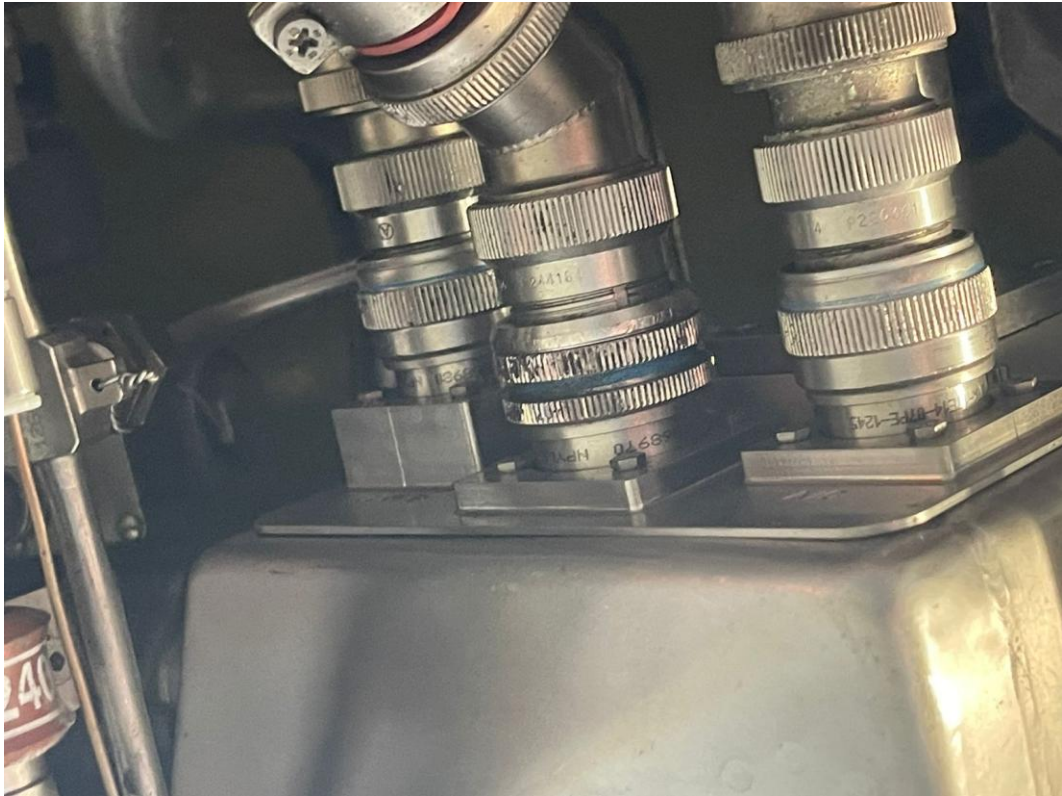
**Lampiran B Surat Keterangan Pelaksanaan Penelitian PT GMF AeroAsia
Tbk**



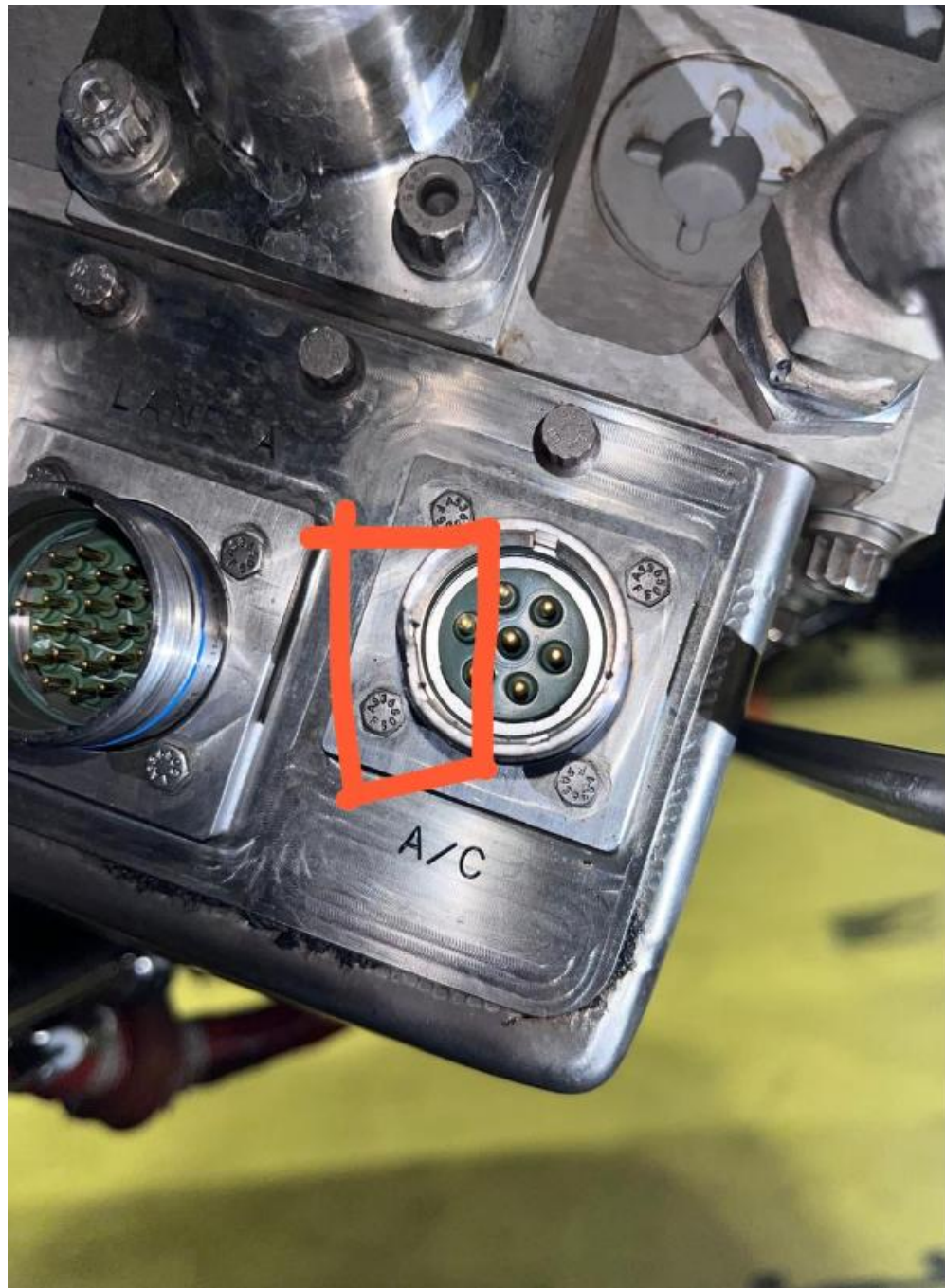
Lampiran C Komponen *Fuel Metering Unit*



Lampiran C Komponen *Fuel Metering Unit* (lanjutan)



Lampiran C Kerusakan Komponen FMU



Lampiran F Data Kegagalan *Fuel Metering Unit*



Lampiran F Data Kegagalan *Fuel Metering Unit* (lanjutan)



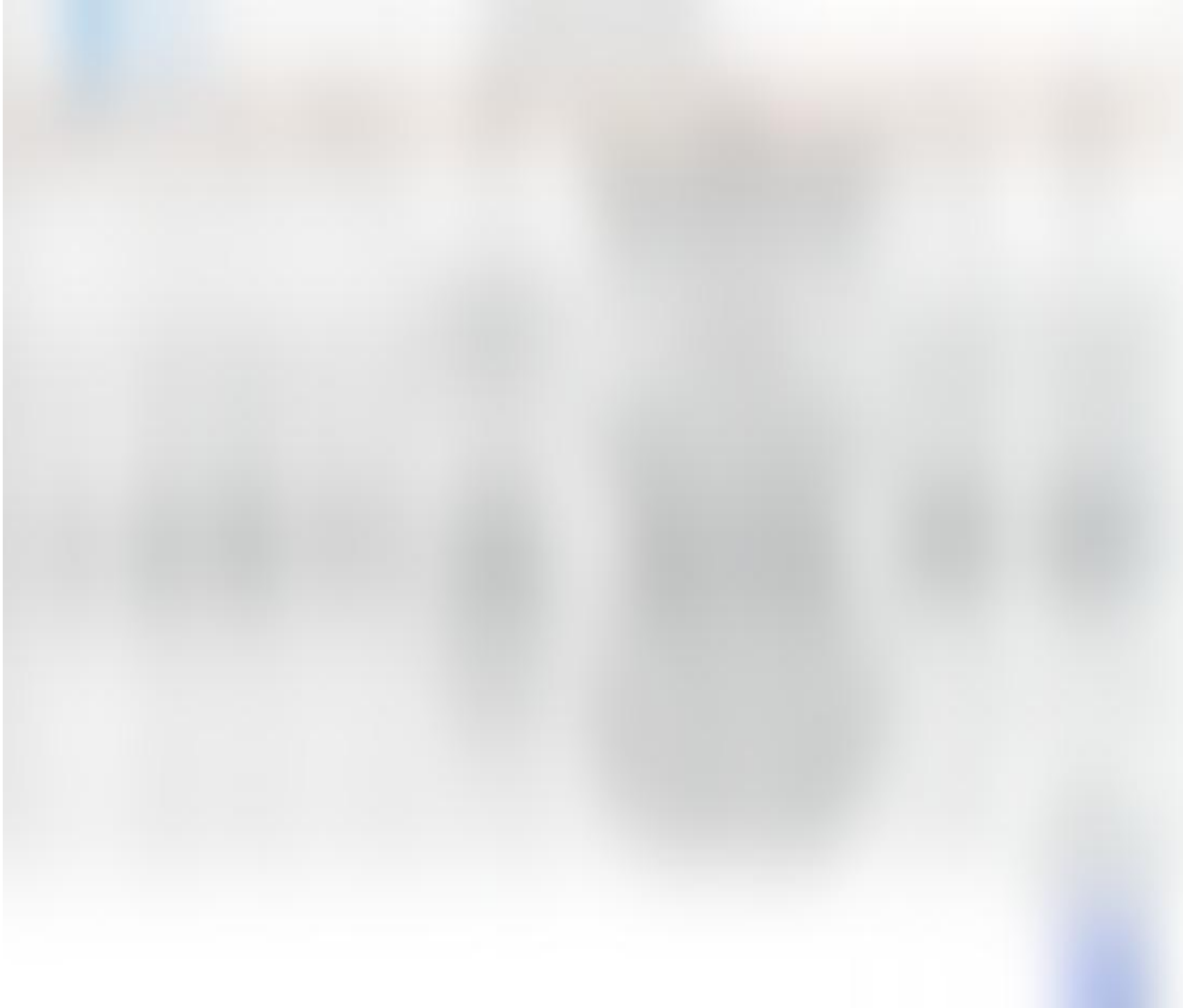
Lampiran F Data Kegagalan *Fuel Metering Unit* (lanjutan)



Lampiran F Data Kegagalan *Fuel Metering Unit* (lanjutan)



Lampiran F Data Kegagalan *Fuel Metering Unit* (lanjutan)



Lampiran G *Maintenance Data Report (MDR)*



Lampiran H Authorised Release Certificate



Lampiran I Repair Report *Fuel Metering Unit*



Lampiran J Perhitungan *Median Rank* Data Kegagalan

NO	TTF	RANK	REVERSE RANK	ADJUSTED RANK	i-0,3	MEDIAN RANK "F(t)"
1	1098	1	55	1	0,7	0,012635379
2	1278	2	54	2	1,7	0,030685921
3	1879	3	53	3	2,7	0,048736462
4	2189	4	52	4	3,7	0,066787004
5	2345	5	51	5	4,7	0,084837545
6	2487	6	50	6	5,7	0,102888087
7	2987	7	49	7	6,7	0,120938628
8	3006	8	48	8	7,7	0,13898917
9	3245	9	47	9	8,7	0,157039711
10	3345	10	46	10	9,7	0,175090253
11	3568	11	45	11	10,7	0,193140794
12	3678	12	44	12	11,7	0,211191336
13	3765	13	43	13	12,7	0,229241877
14	3876	14	42	14	13,7	0,247292419
15	3990	15	41	15	14,7	0,26534296
16	4000	16	40	16	15,7	0,283393502
17	4098	17	39	17	16,7	0,301444043
18	4186	18	38	18	17,7	0,319494585
19	4342	19	37	19	18,7	0,337545126
20	4498	20	36	20	19,7	0,355595668
21	4654	21	35	21	20,7	0,373646209
22	4811	22	34	22	21,7	0,391696751
23	4967	23	33	23	22,7	0,409747292
24	5308	24	32	24	23,7	0,427797834
25	5456	25	31	25	24,7	0,445848375
26	5560	26	30	26	25,7	0,463898917
27	5570	27	29	27	26,7	0,481949458
28	5849	28	28	28	27,7	0,5
29	6000	29	27	29	28,7	0,518050542
30	6020	30	26	30	29,7	0,536101083
31	6131	31	25	31	30,7	0,554151625
32	6240	32	24	32	31,7	0,572202166
33	6291	33	23	33	32,7	0,590252708
34	6510	34	22	34	33,7	0,608303249
35	6871	35	21	35	34,7	0,626353791
36	7032	36	20	36	35,7	0,644404332
37	7194	37	19	37	36,7	0,662454874
38	7356	38	18	38	37,7	0,680505415
39	7518	39	17	39	38,7	0,698555957

NO	TTF	RANK	REVERSE RANK	<i>ADJUSTED RANK</i>	i-0,3	<i>MEDIAN RANK "F(t)"</i>
40	7681	40	16	40	39,7	0,716606498
41	7845	41	15	41	40,7	0,73465704
42	8009	42	14	42	41,7	0,752707581
43	8074	43	13	43	42,7	0,770758123
44	9339	44	12	44	43,7	0,788808664
45	10512	45	11	45	44,7	0,806859206
46	11071	46	10	46	45,7	0,824909747
47	11338	47	9	47	46,7	0,842960289
48	12005	48	8	48	47,7	0,86101083
49	13017	49	7	49	48,7	0,879061372
50	13341	50	6	50	49,7	0,897111913
51	13909	51	5	51	50,7	0,915162455
52	14318	52	4	52	51,7	0,933212996
53	14517	53	3	53	52,7	0,951263538
54	14965	54	2	54	53,7	0,969314079
55	15014	55	1	55	54,7	0,987364621
TOTAL	364153	1540	1540	1540	1468,8	26,51263538

Lampiran K Perhitungan Regresi Linier Nilai X dan Y

X	Y	X*Y	X ²	y ²
-4,364903333	7,001245622	-30,55976035	19,0523811	49,01744026
-3,468408519	7,153051635	-24,80970523	12,02985766	51,16614769
-2,996449767	7,538494999	-22,58872158	8,978711205	56,82890686
-2,671884936	7,691200098	-20,55000168	7,138969112	59,15455894
-2,4230177	7,760040681	-18,80271592	5,871014775	60,21823137
-2,220317226	7,818832444	-17,36028836	4,929808584	61,13414078
-2,048713996	8,002024818	-16,39386024	4,197229038	64,03240119
-1,8994681	8,00836557	-15,21163494	3,607979065	64,13391911
-1,767054589	8,084870629	-14,28640775	3,12248192	65,36513309
-1,647756294	8,115221973	-13,37190809	2,715100806	65,85682766
-1,538951061	8,179760494	-12,58825109	2,368370368	66,90848173
-1,438718857	8,210124405	-11,8120608	2,069911948	67,40614275
-1,34561059	8,23350314	-11,07908902	1,810667859	67,79057396
-1,258504794	8,262558973	-10,39847008	1,583834316	68,26988078
-1,176514909	8,29154651	-9,755128085	1,38418733	68,74974353
-1,09892712	8,29404964	-9,114556084	1,207640815	68,79125943
-1,025157404	8,318254329	-8,527520017	1,050947704	69,19335508
-0,954721059	8,339500903	-7,961897136	0,911492301	69,54727531
-0,887210591	8,37609035	-7,43135607	0,787142633	70,15888956
-0,822279338	8,411388133	-6,916510668	0,67614331	70,75145032
-0,759629121	8,445482344	-6,41543433	0,577036402	71,32617202
-0,699000767	8,478660242	-5,926590009	0,488602072	71,88767949
-0,64016673	8,510571315	-5,44818461	0,409813442	72,42982411
-0,582925258	8,576970395	-4,999732677	0,339801856	73,56442116
-0,527095701	8,6044712	-4,535379781	0,277829878	74,03692462
-0,472514703	8,623353387	-4,074661262	0,223270144	74,36222364
-0,419033031	8,625150333	-3,614222887	0,175588681	74,39321827
-0,366512921	8,674025985	-3,179142597	0,134331721	75,2387268
-0,314825781	8,699514748	-2,738831526	0,099115272	75,68155685
-0,263850185	8,702842538	-2,296246618	0,06961692	75,73946825
-0,213470053	8,721113148	-1,861696487	0,045569464	76,05781454
-0,163572961	8,738735461	-1,429420831	0,026756113	76,36549746
-0,114048515	8,74687532	-0,997568139	0,013007064	76,50782786
-0,06478673	8,781094735	-0,568898412	0,00419732	77,10762475
-0,015676341	8,835064935	-0,138501489	0,000245748	78,05837241
0,033397017	8,858226439	0,29583834	0,001115361	78,46817565
0,08255285	8,881002624	0,733152077	0,006814973	78,87220761
0,131918177	8,903271586	1,174503357	0,017402405	79,26824493
0,18163038	8,925055424	1,621061208	0,032989595	79,65661432
0,231840726	8,946505026	2,074164222	0,053750122	80,03995218

X	Y	X*Y	X ²	y ²
0,282718851	8,967631665	2,535318521	0,079929949	80,41841768
0,334458611	8,988321188	3,006221423	0,111862563	80,78991778
0,387285931	8,996404301	3,484180811	0,149990392	80,93529035
0,441469598	9,141954459	4,035894963	0,194895406	83,57533133
0,497336565	9,260272741	4,60547224	0,247343659	85,75265123
0,555294297	9,312084356	5,170947336	0,308351756	86,71491505
0,615864635	9,335915195	5,749659999	0,379289248	87,15931253
0,679737301	9,393078509	6,384825835	0,462042799	88,22992387
0,747858858	9,474011474	7,085223398	0,559292871	89,75689342
0,82159027	9,498597279	7,803955108	0,675010573	90,22335027
0,903009763	9,540291392	8,614976268	0,815426632	91,01715984
0,995562721	9,569272766	9,52681123	0,991145131	91,57098127
1,105696411	9,583075655	10,59597235	1,222564552	91,83533902
1,248167093	9,61346942	11,99921618	1,557921092	92,41879429
1,475050047	9,616738378	14,1851704	2,175772643	92,48165703
-32,39428893	474,6592313	-241,24696	96,24579303	4116,417241

AVG X	AVG Y	B	A	β	η	GAMMA	MTTF
-0,56216798	8,630167842	38,32119059	8,909344592	2,013663315	7400,808947	0,886121991	6558,019561
		77,16597566					
		0,496607349					

Lampiran L Perhitungan *Reliability* dan Laju Kegagalan

2,013663315	7400,808947	2500	0,8936600480	89%	0,1063399520	10,63%	0,0000905583	0,0091%
2,013663315	7400,808947	3000	0,8501837510	85%	0,1498162490	14,98%	0,0001089410	0,0109%
2,013663315	7400,808947	3500	0,8014137782	80%	0,1985862218	19,86%	0,0001273659	0,0127%
2,013663315	7400,808947	4000	0,7485070519	75%	0,2514929481	25,15%	0,0001458268	0,0146%
2,013663315	7400,808947	4500	0,6926641967	69%	0,3073358033	30,73%	0,0001643194	0,0164%
2,013663315	7400,808947	5000	0,6350835421	64%	0,3649164579	36,49%	0,0001828401	0,0183%
2,013663315	7400,808947	5500	0,5769184813	58%	0,4230815187	42,31%	0,0002013862	0,0201%
2,013663315	7400,808947	6000	0,5192401510	52%	0,4807598490	48,08%	0,0002199554	0,0220%
2,013663315	7400,808947	6500	0,4630069460	46%	0,5369930540	53,70%	0,0002385458	0,0239%
2,013663315	7400,808947	6558	0,4566164809	46%	0,5433835191	54,34%	0,0002407035	0,0241%
2,013663315	7400,808947	7500	0,3580180300	36%	0,6419819700	64,20%	0,0002757838	0,0276%
2,013663315	7400,808947	8000	0,3104524849	31%	0,6895475151	68,95%	0,0002944289	0,0294%
2,013663315	7400,808947	8500	0,2667072991	27%	0,7332927009	73,33%	0,0003130899	0,0313%
2,013663315	7400,808947	9000	0,2269973687	23%	0,7730026313	77,30%	0,0003317660	0,0332%
2,013663315	7400,808947	9500	0,1914034389	19%	0,8085965611	80,86%	0,0003504562	0,0350%
2,013663315	7400,808947	10000	0,1598890204	16%	0,8401109796	84,01%	0,0003691599	0,0369%
2,013663315	7400,808947	10500	0,1323197561	13%	0,8676802439	86,77%	0,0003878764	0,0388%
2,013663315	7400,808947	11000	0,1084838715	11%	0,8915161285	89,15%	0,0004066051	0,0407%
2,013663315	7400,808947	11500	0,0881124967	9%	0,9118875033	91,19%	0,0004253454	0,0425%
2,013663315	7400,808947	12000	0,0708988540	7%	0,9291011460	92,91%	0,0004440968	0,0444%
2,013663315	7400,808947	12500	0,0565155464	6%	0,9434844536	94,35%	0,0004628590	0,0463%
2,013663315	7400,808947	13000	0,0446294341	4%	0,9553705659	95,54%	0,0004816314	0,0482%

2,013663315	7400,808947	13500	0,0349138208	3%	0,9650861792	96,51%	0,0005004136	0,0500%
2,013663315	7400,808947	14000	0,0270578835	3%	0,9729421165	97,29%	0,0005192054	0,0519%
2,013663315	7400,808947	14500	0,0207734527	2%	0,9792265473	97,92%	0,0005380063	0,0538%
2,013663315	7400,808947	15000	0,0157993786	2%	0,9842006214	98,42%	0,0005568161	0,0557%
2,013663315	7400,808947	15500	0,0119038075	1%	0,9880961925	98,81%	0,0005756345	0,0576%
2,013663315	7400,808947	16000	0,0088847359	1%	0,9911152641	99,11%	0,0005944612	0,0594%
2,013663315	7400,808947	16500	0,0065692246	1%	0,9934307754	99,34%	0,0006132959	0,0613%
2,013663315	7400,808947	17000	0,0048116379	0%	0,9951883621	99,52%	0,0006321384	0,0632%
2,013663315	7400,808947	17500	0,0034912371	0%	0,9965087629	99,65%	0,0006509885	0,0651%
2,013663315	7400,808947	18000	0,0025094104	0%	0,9974905896	99,75%	0,0006698459	0,0670%
2,013663315	7400,808947	18500	0,0017867691	0%	0,9982132309	99,82%	0,0006887105	0,0689%
2,013663315	7400,808947	19000	0,0012602828	0%	0,9987397172	99,87%	0,0007075821	0,0708%
2,013663315	7400,808947	19500	0,0008805802	0%	0,9991194198	99,91%	0,0007264605	0,0726%
2,013663315	7400,808947	20000	0,0006094944	0%	0,9993905056	99,94%	0,0007453455	0,0745%
2,013663315	7400,808947	20500	0,0004178968	0%	0,9995821032	99,96%	0,0007642369	0,0764%
2,013663315	7400,808947	21000	0,0002838347	0%	0,9997161653	99,97%	0,0007831346	0,0783%

No	A/C Registration	Electrical Conector Protective Broken	<i>Heatshield</i> Scrates	<i>Housing Adjuster</i> Crack	HP Fuell Inlet Broken	Total Kegagalan	% dari Total	2023	2024	2025
1	PK-GHA	2	0	0	0	2	3,6%	1	1	0
2	PK-GHC	1	1	1	0	3	5,5%	2	1	0
3	PK-GHD	1	1	1	0	3	5,5%	1	1	1
4	PK-GPC	2	0	1	0	3	5,5%	1	1	1
5	PK-GPF	2	2	0	0	4	7,3%	1	2	1
6	PK-GPL	2	1	1	0	4	7,3%	2	1	1
7	PK-GPM	2	1	1	1	5	9,1%	2	2	1
8	PK-GPO	4	0	0	1	5	9,1%	2	2	1
9	PK-GPT	0	3	1	1	5	9,1%	2	2	1
10	PK-GPU	3	1	0	0	4	7,3%	1	2	1
11	PK-GPV	3	0	2	0	5	9,1%	2	2	1
12	PK-GPW	5	0	0	0	5	9,1%	2	2	1
13	PK-GPX	3	1	0	1	5	9,1%	2	2	1
14	PK-GPZ	2	0	0	0	2	3,6%	1	1	0
	TOTAL	32	11	8	4	55	100,0%	22	22	11

Lampiran M Instrumen Wawancara Validasi Ahli

INSTRUMEN WAWANCARA VALIDASI AHLI

ANALISIS KEANDALAN FUEL METERING UNIT PADA ENGINE TRENT 700
PESAWAT AIRBUS A330-300 DI PT.GMF AEROASIA

A. IDENTITAS NARASUMBER

Nama Lengkap :

Institusi / Instansi :

Jabatan / Posisi :

Tanggal Wawancara :

B. PETUNJUK WAWANCARA

Form wawancara ini digunakan untuk menggali akar penyebab (root cause) terjadinya unscheduled removal Fuel Metering Unit (FMU) Part Number 702-03 pada pesawat Airbus A330-300 di PT GMF AeroAsia, Tbk. Jawaban responden akan dianalisis Menggunakan metode FMEA guna mengetahui potensi kegagalan , dampak kegagalan dan rekomendasi perbaikan

Dosen Pembimbing,



Lilies Esthi Riyanti, S.SiT., MT
NIP. 19820720 200502 2 001

Validator,



Agus Hermawan, S.ST., MT
NIP. 583148

Lampiran M Instrumen Wawancara Validasi Ahli (lanjutan)

Referensi:

- [1] Mohamad Khanlo, H., & Mohammad Mahmodi Kohan, A. (2022). *Failure Mode and Effects Analysis on the Hydraulic System of Aircraft Ilyushin-76*. International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application, 5(1), 49-58. <https://doi.org/10.30699/IJRRS.5.1.7>
- [2] Luo, X. N., & Yang, Y. (2017). *Reliability Analysis for the Hydraulic Booster Control Surface of Aircraft*. Journal of Aircraft. <https://doi.org/10.2514/1.C033500>
- [3] Federal Aviation Administration (FAA). (2015). *System Safety Handbook: Reliability and Risk Assessment in Aircraft Systems*. U.S. Department of Transportation.
- [4] SKYbrary Aviation Safety. (2024). *Engine Fuel Control Systems and In-Flight Shutdown Risks*. SKYbrary.
- [5] European Aviation Safety Agency (EASA). (2021). *Certification Specifications for Engines (CS-E): Engine Fuel and Control Systems Failure Analysis*. EASA.
- [6] Deshmukh, Y., Mishra, A. K., Mane, S., Gupta, R., & Kunjir, V. (2024). *Effect of failure mode causing in aerospace manufacturing industries and its applications: Conceptual approach*. AIP Conference Proceedings, 3037(1), 020024. <https://doi.org/10.1063/5.0196289>
- [7] Analisristianti, S. (2024). *Analisis Keandalan Fuel Nozzle Airbus A320neo Menggunakan Distribusi Weibull dan FMEA di PT XYZ*

Lampiran M Instrumen Wawancara Validasi Ahli (lanjutan)

Variabel	Kerusakan	Responden	Bentuk Instrumen	Bentuk Pertanyaan	Validasi			Keterangan
					Relevan	Cukup Relevan	Tidak Relevan	
	Electrical Connector Protective Broken		Wawancara tidak terstruktur	1. Faktor apa yang menyebabkan Electrical Connector Protective Broken?	✓			Data kegagalan terdapat di AFML
				2. Apa dampak yang terjadi jika Electrical Connector Protective Broken?	✓			
				3. Apa rekomendasi perbaikan untuk kerusakan Electrical Connector Protective Broken?	✓			

Lampiran M Instrumen Wawancara Validasi Ahli (lanjutan)

Variabel	Kerusakan	Responden	Bentuk Instrumen	Bentuk Pertanyaan	Validasi			Keterangan
					Relevan	Cukup Relevan	Tidak Relevan	
	Heatshield Scratches			1. Faktor apa yang menyebabkan Heatshield Scratches?	✓			
				2. Apa dampak yang terjadi jika Heatshield Scratches?	✓			
				3. Apa rekomendasi perbaikan untuk kerusakan Heatshield Scratches?	✓			

Lampiran M Instrumen Wawancara Validasi Ahli (lanjutan)

Variabel	Kerusakan	Responden	Bentuk Instrumen	Bentuk Pertanyaan	Validasi			Keterangan
					Relevan	Cukup Relevan	Tidak Relevan	
	Housing Adjuster Crack		Wawancara tidak terstruktur	1. Faktor apa yang menyebabkan Housing Adjuster Crack?	✓			Data kegagalan terdapat di AFML
				2. Apa dampak yang terjadi jika Housing Adjuster Crack?	✓			
				3. Apa rekomendasi perbaikan untuk kerusakan Housing Adjuster Crack?	✓			

Lampiran M Instrumen Wawancara Validasi Ahli (lanjutan)

Variabel	Kerusakan	Responden	Bentuk Instrumen	Bentuk Pertanyaan	Validasi			Keterangan
					Relevan	Cukup Relevan	Tidak Relevan	
	HP Fuel Inlet Broken			1. Faktor yang menyebabkan timbulnya HP Fuel Inlet Broken?	✓			
				2. Apa dampak yang terjadi jika HP Fuel Inlet Broken?	✓			
				3. Apa rekomendasi perbaikan untuk kerusakan HP Fuel Inlet Broken?	✓			

Lampiran N Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*)

IDENTITAS RESPONDEN

Nama :
 Jenis Kelamin :
 Usia :
 Pendidikan Terakhir :
 Perusahaan :
 Jabatan :
 Masa Kerja :

KUESIONER PENILAIAN FMEA

Petunjuk Kriteria Pengisian Kuesioner

1. Tingkat Keparahan (*Severity*)

Severity adalah sebuah penilaian terhadap tingkat keseriusan suatu efek atau akibat dari potensi kegagalan pada suatu sistem yang berpengaruh pada suatu hasil kerja sistem. Severity dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Keparahan	Tingkat keparahan	Peringkat
Sangat bahaya, Kegagalan terjadi tanpa ada peringatan	Sangat berbahaya dan berpengaruh terhadap keselamatan dan tanpa ada kerusakan sebelum kegagalan terjadi	10
Bahaya dengan tanda – tanda	Efeknya serius dan berdampak terhadap keselamatan dan terdapat peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	9
Ekstrem	Berdampak terhadap performa pesawat sehingga tidak dapat dioperasikan	8
Sangat tinggi	Berpengaruh terhadap performa pesawat tetapi pesawat masih bisa dioperasikan	7
Tinggi	Pesawat bisa beroperasi tetapi, terdapat gangguan kecil dan terdapat komponen yang tidak berfungsi	6
Sedang	berpengaruh terhadap performa pesawat serta komponen pengikutnya	5
Rendah	Pesawat tetap beroperasi dengan tanda kerusakan, sehingga membutuhkan perbaikan	4

**Lampiran N Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*)
(lanjutan)**

Kecil	pesawat bisa digunakan dengan baik namun terdapat sedikit gangguan berupa tanda kerusakan sistem	3
Sangat kecil	Apakah pesawat dapat digunakan dengan baik namun masih ada gangguan berupa tanda kerusakan sistem yang lebih sedikit	2
Tidak ada dampak	Apakah tidak ada dampak terhadap pesawat	1

2. Tingkat Kejadian (*Occurrence*)

Occurrence adalah kemungkinan probabilitas terjadinya risiko. Rating Occurrence seperti pada tabel berikut.

Peluang terjadi kegagalan	Tingkat kemungkinan kegagalan	Peringkat
Sangat tinggi dan ekstrem; kegagalan hampir tak terhindarkan	1 dari 2	10
Sangat tinggi; kegagalan berhubungan dengan proses yang gagal sebelumnya	1 dari 3	9
Tinggi; kegagalan terus berulang	1 dari 8	8
Relatif tinggi	1 dari 20	7
Cenderung tinggi	1 dari 80	6
Sedang	1 dari 200	5
Relatif rendah	1 dari 1000	4
Rendah	1 dari 5.000	3
Sangat rendah	1 dari 10,000	2
Hampir tidak mungkin terjadi kegagalan	1 dari 100,000	1

Lampiran N Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) (lanjutan)

3. Tingkat Deteksi (*Detection*)

Detection adalah sebuah penilaian terhadap tingkat kemudahan mendeteksi suatu potensi kegagalan. Penilaian tingkat detection sangat penting dalam menemukan potensi penyebab kegagalan yang menimbulkan kerusakan. Detection dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Kemungkinan kegagalan terdeteksi	Kriteria berdasarkan tancangan pengendalian saat ini	Peringkat
Hampir mustahil	Tidak terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	10
Sangat Kecil	Terdapat sangat sedikit kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	9
Kecil	Terdapat sedikit, terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	8
Sangat rendah	Terdapat kendali tetapi sangat rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	7
Rendah	Terdapat kendali tetapi rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	6
Sedang	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang/cukup untuk mendeteksi potensi kegagalan	5
Agak tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang cenderung tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	4
Tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	3
Sangat tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sangat tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	2
Hampir pasti	Kendali hampir pasti dapat mendeteksi potensi kegagalan	1

**Lampiran N Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*)
(lanjutan)**

4. Kolom Nilai S O D

Setelah membaca kriteria di atas, mohon isi nilai S, O, dan D untuk setiap modus kegagalan pada Lembar Wawancara Penelitian di halaman berikutnya, dengan format sebagai berikut.

KRITERIA	NILAI
Severity	
Occurrence	
Detection	

Dosen Pembimbing,



Lilies Esthi Rivanti, S.SiT., MT
NIP. 19820720 200502 2 001

Validator,



Agus Hermawan, S.ST., MT
NIP. 583148

Lampiran N Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*)
(lanjutan)

LEMBAR KUISIONER

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Electrical Connector Protective Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)			
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Electrical Connector Protective Broken? (D)			
Heatshield Scratches	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Heatshield Scratches Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)			
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Heatshield Scratches? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Heatshield Scratches? (D)			

Lampiran N Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*)
(lanjutan)

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Housing Adjuster Crack	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Housing Adjuster Crack Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)			
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Housing Adjuster Crack? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Housing Adjuster Crack? (D)			
HP Fuel Inlet Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)			
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken? (O)			

**Lampiran N Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*)
(lanjutan)**

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat HP Fuel Inlet Broken? (D)			

Reff : Data pada tabel Risk tersebut diperoleh dari data Engineering PT GMF AeroAsia, Maintenance Manual dan hasil wawancara dengan teknisi pemegang type rating pesawat Airbus A330 series di PT GMF AeroAsia, Tbk.

Note : Nilai Occurrence diambil dari data unschedule removal.

Tangerang,

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 1

INSTRUMEN WAWANCARA

ANALISIS KEANDALAN FUEL METERING UNIT PADA ENGINE TRENT 700
PESAWAT AIRBUS A330-300 DI PT.GMF AEROASIA

A. IDENTITAS NARASUMBER

Nama Lengkap : Ariski Nugroho
Institusi / Instansi : PT GMF AeroAsia
Jabatan / Posisi : Aircraft Maintenance Engineer
Tanggal Wawancara : Sabtu, 08 Agustus 2026

B. PETUNJUK WAWANCARA

Form wawancara ini digunakan untuk menggali akar penyebab (root cause) terjadinya unscheduled removal Fuel Metering Unit (FMU) Part Number 702-03 pada pesawat Airbus A330-300 di PT GMF AeroAsia. Tbk. Jawaban responden akan dianalisis Menggunakan metode FMEA guna mengetahui potensi kegagalan, dampak kegagalan dan rekomendasi perbaikan

Referensi:

- [1] Mohamad Khanlo, H., & Mohammad Mahmodi Kohan, A. (2022). *Failure Mode and Effects Analysis on the Hydraulic System of Aircraft Ilushin-76*. International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application, 5(1), 49-58. <https://doi.org/10.30699/IJRRS.5.1.7>
- [2] Luo, X. N., & Yang, Y. (2017). *Reliability Analysis for the Hydraulic Booster Control Surface of Aircraft*. Journal of Aircraft. <https://doi.org/10.2514/1.C033500>
- [3] Federal Aviation Administration (FAA). (2015). *System Safety Handbook: Reliability and Risk Assessment in Aircraft Systems*. U.S. Department of Transportation.
- [4] SKYbrary Aviation Safety. (2024). *Engine Fuel Control Systems and In-Flight Shutdown Risks*. SKYbrary.
- [5] European Aviation Safety Agency (EASA). (2021). *Certification Specifications for Engines (CS-E) Engine Fuel and Control Systems Failure Analysis*. EASA.

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 1 (lanjutan)

LEMBAR WAWANCARA

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
Electrical Connector (interface FMU-EEC)	Electrical Connector Protective Broken	Gedaran engine terus menerus pada area gearbox	Sealing konektor menjadi hilang sehingga terminal terpapar ketembakan dan debris	Penggantian Protective konektor

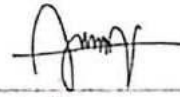
Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 1 (lanjutan)

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
FMU Housing Adjuster	Housing Adjuster Crack	Overtorque pada saat pemasangan housing adjuster	Kebocoran bahan bakar (Fuel) Pada FMU	Melakukan NDT pada saat komponen masuk Shop Agar Mengetahui bisa direpair atau tidak
HP Inlet Fuel	HP Inlet Fuel Broken	Fatigue pada sambungan flange karena pressure berulang	Supply bahan bakar menuju combustion tidak sesuai	Leak Check Melakukan leak check jika masih leak dilakukan penggantian part

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 1 (lanjutan)

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
Heatshield	Heatshield Scratches	Sering dilepas dan pasang sehingga menjadi heat shield scratches	Temperatur engine menjadi naik karena salah membaca perineah	Ganti heatshield

Tangerang, 08 Agustus 2026



Ariski Nugroho

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 2

INSTRUMEN WAWANCARA

ANALISIS KEANDALAN FUEL METERING UNIT PADA ENGINE TRENT 700
PESAWAT AIRBUS A330-300 DI PT.GMF AEROASIA

A. IDENTITAS NARASUMBER

Nama Lengkap : Dwi Septyo Budiatno
Institusi / Instansi : PT GMF AeroAsia
Jabatan / Posisi : Aircraft Maintenance Engineer
Tanggal Wawancara : Sabtu, 08 Agustus 2026

B. PETUNJUK WAWANCARA

Form wawancara ini digunakan untuk menggali akar penyebab (root cause) terjadinya unscheduled removal Fuel Metering Unit (FMU) Part Number 702-03 pada pesawat Airbus A330-300 di PT GMF AeroAsia, Tbk. Jawaban responden akan dianalisis Menggunakan metode FMEA guna mengetahui potensi kegagalan, dampak kegagalan dan rekomendasi perbaikan

Referensi:

- [1] Mohamad Khanlo, H., & Mohammad Mahmodi Kohan, A. (2022). *Failure Mode and Effects Analysis on the Hydraulic System of Aircraft Ilyushin-76*. International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application, 5(1), 49-58. <https://doi.org/10.30699/IJRRS.5.1.7>
- [2] Luo, X. N., & Yang, Y. (2017). *Reliability Analysis for the Hydraulic Booster Control Surface of Aircraft*. Journal of Aircraft. <https://doi.org/10.2514/1.C033500>
- [3] Federal Aviation Administration (FAA). (2015). *System Safety Handbook: Reliability and Risk Assessment in Aircraft Systems*. U.S. Department of Transportation.
- [4] SKYbrary Aviation Safety. (2024). *Engine Fuel Control Systems and In-Flight Shutdown Risks*. SKYbrary.
- [5] European Aviation Safety Agency (EASA). (2021). *Certification Specifications for Engines (CS-E): Engine Fuel and Control Systems Failure Analysis*. EASA.

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 2 (lanjutan)

LEMBAR WAWANCARA

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
Electrical Connector (interface FMU-EEC)	Electrical Connector Protective Broken	Gedaton engine terus-menerus pada gearbox	Sinyal menuju EEC tidak terdara	Penggantian Electrical Protective Connector

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 2 (lanjutan)

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
FMU Housing Adjuster	Housing Adjuster Crack	Over torque pada saat pemasangan housing adjuster	Fuel flow tidak akurat terhadap perintah FCC sehingga tidak terbaca ECAM	Penggantian housing
HP Fuel Inlet	HP Fuel Inlet Broken	Pemasangannya terlambat teknisi tidak sesuai prosedur sehingga inlet portnya menjadi Stress	Kebocoran bahan bakar di area engine sehingga berpotensi menjadi fire hazard	Penggantian HP fuel inlet port

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 2 (lanjutan)

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
Heatshield	Heatshield Scrunches	Berubah bentuk karena memuai akibat panas dari engine	Kebocoran bahan bakar di area engine	Mengganti Heatshield

Tangerang, 08 Agustus 2026



Dani Septyo Budiatno

Lampiran O Biodata Pegawai Narasumber



Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 3 (Asep Rifai)

INSTRUMEN WAWANCARA

ANALISIS KEANDALAN FUJL METERING UNIT PADA ENGINE TRENT 700
PESEAWAT AIRBUS A330-300 DI PT GMF AeroAsia

A. IDENTITAS NARASUMBER

Nama Lengkap : Asep Rifai
Institusi / Instansi : PT GMF AeroAsia
Jabatan / Posisi : Aircraft Maintenance Engineer
Tanggal Wawancara : Sabtu, 08 Agustus 2026

B. PETUNJUK WAWANCARA

Form wawancara ini digunakan untuk menggali akar penyebab (root cause) terjadinya unscheduled removal Fuel Metering Unit (FMU) Part Number 702-03 pada pesawat Airbus A330-300 di PT GMF AeroAsia, Tbk. Jawaban responden akan dianalisis Menggunakan metode FMEA guna mengahai potensi kegagalan , dampak kegagalan dan rekomendasi perbaikan

Referensi:

- [1] Mohamad Khario, H., & Mohammad Mahmodi Kohan, A. (2022). *Failure Mode and Effects Analysis on the Hydraulic System of Aircraft Ilyushin-76*. International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application, 5(1), 49-58. <https://doi.org/10.30699/IJRRS.5.1.7>
- [2] Luo, X. N., & Yang, Y. (2017). *Reliability Analysis for the Hydraulic Booster Control Surface of Aircraft*. Journal of Aircraft. <https://doi.org/10.2514/1.C033500>
- [3] Federal Aviation Administration (FAA). (2015). *System Safety Handbook: Reliability and Risk Assessment in Aircraft Systems*. U.S. Department of Transportation.
- [4] SKYbrary Aviation Safety. (2024). *Engine Fuel Control Systems and In-Flight Shutdown Risks*. SKYbrary.
- [5] European Aviation Safety Agency (EASA). (2021). *Certification Specifications for Engines (CS-E): Engine Fuel and Control Systems Failure Analysis*. EASA.

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 3 (Asep Rifai) (lanjutan)

LEMBAR WAWANCARA

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
Electrical Connector (interface FMU-EEC)	Electrical Connector Protective Broken	Beban mekanis berlebih pada Saat Pelepasan dan Pemasangan harness	Sinyal menuju EEC tidak terbaca	Penyambungan Electrical Protective Connector

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 3 (Asep Rifai) (lanjutan)

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
FMU Housing Adjuster	Housing Adjuster Crack	Korosi pada housing karena kelembapan	Kebocoran fuel	Penggantian housing
HP Fuel Inlet	HP Fuel Inlet Broken	Pemasangan HP Fuel Inlet terkadung over torque sehingga menyebabkan crack	Kebocoran dimana bahan bakar di area engine	Melakukan leak check jika masih ditemukan maka dilakukan Penggantian HP Fuel Inlet

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 3 (Asep Rifai) (lanjutan)

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
Heatsield	Heatsield Scratches	Gesekan dengan clamp dan bracket akibat getaran engine	Fungsi Proteksi: thermal tidak terbaca ECAP	Penggantian heat shield

Tangerang, 08 Agustus 2026



Asep Rifai

Lampiran O Biodata Pegawai Narasumber



Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 4 (Fakhmi Reza)

INSTRUMEN WAWANCARA

ANALISIS KECENDERUNGAN TETAP METERING UNIT PADA ENGINE TRENT 700
PESAWAT AIRBUS A330-300 (DI PT GMF AeroAsia)

A. IDENTITAS NARASUMBER

Nama Lengkap : Fakhmi Reza
Institusi / Instansi : PT GMF AeroAsia
Jabatan / Posisi : Aircraft Maintenance Engineer
Tanggal Wawancara : Sabtu, 08 Agustus 2026

B. PETUNJUK WAWANCARA

Form wawancara ini digunakan untuk menggali akar penyebab (root cause) terjadinya unscheduled removal Fuel Metering Unit (FMU) Part Number 702-03 pada pesawat Airbus A330-300 di PT GMF AeroAsia, Tbk. Jawaban responden akan dianalisis Menggunakan metode FMEA guna mengetahui potensi kegagalan, dampak kegagalan dan rekomendasi perbaikan

Referensi:

- [1] Mohamad Khario, H., & Mohammad Mahmodi Kohan, A. (2022). *Failure Mode and Effects Analysis on the Hydraulic System of Aircraft Ilushin-76*. International Journal of Reliability, Risk and Safety, Theory and Application, 5(1), 49-58. <https://doi.org/10.30699/IJRRS.5.1.7>
- [2] Luo, X. N., & Yang, Y. (2017). *Reliability Analysis for the Hydraulic Booster Control Surface of Aircraft*. Journal of Aircraft. <https://doi.org/10.2514/1.C033500>
- [3] Federal Aviation Administration (FAA). (2015). *System Safety Handbook: Reliability and Risk Assessment in Aircraft Systems*. U.S. Department of Transportation.
- [4] SKYbrary Aviation Safety. (2024). *Engine Fuel Control Systems and In-Flight Shutdown Risks*. SKYbrary.
- [5] European Aviation Safety Agency (EASA). (2021). *Certification Specifications for Engines (CS-E): Engine Fuel and Control Systems Failure Analysis*. EASA.

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 4 (lanjutan)

LEMBAR WAWANCARA

Nama Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
Electrical Connector Interface TM 41x	Electrical Connector Protective Hooker	Material Pelindung jak gelas karena terdapat dingin beruntang	Electrical Connector mag. & kendor sehingga tidak terbacu EEC	Ganti Electrical Protective Connector

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 4 (lanjutan)

Subs Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab Kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
FMU Housing Adjuster	Housing Adjuster Crack	Fatigue terhadap getaran dan tekanan aliran fuel	Penurunan performa thrust menimbulkan engine surge	Penggantian housing
HP Inlet Fuel	HP Inlet Fuel Broken	Fatigue pada sambungan flange	Kebocoran bahan bakar di area engine	Leak check setelah Remagungan

Lampiran O Lembar Wawancara FMEA - Narasumber 4 (lanjutan)

Sub Komponen	Mode Kegagalan Potensial	Potensi Penyebab kegagalan	Potensi Dampak Kegagalan	Tindakan yang Direkomendasikan
Heatshield	Heatshield Scrunches	Gesekan dengan bracket akibat getaran engine	§ Temperatur engine menjadi naik	Mengganti heatsteel

Tangerang, 08 Agustus 2026



Fakhmi Rezo

Lampiran O Biodata Pegawai Narasumber

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA

IDENTITAS RESPONDEN

Nama : **ARISKI MUGROHO**
 Jenis Kelamin : **LAKI-LAKI**
 Usia : **30 TAHUN**
 Pendidikan Terakhir : **S1**
 Perusahaan : **GMF AEROSIA**
 Jabatan : **PROJECT LEADER /AME**
 Masa Kerja : **11 TAHUN**

KUESIONER PENILAIAN FMEA

Petunjuk Kriteria Pengisian Kuesioner

1. Tingkat Keparahahan (*Severity*)

Severity adalah sebuah penilaian terhadap tingkat keseriusan suatu efek atau akibat dari potensi kegagalan pada suatu sistem yang berpengaruh pada suatu hasil kerja sistem. Severity dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Keparahan	Tingkat keparahan	Peringkat
Sangat bahaya, Kegagalan terjadi tanpa ada peringatan	Sangat berbahaya dan berpengaruh terhadap keselamatan dan tanpa ada peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	10
Bahaya dengan tanda – tanda	Efeknya serius dan berdampak terhadap keselamatan dan terdapat peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	9
Ekstrem	Berdampak terhadap performa pesawat sehingga tidak dapat dioperasikan	8
Sangat tinggi	Berpengaruh terhadap performa pesawat tetapi pesawat masih bisa dioperasikan	7
Tinggi	Pesawat bisa beroperasi tetapi, terdapat gangguan kecil dan terdapat komponen yang tidak berfungsi	6
Sedang	berpengaruh terhadap performa pesawat serta komponen pengikutnya	5
Rendah	Pesawat tetap beroperasi dengan tanda kerusakan, sehingga membutuhkan perbaikan	4

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 1 (lanjutan)

Kecil	pesawat bisa digunakan dengan baik namun terdapat sedikit gangguan berupa tanda kerusakan sistem	3
Sangat kecil	Apakah pesawat dapat digunakan dengan baik namun masih ada gangguan berupa tanda kerusakan sistem yang lebih sedikit	2
Tidak ada dampak	Apakah tidak ada dampak terhadap pesawat	1

2. Tingkat Kejadian (*Occurrence*)

Occurrence adalah kemungkinan probabilitas terjadinya risiko. Rating Occurrence seperti pada tabel berikut.

Peluang terjadi kegagalan	Tingkat kemungkinan kegagalan	Peringkat
Sangat tinggi dan ekstrem; kegagalan hampir tak terhindarkan	1 dari 2	10
Sangat tinggi; kegagalan berhubungan dengan proses yang gagal sebelumnya	1 dari 3	9
Tinggi: kegagalan terus berulang	1 dari 8	8
Relatif tinggi	1 dari 20	7
Cenderung tinggi	1 dari 80	6
Sedang	1 dari 200	5
Relatif rendah	1 dari 1000	4
Rendah	1 dari 5.000	3
Sangat rendah	1 dari 10,000	2
Hampir tidak mungkin terjadi kegagalan	1 dari 100,000	1

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 1 (lanjutan)

3. Tingkat Deteksi (*Detection*)

Detection adalah sebuah penilaian terhadap tingkat kemudahan mendeteksi suatu potensi kegagalan. Penilaian tingkat detection sangat penting dalam menemukan potensi penyebab kegagalan yang menimbulkan kerusakan. Detection dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Kemungkinan kegagalan terdeteksi	Kriteria berdasarkan rancangan pengendalian saat ini	Peringkat
Hampir mustahil	Tidak terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	10
Sangat Kecil	Terdapat sangat sedikit kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	9
Kecil	Terdapat sedikit, terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	8
Sangat rendah	Terdapat kendali tetapi sangat rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	7
Rendah	Terdapat kendali tetapi rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	6
Sedang	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang/cukup untuk mendeteksi potensi kegagalan	5
Agak tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang cenderung tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	4
Tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	3
Sangat tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sangat tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	2
Hampir pasti	Kendali hampir pasti dapat mendeteksi potensi kegagalan	1

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 1 (lanjutan)

4. Kolom Nilai S O D

Setelah membaca kriteria di atas, mohon isi nilai S, O, dan D untuk setiap modus kegagalan pada Lembar Wawancara Penelitian di halaman berikutnya, dengan format sebagai berikut.

KRITERIA	NILAI
Severity	
Occurrence	
Detection	

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 1 (lanjutan)

LEMBAR KUISIONER

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Electrical Connector Protective Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	7	6	4
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Electrical Connector Protective Broken? (D)			
Heatshield Scratches	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Heatshield Scratches Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	4	4	3
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Heatshield Scratches? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Heatshield Scratches? (D)			

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 1 (lanjutan)

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Housing Adjuster Crack	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Housing Adjuster Crack Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	7	3	5
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Housing Adjuster Crack? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Housing Adjuster Crack? (D)			
HP Fuel Inlet Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	8	2	4
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken? (O)			

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 1 (lanjutan)

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat HP Fuel Inlet Broken? (D)			

Reff : Data pada tabel Risk tersebut diperoleh dari data Engineering PT GMF AeroAsia, Maintenance Manual dan hasil wawancara dengan teknisi pemegang type rating pesawat Airbus A330 series di PT GMF AeroAsia, Tbk.

Note : Nilai Occurrence diambil dari data unschedule removal.

Tangerang, 08 Agustus 2026


ARISKI NUGROHO / 581423

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 2

IDENTITAS RESPONDEN

Nama : DWI SEPTYO BUDIRATNO
 Jenis Kelamin : LAKI - LAKI
 Usia : 36 TAHUN
 Pendidikan Terakhir : S2
 Perusahaan : CMF AEROASIA
 Jabatan : AIRCRAFT MAINTENANCE ENGINEER / AME
 Masa Kerja : 12 TAHUN

KUESIONER PENILAIAN FMEA

Petunjuk Kriteria Pengisian Kuesioner

1. Tingkat Keparahahan (*Severity*)

Severity adalah sebuah penilaian terhadap tingkat keseriusan suatu efek atau akibat dari potensi kegagalan pada suatu sistem yang berpengaruh pada suatu hasil kerja sistem. Severity dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Keparahan	Tingkat keparahan	Peringkat
Sangat bahaya, Kegagalan terjadi tanpa ada peringatan	Sangat berbahaya dan berpengaruh terhadap keselamatan dan tanpa ada peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	10
Bahaya dengan tanda – tanda	Efeknya serius dan berdampak terhadap keselamatan dan terdapat peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	9
Ekstrem	Berdampak terhadap performa pesawat sehingga tidak dapat dioperasikan	8
Sangat tinggi	Berpengaruh terhadap performa pesawat tetapi pesawat masih bisa dioperasikan	7
Tinggi	Pesawat bisa beroperasi tetapi, terdapat gangguan kecil dan terdapat komponen yang tidak berfungsi	6
Sedang	berpengaruh terhadap performa pesawat serta komponen pengikutnya	5
Rendah	Pesawat tetap beroperasi dengan tanda kerusakan, sehingga membutuhkan perbaikan	4

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 2 (lanjutan)

Kecil	pesawat bisa digunakan dengan baik namun terdapat sedikit gangguan berupa tanda kerusakan sistem	3
Sangat kecil	Apakah pesawat dapat digunakan dengan baik namun masih ada gangguan berupa tanda kerusakan sistem yang lebih sedikit	2
Tidak ada dampak	Apakah tidak ada dampak terhadap pesawat	1

2. Tingkat Kejadian (*Occurrence*)

Occurrence adalah kemungkinan probabilitas terjadinya risiko. Rating Occurrence seperti pada tabel berikut.

Peluang terjadi kegagalan	Tingkat kemungkinan kegagalan	Peringkat
Sangat tinggi dan ekstrem; kegagalan hampir tak terhindarkan	1 dari 2	10
Sangat tinggi; kegagalan berhubungan dengan proses yang gagal sebelumnya	1 dari 3	9
Tinggi: kegagalan terus berulang	1 dari 8	8
Relatif tinggi	1 dari 20	7
Cenderung tinggi	1 dari 80	6
Sedang	1 dari 200	5
Relatif rendah	1 dari 1000	4
Rendah	1 dari 5.000	3
Sangat rendah	1 dari 10,000	2
Hampir tidak mungkin terjadi kegagalan	1 dari 100,000	1

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 2 (lanjutan)

3. Tingkat Deteksi (*Detection*)

Detection adalah sebuah penilaian terhadap tingkat kemudahan mendeteksi suatu potensi kegagalan. Penilaian tingkat detection sangat penting dalam menemukan potensi penyebab kegagalan yang menimbulkan kerusakan. Detection dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Kemungkinan kegagalan terdeteksi	Kriteria berdasarkan rancangan pengendalian saat ini	Peringkat
Hampir mustahil	Tidak terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	10
Sangat Kecil	Terdapat sangat sedikit kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	9
Kecil	Terdapat sedikit, terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	8
Sangat rendah	Terdapat kendali tetapi sangat rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	7
Rendah	Terdapat kendali tetapi rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	6
Sedang	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang/cukup untuk mendeteksi potensi kegagalan	5
Agak tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang cenderung tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	4
Tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	3
Sangat tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sangat tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	2
Hampir pasti	Kendali hampir pasti dapat mendeteksi potensi kegagalan	1

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 2 (lanjutan)

4. Kolom Nilai S O D

Setelah membaca kriteria di atas, mohon isi nilai S, O, dan D untuk setiap modus kegagalan pada Lembar Wawancara Penelitian di halaman berikutnya, dengan format sebagai berikut.

KRITERIA	NILAI
Severity	
Occurrence	
Detection	

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 2 (lanjutan)

LEMBAR KUISIONER

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Electrical Connector Protective Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	6	7	5
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Electrical Connector Protective Broken? (D)			
Heatshield Scratches	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Heatshield Scratches Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	5	3	4
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Heatshield Scratches? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Heatshield Scratches? (D)			

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 2 (lanjutan)

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Housing Adjuster Crack	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Housing Adjuster Crack Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	8	4	6
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Housing Adjuster Crack? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Housing Adjuster Crack? (D)			
HP Fuel Inlet Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	9	3	5
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken? (O)			

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 2 (lanjutan)

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat HP Fuel Inlet Broken? (D)			

Reff : Data pada tabel Risk tersebut diperoleh dari data Engineering PT GMF AeroAsia, Maintenance Manual dan hasil wawancara dengan teknisi pemegang type rating pesawat Airbus A330 series di PT GMF AeroAsia, Tbk.

Note : Nilai Occurrence diambil dari data unschedule removal.

Tangerang, 08 Agustus 2026



DWI SEPTYO BUDIATNO

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 3

IDENTITAS RESPONDEN

Nama : ASEP RIFA I
 Jenis Kelamin : LAKI - LAKI
 Usia : 34 TAHUN
 Pendidikan Terakhir : S1
 Perusahaan : CME AERODASIA
 Jabatan : AIRCRAFT MAINTENANCE ENGINEER / AME
 Masa Kerja : 16 TAHUN

KUESIONER PENILAIAN FMEA

Petunjuk Kriteria Pengisian Kuesioner

1. Tingkat Keparahahan (*Severity*)

Severity adalah sebuah penilaian terhadap tingkat keseriusan suatu efek atau akibat dari potensi kegagalan pada suatu sistem yang berpengaruh pada suatu hasil kerja sistem. Severity dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Keparahan	Tingkat keparahan	Peringkat
Sangat bahaya, Kegagalan terjadi tanpa ada peringatan	Sangat berbahaya dan berpengaruh terhadap keselamatan dan tanpa ada peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	10
Bahaya dengan tanda – tanda	Efeknya serius dan berdampak terhadap keselamatan dan terdapat peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	9
Ekstrem	Berdampak terhadap performa pesawat sehingga tidak dapat dioperasikan	8
Sangat tinggi	Berpengaruh terhadap performa pesawat tetapi pesawat masih bisa dioperasikan	7
Tinggi	Pesawat bisa beroperasi tetapi, terdapat gangguan kecil dan terdapat komponen yang tidak berfungsi	6
Sedang	berpengaruh terhadap performa pesawat serta komponen pengikutnya	5
Rendah	Pesawat tetap beroperasi dengan tanda kerusakan, sehingga membutuhkan perbaikan	4

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 3 (lanjutan)

Kecil	pesawat bisa digunakan dengan baik namun terdapat sedikit gangguan berupa tanda kerusakan sistem	3
Sangat kecil	Apakah pesawat dapat digunakan dengan baik namun masih ada gangguan berupa tanda kerusakan sistem yang lebih sedikit	2
Tidak ada dampak	Apakah tidak ada dampak terhadap pesawat	1

2. Tingkat Kejadian (*Occurrence*)

Occurrence adalah kemungkinan probabilitas terjadinya risiko. Rating Occurrence seperti pada tabel berikut.

Peluang terjadi kegagalan	Tingkat kemungkinan kegagalan	Peringkat
Sangat tinggi dan ekstrem; kegagalan hampir tak terhindarkan	1 dari 2	10
Sangat tinggi; kegagalan berhubungan dengan proses yang gagal sebelumnya	1 dari 3	9
Tinggi; kegagalan terus berulang	1 dari 8	8
Relatif tinggi	1 dari 20	7
Cenderung tinggi	1 dari 80	6
Sedang	1 dari 200	5
Relatif rendah	1 dari 1000	4
Rendah	1 dari 5.000	3
Sangat rendah	1 dari 10,000	2
Hampir tidak mungkin terjadi kegagalan	1 dari 100,000	1

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 3 (lanjutan)

3. Tingkat Deteksi (*Detection*)

Detection adalah sebuah penilaian terhadap tingkat kemudahan mendeteksi suatu potensi kegagalan. Penilaian tingkat detection sangat penting dalam menemukan potensi penyebab kegagalan yang menimbulkan kerusakan. Detection dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Kemungkinan kegagalan terdeteksi	Kriteria berdasarkan rancangan pengendalian saat ini	Peringkat
Hampir mustahil	Tidak terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	10
Sangat Kecil	Terdapat sangat sedikit kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	9
Kecil	Terdapat sedikit, terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	8
Sangat rendah	Terdapat kendali tetapi sangat rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	7
Rendah	Terdapat kendali tetapi rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	6
Sedang	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang/cukup untuk mendeteksi potensi kegagalan	5
Agak tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang cenderung tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	4
Tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	3
Sangat tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sangat tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	2
Hampir pasti	Kendali hampir pasti dapat mendeteksi potensi kegagalan	1

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 3 (lanjutan)

4. Kolom Nilai S O D

Setelah membaca kriteria di atas, mohon isi nilai S, O, dan D untuk setiap modus kegagalan pada Lembar Wawancara Penelitian di halaman berikutnya, dengan format sebagai berikut.

KRITERIA	NILAI
Severity	
Occurrence	
Detection	

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 3 (lanjutan)

LEMBAR KUISIONER

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Electrical Connector Protective Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	7	6	4
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Electrical Connector Protective Broken? (D)			
Heatshield Scratches	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Heatshield Scratches Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	4	4	2
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Heatshield Scratches? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Heatshield Scratches? (D)			

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 3 (lanjutan)

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Housing Adjuster Crack	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Housing Adjuster Crack Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	1	3	5
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Housing Adjuster Crack? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Housing Adjuster Crack? (D)			
HP Fuel Inlet Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	2	2	4
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken? (O)			

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 3 (lanjutan)

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat HP Fuel Inlet Broken? (D)			

Reff : Data pada tabel Risk tersebut diperoleh dari data Engineering PT GMF AeroAsia, Maintenance Manual dan hasil wawancara dengan teknisi pemegang type rating pesawat Airbus A330 series di PT GMF AeroAsia, Tbk.

Note : Nilai Occurrence diambil dari data unschedule removal.

Tangerang, 08 Agustus 2026


Asep Rifa'i

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 4

IDENTITAS RESPONDEN

Nama : Fakhmi Reza
 Jenis Kelamin : Laki - Laki
 Usia : 34
 Pendidikan Terakhir : S1
 Perusahaan : PT. GMF AeroAsia
 Jabatan : A/C Maint. Engineer
 Masa Kerja : 10 th

KUESIONER PENILAIAN FMEA

Petunjuk Kriteria Pengisian Kuesioner

1. Tingkat Keparahannya (*Severity*)

Severity adalah sebuah penilaian terhadap tingkat keseriusan suatu efek atau akibat dari potensi kegagalan pada suatu sistem yang berpengaruh pada suatu hasil kerja sistem. Severity dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Keparahan	Tingkat keparahan	Peringkat
Sangat bahaya, Kegagalan terjadi tanpa ada peringatan	Sangat berbahaya dan berpengaruh terhadap keselamatan dan tanpa ada peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	10
Bahaya dengan tanda – tanda	Efeknya serius dan berdampak terhadap keselamatan dan terdapat peringatan kerusakan sebelum kegagalan terjadi	9
Ekstrem	Berdampak terhadap performa pesawat sehingga tidak dapat dioperasikan	8
Sangat tinggi	Berpengaruh terhadap performa pesawat tetapi pesawat masih bisa dioperasikan	7
Tinggi	Pesawat bisa beroperasi tetapi, terdapat gangguan kecil dan terdapat komponen yang tidak berfungsi	6
Sedang	berpengaruh terhadap performa pesawat serta komponen pengikutnya	5
Rendah	Pesawat tetap beroperasi dengan tanda kerusakan, sehingga membutuhkan perbaikan	4

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 4 (lanjutan)

Kecil	pesawat bisa digunakan dengan baik namun terdapat sedikit gangguan berupa tanda kerusakan sistem	3
Sangat kecil	Apakah pesawat dapat digunakan dengan baik namun masih ada gangguan berupa tanda kerusakan sistem yang lebih sedikit	2
Tidak ada dampak	Apakah tidak ada dampak terhadap pesawat	1

2. Tingkat Kejadian (*Occurrence*)

Occurrence adalah kemungkinan probabilitas terjadinya risiko. Rating Occurrence seperti pada tabel berikut.

Peluang terjadi kegagalan	Tingkat kemungkinan kegagalan	Peringkat
Sangat tinggi dan ekstrem; kegagalan hampir tak terhindarkan	1 dari 2	10
Sangat tinggi; kegagalan berhubungan dengan proses yang gagal sebelumnya	1 dari 3	9
Tinggi: kegagalan terus berulang	1 dari 8	8
Relatif tinggi	1 dari 20	7
Cenderung tinggi	1 dari 80	6
Sedang	1 dari 200	5
Relatif rendah	1 dari 1000	4
Rendah	1 dari 5.000	3
Sangat rendah	1 dari 10,000	2
Hampir tidak mungkin terjadi kegagalan	1 dari 100,000	1

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 4 (lanjutan)

3. Tingkat Deteksi (*Detection*)

Detection adalah sebuah penilaian terhadap tingkat kemudahan mendeteksi suatu potensi kegagalan. Penilaian tingkat detection sangat penting dalam menemukan potensi penyebab kegagalan yang menimbulkan kerusakan. Detection dapat dinilai pada skala 1 sampai 10.

Kemungkinan kegagalan terdeteksi	Kriteria berdasarkan rancangan pengendalian saat ini	Peringkat
Hampir mustahil	Tidak terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	10
Sangat Kecil	Terdapat sangat sedikit kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	9
Kecil	Terdapat sedikit, terdapat kendali untuk mendeteksi potensi kegagalan	8
Sangat rendah	Terdapat kendali tetapi sangat rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	7
Rendah	Terdapat kendali tetapi rendah kemampuannya untuk mendeteksi potensi kegagalan	6
Sedang	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang/cukup untuk mendeteksi potensi kegagalan	5
Agak tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sedang cenderung tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	4
Tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	3
Sangat tinggi	Terdapat kendali yang memiliki kemampuan sangat tinggi untuk mendeteksi potensi kegagalan	2
Hampir pasti	Kendali hampir pasti dapat mendeteksi potensi kegagalan	1

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 4 (lanjutan)

4. Kolom Nilai S O D

Setelah membaca kriteria di atas, mohon isi nilai S, O, dan D untuk setiap modus kegagalan pada Lembar Wawancara Penelitian di halaman berikutnya, dengan format sebagai berikut.

KRITERIA	NILAI
Severity	
Occurrence	
Detection	

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 4 (lanjutan)

LEMBAR KUISIONER

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Electrical Connector Protective Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	8	5	3
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Electrical Connector Protective Broken? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Electrical Connector Protective Broken? (D)			
Heatshield Scratches	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Heatshield Scratches Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	3	5	3
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Heatshield Scratches? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Heatshield Scratches? (D)			

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 4 (lanjutan)

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
Housing Adjuster Crack	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena Housing Adjuster Crack Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	6	2	4
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena Housing Adjuster Crack? (O)			
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat Housing Adjuster Crack? (D)			
HP Fuel Inlet Broken	Seberapa parah akibat dari potensi kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken Terhadap kinerja Fuel Metering Unit? (S)	7	1	3
	Seberapa sering terjadinya kegagalan karena HP Fuel Inlet Broken? (O)			

Lampiran P Hasil Kuesioner Penilaian FMEA (*Severity, Occurrence, Detection*) - Narasumber 4 (lanjutan)

RISK	Butir Pertanyaan	(S)	(O)	(D)
	Seberapa mungkin penyebab kegagalan terdeteksi akibat HP Fuel Inlet Broken? (D)			

Reff : Data pada tabel Risk tersebut diperoleh dari data Engineering PT GMF AeroAsia, Maintenance Manual dan hasil wawancara dengan teknisi pemegang type rating pesawat Airbus A330 series di PT GMF AeroAsia, Tbk.

Note : Nilai Occurrence diambil dari data unschedule removal.

Tangerang, 08 Aug 2026


Fakhmi Reza, S.T.

Lampiran Q Bukti Dokumentasi Wawancara di PT GMF AeroAsia



Lampiran Q Bukti Dokumentasi Wawancara di PT GMF AeroAsia



Lampiran R Triangulasi Data Penelitian

Sub Komponen / Mode Kegagalan	Wawancara	Observasi	Dokumentasi	Hasil Triangulasi
Electrical Connector (interface FMU–EEC) (Protective cover konektor patah)	<i>Engineer</i> powerplant menyatakan temuan protective cover patah paling sering ditemukan pada area <i>accessory gearbox</i> karena tingkat getaran yang tinggi. Teknisi line <i>maintenance</i> menyebutkan cover kerap terbentur atau tertekan berlebih saat pelepasan dan pemasangan harness. Narasumber menilai dampak paling dirasakan berupa fault message pada ECAM dan <i>engine</i> rollback yang memicu <i>unscheduled removal</i>.	Pengamatan langsung pada FMU menemukan protective cover dalam kondisi retak dan sebagian patah pada sisi backshell. Terminal konektor terlihat kotor dan lembap akibat hilangnya fungsi sealing. Tidak ditemukan protective cap sementara terpasang selama harness dalam kondisi dilepas.	AMM/CMM <i>engine</i>: batasan kondisi konektor dan nilai torque backshell. <i>Maintenance</i> record/technical log: pencatatan intermittent signal dan fault message EEC–FMU. Worksheet FMEA: S = 7, O = 6, D = 4, RPN = 168 (peringkat tertinggi).	Ketiga sumber konvergen: penyebab dominan adalah getaran <i>engine</i>, handling error, dan degradasi material akibat thermal cycling. Dampak tervalidasi hingga intermittent command fuel flow dan <i>unscheduled removal</i>. Tindakan yang disepakati: penggantian cover, penambahan Detailed Visual <i>Inspection</i> dan verifikasi torque backshell pada interval 2.400 FH, serta pemasangan protective cap sementara.
FMU <i>Housing Adjuster</i> (Keretakan pada <i>Housing Adjuster</i>)	<i>Engineer</i> menyatakan crack umumnya berawal dari overtorque saat adjustment fuel metering. Teknisi menyebutkan fluktuasi tekanan bahan bakar dan getaran mempercepat kelelahan material. Narasumber menekankan risiko pergeseran setting metering terhadap akurasi fuel flow.	Ditemukan indikasi retak halus pada permukaan <i>Housing Adjuster</i> saat pemeriksaan visual. Terdapat rembesan bahan bakar eksternal pada body FMU di sekitar area adjuster. Permukaan <i>housing</i> menunjukkan gejala korosi ringan akibat paparan kelembapan.	AMM: nilai torque yang diizinkan pada pelaksanaan adjustment. Laporan shop visit dan hasil NDT (dye penetrant). Worksheet FMEA: S = 7, O = 3, D = 5, RPN = 105.	Ketiga sumber sejalan bahwa overtorque, fatigue, dan korosi merupakan penyebab utama keretakan. Dampak tervalidasi berupa kebocoran eksternal, ketidakakuratan fuel flow, dan potensi <i>engine</i> surge. Tindakan yang disepakati: pemeriksaan NDT saat shop visit, pengendalian torque sesuai AMM, dan penggantian <i>housing</i> yang terindikasi crack.

Sub Komponen / Mode Kegagalan	Wawancara	Observasi	Dokumentasi	Hasil Triangulasi
<i>HP Fuel Inlet Port</i> (HP fuel inlet patah atau retak)	<i>Engineer</i> menilai tekanan berlebih dari HP fuel pump sebagai pemicu utama keretakan flange. Teknisi menyebutkan pemasangan fuel line yang tidak sesuai AMM menimbulkan pre-stress pada sambungan. Narasumber menegaskan konsekuensi paling berat berupa fire hazard dan in-flight shut down.	Pemeriksaan visual menemukan indikasi retak pada flange sambungan HP fuel inlet. Terdapat jejak kebocoran bahan bakar bertekanan tinggi di sekitar port. Leak check setelah pemasangan tidak selalu terdokumentasi pada lembar kerja.	AMM: prosedur pemasangan fuel line, nilai torque, dan leak check. Data pemeriksaan tekanan keluaran HP fuel pump. Worksheet FMEA: S = 8, O = 2, D = 4, RPN = 64 dengan nilai <i>Severity</i> tertinggi.	Ketiga sumber konvergen bahwa frekuensi kejadian rendah namun tingkat keparahan paling tinggi di antara seluruh mode kegagalan. Dampak tervalidasi hingga potensi kebakaran, IFSD, dan aircraft on ground (AOG). Tindakan yang disepakati: leak check setiap selesai pemasangan FMU, verifikasi torque fuel line sesuai AMM, dan penggantian inlet disertai pemeriksaan tekanan HP fuel pump.
<i>Heatshield FMU</i> (Goresan dan deformasi pada heatshield)	Teknisi menyebutkan goresan umumnya timbul akibat gesekan clamp dan bracket serta kontak dengan tools saat <i>maintenance</i>. <i>Engineer</i> menilai deformasi dipicu pemuaian termal yang berulang. Narasumber menempatkan temuan ini sebagai prioritas terendah karena tidak berdampak langsung pada fungsi metering.	Ditemukan goresan dan penyok pada permukaan <i>Heatshield</i> di titik kontak clamp. Posisi clamp dan bracket tidak seluruhnya sesuai kedudukan semula. Temperatur permukaan FMU pada area yang tidak terlindungi terpantau lebih tinggi.	AMM/CMM: batasan kerusakan (damage limit) <i>Heatshield</i> dan tata cara pemasangan clamp. Catatan penggantian seal dan o-ring FMU. Worksheet FMEA: S = 4, O = 4, D = 3, RPN = 48 (peringkat terendah).	Ketiga sumber sejalan bahwa penyebab bersifat mekanis dan termal serta berkaitan erat dengan mutu pelaksanaan pekerjaan. Dampak tervalidasi berupa penurunan proteksi termal yang mempercepat degradasi seal dan o-ring. Tindakan yang disepakati: penggantian <i>Heatshield</i> yang tergores dalam, perbaikan metode pemasangan clamp dan bracket, serta sosialisasi prosedur handling tools kepada teknisi.

Lampiran S Hasil Turnitin

ta---untuk-turnitin_1786320242171.docx		
ORIGINALITY REPORT		
19%		
SIMILARITY INDEX		
PRIMARY SOURCES		
1	Dimas Saputra Wijaya. "ANALISIS KEANDALAN IGNITION LEADS P/N 9043185-16 PADA ENGINE CFM56-3 PESAWAT BOEING 737-300 DI PERUSAHAAN XYZ", Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan, 2025 Crossref	138 words — 1%
2	repository.ppicurug.ac.id Internet	129 words — 1%
3	dspace.uil.ac.id Internet	121 words — 1%
4	journal.universitaspahlawan.ac.id Internet	113 words — 1%
5	repository.ppns.ac.id Internet	100 words — 1%
6	repository.unissula.ac.id Internet	90 words — 1%
7	journal.ubb.ac.id Internet	80 words — 1%
8	e-jurnal.tni-au.mil.id Internet	76 words — 1%
9	ejournals.itda.ac.id Internet	59 words — < 1%
10	repository.uin-suska.ac.id Internet	58 words — < 1%
11	eprints.umg.ac.id Internet	55 words — < 1%
eprintslib.ummgl.ac.id		