



Analisis Keandalan *Fuel Metering Unit* Engine Trent 700 Airbus A330-300 Menggunakan Weibull dan FMEA

Muhamad Gilam Yudha Pratama¹ Lilies Esthi Riyanthi² Abdan Mughni Syafa'at³

Program Studi Diploma IV Teknik Pesawat Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug,
Tangerang, Banten, Indonesia^{1,2,3}

Email: gilamyudha0405@ppicurug.ac.id¹ lilies.esthi@ppicurug.ac.id²
abdan52001@gmail.com³

Abstrak

Fuel Metering Unit (FMU) merupakan komponen utama sistem bahan bakar *engine* Rolls-Royce Trent 700 yang 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 XYZ yang berdampak pada keterlambatan penerbangan dan meningkatnya biaya perawatan, sementara nilai keandalan komponen tersebut belum pernah diukur secara kuantitatif sehingga strategi perawatan masih bersifat reaktif. Penelitian ini bertujuan menentukan nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) FMU, mengidentifikasi modus kegagalan yang menjadi prioritas penanganan, serta menyusun usulan interval dan tindakan perawatan untuk meningkatkan keandalan komponen. Penelitian menggunakan metode *mixed methods* karena permasalahan menuntut pengukuran statistik sekaligus penelusuran penyebab kegagalan yang hanya dapat diperoleh dari pengalaman personel perawatan. Analisis kuantitatif dilakukan dengan distribusi Weibull dua parameter melalui *median rank regression* terhadap data *Time to Failure* yang diturunkan dari *Time Since Installation*, 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, dan sebanyak 34 unit atau 61,8 persen mengalami kegagalan sebelum mencapai MTTF. Analisis FMEA menempatkan *electrical connector protective broken* sebagai prioritas utama dengan *Risk Priority Number* 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* 5.300 FH (B40 life) dengan *functional check* antara pada 3.500 FH, disertai pemeriksaan spesifik sesuai modus kegagalan dominan. Penelitian lanjutan disarankan menambahkan data *suspension* dan analisis biaya.

Kata Kunci: *Fuel Metering Unit*; Distribusi Weibull; *Mean Time to Failure*; FMEA; *Risk Priority Number*



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Perawatan merupakan aspek yang menentukan keselamatan dan kesinambungan operasi dalam industri penerbangan, yaitu kegiatan memeriksa dan menganalisis peralatan secara teratur agar tetap berfungsi baik dan memiliki umur pakai lebih panjang (Siswanto, 2017). Pelaksanaannya di Indonesia diatur melalui *Civil Aviation Safety Regulation* (CASR) Part 43 untuk aspek pemeliharaan dan CASR Part 145 untuk persyaratan *Approved Maintenance Organization* (Juniar dkk., 2023). PT XYZ merupakan salah satu AMO tersertifikasi CASR Part 145 terbesar di Asia Tenggara yang menangani perawatan pesawat *wide-body* Airbus A330 (Maharani dkk., 2025). Pesawat tersebut menggunakan *engine* Rolls-Royce Trent 700 dengan *Fuel Metering Unit* (FMU) sebagai komponen utama sistem bahan bakar yang 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 XYZ, yang berdampak pada

keterlambatan penerbangan, meningkatnya biaya perawatan, serta menurunnya ketersediaan pesawat.

Metode distribusi Weibull telah banyak digunakan untuk mengkaji keandalan komponen pesawat udara. Rahmawati (t.t.) menerapkan distribusi Weibull pada *nose wheel assembly* ATR 72-500 dan memperoleh karakteristik kegagalan *early wear-out*. Rachman (2018) menggunakan pendekatan yang sama pada *fuel nozzle* Cessna Grand Caravan 208B untuk menyusun dasar perawatan preventif berbasis data penggantian komponen, sedangkan Pohl dan Hermanns (2016) mengembangkan pendekatan berbasis model untuk analisis keandalan sistem suplai bahan bakar melalui *accelerated life testing*. Pada lingkup MRO nasional, Setiawan dkk. (2020) menggunakan analisis *reliability* sebagai dasar perencanaan aktivitas *maintenance* komponen pesawat Boeing 737 NG di PT XYZ. Di sisi lain, metode FMEA banyak dipakai untuk memprioritaskan modus kegagalan melalui pendekatan *bottom-up* terhadap akar penyebab dan dampaknya (Fadli dkk., 2021; Prasetya dkk., 2021), termasuk pada komponen sistem bahan bakar pesawat sebagaimana dilakukan Analisisristianti (2024) pada *fuel nozzle* Airbus A320neo.

Kajian tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian terdahulu hanya berhenti pada perhitungan parameter keandalan dengan rekomendasi perawatan yang bersifat umum, atau sebaliknya hanya melakukan analisis FMEA tanpa dasar statistik yang terukur. Penelitian yang secara khusus membahas keandalan FMU P/N 702-03 pada *engine* Rolls-Royce Trent 700 pesawat Airbus A330-300 juga masih sangat terbatas, padahal komponen ini tergolong *airworthy item* yang kegagalannya berdampak langsung pada kelaikan operasi. Di lokasi penelitian sendiri belum tersedia nilai keandalan FMU yang terukur maupun identifikasi penyebab kegagalan dominan, sehingga strategi pemeliharaan yang berjalan cenderung reaktif. Kesenjangan inilah yang menjadi orisinalitas penelitian ini, yaitu menggabungkan kedua metode dalam satu alur analisis: hasil distribusi Weibull digunakan untuk menyaring populasi komponen yang gagal sebelum mencapai MTTF, dan populasi tersebut kemudian dianalisis menggunakan FMEA untuk menentukan prioritas modus kegagalan. Keluaran penelitian tidak berhenti pada nilai keandalan, melainkan berupa interval inspeksi berbasis *B-Life* yang telah disertai isi pemeriksaan spesifik sesuai modus kegagalan dominan. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) komponen FMU P/N 702-03 melalui pendekatan distribusi Weibull, mengidentifikasi modus kegagalan yang menjadi prioritas penanganan berdasarkan nilai *Risk Priority Number* pada analisis FMEA, serta menyusun usulan interval dan tindakan perawatan yang dapat meningkatkan keandalan komponen dan menekan angka *unscheduled removal* di PT XYZ.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan relevansi
1	Rahmawati (t.t.)	<i>Reliability Analysis of Nose Wheel Assy</i> ATR 72-500	Menentukan tingkat keandalan <i>nose wheel assembly</i>	Kuantitatif (Weibull)	Karakteristik kegagalan komponen tergolong <i>early wear-out</i>	Menguatkan penggunaan distribusi Weibull untuk komponen pesawat; berbeda pada objek yang diteliti
2	Pohl dan Hermanns (2016)	<i>Physical Model Based Reliability Analysis for Accelerated Life Testing of a Fuel Supply System</i>	Menganalisis masa pakai sistem suplai bahan bakar sebelum terjadi kegagalan	Kuantitatif (Weibull)	Pendekatan berbasis model efektif untuk analisis pengujian masa pakai	Relevan pada objek sistem bahan bakar; berbeda pada tipe pesawat dan <i>part number</i> komponen
3	Rachman (2018)	Analisis Keandalan	Menilai keandalan dan	Kuantitatif (Weibull)	Perawatan preventif berupa	Sejalan dalam penggunaan Weibull



		Komponen <i>Fuel Nozzle</i> pada Pesawat Cessna Grand Caravan 208B dengan Metode Weibull	efektivitas perawatan <i>fuel nozzle</i>		pemeriksaan atau penggantian periodik dapat menjadi dasar strategi perawatan	sebagai dasar interval perawatan; berbeda pada pesawat dan komponen
4	Fadli dkk. (2021)	Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV dengan Metode FMEA	Mengidentifikasi akar penyebab kegagalan dan dampaknya terhadap sistem	Kualitatif (FMEA)	FMEA sebagai pendekatan <i>bottom-up</i> mampu memetakan penyebab kegagalan tiap bagian sistem	Menjadi rujukan penerapan FMEA; berbeda karena tidak didukung dasar statistik keandalan
5	Analisristianti (2024)	Analisis Keandalan <i>Fuel Nozzle</i> Airbus A320neo Menggunakan Distribusi Weibull dan FMEA di PT XYZ	Menganalisis keandalan dan modus kegagalan <i>fuel nozzle</i>	<i>Mixed methods</i> (Weibull dan FMEA)	Karakteristik kegagalan komponen teridentifikasi melalui kombinasi kedua metode	Paling dekat secara metodologis; berbeda pada tipe <i>engine</i> , komponen, dan tidak menghasilkan interval berbasis <i>B-Life</i>

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *mixed methods*, yaitu kombinasi metode kuantitatif dan kualitatif. Pendekatan tersebut dipilih karena permasalahan yang dikaji menuntut dua jenis keluaran sekaligus, yaitu besaran keandalan yang terukur secara statistik dan penjelasan mengenai penyebab kegagalan yang hanya dapat diperoleh dari pengalaman personel perawatan di lapangan, sehingga hasil kedua pendekatan saling melengkapi. Penelitian dilaksanakan di PT XYZ pada fasilitas perawatan pesawat Airbus A330, dengan objek penelitian berupa komponen *Fuel Metering Unit* P/N 702-03 pada *engine* Rolls-Royce Trent 700 pesawat Airbus A330-300. Data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung terhadap komponen FMU serta wawancara dan pengisian kuesioner oleh empat orang narasumber *Aircraft Maintenance Engineer* bersertifikat *type rating* Airbus A330 yang berpengalaman menangani *engine*. Data sekunder dikumpulkan dari *Aircraft Flight Maintenance Log*, *removal history*, *shop report*, *repair report*, *Aircraft Maintenance Manual*, *task card*, serta *service bulletin* yang berkaitan dengan objek penelitian. Seluruh data *unscheduled removal* pada periode 2023 sampai 2025 digunakan sebagai populasi penelitian, sehingga diperoleh 55 data kegagalan yang lengkap dan terverifikasi.

Pengolahan data kuantitatif dilakukan menggunakan distribusi Weibull dua parameter. Nilai *Time to Failure* (TTF) diturunkan dari *Time Since Installation* setiap komponen dengan satuan *flight hours* (FH), karena satuan tersebut menggambarkan lamanya komponen bekerja selama pesawat beroperasi. Data TTF diurutkan dari nilai terkecil, kemudian diberi *rank*, *reverse rank*, *Adjusted Rank*, dan *Median Rank* menggunakan pendekatan *Benard's approximation*. Estimasi parameter dilakukan melalui *X on Y median rank regression*, yang merupakan metode standar untuk sampel berukuran 2 sampai 100 data dengan nilai β yang belum diketahui (Abernethy, 2015). *Shape parameter* diperoleh dari $\beta = 1/B$ dan *scale parameter* dari $\eta = e^A$, dengan A dan B masing-masing merupakan konstanta dan koefisien regresi. Parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung $MTTF = \eta \times \Gamma(1 + 1/\beta)$, *reliability* $R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$, *Cumulative Distribution Function* $F(t) = 1 - R(t)$, *Failure Rate* $\lambda(t) = (\beta/\eta)(t/\eta)^{(\beta-1)}$, serta *B-Life* $B_p = \eta \times [-\ln R(t)]^{1/\beta}$. Ketepatan model regresi dinilai melalui koefisien determinasi (R^2).

Pengolahan data kualitatif dilakukan menggunakan *Failure Mode and Effect Analysis*. Populasi yang dianalisis dibatasi pada komponen yang mengalami kegagalan sebelum mencapai nilai MTTF, karena kelompok inilah yang mengindikasikan adanya penyebab yang

dapat dicegah. Setiap modus kegagalan dinilai berdasarkan tiga parameter, yaitu *Severity* (S) sebagai tingkat keseriusan dampak, *Occurrence* (O) sebagai frekuensi kemunculan penyebab, dan *Detection* (D) sebagai kemampuan prosedur perawatan yang berjalan dalam mendeteksi kegagalan, masing-masing pada skala 1 sampai 10. Nilai akhir tiap parameter merupakan pembulatan dari rata-rata penilaian keempat narasumber, kemudian dihitung *Risk Priority Number* (RPN) sebagai hasil perkalian $S \times O \times D$. Urutan nilai RPN digunakan untuk menetapkan prioritas penanganan, dan hasilnya dipadukan dengan nilai *B-Life* untuk menyusun usulan interval beserta isi pemeriksaan perawatan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT XYZ. Data *unscheduled removal* komponen *Fuel Metering Unit* P/N 702-03 pada armada Airbus A330-300 selama periode 2023 sampai 2025 berjumlah 55 kejadian, dengan seluruh *fault* bersumber pada kondisi FMU *unserviceable*. Sebaran jumlah kejadian per tahun disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah *unscheduled removal* 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)

Data tersebut selanjutnya diolah menjadi *Time to Failure*, dengan nilai terendah 1.098 FH dan nilai tertinggi 15.014 FH. Rentang yang lebar menunjukkan umur kegagalan FMU bervariasi antar unit sehingga analisis tidak cukup menggunakan nilai rata-rata. Hasil estimasi parameter distribusi Weibull melalui *median rank regression* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Distribusi Weibull Fuel Metering Unit

Parameter	Simbol	Hasil
Jumlah data kegagalan	n	55 data
<i>Shape parameter</i>	β	2,013663
<i>Scale parameter</i>	η	7.400,81 FH
Fungsi gamma	$\Gamma(1 + 1/\beta)$	0,886122
Koefisien determinasi	R^2	0,9748

(Sumber: Pengolahan data penulis, 2026)

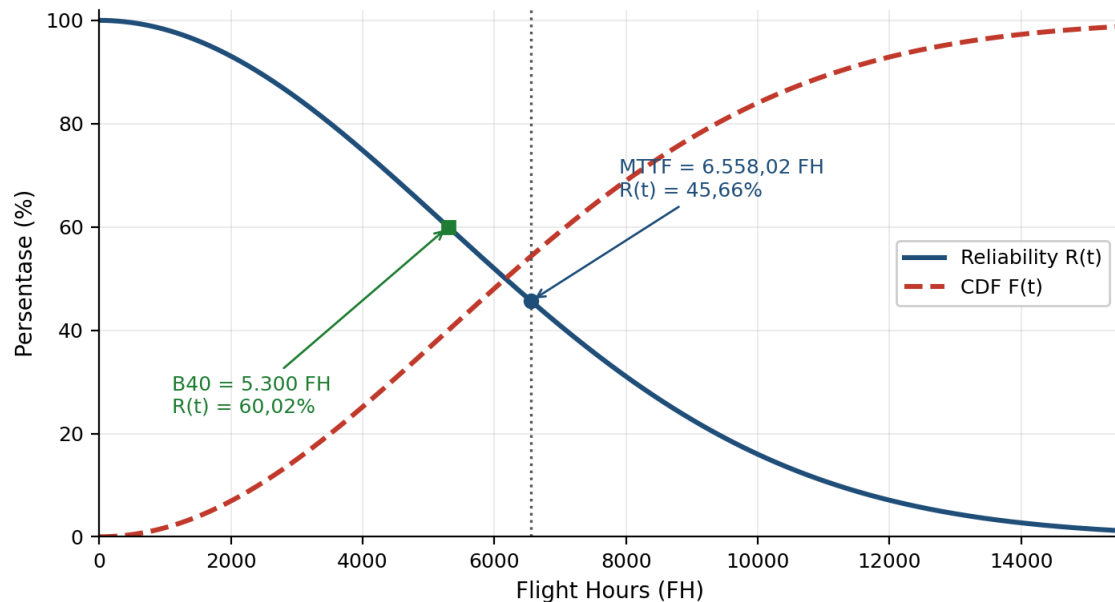
Berdasarkan parameter tersebut diperoleh nilai MTTF sebesar $7.400,81 \times 0,886122 = 6.558,02$ FH. Pada titik MTTF, nilai *reliability* tersisa 45,66 persen dan nilai CDF mencapai 54,34 persen, sedangkan *Failure Rate* sebesar 0,000241 kegagalan per *flight hour*. Nilai *reliability* dan CDF pada beberapa interval operasi disajikan pada Tabel 3 dan kurvanya ditampilkan pada Gambar 1.

Tabel 3. Nilai Reliability, CDF, dan Failure Rate Fuel Metering Unit per Interval Waktu

No	Flight Hours (FH)	Reliability R(t)	CDF F(t)	Failure Rate $\lambda(t)$
1	1.000	98,24%	1,76%	0,000036
2	2.000	93,08%	6,92%	0,000072
3	3.000	85,02%	14,98%	0,000109
4	4.000	74,85%	25,15%	0,000146
5	5.000	63,51%	36,49%	0,000183
6	6.000	51,92%	48,08%	0,000220
7	6.558,02 (MTTF)	45,66%	54,34%	0,000241

8	7.400,81 (η)	36,79%	63,21%	0,000272
9	8.000	31,05%	68,95%	0,000294
10	10.000	15,99%	84,01%	0,000369
11	12.000	7,09%	92,91%	0,000444
12	15.000	1,58%	98,42%	0,000557

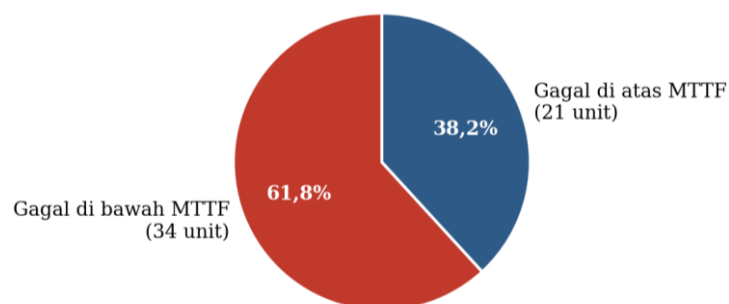
(Sumber: Pengolahan data penulis, 2026)



Gambar 1. Kurva Reliability dan CDF Fuel Metering Unit

(Sumber: Pengolahan data penulis, 2026)

Perbandingan seluruh kejadian kegagalan terhadap nilai MTTF menunjukkan sebanyak 34 unit atau 61,8 persen mengalami kegagalan sebelum mencapai 6.558,02 FH, sedangkan 21 unit atau 38,2 persen bertahan melewati nilai tersebut, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Persentase Kegagalan FMU terhadap Nilai MTTF

(Sumber: Pengolahan data penulis, 2026)

Perhitungan *B-Life* dilakukan untuk memperoleh umur operasi pada beberapa target keandalan. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan *B-Life* Fuel Metering Unit

<i>B-Life</i>	Peluang Gagal	Reliability 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%	6.169,42
B60	60%	40%	7.086,38
B70	70%	30%	8.115,48
B80	80%	20%	9.373,79
B90	90%	10%	11.198,46

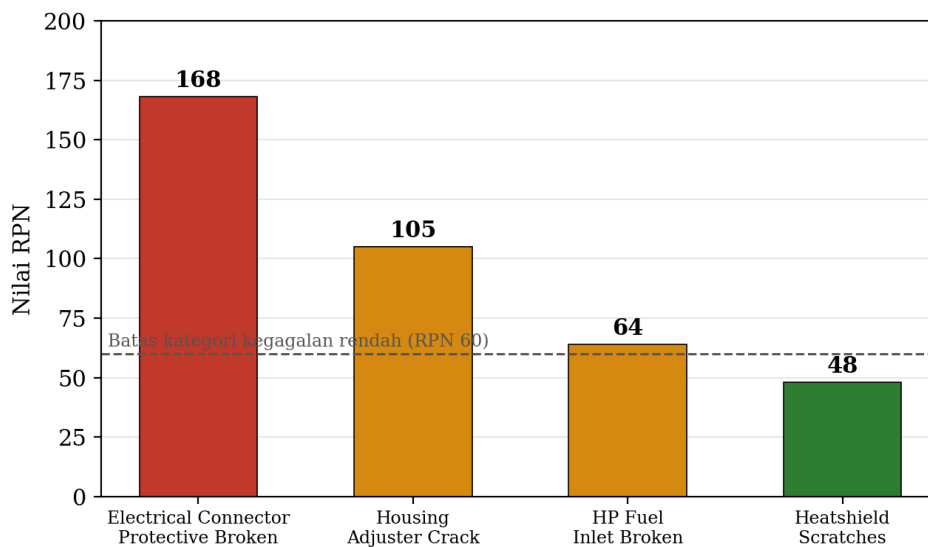
(Sumber: Pengolahan data penulis, 2026)

Terhadap 34 unit yang gagal sebelum mencapai MTTF teridentifikasi empat modus kegagalan. Hasil penilaian *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* oleh empat narasumber beserta nilai RPN disajikan pada Tabel 5, sedangkan perbandingan visualnya ditampilkan pada Gambar 3.

Tabel 5. Nilai S, O, D, dan Risk Priority Number Modus Kegagalan FMU

No	Modus 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 penulis, 2026)



Gambar 3. Nilai Risk Priority Number Tiap Modus Kegagalan FMU

(Sumber: Pengolahan data penulis, 2026)

Berdasarkan gabungan hasil analisis Weibull dan FMEA, disusun usulan interval beserta isi tindakan perawatan sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. 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 <i>torque 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> kendur yang mempercepat kerusakan <i>protective cover</i> konektor
<i>Functional check</i> dan pemantauan riwayat <i>fault</i>	± 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



Pemeriksaan <i>Non-Destructive Test</i> pada <i>Housing Adjuster</i>	Pada saat <i>shop visit</i>	Diarahkan pada modus kegagalan prioritas kedua (RPN 105) yang tidak terdeteksi 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

(Sumber: Pengolahan data penulis, 2026)

Pembahasan

Nilai *shape parameter* sebesar 2,013663 yang lebih besar dari satu menempatkan FMU pada fase *wear-out*, yaitu laju kegagalan meningkat seiring bertambahnya waktu operasi. Kesesuaian model terhadap data cukup baik dengan koefisien determinasi 0,9748, sehingga hasil estimasi dapat dipertanggungjawabkan. Secara teknis, temuan ini konsisten dengan kondisi pemasangan FMU pada *accessory gearbox* yang menerima beban getaran *engine* secara terus-menerus sekaligus terpapar temperatur tinggi dan fluktuasi tekanan bahan bakar. Kondisi tersebut memicu degradasi material pelindung konektor, keausan pada bagian bergerak, penurunan kemampuan *sealing*, serta kelelahan material pada *housing*. Nilai β yang mendekati dua menegaskan bahwa mekanisme kegagalan didominasi keausan bertahap akibat beban operasi berulang, bukan kegagalan acak maupun cacat produksi. Temuan ini sejalan dengan Rahmawati (t.t.) yang memperoleh karakteristik *early wear-out* pada *nose wheel assembly* ATR 72-500, serta menguatkan hasil Rachman (2018) bahwa komponen dengan pola *wear-out* memerlukan perawatan preventif berbasis interval. Konsekuensi praktisnya, strategi yang hanya menunggu komponen gagal menjadi kurang tepat karena peluang *unscheduled removal* justru semakin besar pada umur operasi lanjut.

Nilai MTTF sebesar 6.558,02 FH menjawab tujuan pertama penelitian, namun angka tersebut tidak dapat langsung dijadikan interval perawatan. Pada titik MTTF, *reliability* hanya tersisa 45,66 persen yang berarti lebih dari separuh populasi komponen telah gagal terlebih dahulu. Hal ini diperkuat oleh data aktual, yaitu 34 unit atau 61,8 persen FMU gagal sebelum mencapai MTTF. Analisis CDF menunjukkan penurunan keandalan 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, sehingga rentang tersebut dapat disebut sebagai rentang kritis operasi FMU. Pola *increasing failure rate* juga terlihat dari peningkatan $\lambda(t)$ sekitar 31 kali lipat pada rentang 500 sampai 15.000 FH. Karena $\lambda(t)$ sebanding dengan t pangkat 1,013663 yang secara praktis mendekati satu, setiap penggandaan waktu operasi akan menggandakan pula laju kegagalan komponen. Oleh sebab itu, penetapan interval dialihkan pada pendekatan *B-Life* yang menetapkan target keandalan terlebih dahulu, sebagaimana ditegaskan Fidanoglu dkk. (2017) bahwa interval perawatan pada program berbasis MSG-3 harus mengikuti tingkat keandalan yang ditargetkan dan bukan mengikuti rata-rata umur kegagalan.

Interval yang direkomendasikan adalah 5.300 FH, dibulatkan ke bawah dari *B40 life* sebesar 5.301,58 FH, dengan keandalan aktual pada akhir interval sebesar 60,02 persen. Pemilihan indeks B40 didasarkan pada 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 yang dihasilkan. Indeks B10 memang lebih aman dengan interval 2.420,66 FH, tetapi interval tersebut sekitar 54 persen lebih pendek dibandingkan B40 sehingga frekuensi inspeksi menjadi lebih dari dua kali lipat sepanjang umur operasi. Beban tersebut dinilai belum sebanding dengan sebaran kegagalan aktual, mengingat data TTF terdistribusi kontinu hingga

jauh di atas 5.000 FH dan 38,2 persen populasi justru bertahan melewati MTTF. Sebagai kompensasi atas interval yang lebih panjang, ditetapkan pemeriksaan antara berupa *functional check* pada 3.500 FH (*B20 life*), yaitu tepat sebelum rentang kritis dimulai dan sebelum keandalan turun di bawah 80 persen. 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. Pendekatan perencanaan perawatan yang berpijak pada nilai keandalan seperti ini sejalan dengan Setiawan dkk. (2020) yang menjadikan analisis *reliability* sebagai dasar perencanaan aktivitas *maintenance* komponen pesawat di PT XYZ.

Hasil FMEA menempatkan *electrical connector protective broken* sebagai prioritas utama dengan RPN 168 dan menjawab tujuan kedua penelitian. Modus ini memperoleh nilai *Occurrence* tertinggi ($O = 6$) sesuai frekuensi kejadiannya yang mencapai 20 unit atau 58,8 persen dari seluruh kegagalan di bawah MTTF. Kerusakan pelindung konektor tidak semata disebabkan keausan material, melainkan diawali getaran *engine* pada area *accessory gearbox* yang menimbulkan *micro-movement* dan keretakan awal, kemudian diperparah beban mekanis saat pelepasan dan pemasangan *harness* pada pekerjaan perawatan. Ketika pelindung patah, fungsi *sealing* konektor hilang sehingga terminal terpapar kelembaban dan *debris*; sinyal perintah EEC menuju *torque motor* FMU menjadi *intermittent*, *fuel flow* tidak sesuai *command*, dan berujung pada *fault message* serta *unscheduled removal*. Perlu dicatat bahwa *HP fuel inlet broken* memiliki *Severity* tertinggi ($S = 8$) namun RPN-nya relatif rendah karena frekuensinya kecil ($O = 2$). Hal ini menunjukkan RPN tidak dapat dijadikan satu-satunya dasar pengambilan keputusan, sebagaimana juga dikemukakan Prasetya dkk. (2021), karena modus dengan *severity* tinggi tetap memerlukan perhatian khusus mengingat dampaknya berkaitan langsung dengan keselamatan penerbangan. Atas dasar itu, *leak check* setelah setiap pemasangan tetap dipertahankan meskipun modus tersebut jarang terjadi.

Perbedaan utama penelitian ini terhadap penelitian terdahulu terletak pada keterpaduan alur analisis dan bentuk keluarannya, sehingga menjawab tujuan ketiga penelitian. Rahmawati (t.t.), Rachman (2018), serta Pohl dan Hermanns (2016) berhenti pada parameter keandalan dan rekomendasi perawatan yang bersifat umum, sedangkan Fadli dkk. (2021) melakukan pemeringkatan modus kegagalan tanpa dasar statistik keandalan. Analisisristianti (2024) telah memadukan Weibull dan FMEA pada *fuel nozzle* Airbus A320neo, namun kedua metode dijalankan secara paralel tanpa saling menyaring populasi data. Pada penelitian ini, hasil Weibull digunakan sebagai penyaring populasi, yaitu hanya 34 unit yang gagal di bawah MTTF yang dianalisis menggunakan FMEA, sehingga prioritas modus kegagalan yang diperoleh benar-benar mewakili kegagalan yang bersifat dapat dicegah. Keluaran akhirnya pun bukan sekadar nilai keandalan, melainkan interval berbasis *B-Life* yang isinya telah dipetakan langsung terhadap modus kegagalan dominan sebagaimana disajikan pada Tabel 6. Dengan penerapan skema tersebut, kegagalan yang selama ini terjadi pada rentang di bawah MTTF sebanyak 61,8 persen dari total kejadian diharapkan dapat terdeteksi lebih dini melalui *scheduled maintenance*, sehingga jumlah *unscheduled removal*, keterlambatan penerbangan, dan biaya perawatan akibat kegagalan FMU dapat ditekan.

KESIMPULAN

Analisis keandalan terhadap 55 data *unscheduled removal Fuel Metering Unit* P/N 702-03 pada *engine* Rolls-Royce Trent 700 pesawat Airbus A330-300 di PT XYZ menghasilkan *shape parameter* 2,013663 dan *scale parameter* 7.400,81 FH dengan koefisien determinasi 0,9748, sehingga komponen berada pada fase *wear-out*. Nilai *Mean Time to Failure* yang diperoleh sebesar 6.558,02 *flight hours* dengan *reliability* tersisa 45,66 persen dan *Cumulative Distribution Function* 54,34 persen pada titik tersebut, sementara data aktual menunjukkan 34

unit atau 61,8 persen komponen gagal sebelum mencapai nilai MTTF. Analisis *Failure Mode and Effect Analysis* terhadap kelompok kegagalan tersebut menempatkan *electrical connector protective broken* sebagai prioritas utama dengan *Risk Priority Number* 168, diikuti *Housing Adjuster crack* (105), *HP fuel inlet broken* (64), dan *Heatshield scratches* (48). Berdasarkan konsep *B-Life*, penelitian ini menghasilkan skema perawatan bertingkat sebagai temuan barunya, yaitu interval utama 5.300 FH pada B40 *life* dengan keandalan 60,02 persen, disertai *functional check* antara pada 3.500 FH dan ambang evaluasi penggantian terencana sebelum 6.500 FH. Isi pemeriksaan pada setiap interval dipetakan langsung terhadap prioritas modus kegagalan, meliputi *detailed visual inspection* konektor beserta *protective cover*, verifikasi nilai *torque backshell*, pemeriksaan kondisi *clamp* dan *bracket harness*, pemeriksaan *Non-Destructive Test* pada *Housing Adjuster* saat *shop visit*, serta *leak check* setelah setiap pemasangan. Skema tersebut menempatkan tindakan perawatan sebelum lebih dari separuh populasi komponen diperkirakan gagal, sehingga angka *unscheduled removal* FMU dapat ditekan.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada penggunaan data kegagalan tanpa data *suspension*, yaitu komponen yang masih beroperasi, sehingga estimasi parameter Weibull berpotensi bersifat konservatif terhadap kondisi populasi sesungguhnya. Penilaian FMEA juga masih bergantung pada empat narasumber sehingga unsur subjektivitas belum sepenuhnya terkendali, dan usulan interval belum diuji terhadap aspek biaya. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan rentang data yang lebih panjang dengan menyertakan data *suspension*, membandingkan hasil *median rank regression* terhadap metode *Maximum Likelihood Estimation* atau distribusi Weibull tiga parameter, memperbanyak jumlah responden dengan pembobotan seperti *Fuzzy FMEA* atau *Analytical Hierarchy Process*, menambahkan *cost-benefit analysis* terhadap usulan interval, serta memperluas kajian pada komponen lain sistem bahan bakar *engine* Rolls-Royce Trent 700.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Politeknik Penerbangan Indonesia Curug atas dukungan akademik selama penyusunan penelitian, kepada PT XYZ atas izin penelitian dan akses data perawatan, serta kepada para dosen pembimbing dan narasumber *Aircraft Maintenance Engineer* yang telah memberikan arahan dan penilaian dalam pelaksanaan penelitian ini.

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).
- Analisristianti, S. (2024). Analisis keandalan *fuel nozzle* Airbus A320neo menggunakan distribusi Weibull dan *failure mode and effect analysis* di PT XYZ.
- Fadli, M., Jufrizel, & Hastuti, D. (2021). Analisis keandalan sistem distribusi 20 kV dengan metode FMEA pada penyulang Akasia dan Lele PT PLN (Persero) ULP Kota Barat.
- 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.
- Fidanoglu, A., Ungor, E., Ozkol, I., & Komurgoz, G. (2017). Determination of the optimum maintenance periodicity of aircraft components by Weibull distribution.
- 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).



- 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>
- Pohl, S., & Hermanns, O. (2016). *Physical model based reliability analysis for accelerated life testing of a fuel supply system*.
- 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>
- Rachman, A. (2018). *Analisis keandalan komponen fuel nozzle pada pesawat Cessna Grand Caravan 208B dengan metode Weibull*.
- Rahmawati, F. K. (t.t.). *Reliability analysis of nose wheel assy ATR 72-500*.
- ReliaSoft Corporation. (2015). *Accelerated life testing reference*. ReliaSoft Corporation.
- 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 XYZ. *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*.
- 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 XYZ. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 14(1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8459>