



Analisis Water Ingress pada Rudder Airbus A330 dengan Regresi Linier dan Root Cause Analysis

Riyaldo Zorena Sebayang¹ Iwan Engkus Kurniawan² Fawwaz Yusa Gifari³

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

Email: riyzoreseba1@gmail.com¹ iwan.engkus@ppicurug.ac.id² fawwazyusa@ppicurug.ac.id³

Abstrak

Struktur honeycomb composite pada komponen rudder pesawat Airbus A330 rentan mengalami water ingress yang memicu disbonding dan delaminasi akibat siklus beku-cair pada ketinggian jelajah. Data inspeksi PT GMF AeroAsia Tbk. periode 2018–2025 menunjukkan peningkatan temuan dari 21 defect pada interval enam tahun menjadi 78 defect pada interval delapan belas tahun, namun penanganannya masih bersifat reaktif dan belum didukung pemodelan kuantitatif maupun penelusuran akar masalah yang terstruktur. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh usia operasional pesawat terhadap tingkat water ingress, mengidentifikasi akar penyebab dominan, serta merumuskan tindakan perbaikan yang optimal. Penelitian menggunakan pendekatan metode campuran (mixed methods) terhadap data observasi 36 unit pesawat Airbus A330. Pendekatan ini dipilih karena pemodelan statistik saja tidak cukup menjelaskan penyebab operasional kegagalan, sedangkan penelusuran kualitatif tanpa dasar kuantitatif berisiko kehilangan prioritas. Analisis kuantitatif dilakukan melalui Regresi Linier Sederhana dengan usia pesawat sebagai variabel bebas serta jumlah temuan (Total Defect) dan luas kerusakan (Size Defect) sebagai dua variabel terikat, didahului uji asumsi klasik dan diikuti uji hipotesis. Analisis kualitatif dilakukan melalui Root Cause Analysis yang terdiri atas Diagram Pareto, Diagram Fishbone 4M1E, dan matriks 5W+1H. Hasil regresi menunjukkan usia pesawat berpengaruh positif dan signifikan terhadap kedua variabel terikat, dengan model Total Defect menghasilkan $Y_2 = -0,184 + 0,341X$ ($R^2 = 81,5\%$; $F = 150,244$) dan model Size Defect menghasilkan $Y_1 = 1.509,67 + 417,37X$ ($R^2 = 91,3\%$; $F = 357,670$), keduanya signifikan pada taraf 0,05. Diagram Pareto mengidentifikasi area hoist point sebagai penyumbang dominan sebesar 86,21% dari 145 defect, dan Diagram Fishbone menemukan lima akar penyebab utama pada aspek manusia, metode, material, mesin, dan lingkungan. Penelitian menyimpulkan bahwa perawatan rudder perlu bergeser dari reaktif menuju prediktif melalui penambahan task card Detailed Visual Inspection dan interval penggantian hoist point cover pada Maintenance Program, standarisasi prosedur teknis, verifikasi part number sesuai katalog resmi, penyediaan tail dock yang memadai, serta perlindungan cuaca saat pesawat di apron. Penelitian lanjutan disarankan menambahkan variabel rute, frekuensi penerbangan, dan kondisi lingkungan operasional melalui regresi berganda.

Kata Kunci: 5W+1H, Diagram Fishbone, Diagram Pareto, Honeycomb Composite, Regresi Linier, Root Cause Analysis, Rudder Airbus A330, Water Ingress



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

PENDAHULUAN

Manufaktur pesawat udara komersial saat ini mengadopsi material komposit secara masif, salah satunya struktur honeycomb sandwich yang diaplikasikan pada flight control surface seperti rudder Airbus A330, karena rasio kekuatan terhadap berat yang superior dan ketahanannya terhadap structural fatigue. Namun dalam kondisi operasional aktual, penurunan viskositas dan elastisitas sealant maupun surface coating akibat paparan ultraviolet dan fluktuasi cuaca ekstrem memicu retak mikro yang menjadi jalur infiltrasi fluida ke dalam sel inti komposit, sebuah kerusakan yang dikenal sebagai water ingress (Xu et al., 2023). Kritikalitasnya termanifestasi pada ketinggian jelajah, ketika fluida yang terperangkap membeku dan mengalami ekspansi volumetrik; freeze-thaw cycle yang berulang menghasilkan

tegangan geser dari dalam struktur yang merobek lapisan adhesif antara core dan skin, sehingga bermuara pada disbonding dan delaminasi yang mendegradasi integritas struktural serta keseimbangan aerodinamis komponen (Sfarra et al., 2021). Data inspeksi PT GMF AeroAsia Tbk. periode 2018–2025 memperlihatkan eskalasi temuan dari 21 defect pada interval enam tahun menjadi 46 defect pada dua belas tahun dan 78 defect pada delapan belas tahun, sementara perluasan kerusakan umumnya baru teridentifikasi melalui Non-Destructive Testing saat armada memasuki fase perawatan berat (Vavilov et al., 2016).

Upaya menggeser perawatan dari reaktif menuju prediktif melalui pemodelan statistik telah banyak dikaji dalam sepuluh tahun terakhir. Napitupulu dan Siagian (2023) menunjukkan bahwa regresi linier sederhana pada data deret waktu menghasilkan proyeksi operasional dengan margin galat yang rendah, sedangkan Darmawan dan Kurniawan (2023) memodelkan laju keausan brake pad kereta listrik berdasarkan akumulasi siklus operasional untuk memperkirakan remaining useful life. Pada ranah penerbangan, Jammal et al. (2025) menemukan korelasi linier yang kuat antara siklus penerbangan dan tingkat keausan carbon brake sehingga siklus penggantian suku cadang dapat dioptimalkan, sementara Yıldırım dan Afser (2025) membuktikan bahwa metode linier merupakan pendekatan yang cepat dan akurat untuk memprediksi remaining useful life mesin pesawat pada dataset C-MAPSS. Rahma dan Widharto (2024) memperluas pendekatan tersebut melalui regresi berganda untuk mengukur pengaruh kepatuhan jadwal preventif terhadap keandalan mesin, dan Sezenoğlu Çetin et al. (2026) mengembangkan predictive maintenance berbasis sparse event logs pada komponen pesawat. Sejalan dengan itu, penelusuran akar masalah secara terstruktur juga terbukti efektif di lingkungan perawatan. Tan dan Raghavan (2016) melaporkan bahwa transisi menuju root cause based maintenance mampu menurunkan kerusakan komponen berulang hingga lebih dari 30%. Ariani et al. (2025) mengintegrasikan pengujian tegangan material dengan Root Cause Analysis pada kegagalan wire rope, sedangkan Nasution et al. (2025) menunjukkan bahwa kombinasi Root Cause Analysis dan matriks 5W+1H berhasil menekan tingkat cacat produk melalui standarisasi ulang instruksi kerja. Di lingkungan PT GMF AeroAsia Tbk. sendiri, pendekatan ini telah diterapkan pada analisis kegagalan Surge Control Valve APU Airbus A330 (Prayogo et al., 2026), pada analisis waste manhours perawatan C-Check Airbus A330 (Christian Carlos et al., 2026), serta pada penelusuran keterlambatan turnaround time C-Check Airbus A330 (Hayatussalam et al., 2025).

Rujukan tersebut memperlihatkan tiga kesenjangan yang jelas. Pertama, pemodelan regresi prediktif pada literatur penerbangan masih terfokus pada komponen bergerak dan sistem yang mengalami keausan mekanis seperti brake, engine, dan mesin produksi, sementara degradasi struktural material komposit pada flight control surface belum dimodelkan secara kuantitatif. Kedua, penerapan Root Cause Analysis di lingkungan PT GMF AeroAsia Tbk. sejauh ini menyasar kegagalan sistem, katup, dan efisiensi waktu perawatan, belum menyentuh kerusakan struktural water ingress pada rudder. Ketiga, kedua rumpun metode tersebut umumnya diterapkan secara terpisah, sehingga hasil prediksi kuantitatif jarang diteruskan menjadi resolusi prosedural yang dapat langsung dieksekusi di lapangan. Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengintegrasikan keduanya dalam satu kerangka kerja: pemodelan Regresi Linier Sederhana atas 36 unit Airbus A330 dengan dua variabel terikat sekaligus, yaitu jumlah temuan dan luas kerusakan, yang hasilnya diteruskan ke rantai Root Cause Analysis berupa Diagram Pareto, Diagram Fishbone 4M1E, hingga matriks 5W+1H yang tervalidasi melalui Focus Group Discussion bersama praktisi. Penggunaan dua variabel terikat secara paralel juga memungkinkan perbandingan daya jelas model terhadap dimensi frekuensi dan dimensi keparahan kerusakan, sesuatu yang belum dilakukan penelitian terdahulu.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk (1) menganalisis dan mengukur tingkat signifikansi pengaruh usia pesawat terhadap jumlah temuan dan perluasan area water ingress pada struktur rudder Airbus A330 melalui pemodelan Regresi Linier Sederhana; (2) mengidentifikasi dan memetakan akar permasalahan dominan penyebab water ingress di fasilitas PT GMF AeroAsia Tbk. menggunakan Diagram Pareto dan Diagram Fishbone; serta (3) merumuskan rancangan usulan perbaikan secara sistematis menggunakan matriks 5W+1H untuk memitigasi kerusakan komponen rudder di masa depan.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/Tahun	Judul	Metode	Hasil	Kontribusi dan relevansi
1	Tan & Raghavan (2016)	Root Cause Analysis Based Maintenance Policy	Root Cause Analysis	Transisi dari perawatan reaktif menuju root cause based maintenance menurunkan kerusakan komponen berulang lebih dari 30%	Menjadi dasar argumentasi bahwa penelusuran akar masalah lebih efektif daripada penanganan gejala, sebagaimana kerangka RCA penelitian ini
2	Napitupulu & Siagian (2023)	Prediksi Data Produksi Menggunakan Regresi Linear Sederhana	Regresi linier sederhana	Pemodelan regresi pada data deret waktu menghasilkan proyeksi dengan margin galat yang sangat rendah	Memberi justifikasi metodologis penggunaan regresi linier sederhana pada data historis operasional
3	Darmawan & Kurniawan (2023)	Analisis Laju Keausan Brake Pad terhadap Disc Brake Kereta Listrik LRV Seri 1100	Regresi linier	Laju degradasi material dapat dimodelkan berdasarkan akumulasi siklus operasional sehingga remaining useful life dapat diprediksi	Menunjukkan bahwa regresi mampu memodelkan degradasi material, meskipun objeknya keausan mekanis dan bukan struktur komposit
4	Yıldırım & Afser (2025)	Linear Methods for Predictive Maintenance: The Case of NASA C-MAPSS Datasets	Regresi linier	Algoritma linier terbukti cepat dan akurat dalam memprediksi remaining useful life mesin pesawat	Menguatkan kelayakan metode linier sebagai fondasi awal sistem pemeliharaan prediktif di fasilitas MRO
5	Hayatussalam et al. (2025)	Analysis of Turnaround Time Delays in C-Check of Airbus A330 Aircraft Using Root Cause Analysis Method	RCA (Pareto, Fishbone, 5W+1H)	Keterlambatan perawatan berakar pada kelemahan logistik dan komunikasi; matriks 5W+1H efektif memangkas durasi delay	Membuktikan efektivitas rantai Pareto-Fishbone-5W+1H pada armada Airbus A330, meskipun objeknya waktu perawatan dan bukan kerusakan struktural
6	Prayogo et al. (2026)	Analisis Kegagalan Surge Control Valve pada APU Model GTCP331-350 Pesawat Airbus A330 Series di PT GMF AeroAsia Tbk.	Root Cause Analysis	Kegagalan didominasi faktor kelelahan material dan prosedur inspeksi reaktif, sehingga diusulkan perbaikan Maintenance Program	Menjadi rujukan terdekat secara lokasi dan armada, namun menyorot kegagalan sistem APU dan bukan struktur komposit rudder

Sumber: Hasil kajian pustaka penulis (2026)

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode campuran (mixed methods) yang menggabungkan analisis kuantitatif dan kualitatif. Pemilihan pendekatan ini didasarkan pada karakteristik permasalahan yang diteliti. Pemodelan statistik semata hanya mampu menunjukkan adanya tren degradasi tanpa menjelaskan penyebab operasionalnya, sedangkan penelusuran kualitatif tanpa dasar kuantitatif berisiko kehilangan prioritas penanganan. Pengukuran kuantitatif berfokus pada pengolahan data numerik historis untuk melihat hubungan antarvariabel dan memprediksi keandalan sistem operasional (Herry et al., 2018), sementara analisis kualitatif deskriptif digunakan untuk menelusuri faktor fundamental yang memicu penyimpangan teknis guna merumuskan perbaikan kualitas yang berkelanjutan (Rafsyani Zani & Supriyanto, 2021).

Penelitian dilaksanakan pada Januari 2026 hingga Agustus 2026 di Unit TBW (Wide Body Aircraft Base Maintenance) Hangar 3 PT GMF AeroAsia Tbk. Objek penelitian adalah komponen rudder pada armada Airbus A330, dengan populasi pengamatan sebanyak 36 unit pesawat (N

= 36) yang menjalani fase Base Maintenance sepanjang periode 2018–2025. Variabel bebas (X) adalah interval usia operasional pesawat yang dikelompokkan ke dalam tiga kategori, yaitu enam tahun (D01 Check), dua belas tahun (D02 Check), dan delapan belas tahun (D03 Check). Variabel terikat terdiri atas dua ukuran yang dianalisis secara terpisah, yaitu jumlah temuan kerusakan atau Total Defect (Y_2) dan luas area kerusakan atau Size Defect (Y_1) dalam satuan sq.mm.

Data primer diperoleh melalui observasi langsung terhadap komponen rudder serta diskusi terarah (brainstorming) bersama personel ahli, yaitu inspector, engineer, dan teknisi struktural. Keterangan langsung dari praktisi ini menjadi basis penyusunan Diagram Fishbone. Data sekunder mencakup tiga kategori, yaitu data kuantitatif degradasi komponen yang diekstraksi dari laporan Non-Destructive Testing metode Thermography Infrared, data laporan pemeliharaan berupa catatan penyelesaian perawatan dan frekuensi temuan cacat, serta dokumen standar regulasi berupa Aircraft Maintenance Manual (AMM), Structural Repair Manual (SRM), dan Standar Operasional Prosedur internal perusahaan. Pengolahan statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak IBM SPSS. Tahap kuantitatif dilaksanakan melalui Regresi Linier Sederhana dengan model persamaan (1), sedangkan koefisien regresi dan konstanta dihitung melalui persamaan (2) dan (3). Kemampuan model dalam menjelaskan variasi variabel terikat diukur dengan koefisien determinasi pada persamaan (4). Adapun pada tahap Diagram Pareto, persentase kumulatif setiap jenis temuan dihitung menggunakan persamaan (5).

$$Y = a + bX \quad (1)$$

$$b = [n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)] \div [n\sum X^2 - (\sum X)^2] \quad (2)$$

$$a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - [\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \div \sum (Y_i - \bar{Y})^2] \quad (4)$$

$$\text{Persentase kumulatif} = (\sum f_i \div \sum f_{\text{total}}) \times 100\% \quad (5)$$

Sebelum kedua model regresi diinterpretasikan, data terlebih dahulu diuji melalui serangkaian uji asumsi klasik agar estimasi bersifat Best Linear Unbiased Estimator, yaitu uji normalitas dengan Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk, uji linearitas melalui Test for Linearity, uji heteroskedastisitas melalui pengamatan scatterplot residual, serta uji autokorelasi menggunakan statistik Durbin-Watson. Setelah asumsi terpenuhi, pengujian dilanjutkan pada uji signifikansi simultan (uji F), uji signifikansi parsial (uji t), dan koefisien determinasi (Siregar, 2025; Sugiyono, 2015). Ringkasan kriteria pengambilan keputusan setiap pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Kriteria Pengujian Statistik

Jenis uji	Tujuan	Kriteria keputusan
Normalitas	Menguji distribusi normal residual	Sig. Kolmogorov-Smirnov > 0,05 = residual normal
Linearitas	Menguji hubungan linear antarvariabel	Sig. Deviation from Linearity > 0,05 = linear
Heteroskedastisitas	Menguji kesamaan varians residual	Titik menyebar acak tanpa pola = tidak terjadi heteroskedastisitas
Autokorelasi	Menguji korelasi residual antarpengamatan	Nilai Durbin-Watson 1,5–2,5 = tidak ada autokorelasi
Uji F	Menguji pengaruh simultan	Sig. < 0,05 = berpengaruh signifikan simultan
Uji t	Menguji pengaruh parsial	Sig. < 0,05 = berpengaruh signifikan parsial
Koefisien determinasi (R^2)	Mengukur daya jelas model	Semakin mendekati 1, semakin baik daya jelas model

Sumber: Siregar (2025); Priadana dan Sunarsi (2021)

Tahap kualitatif dilaksanakan melalui Root Cause Analysis. Diagram Pareto digunakan sebagai filter analitik berbasis prinsip 80/20 untuk mengisolasi jenis temuan yang paling dominan (Prayogo et al., 2026). Faktor dominan tersebut kemudian dibedah menggunakan Diagram Fishbone dengan kategori 4M1E, yaitu Man, Machine, Material, Method, dan Environment (Athfal Aldiefa, 2019). Tahap akhir menerjemahkan akar masalah menjadi rencana tindakan melalui matriks 5W+1H yang merinci instruksi teknis, jadwal pemeliharaan, dan alokasi penanggung jawab (Purwanto et al., 2022; Zaqi Al-Faritsy & Suluh Wahyunoto, 2022). Seluruh rancangan tindakan perbaikan divalidasi melalui Focus Group Discussion bersama praktisi dan personel ahli di PT GMF AeroAsia Tbk.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Unit TBW Hangar 3 PT GMF AeroAsia Tbk. Data mencakup 36 unit pesawat Airbus A330 yang terbagi atas 11 unit pada interval usia enam tahun, 12 unit pada dua belas tahun, dan 13 unit pada delapan belas tahun. Rekapitulasi statistik deskriptif kedua variabel terikat disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Statistik Deskriptif Total Defect dan Size Defect Berdasarkan Interval Usia Pesawat

Usia (tahun)	N	Mean Total Defect	Std. Deviation	Mean Size Defect (sq.mm)	Std. Deviation	Total Defect
6	11	1,91	0,701	4.047,91	491,165	21
12	12	3,83	0,718	6.455,67	813,391	46
18	13	6,00	1,000	9.051,08	611,033	78
Total	36	4,03	1,874	6.657,19	2.164,972	145

Sumber: Hasil pengolahan data SPSS (2026)

Rata-rata Total Defect meningkat dari 1,91 pada kelompok usia enam tahun menjadi 6,00 pada kelompok delapan belas tahun, sedangkan rata-rata Size Defect meningkat dari 4.047,91 sq.mm menjadi 9.051,08 sq.mm pada kelompok usia yang sama. Hasil pengujian asumsi klasik terhadap residual kedua model regresi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Asumsi Klasik Kedua Model Regresi

Jenis uji	Statistik	Total Defect (Y ₂)	Size Defect (Y ₁)	Keterangan
Normalitas	Sig. Kolmogorov-Smirnov	0,000	0,200	Y ₁ normal; Y ₂ tidak normal sempurna
Normalitas	Sig. Shapiro-Wilk	0,000	0,830	Y ₁ normal; Y ₂ tidak normal sempurna
Linearitas	Sig. Deviation from Linearity	0,682	0,688	Kedua model linear
Heteroskedastisitas	Pola scatterplot residual	Acak	Acak	Tidak terjadi heteroskedastisitas
Autokorelasi	Durbin-Watson	2,116	1,991	Tidak terjadi autokorelasi

Sumber: Hasil pengolahan data SPSS (2026)

Setelah asumsi klasik terpenuhi, dilakukan analisis regresi linier sederhana terhadap kedua variabel terikat. Hasil lengkap koefisien regresi, uji parsial, uji simultan, dan koefisien determinasi disajikan pada Tabel 5.

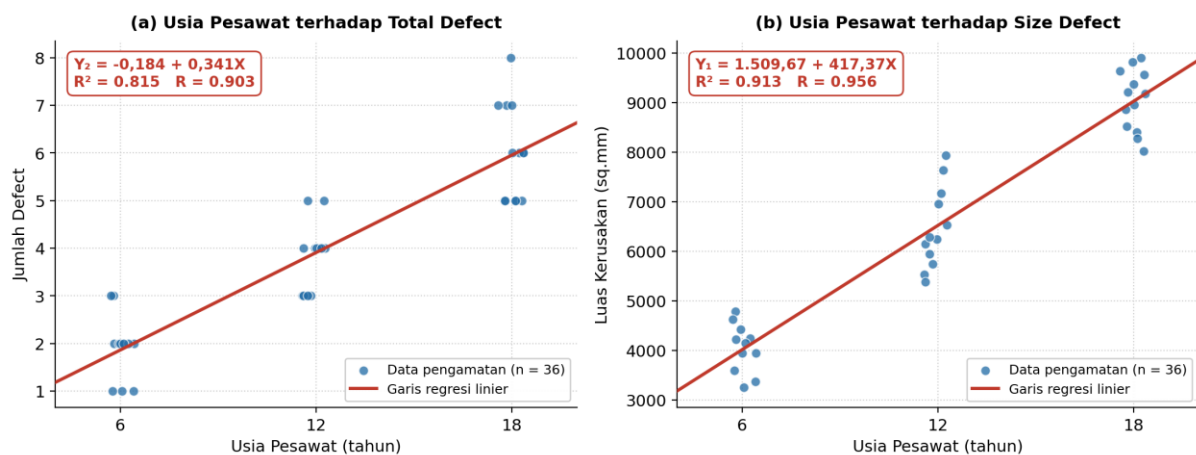
Tabel 5. Hasil Analisis Regresi Linier Sederhana Kedua Model

Model / parameter	B	Std. Error	t	Sig.	R	R ²
Total Defect (Y ₂) – Konstanta	-0,184	0,370	-0,497	0,622	0,903	0,815

Model / parameter	B	Std. Error	t	Sig.	R	R ²
Total Defect (Y ₂) – Usia	0,341	0,028	12,257	0,000		
Size Defect (Y ₁) – Konstanta	1.509,667	292,774	5,156	0,000	0,956	0,913
Size Defect (Y ₁) – Usia	417,367	22,069	18,912	0,000		
Uji F model Total Defect (Y ₂)	F = 150,244; Sig. = 0,000; Durbin-Watson = 2,116					
Uji F model Size Defect (Y ₁)	F = 357,670; Sig. = 0,000; Durbin-Watson = 1,991					

Sumber: Hasil pengolahan data SPSS (2026)

Berdasarkan Tabel 5 diperoleh dua persamaan regresi, yaitu $Y_2 = -0,184 + 0,341X$ untuk model Total Defect dan $Y_1 = 1.509,667 + 417,367X$ untuk model Size Defect. Setiap penambahan satu tahun usia pesawat meningkatkan jumlah temuan sebesar 0,341 defect dan memperluas area kerusakan sebesar 417,367 sq.mm. Sebaran data pengamatan terhadap garis regresi kedua model ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sebaran Data dan Garis Regresi Usia Pesawat terhadap Total Defect dan Size Defect
 Sumber: Hasil pengolahan data penulis (2026)

Tahap kualitatif diawali dengan pemetaan frekuensi jenis temuan. Dari total 145 defect yang tercatat pada 36 unit pesawat, rekapitulasi frekuensi beserta persentase kumulatifnya disajikan pada Tabel 6.

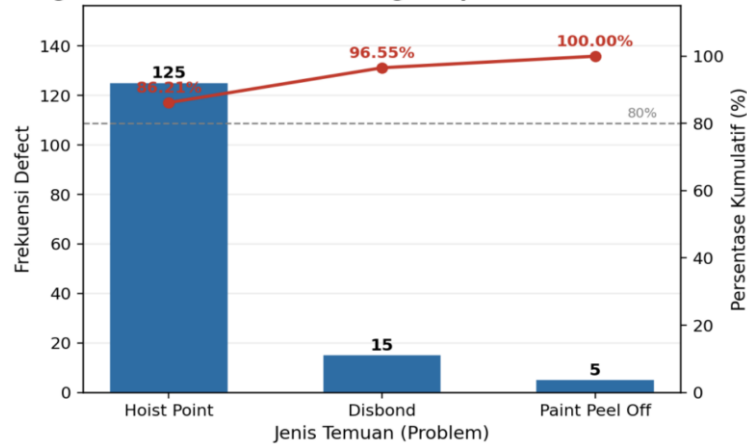
Tabel 6. Rekapitulasi Frekuensi Jenis Temuan Water Ingress

No	Jenis temuan (problem)	Frekuensi (defect)	Persentase (%)	Persentase kumulatif (%)
1	Hoist Point	125	86,21	86,21
2	Disbond	15	10,34	96,55
3	Paint Peel Off	5	3,45	100,00
	Total	145	100,00	–

Sumber: Data Problem Water Ingression PT GMF AeroAsia Tbk. (2026)

Visualisasi data tersebut dalam bentuk Diagram Pareto ditampilkan pada Gambar 2. Kategori Hoist Point telah melampaui ambang kumulatif 80% sejak kategori pertama.

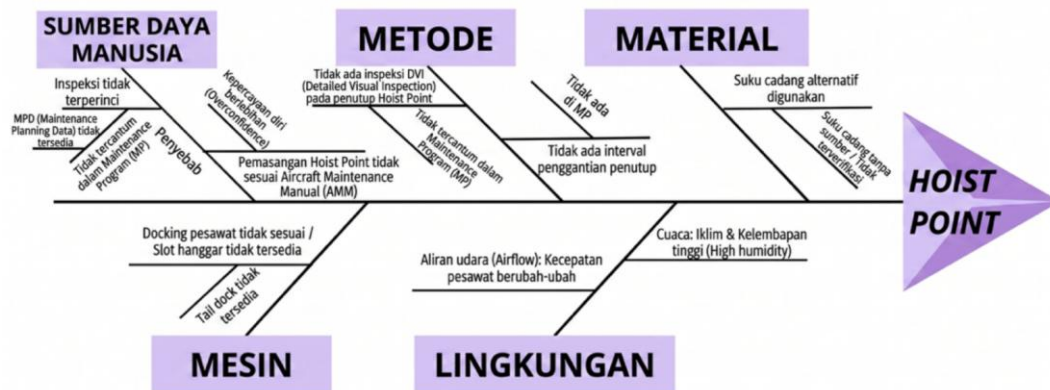
Diagram Pareto Temuan Water Ingress pada Rudder Airbus A330



Gambar 2. Diagram Pareto Temuan Water Ingress pada Rudder Airbus A330

Sumber: Hasil pengolahan data penulis (2026)

Faktor dominan tersebut selanjutnya dibedah menggunakan Diagram Fishbone dengan kategori 4M1E sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Fishbone Akar Penyebab Water Ingress pada Area Hoist Point

Sumber: Hasil pengolahan data penulis (2026)

Berdasarkan Diagram Fishbone tersebut teridentifikasi lima akar penyebab utama, yang kemudian diterjemahkan menjadi rencana tindakan perbaikan melalui matriks 5W+1H sebagaimana diringkas pada Tabel 7.

Tabel 7. Ringkasan Akar Penyebab dan Usulan Perbaikan Berbasis Matriks 5W+1H

Kategori	Akar penyebab	Usulan perbaikan (What & How)	Penanggung jawab dan waktu (Who & When)
Man	Inspeksi tidak terperinci akibat pegawai baru tanpa pengawasan serta pemasangan hoist point tidak sesuai AMM karena over-confidence teknisi	Pelatihan wajib inspeksi area hoist point cover dan penerapan Detailed Visual Inspection terstandar sesuai AMM/SRM; pembuatan checklist khusus yang memuat titik pemeriksaan torque, gap seal, dan kondisi sealant, dicatat dalam NRC	Inspector minimal B1/B2 EASA Part 66 didampingi supervisor; pegawai baru wajib OJT tiga kali pendampingan; verifikasi ulang 24 jam setelah pemasangan pada setiap D-Check
Method	Tidak terdapat task card Detailed Visual Inspection khusus hoist point cover dalam Maintenance Program dan tidak ada interval penggantian cover yang terjadwal	Penambahan task card DVI ke dalam Maintenance Program dan penetapan interval replacement cover melalui pengajuan Engineering Order, disertai penetapan part life limit berdasarkan analisis fatigue dan data historis	Engineer Reliability berkoordinasi dengan Airbus Technical Support dan disetujui operator; revisi diajukan sebelum D-Check berikutnya dengan interval penggantian setiap enam tahun (D01 Check)

Kategori	Akar penyebab	Usulan perbaikan (What & How)	Penanggung jawab dan waktu (Who & When)
Material	Penggunaan alternative part number tanpa sumber yang jelas sehingga dimensi dan spesifikasi material cover kurang efektif	Kewajiban penggunaan part sesuai Part Number OEM Airbus dan larangan alternative part number tanpa dokumen approval; verifikasi terhadap Illustrated Parts Catalog Airbus A330 setiap penggantian cover disertai EASA Form 1 atau FAA 8130-3	Material Engineer dan Store Keeper, diverifikasi Quality Assurance sebelum part dipasang; berlaku segera pada setiap permintaan part
Machine	Tidak tersedianya slot hangar dan tail dock yang sesuai sehingga docking pesawat tidak optimal dan akses ke area hoist point menurun	Penyediaan dedicated tail dock Airbus A330 pada salah satu bay hangar atau penggunaan mobile docking platform tersertifikasi sesuai AMM 07-10-00 sebagai alternatif	Production Planning & Control dan Hangar Manager; slot dengan tail dock dikonfirmasi minimal 30 hari sebelum input date pesawat
Environment	Iklim tropis dengan kelembapan tinggi serta fluktuasi kecepatan airflow yang mempercepat degradasi sealant dan kerusakan material cover	Penerapan prosedur perlindungan sementara berupa weather protection cover pada area hoist point sesuai AMM 55-40-00, disertai pencatatan humidity log setiap kedatangan pesawat untuk monitoring tren degradasi	Line Maintenance Technician dan Aircraft Ramp Handling dikoordinasikan Line Maintenance Supervisor; berlaku saat pesawat parkir lebih dari 48 jam atau kelembapan di atas 80% selama lebih dari 24 jam

Sumber: Hasil pengolahan data penulis (2026)

Pembahasan

Seluruh data yang disajikan merupakan data hasil pengolahan, bukan data mentah. Data temuan Non-Destructive Testing pada 36 unit pesawat direkapitulasi terlebih dahulu menurut interval usia, diuji asumsi klasiknya, kemudian diregresikan dan diuji hipotesisnya melalui SPSS. Frekuensi jenis temuan diolah menjadi persentase kumulatif sebelum divisualisasikan, sedangkan akar penyebab disusun berdasarkan hasil observasi lapangan dan diskusi terarah bersama praktisi. Dengan demikian seluruh nilai koefisien, statistik uji, dan persentase yang dilaporkan merupakan turunan langsung dari data operasional armada. Hasil regresi menunjukkan bahwa usia pesawat berpengaruh positif dan signifikan terhadap water ingress pada kedua dimensi pengukuran. Secara teknis, hubungan ini dapat dijelaskan oleh mekanisme degradasi material. Penurunan kualitas seal, gasket, dan lapisan pelindung struktur seiring bertambahnya usia pakai memperbesar celah mikro pada sambungan, sehingga jalur infiltrasi fluida bertambah baik dari sisi jumlah titik masuk maupun luas area terdampak. Fluida yang telah terperangkap kemudian mengalami freeze-thaw cycle berulang pada setiap fase penerbangan, sehingga kerusakan yang telah terbentuk cenderung merambat, bukan menetap pada ukuran awalnya. Karakteristik perambatan inilah yang menjelaskan mengapa usia pesawat memiliki daya jelas lebih tinggi terhadap Size Defect ($R^2 = 0,913$) dibandingkan terhadap Total Defect ($R^2 = 0,815$). Jumlah titik temuan sangat dipengaruhi faktor lain di luar model seperti frekuensi inspeksi, sensitivitas alat, rute operasi, dan ketelitian teknis, sedangkan luas kerusakan lebih murni merefleksikan akumulasi waktu degradasi.

Perlu dicatat bahwa variabel bebas dalam penelitian ini hanya mengambil tiga nilai diskret, yaitu 6, 12, dan 18 tahun, sehingga garis regresi pada dasarnya menghubungkan tiga rata-rata kelompok. Kondisi ini justru menjadikan uji linearitas sangat penting, dan hasil Deviation from Linearity sebesar 0,682 untuk model Total Defect serta 0,688 untuk model Size Defect membuktikan bahwa ketiga rata-rata kelompok tersebut memang terletak pada satu garis lurus. Dengan demikian penggunaan model linier dapat dipertanggungjawabkan, meskipun ekstrapolasi ke luar rentang 6–18 tahun perlu dilakukan dengan hati-hati. Terkait residual model Total Defect yang tidak berdistribusi normal secara sempurna, kondisi tersebut wajar mengingat Total Defect merupakan data cacah dengan rentang nilai yang terbatas.

Berdasarkan Central Limit Theorem, distribusi sampling rata-rata akan mendekati normal seiring bertambahnya ukuran sampel terlepas dari bentuk distribusi populasinya (Jay & Magsalay, 2025), dan dengan $N = 36$ yang melampaui ambang umum 30, asumsi normalitas terpenuhi secara asimtotik sehingga estimasi Ordinary Least Squares tetap robust.

Pada tahap kualitatif, dominasi temuan pada area hoist point sebesar 86,21% berkaitan langsung dengan fungsinya sebagai titik pengangkatan yang memiliki sambungan mekanis menembus struktur komposit honeycomb. Sambungan tersebut menjadi jalur masuk air apabila sealant mengalami degradasi, retak mikro, atau kegagalan proteksi akibat siklus pembebanan berulang selama pelepasan dan pemasangan komponen pada perawatan berat. Temuan ini konsisten dengan hasil Diagram Fishbone yang menempatkan ketiadaan task card Detailed Visual Inspection dan interval penggantian cover dalam Maintenance Program sebagai akar penyebab pada aspek metode. Dengan kata lain, temuan kuantitatif dan kualitatif saling menguatkan: tren degradasi yang terukur secara statistik terjadi justru pada area yang secara prosedural tidak memiliki instrumen pemantauan terjadwal.

Dibandingkan dengan penelitian sejenis, hasil ini menunjukkan kesesuaian sekaligus perluasan. Jammal et al. (2025) menemukan korelasi linier yang kuat antara siklus penerbangan dan keausan carbon brake, sedangkan Darmawan dan Kurniawan (2023) memodelkan laju keausan brake pad berdasarkan akumulasi siklus operasional; arah temuan keduanya sejalan dengan penelitian ini, yaitu akumulasi pemakaian berbanding lurus dengan tingkat degradasi. Perbedaannya terletak pada objek, karena kedua penelitian tersebut menyasar keausan mekanis komponen bergerak, sedangkan penelitian ini memodelkan degradasi struktural material komposit pada flight control surface. Nilai R^2 sebesar 0,913 pada model Size Defect juga lebih tinggi dibandingkan model prediktif pada komponen bergerak yang umumnya dipengaruhi variasi pola operasi antarunit, yang mengindikasikan bahwa degradasi komposit akibat paparan lingkungan berlangsung lebih seragam antararmada. Pada sisi kualitatif, Hayatussalam et al. (2025) dan Prayogo et al. (2026) telah membuktikan efektivitas rantai Pareto–Fishbone–5W+1H di lingkungan PT GMF AeroAsia Tbk., namun keduanya berfokus pada waktu perawatan dan kegagalan sistem APU; penelitian ini memperluas penerapannya ke ranah kerusakan struktural komposit.

Implikasi praktis dari sintesis kedua pendekatan tersebut adalah tersedianya dasar yang terukur bagi transisi dari perawatan reaktif menuju prediktif. Model regresi memberikan proyeksi kapan tingkat kerusakan akan mencapai ambang tertentu berdasarkan usia armada, sedangkan matriks 5W+1H menerjemahkan proyeksi tersebut menjadi tindakan konkret yang memiliki penanggung jawab dan tenggat waktu. Penetapan interval penggantian hoist point cover setiap enam tahun bertepatan dengan D01 Check menjadi titik temu antara keduanya, karena memanfaatkan kesempatan perawatan yang telah terjadwal tanpa menambah downtime baru. Pendekatan ini sejalan dengan temuan Tan dan Raghavan (2016) bahwa kebijakan perawatan berbasis akar masalah mampu menurunkan kerusakan berulang secara signifikan, sekaligus mendukung arah pengembangan predictive maintenance berbasis data operasional yang dikemukakan Sezenoğlu Çetin et al. (2026).

KESIMPULAN

Usia operasional pesawat terbukti berpengaruh positif dan signifikan terhadap peningkatan jumlah maupun luasan area water ingress pada rudder Airbus A330 di PT GMF AeroAsia Tbk. Pemodelan Regresi Linier Sederhana atas 36 unit pesawat menghasilkan persamaan $Y_2 = -0,184 + 0,341X$ untuk Total Defect dengan koefisien determinasi 81,5% dan $Y_1 = 1.509,67 + 417,37X$ untuk Size Defect dengan koefisien determinasi 91,3%, keduanya signifikan pada taraf 0,05 baik secara parsial maupun simultan. Usia pesawat terbukti lebih dominan menjelaskan keparahan kerusakan dibandingkan frekuensi temuannya, sehingga

dimensi luas area merupakan indikator degradasi yang lebih representatif untuk dijadikan dasar perencanaan perawatan.

Analisis Diagram Pareto mengidentifikasi area hoist point sebagai penyebab paling dominan dengan kontribusi 86,21% dari total 145 defect, dan penelusuran melalui Diagram Fishbone 4M1E menemukan lima akar penyebab utama, yaitu inspeksi teknisi yang kurang terperinci, ketiadaan instruksi inspeksi dan penggantian dalam Maintenance Program, penggunaan material alternatif yang tidak terverifikasi, keterbatasan fasilitas tail dock, serta paparan iklim dengan kelembapan tinggi. Temuan baru penelitian ini adalah terbangunnya kerangka kerja terintegrasi yang menghubungkan pemodelan kuantitatif degradasi struktur komposit dengan resolusi prosedural yang dapat langsung dieksekusi, di mana tren degradasi yang terukur secara statistik ternyata terjadi pada area yang justru tidak memiliki instrumen pemantauan terjadwal. Rencana tindakan perbaikan yang dirumuskan melalui matriks 5W+1H mencakup pelatihan standardisasi inspeksi, penambahan task card Detailed Visual Inspection beserta interval penggantian cover setiap enam tahun, verifikasi part number sesuai Illustrated Parts Catalog, penyediaan slot hangar dan tail dock yang memadai, serta prosedur perlindungan cuaca saat pesawat berada di apron.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan. Variabel bebas hanya mengambil tiga nilai interval usia sehingga model belum menangkap perilaku degradasi pada rentang usia antara, dan ekstrapolasi ke luar rentang enam hingga delapan belas tahun perlu dilakukan dengan hati-hati. Model juga hanya melibatkan satu variabel bebas, sehingga faktor lain yang berpotensi memengaruhi water ingress seperti rute operasi, frekuensi penerbangan, kondisi iklim bandara asal, dan riwayat perbaikan sebelumnya belum diperhitungkan. Selain itu, penelitian tidak mencakup pengujian destruktif spesimen komposit maupun analisis biaya, sehingga usulan perbaikan belum mempertimbangkan trade-off ekonomi antara pemeriksaan terjadwal dan perbaikan skala besar. Penelitian selanjutnya disarankan memperluas cakupan data lintas operator, menambahkan variabel lingkungan dan operasional melalui regresi berganda, serta melengkapi analisis dengan pengujian laboratorium terhadap material komposit dan sealant agar rekomendasi yang dihasilkan mempertimbangkan aspek teknis, prosedural, dan ekonomi secara bersamaan.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Penerbangan Indonesia Curug atas dukungan akademik selama penyusunan penelitian, kepada dosen pembimbing atas arahan dan masukan yang diberikan, serta kepada PT GMF AeroAsia Tbk. atas kesempatan On The Job Training, akses terhadap data inspeksi, dan kesediaan para praktisi mengikuti Focus Group Discussion yang menjadi dasar validasi usulan perbaikan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alma, B. (2022). Penerapan metode failure mode, effect analysis, dan 5W1H untuk menurunkan reject pada mesin rolling tiga di PT XYZ. *Journal of Applied Management Research*, 2(2), 73–80. <https://doi.org/10.36441/jamr>
- Ariani, F., & Pulungan, B. S. P. N. (2025). *Finite element analysis and root cause analysis of wire rope failure in STS cranes*.
- Athfal Aldiefa. (2019). *Analisis teknis persyaratan penempatan peralatan dan mobilitas masyarakat terhadap pancaran localizer menggunakan diagram fishbone di Bandar Udara Adi Soemarmo Solo*.
- Christian Carlos, Riyanti, L. E., & Al Farisy, M. F. (2026). Analisis waste manhours pada proses perawatan C-Check pesawat Airbus 330 dengan metode value stream mapping (VSM). *Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, 6(1), 137–160. <https://doi.org/10.55606/teknik.v6i1.8663>



- Darmawan, B. I., & Kurniawan, I. (2023). *Analisis laju keausan brake pad terhadap disc brake kereta listrik LRV seri 1100*.
- Dewi, H., & Sutiarno, D. (2018). Analisa produk cacat menggunakan metode peta kendali P dan root cause analysis. *Jurnal Teknologi Industri Agro*, 7(2).
- Hayatussalam, F. I., Riyanti, L. E., & Kurniawan, I. E. (2025). *Analysis of turnaround time delays in C-Check of Airbus 330 aircraft using root cause analysis method*.
- Herry, A. P., Farida, F., & Lutfia, N. I. (2018). Performance analysis of TPM implementation through Overall Equipment Effectiveness (OEE) and six big losses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 453(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/453/1/012061>
- Huang, J., Liu, W., Zhou, Y., & Liu, D. (2024). Structural analysis and testing of a flexible rudder using a cosine honeycomb structure. *Aerospace*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/aerospace11060462>
- Jammal, P., Pinon Fischer, O., Mavris, D. N., & Wagner, G. (2025). *Advancing aviation safety through predictive maintenance: A machine learning approach for carbon brake wear severity classification*.
- Jay, R., & Magsalay, M. (2025). *Quantifying central limit theorem convergence: A Monte Carlo simulation approach to minimum sample size*. <https://doi.org/10.47772/IJRISS>
- Nam, S., Choi, S., Edell, G., De, A., & Song, W. K. (2023). Comparative analysis of the aviation maintenance, repair, and overhaul (MRO) industry in Northeast Asian countries: A suggestion for the development of Korea's MRO industry. *Sustainability*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/su15021159>
- Napitupulu, S., & Siagian, N. A. (2023). Prediksi data produksi menggunakan regresi linear sederhana. *JDMIS: Journal of Data Mining and Information Systems*, 1(2), 95–105. <https://doi.org/10.54259/jdmis.v1i2.1956>
- Nasution, K. P., Fitra, A., & Insani, A. E. (2025). Penerapan root cause analysis (RCA) dalam mengurangi tingkat cacat produk stick lolipop di PT XYZ.
- Prayogo, R. A., Nugraha, W. C., & Nurhawani, 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>
- Priadana, S., & Sunarsi, D. (2021). *Metode penelitian kuantitatif*. Pascal Books.
- Purwanto, D., & Septiari, R. (2022). Pengendalian kualitas dengan menggunakan metode statistical quality control guna meminimalisasi produk gagal pada PT Malindo Intitama Raya. *Jurnal Mahasiswa Teknik Industri*, 5(2).
- Rafsyani Zani, F., & Supriyanto, H. (2021). *Analisis perbaikan proses pengemasan menggunakan metode root cause analysis dan failure mode and effect analysis dalam upaya meningkatkan kualitas produk pada CV XYZ*.
- Rahma, N. K., & Widharto, Y. (2024). *Analisis penjadwalan maintenance dengan metode korelasi dan regresi linier berganda (studi kasus: Divisi Farmasi 3 PT Konimex)*.
- Sezenoğlu Çetin, F., Üngör, U., Koyuncu, E., & Özkol, İ. (2026). Data-driven predictive maintenance for aircraft components through sparse event logs. *Aerospace*, 13(1), 110. <https://doi.org/10.3390/aerospace13010110>
- Sfarra, S., Tejedor, B., Perilli, S., Almeida, R. M. S. F., & Barreira, E. (2021). Evaluating the freeze-thaw phenomenon in sandwich-structured composites via numerical simulations and infrared thermography. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(6), 3105–3123. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09985-1>
- Siregar, S. (2025). *Statistik parametrik untuk penelitian kuantitatif*. Bumi Aksara.



- Sugiyono. (2015). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Susendi, N., Suparman, A., & Sopyan, I. (2021). Kajian metode root cause analysis yang digunakan dalam manajemen risiko di industri farmasi. *Majalah Farmasetika*, 6(4), 310. <https://doi.org/10.24198/mfarmasetika.v6i4.35053>
- Tan, C. M., & Raghavan, N. (2016). *Root cause analysis based maintenance policy*.
- Vavilov, V., Marinetti, S., Pan, Y., & Chulkov, A. (2016). Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: Qualitative and quantitative aspects. *Polymer Testing*, 54, 270–280. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.07.023>
- Xu, X., Huo, W., Li, F., & Zhou, H. (2023). Classification of liquid ingress in GFRP honeycomb based on one-dimension sequential model using THz-TDS. *Sensors*, 23(3). <https://doi.org/10.3390/s23031149>
- Yıldırım, U., & Afser, H. (2025). *Linear methods for predictive maintenance: The case of NASA C-MAPSS datasets*.
- Zaqi Al-Faritsy, A., & Suluh Wahyunoto, A. (2022). Analisis pengendalian kualitas produk meja menggunakan metode six sigma pada PT XYZ. *Jurnal Rekayasa Industri (JRI)*, 4(2).