



Perhitungan Performa Penerbangan Berbasis Data FDMA pada Pesawat Cessna 172SP di Lingkungan Tropis (Studi di Bandar Udara Banyuwangi)

Dimas Dicky Fernando¹, Kukuh Tri Prasetyo², Rochmad Setiawan^{3*}, Aji Akhidah⁴

^{1,2,3,4}Akademi Penerbang Indonesia Banyuwangi, Indonesia

Email: dimas.fernando95@gmail.com¹, kukuhtriprasetyo@gmail.com², inc.razer@gmail.com^{3*}, ajiakidah51@gmail.com⁴

* Penulis Korespondensi: inc.razer@gmail.com

Abstract: Conventional flight planning often relies on static performance calculations from manufacturer manuals without accounting for real-time local tropical atmospheric dynamics. This study analyzes daily fuel consumption deviations and approach stability within the Cessna 172S NAV III fleet at Blimbingsari Airport (WADY) using FDMA data. An ex-post facto quantitative approach was employed, extracting macro data from logs FDMA 2025.csv (3,164 flight releases) and micro parameters from approaches.csv (7,796 samples). Hypotheses were tested using One-Sample T-Test and Multiple Linear Regression via SPSS. Results revealed significant deviation ($p < 0.001$), with actual fuel consumption reaching 10.2 USG/hr during circular circuit flights, approaching the POH maximum limit (10.4 USG/hr). An overspeed approach of 9–13 knots above POH reference speed (61 KIAS) was detected, causing flare distance up to 1,300 feet and triggering maximum ground braking of 0.12 G. This research formulated a Safe Operating Envelope Matrix introducing a 5% Landing Weight Penalty at ambient temperature $>32^{\circ}\text{C}$ and a $1.6\times$ safety factor for Landing Distance Required.

Keywords: Cessna 172, FDMA, Flight Operations, FOO, Operations Management

Abstrak: Perencanaan penerbangan konvensional sering kali mengandalkan perhitungan performa statis berdasarkan manual pabrikan tanpa mempertimbangkan dinamika atmosfer tropis lokal secara real-time. Penelitian ini bertujuan menganalisis deviasi konsumsi bahan bakar harian dan kestabilan fase pendekatan pada armada Cessna 172S NAV III di Bandara Blimbingsari (WADY) menggunakan intervensi data Flight Data Monitoring and Analysis (FDMA). Pendekatan kuantitatif ex-post facto digunakan dengan mengeksplorasi data makro dari logs FDMA 2025.csv (3.164 rilis penerbangan) dan data mikro dari approaches.csv (7.796 sampel). Pengujian hipotesis dilakukan melalui One-Sample T-Test dan Regresi Linear Berganda menggunakan SPSS. Hasil menunjukkan deviasi signifikan ($p < 0,001$) dengan konsumsi bahan bakar aktual mencapai 10,2 USG/jam pada penerbangan sirkuit sirkuler, mendekati batas atas POH (10,4 USG/jam). Pada fase pendaratan terdeteksi overspeed approach 9–13 knots di atas batas referensi POH (61 KIAS) yang mengakibatkan flare distance hingga 1.300 kaki dan beban pengereman 0,12 G. Penelitian berhasil memformulasi Safe Operating Envelope Matrix mencakup Landing Weight Penalty 5% pada suhu $>32^{\circ}\text{C}$ dan safety factor $1,6\times$ untuk Landing Distance Required.

Kata kunci: Cessna 172, FDMA, FOO, Manajemen Operasi, Operasi Terbang.

1. LATAR BELAKANG

Keselamatan dan efisiensi operasional penerbangan pada sektor General Aviation (GA) di Indonesia menuntut akurasi tinggi sejak fase perencanaan di darat. Sebagai lini pertahanan pertama, seorang Flight Operations Officer (FOO) bertanggung jawab melakukan kalkulasi performa, menentukan batas berat pesawat (mass and balance), serta menerbitkan Dispatch Release yang menjamin pesawat dapat lepas landas dengan aman (Wiegmann & Shappell, 2017). Namun, karakteristik iklim tropis di wilayah operasional seperti Akademi Penerbang Indonesia (API) Banyuwangi kerap memunculkan deviasi performa aktual yang tidak terprediksi oleh metode konvensional.

Tantangan utama adalah kesenjangan signifikan antara prediksi performa teoritis Pilot Operating Handbook (POH) dengan performa aktual saat menghadapi variabilitas angin lokal dan fenomena Density Altitude (DA) ekstrem. McRae et al. (2021) membuktikan bahwa setiap kenaikan DA sebesar 1.000 kaki meningkatkan jarak take-off sebesar 15% pada mesin piston aspirasi normal, sementara Goodman & Small Griswold (2019) mengonfirmasi bahwa kondisi tropis pesisir secara signifikan meningkatkan DA harian. Kondisi suhu harian Banyuwangi yang sering melampaui 30°C mendegradasi daya angkat sayap, efisiensi baling-baling, dan daya kuda mesin secara simultan.

Pemanfaatan teknologi Flight Data Monitoring & Analysis (FDMA) yang mengintegrasikan log biner Garmin G1000 menawarkan transformasi paradigma kerja FOO (Tvaryanas, 2006). Padmanaban & Mahendran (2015) membuktikan bahwa FDM mampu mendeteksi penurunan margin keselamatan secara proaktif. Namun di Indonesia, pemanfaatan data FDMA masih terbatas untuk investigasi reaktif pasca kejadian (Stolzer et al., 2023). Padahal, karakteristik operasional General Aviation memiliki tantangan yang sangat berbeda dengan penerbangan komersial reguler. Setiawan et al. (2025) menegaskan bahwa maskapai komersial yang beroperasi di bawah regulasi CASR Part 121 memiliki perimeter standar yang sangat ketat dan rigid, di mana deviasi parameter atau eksidensi (exceedance) tidak dapat ditoleransi sama sekali. Sebaliknya, fleksibilitas operasional pada General Aviation menyebabkan fluktuasi parameter penerbangan menjadi lebih sering terjadi di lapangan.

Berdasarkan analisis makro terhadap 3164 penerbangan dengan akumulasi 3.948,7 jam terbang, sistem FDMA API Banyuwangi merekam 3.463 peristiwa eksidensi keselamatan, termasuk 614 kasus High CHT, 30 peristiwa Low Airspeed, dan 17 indikasi stall. Distribusi parameter ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Parameter Operasional dan Eksidensi Keselamatan Armada Cessna 172SP

No	Parameter Operasional / Safety Events	Nilai	Relevansi terhadap Perencanaan Flight Dispatch
1	Total Penerbangan Dianalisis	3.164 flights	Validasi empiris model performa lokal
2	Akumulasi Jam Terbang	3.948,7 jam	Representasi data kuat untuk regresi statistik
3	Total Peristiwa Eksidensi	2.743 events	Indikator tingginya deviasi dari standar POH
4	Rata-rata Durasi Fase Take-off	0,6 menit	Threshold TODR
5	Rata-rata Durasi Fase Climb	6,3 menit	Fase kritis perhitungan Climb Gradient oleh FOO
6	Eksidensi High CHT	3 events	Indikator thermal stress
7	Peringatan Indikasi Stall	1346 events	Pemetaan batas kritis
8	Pola Distribusi Kecepatan Angin Dominan	4–11 knots	Variabilitas komponen angin (crosswind/tailwind)

Sumber: API Banyuwangi (2025)

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah penelitian ini adalah: (1) Apakah terdapat perbedaan/deviasi antara konsumsi bahan bakar aktual di lapangan dengan standar POH? (2) Apakah kecepatan pendekatan (*approach speed*) saat melintasi ketinggian 50 kaki berpengaruh terhadap jarak melayang (*flare distance*) pesawat? (3) Bagaimana hubungan antara kecepatan pendekatan terhadap flare distance armada Cessna 172SP?

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan: (1) untuk mengetahui deviasi performa daya tanjak aktual terhadap standar POH; (2) untuk mengetahui pengaruh kecepatan pendekatan (*approach speed*) saat melintasi ketinggian 50 kaki terhadap jarak melayang (*flare distance*) pesawat; dan (3) untuk mengetahui hubungan antara kecepatan pendekatan terhadap flare distance armada Cessna 172SP.

2. KAJIAN TEORITIS

Perencanaan Penerbangan dan Peran Flight Operation Officer

Perencanaan penerbangan adalah pilar utama pemastian keselamatan operasi udara. Sesuai CASR Part 91 dan Part 141, proses ini mencakup analisis komprehensif terhadap rute, kondisi meteorologi, kecukupan bahan bakar, dan batasan performa pesawat. FOO memiliki tanggung jawab bersama dengan *Pilot in Command* terhadap keselamatan penerbangan. Keterbatasan utama praktik konvensional adalah penggunaan data statis POH yang dirancang berdasarkan kondisi ideal pesawat baru, tidak merepresentasikan degradasi performa akibat usia armada dan kondisi lokal (Wiegmann & Shappell, 2017).

Pengukuran Risiko, Exceedance Analysis, dan Statistik Komparatif

Elevated Density Altitude (DA) secara langsung mengurangi daya mesin, efisiensi baling-baling, dan gaya angkat sayap, mengakibatkan penurunan MTOW dan pemanjangan jarak take-off serta landing (McRae et al., 2021). Goodman & Small Griswold (2019) membuktikan bahwa kenaikan suhu dan kelembaban di bandara-bandara pesisir tropis secara signifikan meningkatkan DA harian. Pada mesin aspirasi normal seperti Lycoming IO-360 di Cessna 172SP, kondisi ini memicu lonjakan suhu silinder yang terekam sebagai eksidensi High CHT (Pan et al., 2023).

Teori Flare

Fase flare pendaratan merupakan transisi kritis dari lintasan pendekatan (*approach path*) menuju fase pelambatan di atas permukaan landasan. Secara aerodinamika, flare distance sangat dipengaruhi oleh retensi energi kinetik sisa yang dibawa oleh pesawat saat melintasi

ambang landasan. Menurut teori pendaratan performa yang dikembangkan oleh L. Wang et al. (2014) dan L. Wang et al. (2018), kelebihan kecepatan pendekatan (*overspeed*) akan menghasilkan akumulasi gaya angkat sisa (*excess lift*) yang menahan berat pesawat untuk segera menyentuh daratan. Fenomena ini memicu efek melayang aerodinamis (*aerodynamic floating*) di dalam area pengaruh tanah (*ground effect*), di mana hambatan induksi (*induced drag*) berkurang drastis secara alami, sehingga memperpanjang jarak melayang pesawat secara linear sebelum mencapai titik sentuh pendaratan.

Flight Data Monitoring dan Paradigma Data Driven Safety

FDM adalah program manajemen keselamatan proaktif yang melibatkan pengumpulan dan analisis data rekaman penerbangan secara sistematis (Rey et al., 2021). Li et al. (2023) membuktikan bahwa FDM mendeteksi penurunan margin keselamatan secara proaktif. Q. Wang et al. (2023) dalam Scientific Reports menunjukkan bahwa data QAR/FOQA memberikan sumber penting untuk analisis keselamatan berbasis fitur temporal. Tyagi et al. (2023) memperkuat pandangan ini dengan tinjauan sistematis yang menunjukkan SMS berbasis data digital meningkatkan kepatuhan safety boundaries secara signifikan.

Hipotesis

Model 1

- a. H_0 : Tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara konsumsi bahan bakar aktual di lapangan dengan nilai acuan POH (10,4 USG/jam).
- b. H_1 : Terdapat perbedaan yang signifikan antara konsumsi bahan bakar aktual di lapangan dengan nilai acuan POH (10,4 USG/jam).

Model 2

- a. H_0 : Kecepatan instrumen pesawat saat melintasi ketinggian 50 kaki (X_2) tidak berpengaruh terhadap jarak melayang (Flare Distance, Y_2).
- b. H_1 : Kecepatan instrumen pesawat saat melintasi ketinggian 50 kaki (X_2) berpengaruh positif dan signifikan terhadap jarak melayang (Flare Distance, Y_2).

3. METODE PENELITIAN

Pendekatan dan Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain deskriptif-korelasional berbasis data sekunder sensorik digital (Giuffre, 1997). Pendekatan *ex post facto* dipilih karena variabel independen (kondisi atmosfer tropis dan kecepatan pendekatan) merupakan kondisi yang sudah terjadi dan tidak dapat dimanipulasi oleh peneliti. Penelitian ini berupaya menjelaskan hubungan sebab-akibat antara kondisi operasional nyata yang telah terekam dalam

sistem FDMA dengan deviasi performa yang terjadi pada armada Cessna 172SP di API Banyuwangi.

Populasi dan Sample

Populasi penelitian adalah seluruh data rekaman biner dari perangkat avionik Garmin G1000 pada armada Cessna 172SP di API Banyuwangi. Teknik pengambilan sampel menggunakan total sampling terhadap seluruh basis data FDMA yang terakumulasi, meliputi: (1) Data Makro (*logs FDMA 2025.csv*) yang mencakup 3.164 rilis penerbangan dengan akumulasi 3.948,7 jam terbang dan 3.463 peristiwa eksidensi; (2) Data Mikro (*approaches.csv*) mencakup 7.796 rekaman parameter sensorik fase transisi pendekatan dan pendaratan.

Variable Penelitian dan Definisi Operasional

Variabel independen meliputi: (X_1) komponen angin permukaan aktual (*surface wind component*) dalam knots, dikelompokkan menjadi Calm Wind, Tailwind, dan Extreme Headwind; (X_2) kecepatan instrumen saat melintasi ketinggian 50 kaki sebelum threshold (50' IAS) dalam KIAS. Variabel dependen meliputi: (Y_1) Fuel Burn Rate: konsumsi bahan bakar aktual dalam USG/hr; (Y_2) Flare Distance: jarak horizontal dari threshold hingga touchdown point dalam kaki; (Y_3) Max Ground Braking: beban pengereman mekanis maksimum dalam G-Force.

Instrumen dan Teknik Pengumpulan Data

Data diperoleh melalui dua sumber utama: (1) Data FDMA: file log biner dari kartu SD Garmin G1000 yang telah didekripsi menjadi file logs FDMA 2025.csv dan approaches.csv; dan (2) Data Meteorologi: catatan historis METAR/TAF dari stasiun BMKG Bandara Blimbingsari yang disinkronkan berdasarkan timestamp keberangkatan dan kedatangan pesawat. Validitas penggunaan data log penerbangan sebagai instrumen penelitian primer telah dibuktikan oleh (Wang et al., 2014)) dalam jurnal Reliability Engineering & System Safety, serta dikonfirmasi lebih lanjut oleh (Pan et al., 2023) yang membuktikan data QAR dapat diandalkan untuk analisis reliabilitas komponen mesin secara time series.

Prosedur Analisis Data

Pengolahan data dilakukan melalui empat tahapan: (1) Data Cleaning & Filtration, memisahkan data penerbangan normal dari data manuver khusus; peristiwa Too Close to Stall diisolasi sebagai parameter pemetaan batas kritis aerodinamis dari manuver latihan yang disengaja. (2) Analisis Deskriptif Komparatif pengelompokan data berdasarkan variabilitas komponen angin dan komparasi langsung dengan nilai rujukan statis POH (10,4 USG/hr). (3) Pengujian Hipotesis, Model 1 menggunakan One-Sample T-Test (Test Value = 10,4 USG/hr) dan Model 2 menggunakan Regresi Linear Berganda dengan persamaan:

$$Y_2 = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

di mana

Y_2 = Flare Distance;

α = konstanta;

X_1 = komponen tailwind;

X_2 = 50' IAS;

β_1, β_2 = koefisien regresi;

ε = standar error.

Pemilihan metode regresi linear mengacu pada metodologis Wang et al. (2014) yang membuktikan validitas model regresi dari data QAR untuk prediksi parameter pendaratan kritis.

(4) Formulasi Safe Operating Envelope Matrix, sintesis hasil statistik menjadi matriks rekomendasi mitigasi risiko mandatori bagi FOO.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Komparatif Konsumsi Bahan Bakar Aktual dan POH

Berdasarkan Cessna Aircraft Company (2007), laju pembakaran bahan bakar teoritis pada kondisi 75% power adalah 10,4 USG/hr . Uji One Sample T-Test (N = 3.164) menghasilkan: mean aktual 9,475 USG/hr (SD = 4,189), t-hitung = -12,424 (df = 3.163), $p < 0,001$. Meskipun rata-rata makro berada di bawah batas POH, standar deviasi yang tinggi mengonfirmasi lonjakan ekstrem hingga 10,2 USG/hr akibat DA tinggi khas pesisir tropis, konsisten dengan temuan McRae et al. (2021) bahwa elevated DA secara langsung meningkatkan kebutuhan tenaga mesin. Huang & Cheng (2022) memperkuat hal ini dengan membuktikan bahwa data FDR lebih akurat dari tabel statis dalam estimasi konsumsi bahan bakar. Distribusi komparatif disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Distribusi Komparatif Fuel Used terhadap Faktor Angin

Wind Component (X1)	Sampel Penerbangan	Rerata Airtime (min)	Rerata Fuel Used (USG)	Fuel Consume Y1 (USG/hr)	Exceedence Index
Calm Wind	509	57,2	9,6	10,4	513
Tailwind	2.585	56,2	9,4	10,4	2.192
Extreme Headwind	70	64,0	10,5	10,4	30

Sumber: Data Primer Ekstraksi Logs FDMA 2025 (diolah)

Uji Normalitas dan Validitas Model

Pada Model 1 ($N = 3.164$), uji Kolmogorov-Smirnov menghasilkan statistik 0,186 ($p < 0,001$). Mengacu pada Central Limit Theorem (Field, 2013), dengan $N \gg 30$ distribusi sampling rata-rata bersifat robust sehingga analisis parametrik tetap valid. Pada Model 2 ($N = 7.796$), uji normalitas residual menghasilkan K-S $Z = 1,080$ (Asymp. Sig. = 0,194 > 0,05), membuktikan asumsi normalitas sisaan terpenuhi secara ideal. Hal ini mengonfirmasi bahwa data log penerbangan dari Garmin G1000 memiliki kualitas yang dapat diandalkan sebagai instrumen penelitian (Pan et al., 2023 & Wang et al., 2014).

Analisis Kestabilan Pendekatan dan Batas Aerodinamis Pendaratan

Kecepatan referensi POH pada Flaps Full adalah 61 KIAS (Cessna Aircraft Company, 2007). Regresi Linear Sederhana terhadap $N = 7.796$ sampel menghasilkan $R^2 = 0,020$, $F = 160,575$ ($p < 0,001$), konstanta = 105,150, dan koefisien = 7,116 ($t = 12,672$, $p < 0,001$):

$$Y = 105,150 + 7,116X$$

Setiap kenaikan kecepatan pendekatan 1 knot di atas V_{ref} mengektensi flare distance sebesar 7,11 kaki. Data riil merekam kecepatan 70–74 KIAS, memicu flare distance hingga 1.300 kaki. Wang et al., (2018) dalam Safety Science mengonfirmasi melalui ANOVA 293 sampel QAR bahwa flare yang tidak terkontrol memperpanjang jarak pendaratan secara signifikan. Wang et al. (2014) mengonfirmasi melalui model regresi dari 128 sampel QAR bahwa periode 200 kaki hingga touchdown adalah fase kritis yang menentukan jarak pendaratan. Reiser et al. (2024) mengonfirmasi profil pengereman agresif sebagai kontributor utama runway overrun. Matriks parameter pendaratan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Matriks Ekstraksi Parameter Transisi Pendaratan Aktual Cessna 172SP

AC Reg	Tipe Pendaratan	Kecepatan (50' IAS)	Flare Distance	Touchdown Threshold	Touchdown IAS	Max Ground Braking
PK-BYF	Full Stop	70 KIAS	1.300 ft	1.250 ft	53 KIAS	0,11 G
PK-BYF	Touch and Go	74 KIAS	1.050 ft	1.600 ft	53 KIAS	0,00 G
PK-BYN	Full Stop	74 KIAS	700 ft	1.900 ft	40 KIAS	0,12 G

Sumber: Data Ekstraksi approaches.csv

Tabel 4. Rangkuman Hasil Pengujian Hipotesis

Model Analisis	Parameter Statistik	Nilai Empiris	Sig. (p-value)	Kesimpulan Akademis		
Model 1: Uji Komparatif Fuel Used	t-hitung (df = 3.163)	-12,424	< 0,001	Signifikan	berbeda	dari standar POH
Model 2: Uji ANOVA Regresi	F-hitung (df = 1; 7.794)	160,575	< 0,001	Model Fit/Valid	Regresi	Sangat

Model 2: Uji Koefisien Regresi	t-hitung Variabel Kecepatan	12,672	< 0,001	Kecepatan berpengaruh positif & signifikan terhadap Flare Distance
--------------------------------	-----------------------------	--------	---------	--

Sumber: Output SPSS (diolah peneliti)

Nilai Koefisien Determinasi (R^2) sebesar 0,020 menunjukkan bahwa variabilitas kecepatan pendaratan saat melintasi ketinggian 50 kaki menerangkan 2% dari total variansi *Flare Distance*. Meskipun nilai kontribusi langsung ini tergolong rendah, model regresi dinyatakan tetap sangat valid, fit, dan memiliki signifikansi praktis yang tinggi di lapangan. Hal ini dibuktikan oleh nilai -hitung sebesar 160,575 dengan . Dalam analisis data makro dengan ukuran sampel yang sangat besar ($N=7.796$), nilai yang kecil merupakan fenomena yang wajar dan dapat diterima karena perilaku pilot dipengaruhi oleh puluhan faktor eksternal non-linear lainnya seperti teknik flaring tangan pilot, turbulensi mekanis landasan, hingga arus termal lokal. Namun demikian, signifikansi statistik yang sangat kuat ini membuktikan bahwa deviasi kecepatan sekecil apa pun tetap memberikan konsekuensi mekanis yang pasti terhadap perpanjangan jarak mendarat pesawat.

Formulasi Safe Operating Envelope

Pendekatan pembuktian kuantitatif yang mengintegrasikan data sensorik pesawat ke meja kerja FOO jauh lebih valid daripada kalkulasi grafik manual statis (Tvaryanas, 2006). Ayra et al. (2019) dalam *Journal of Aerospace Information Systems* menunjukkan bahwa prediksi metrik pendaratan kritis berbasis data penerbangan dapat dilakukan dengan model statistik sederhana, mendukung pendekatan OLS penelitian ini. Yanto & Liem (2022) dalam *Aerospace* membuktikan model berbasis data operasional nyata lebih akurat dari tabel statis. Temuan kuantitatif ditransformasikan ke dalam Safe Operating Envelope Matrix pada Tabel 6.

Tabel 6. Safe Operating Envelope Matrix, Rekomendasi Mitigasi Proaktif bagi FOO

Deviasi (FDMA vs POH)	Data Rujukan	Konsekuensi Risiko Operasional	Tindakan Mitigasi Mandatori (Pre-flight)
50' IAS: 70 knots (Overspeed +9 kts dari V_{ref} 61 KIAS)	approaches.csv	Runway overrun akibat flare distance membengkak hingga 1.300 ft	Landing Weight Penalty 5% pada mass & balance jika ambient temperature $\geq 32^\circ\text{C}$ (McRae et al., 2021)
Fuel Burn Rate mencapai 10,2 USG/hr (mendekati batas POH 10,4 USG/hr)	logs FDMA 2025.csv	Fuel starvation pada sirkuit akibat high power setting berkelanjutan	Minimum Fuel to Destination +1,5 USG untuk sesi touch-and-go dari standar baku POH (Yanto & Liem, 2022b)
Max Ground Braking > 0,12 G	approaches.csv	Keausan dini pada sistem rem dan risiko tyre burst	Revisi Landing Distance Required (LDR) lokal dengan safety factor $1,6\times$ dari tabel POH (Chu et al., 2024)

Sumber: Data FDMA API Banyuwangi (diolah peneliti)

Angka 5% Landing Weight Penalty dihitung berdasarkan komparasi kehilangan daya angkat aerodinamis akibat kenaikan suhu permukaan rata-rata dari batas ISA (15°C) menjadi suhu aktual ekstrim tropis Banyuwangi (34°C). Kenaikan suhu sebesar 19°C ini menurunkan kerapatan udara (air density) yang setara dengan kehilangan efisiensi gaya angkat sebesar 4,8% (dibulatkan menjadi penalti berat pendaratan 5% untuk mempertahankan climb gradient saat go around).

Sementara itu, angka 1,6x Landing Distance Required (LDR) Safety Factor diperoleh dari hasil integrasi rumus regresi aktual $Y = 105,150 + 7,116X$. Ketika terjadi deviasi kecepatan overspeed taruna pada batas atas sebesar +10 knot ($X=71$ KIAS), jarak melayang bertambah sejauh 71,16 kaki. Jika ditambah dengan fluktuasi angin buritan (tailwind component) sebesar 5 knot yang memperpanjang rolling sejauh 35%, maka total jarak pendaratan aktual membengkak hingga 1,58 kali lipat dari jarak dasar POH. Oleh karena itu, faktor pengali aman ditetapkan sebesar 1,6 kali lipat sebagai ambang batas minimum operasional Flight Dispatch.

Keterkaitan Hasil dengan Teori dan Regulasi Keselamatan Penerbangan

Temuan empiris menegaskan celah operasional nyata jika manajemen keselamatan hanya mengandalkan performa statis. Berdasarkan Swiss Cheese Model Shabani et al. (2024), kecelakaan terjadi dari akumulasi kegagalan laten yang menembus lapisan pertahanan. Ketidakakuratan data perencanaan bahan bakar dan toleransi terhadap overspeed approach merupakan bentuk kegagalan laten tersebut (Wiegmann & Shappell, 2017). Li et al. (2023) mengonfirmasi bahwa pengereman agresif akibat overspeed yang dibiarkan tanpa evaluasi menciptakan kegagalan laten baru berupa keausan dini sistem pengereman. Chu et al. (2024) dalam Journal of Infrastructure Systems membuktikan bahwa landing speed dan braking resistance berkorelasi kuat dengan risiko runway overrun. Penerapan Closed Loop Safety System melalui integrasi FDMA ke meja kerja FOO sejalan dengan standar (ICAO, 2013).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan tiga temuan empiris utama. Pertama, terdapat deviasi signifikan ($p < 0,001$) konsumsi bahan bakar aktual armada Cessna 172SP berfluktuasi hingga 10,2 USG/hr pada operasi sirkuit sirkuler akibat DA dan beban termal tropis, konsisten dengan proyeksi McRae et al. (2021). Kedua, variabilitas kecepatan pendekatan pada 50' IAS berpengaruh positif dan signifikan ($p < 0,001$, koefisien = 7,116) terhadap flare distance, dengan data riil merekam overspeed approach hingga 74 KIAS yang memicu flare distance

1.300 kaki dan pengereman ekstrem 0,12 G, dikonfirmasi oleh Wang et al., (2018) dan Reiser et al. (2024). Ketiga, penelitian berhasil memformulasi Safe Operating Envelope Matrix sebagai instrumen mitigasi proaktif bagi FOO: (1) Landing Weight Penalty 5% pada suhu $>32^{\circ}\text{C}$; (2) Minimum Fuel to Destination +1,5 USG untuk sesi sirkuit; dan (3) safety factor $1,6\times$ pada perhitungan LDR lokal, mengurangi risiko runway excursion sesuai rekomendasi Chu et al. (2024). Implikasi praktis mendorong sekolah penerbangan CASR Part 142 untuk mengintegrasikan data FDMA ke dalam proses penerbitan Dispatch Release secara sistematis. Penelitian lanjutan disarankan memperluas variabel ke parameter obstacle clearance gradient dan climb performance guna melengkapi matriks batas aman yang lebih komprehensif.

Formulasi Safe Operating Envelope Matrix ini dibangun dengan memanfaatkan basis data mitigasi dari 1346 kejadian pre-stall yang terdeteksi pada penerbangan sirkuit taruna. Data batas bawah kritis tersebut dikonversi menjadi indikator batas merah (redline parameter) pada aplikasi pemantau operasional, sehingga sistem Flight Dispatch dapat memberikan peringatan dini otomatis ketika performa armada mendekati ambang batas aerodinamis berbahaya tersebut.

Saran

Bagi instruktur dan siswa penerbang perlu ditingkatkan pengawasan dan kedisiplinan pengajaran di kokpit untuk mempertahankan kecepatan pendekatan sesuai target referensi ($V_{\text{ref}} = 61 \text{ KIAS}$) (Cessna Aircraft Company, 2007) demi memutus rantai normalisasi penyimpangan (normalization of deviance) yang berpotensi memicu bahaya runway overrun (Alogdianakis et al., n.d.). Kemudian untuk peneliti selanjutnya dapat mengembangkan model regresi multi variabel lanjutan dengan memasukkan parameter lingkungan eksternal lain seperti nilai kelembapan udara relatif (*relative humidity*) serta pengaruh akumulasi jam terbang total pesawat untuk menghasilkan kalkulasi penalti performa yang jauh lebih komprehensif.

DAFTAR REFERENSI

- Alogdianakis, G., Katsidimas, I., Aerospace, A. K., & 2024, undefined. (n.d.). Runway Safety Assistant Foreseeing Excursions
- Anthony P. Tvaryanas. (2006). *Human Factors Considerations in Migration of Unman*.
- Ayra, E. S., Ríos Insua, D., & Cano, J. (2019). Bayesian Network for Managing Runway Overruns in Aviation Safety. *Journal of Aerospace Information Systems*, 16(12), 546–558. <https://doi.org/10.2514/1.I010726>
- Cessna Aircraft Company. (2007). *POH CESSNA172S REV 4*. (4th ed.).
- Chu, L., Liu, Y., & Fwa, T. F. (2024). Estimating Runway Overrun Risks of Landing Aircraft. *Journal of Infrastructure Systems*, 30(2). <https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-2419>
- Field, A. P. . (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. SAGE.

- Giuffre, M. (1997). Designing research: Ex post facto designs. *Journal of PeriAnesthesia Nursing*, 12(3), 191–195. [https://doi.org/10.1016/S1089-9472\(97\)80038-X](https://doi.org/10.1016/S1089-9472(97)80038-X)
- Goodman, C. J., & Small Griswold, J. D. (2019). Meteorological Impacts on Commercial Aviation Delays and Cancellations in the Continental United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(3), 479–494. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0277.1>
- Huang, C., & Cheng, X. (2022). Estimation of aircraft fuel consumption by modeling flight data from avionics systems. *Journal of Air Transport Management*, 99, 102181. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102181>
- ICAO. (2013). *Safety management manual (SMM)*. International Civil Aviation Organization.
- Li, C., Sun, R., & Pan, X. (2023a). Takeoff runway overrun risk assessment in aviation safety based on human pilot behavioral characteristics from real flight data. *Safety Science*, 158, 105992. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105992>
- Li, C., Sun, R., & Pan, X. (2023b). Takeoff runway overrun risk assessment in aviation safety based on human pilot behavioral characteristics from real flight data. *Safety Science*, 158, 105992. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105992>
- McRae, M., Lee, R. A., Steinschneider, S., & Galgano, F. (2021). Assessing Aircraft Performance in a Warming Climate. *Weather, Climate, and Society*, 13(1), 39–55. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-20-0098.1>
- Padmanaban, & Mahendran. (2015). Enhancing Flight Data Monitoring and Analysis can Increase Flight Safety. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, 4(2), 1–5. <https://doi.org/10.4172/2168-9792.1000143>
- Pan, W., Feng, Y., & Liu, J. (2023). Parameter-Influencing Analysis of Aeroengine Operation Reliability. *Journal of Aerospace Engineering*, 36(4). <https://doi.org/10.1061/JAEEZ.ASENG-4527>
- Reiser, C., Villani, E., & Machado Cardoso-Junior, M. (2024). A novel approach to runway overrun risk assessment using FRAM and flight data monitoring. *The Aeronautical Journal*, 128(1327), 2054–2072. <https://doi.org/10.1017/aer.2024.37>
- Rey, M., Aloise, D., Soumis, F., & Pieugueu, R. (2021). A data-driven model for safety risk identification from flight data analysis. *Transportation Engineering*, 5. <https://doi.org/10.1016/J.TRENG.2021.100087>
- Sarker, A., Deepo, D. M., Nandi, R., Rana, J., Islam, S., Rahman, S., Hossain, M. N., Islam, Md. S., Baroi, A., & Kim, J.-E. (2020). A review of microplastics pollution in the soil and terrestrial ecosystems: A global and Bangladesh perspective. *Science of The Total Environment*, 733, 139296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139296>
- Setiawan, R., Iswahyudi, P., Mubarak, A., Fadilla, I., Penerbang, A., & Banyuwangi, I. (2025). *OPTIMASI BIAYA OPERASIONAL DAN PEMANFAATAN ARMADA PESAWAT LATIH: STUDI KASUS CESSNA 172 SP DI AKADEMI PENERBANG INDONESIA BANYUWANGI* (Vol. 7, Number 3).
- Shabani, T., Jerie, S., & Shabani, T. (2024). A comprehensive review of the Swiss cheese model in risk management. *Safety in Extreme Environments*, 6(1), 43–57. <https://doi.org/10.1007/s42797-023-00091-7>
- Stolzer, A. J., Sumwalt, R. L., & Goglia, J. J. (2023). *Safety Management Systems in Aviation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003286127>

- Tyagi, A., Tripathi, R., & Bouarfa, S. (2023). SAFETY MANAGEMENT SYSTEM AND HAZARDS IN THE AIRCRAFT MAINTENANCE INDUSTRY: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW. *Aviation*, 27(3), 212–224. <https://doi.org/10.3846/aviation.2023.19851>
- Wang, L., Ren, Y., & Wu, C. (2018). Effects of flare operation on landing safety: A study based on ANOVA of real flight data. *Safety Science*, 102, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.09.027>
- Wang, L., Wu, C., & Sun, R. (2014a). An analysis of flight Quick Access Recorder (QAR) data and its applications in preventing landing incidents. *Reliability Engineering & System Safety*, 127, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.03.013>
- Wang, L., Wu, C., & Sun, R. (2014b). An analysis of flight Quick Access Recorder (QAR) data and its applications in preventing landing incidents. *Reliability Engineering & System Safety*, 127, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.03.013>
- Wang, Q., Qin, K., Lu, B., Sun, H., & Shu, P. (2023). Time-feature attention-based convolutional auto-encoder for flight feature extraction. *Scientific Reports*, 13(1), 14175. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41295-y>
- Wiegmann, D. A., & Shappell, S. A. (2017). *A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315263878>
- Yanto, J., & Liem, R. P. (2022a). Cluster-Based Aircraft Fuel Estimation Model for Effective and Efficient Fuel Budgeting on New Routes. *Aerospace*, 9(10), 624. <https://doi.org/10.3390/aerospace9100624>
- Yanto, J., & Liem, R. P. (2022b). Cluster-Based Aircraft Fuel Estimation Model for Effective and Efficient Fuel Budgeting on New Routes. *Aerospace*, 9(10), 624. <https://doi.org/10.3390/aerospace9100624>