JGIT
Jurnal Greenation Ilmu Teknik
+62 81210467572 https://greenationpublisher.org/JGIT greenation.info@gmail.com
GREENATION PUBLISHER

DOI: https://doi.org/10.38035/jgit.v3i4.825
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Karakteristik Lintasan Pendaratan Pesawat Terkait Runway Occupancy Time: Studi Berbasis ADS-B

Prakoso Satrio Wibowo[1], Adham Faruq Fathony S[2]
[1]Politeknik Penerbangan Indonesia, Kementerian Perhubungan, Indonesia, prakoso251@gmail.com
[2]Politeknik Penerbangan Indonesia, Kementerian Perhubungan, Indonesia, faruqfile@gmail.com

Corresponding Author: prakoso251@gmail.com[1]

Abstract: *Runway Occupancy Time Landing (ROTL) is an important operational indicator of runway efficiency, as variations in aircraft landing behavior can affect the duration of runway occupancy. This study investigates aircraft landing trajectory characteristics associated with differences in ROTL using Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) data. A total of 2,000 Category C landing trajectories recorded between July and October 2025 on Runway 06 and vacating via Taxiway M2 at Soekarno–Hatta International Airport were analyzed. The trajectories were reconstructed at one-second intervals from threshold crossing to runway exit and classified into the 5% lowest and 5% highest ROTL groups. Comparative analysis was conducted using threshold speed and altitude, together with temporal and spatial trajectory profiles represented by altitude–time, speed–time, altitude–horizontal-range, and speed–horizontal-range relationships. The results show a clear difference in threshold speed between the two groups, with mean values of 148.42 kt for the low-ROTL group and 132.07 kt for the high-ROTL group, while mean threshold altitude remained relatively similar at 50.75 ft and 51.43 ft, respectively. The trajectory profiles further indicate differences in the evolution of aircraft speed and altitude from threshold crossing through touchdown and runway rollout. These findings demonstrate* ***(novelty)*** *that trajectory-level analysis can provide additional insight into aircraft landing behavior associated with variations in runway occupancy time.*

Keyword: *ADS-B, Aircraft Landing Trajectory, Runway Occupancy Time, Landing Dynamics, Runway Efficiency.*

Abstrak: Runway Occupancy Time Landing (ROTL) merupakan indikator operasional penting bagi efisiensi landas pacu, karena variasi perilaku pendaratan pesawat dapat memengaruhi lama waktu penggunaan landas pacu. Penelitian ini mengkaji karakteristik lintasan pendaratan pesawat yang berkaitan dengan perbedaan ROTL menggunakan data Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B). Sebanyak 2.000 lintasan pendaratan pesawat Kategori C yang tercatat antara Juli hingga Oktober 2025 pada Runway 06 dan keluar melalui Taxiway M2 di Bandar Udara Internasional Soekarno–Hatta dianalisis. Lintasan direkonstruksi pada interval satu detik dari saat melintasi threshold hingga keluar landas pacu, kemudian diklasifikasikan ke dalam kelompok 5% ROTL terendah dan 5% ROTL tertinggi. Analisis komparatif dilakukan menggunakan kecepatan dan ketinggian pada threshold, serta profil lintasan temporal dan spasial yang direpresentasikan melalui hubungan

altitude waktu, kecepatan waktu, altitude jarak horizontal, dan kecepatan– arak horizontal. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan yang jelas pada kecepatan threshold antara kedua kelompok, dengan nilai rata-rata 148,42 kt untuk kelompok ROTL rendah dan 132,07 kt untuk kelompok ROTL tinggi, sementara rata-rata ketinggian threshold relatif serupa yaitu 50,75 ft dan 51,43 ft. Profil lintasan lebih lanjut menunjukkan adanya perbedaan perkembangan kecepatan dan ketinggian pesawat sejak melintasi threshold hingga touchdown dan rollout di landas pacu. Temuan (novelty) penelitian ini menunjukkan bahwa analisis pada level lintasan dapat memberikan wawasan tambahan mengenai perilaku pendaratan pesawat yang berkaitan dengan variasi runway occupancy time, sekaligus melengkapi analisis ROTL yang selama ini hanya berbasis pada parameter threshold dan nilai agregat.

Kata Kunci: ADS-B, Lintasan Pendaratan Pesawat, Runway Occupancy Time, Dinamika Pendaratan, Efisiensi Landas Pacu.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan transportasi udara global yang terus berlanjut telah meningkatkan tekanan terhadap kapasitas bandar udara, khususnya pada bandara-bandara hub utama yang infrastruktur landas pacunya harus mengakomodasi permintaan lalu lintas yang tinggi dalam ruang operasional yang terbatas. Proyeksi global menunjukkan pertumbuhan lalu lintas udara yang berkelanjutan pada beberapa dekade mendatang, dengan kawasan Asia–Pasifik diproyeksikan memberikan kontribusi signifikan terhadap pertumbuhan tersebut (Airbus, 2025). Di Indonesia, tantangan ini sangat relevan pada Bandar Udara Internasional Soekarno–Hatta, yang berfungsi sebagai pintu gerbang internasional utama negara dan menangani volume pergerakan pesawat yang tinggi setiap tahunnya (AirNav Indonesia, 2024). Dalam kondisi tersebut, peningkatan efisiensi operasi landas pacu yang telah ada menjadi hal yang penting untuk mempertahankan kapasitas kedatangan tanpa hanya bergantung pada perluasan infrastruktur fisik.

Salah satu indikator penting efisiensi operasional landas pacu adalah Runway Occupancy Time Landing (ROTL), yang secara umum menggambarkan waktu yang dibutuhkan pesawat yang mendarat untuk menempati landas pacu sejak melintasi threshold hingga keluar dari landas pacu (runway vacating). ROTL secara langsung memengaruhi interval waktu di mana landas pacu tidak tersedia bagi operasi berikutnya, sehingga berkontribusi terhadap kapasitas landas pacu, pengaturan urutan kedatangan (arrival sequencing), dan efisiensi arus lalu lintas. Penelitian-penelitian sebelumnya telah mengidentifikasi runway occupancy time sebagai salah satu komponen penting dalam penilaian kapasitas bandar udara, khususnya pada kondisi lalu lintas dengan kepadatan tinggi (Pavlin et al., 2006; EUROCONTROL, 2023). Oleh karena itu, pemahaman terhadap faktor-faktor operasional yang berkaitan dengan ROTL menjadi penting untuk mengidentifikasi peluang peningkatan pemanfaatan landas pacu.

Pendekatan-pendekatan sebelumnya dalam mengurangi runway occupancy umumnya menekankan pada aspek infrastruktur bandar udara, khususnya konfigurasi landas pacu–taxiway dan penyediaan rapid-exit taxiway. ICAO Doc 9157 dan FAA AC 150/5300-13B menetapkan kriteria geometris yang dimaksudkan untuk memfasilitasi proses keluar landas pacu (runway vacating) yang efisien, termasuk penentuan lokasi taxiway dan sudut keluar yang tepat (ICAO, 2005; FAA, 2024). Penelitian-penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa konfigurasi landas pacu dan desain rapid-exit taxiway dapat memengaruhi runway occupancy dan kapasitas landas pacu (Galagedera & Samarasekara, 2021; Maltinti et al., 2024). Namun demikian, infrastruktur hanyalah salah satu komponen dari kinerja runway occupancy. Perilaku operasional pesawat selama proses pendaratan turut menentukan seberapa cepat

pesawat berpindah dari saat melintasi threshold menuju touchdown, ground rollout, hingga akhirnya keluar landas pacu.

Pendaratan merupakan proses dinamis berkelanjutan yang melibatkan perubahan ketinggian, kecepatan, posisi, dan kondisi energi pesawat. Kondisi yang diamati pada threshold landas pacu karenanya hanya merepresentasikan kondisi awal dari suatu rangkaian proses yang berlanjut melalui tahap flare, touchdown, deselerasi, dan runway vacating. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa parameter approach dan landing berkaitan dengan variasi runway occupancy. Meijers (2019) mengkaji karakteristik empiris runway occupancy dan menyoroti relevansi parameter operasional pesawat, sementara Lim (2020) meneliti pengaruh kausal parameter pendaratan terhadap runway occupancy time. Penelitian prediktif yang lebih baru juga mengidentifikasi variabel terkait kecepatan sebagai prediktor penting bagi arrival runway occupancy time (Gao et al., 2023; Nguyen et al., 2022). Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa perilaku lintasan pesawat memberikan informasi yang berharga untuk memahami perbedaan ROTL.

Relevansi operasional isu ini sangat jelas terlihat pada Runway 06 di Bandar Udara Internasional Soekarno–Hatta. Penelitian-penelitian sebelumnya di bandara tersebut melaporkan nilai rata-rata ROTL yang melampaui benchmark operasional yang digunakan oleh AirNav Indonesia, khususnya untuk pesawat Kategori C dan D (Juniawan & Putriekapuja, 2023; Rosmayanti et al., 2024). Runway 06 juga beroperasi dalam lingkungan multi-runway yang terbatas, sehingga efisiensi operasi pendaratan menjadi penting untuk mempertahankan kinerja kedatangan. Bagi pesawat yang keluar melalui Taxiway M2, konfigurasi landas pacu dan exit bersifat tetap; oleh karena itu, variasi runway occupancy di antara operasi pesawat yang sebanding dapat memberikan basis empiris yang tepat untuk mengkaji perbedaan perilaku lintasan pendaratan.

Penelitian sebelumnya yang menggunakan 2.000 lintasan pendaratan ADS-B pada Runway 06 menunjukkan adanya perbedaan yang jelas pada kondisi threshold antara operasi ROTL rendah dan tinggi. Secara khusus, kelompok 5% ROTL terendah menunjukkan rata-rata kecepatan threshold sebesar 148,42 kt, dibandingkan dengan 132,07 kt pada kelompok 5% ROTL tertinggi, sementara rata-rata ketinggian threshold relatif serupa yaitu 50,75 ft dan 51,43 ft. Temuan tersebut mengidentifikasi kecepatan threshold sebagai faktor pembeda operasional penting bagi kinerja runway occupancy. Namun demikian, parameter threshold hanya merepresentasikan satu titik pengamatan dalam keseluruhan proses pendaratan. Perbedaan yang teramati pada saat melintasi threshold dapat berkembang lebih lanjut melalui fase flare, touchdown, dan ground-roll sebelum pesawat mencapai exit landas pacu. Oleh karena itu, kajian pada level lintasan diperlukan untuk mengkarakterisasi bagaimana kondisi pesawat berkembang secara spasial dan temporal pada hasil ROTL yang kontras.

Data Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) memberikan peluang untuk melakukan analisis semacam ini menggunakan hasil pengamatan dari operasi pesawat yang sesungguhnya. Rekaman ADS-B memuat informasi posisi, ketinggian, dan kecepatan darat pesawat yang bereferensi waktu, sehingga memungkinkan rekonstruksi dan perbandingan masing-masing lintasan pendaratan sepanjang periode runway occupancy. Data lintasan berbasis surveillance sebelumnya telah diterapkan untuk ekstraksi dan analisis runway occupancy (Kumar et al., 2010), sementara ketersediaan dataset operasional berskala besar memungkinkan perbandingan sistematis pada berbagai peristiwa pendaratan. Alih-alih membatasi analisis pada nilai ROTL agregat atau kondisi pesawat pada satu lokasi tertentu, rekonstruksi lintasan memungkinkan evolusi temporal dan spasial perilaku pesawat dikaji sejak melintasi threshold hingga runway vacating.

Meskipun penelitian mengenai prediksi runway occupancy dan parameter pendaratan terus berkembang, karakteristik temporal dan spasial yang membedakan lintasan pendaratan ROTL rendah dan tinggi masih belum banyak dikaji secara eksplisit. Penelitian-penelitian yang ada umumnya mengevaluasi nilai runway occupancy agregat, karakteristik infrastruktur,

parameter pendaratan individual, atau hubungan prediktif. Pendekatan tersebut bermanfaat untuk mengidentifikasi variabel yang berkaitan dengan ROTL, namun memberikan penjelasan yang terbatas mengenai bagaimana perbedaan tersebut berkembang sepanjang fase-fase lintasan pendaratan. Secara khusus, perbandingan simultan antara ketinggian dan kecepatan terhadap waktu yang telah berlalu maupun jarak horizontal dapat memberikan representasi yang lebih rinci mengenai perilaku pesawat selama flare, touchdown, dan rollout. Dari uraian tersebut, tampak adanya research gap bahwa karakteristik lintasan pendaratan pesawat pada level ROTL rendah dan tinggi belum banyak dikarakterisasi secara temporal maupun spasial dalam penelitian-penelitian sebelumnya.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengkaji karakteristik lintasan pendaratan pesawat yang berkaitan dengan Runway Occupancy Time Landing menggunakan data empiris ADS-B dari Runway 06–Taxiway M2 di Bandar Udara Internasional Soekarno–Hatta. Sebanyak 2.000 lintasan pendaratan pesawat Kategori C yang tercatat antara Juli hingga Oktober 2025 dianalisis, dengan penekanan khusus pada perbandingan kelompok 5% ROTL terendah dan 5% ROTL tertinggi. Analisis ini mengkaji karakteristik threshold bersama-sama dengan hubungan altitude–waktu, kecepatan–waktu, altitude–jarak horizontal, dan kecepatan–jarak horizontal untuk mengkarakterisasi perbedaan evolusi temporal dan spasial lintasan pendaratan.

Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada perluasan analisis ROTL dari pengukuran pada level threshold dan agregat menuju karakterisasi berbasis lintasan (trajectory-based) pada operasi pendaratan. *Keunikan penelitian (state of the art)* ini terletak pada perbandingan kelompok ROTL yang kontras sepanjang keseluruhan sekuens pendaratan, sehingga penelitian ini bertujuan mengidentifikasi bagaimana perbedaan kecepatan dan ketinggian pesawat berkembang sejak melintasi threshold hingga touchdown dan rollout. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman empiris mengenai karakteristik lintasan pendaratan yang berkaitan dengan kinerja runway occupancy, sekaligus melengkapi pendekatan-pendekatan yang telah ada berdasarkan infrastruktur, parameter pendaratan individual, dan pengukuran ROTL agregat. Berdasarkan uraian tersebut, dapat dirumuskan rumusan masalah penelitian ini sebagai berikut: (1) bagaimana karakteristik kecepatan dan ketinggian pesawat pada saat melintasi threshold berbeda antara kelompok ROTL rendah dan tinggi; dan (2) bagaimana perbedaan tersebut berkembang melalui profil lintasan temporal (altitude–waktu dan kecepatan–waktu) serta profil lintasan spasial (altitude–jarak horizontal dan kecepatan–jarak horizontal) sepanjang proses pendaratan hingga runway vacating.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-empiris untuk mengkaji karakteristik lintasan pendaratan pesawat yang berkaitan dengan Runway Occupancy Time Landing (ROTL). Data historis Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) digunakan untuk merekonstruksi lintasan pesawat sejak melintasi threshold landas pacu hingga keluar landas pacu (runway vacating). Analisis ini difokuskan pada perbandingan lintasan pendaratan yang berkaitan dengan hasil runway occupancy yang kontras, bukan pada penentuan kondisi threshold yang optimal. Oleh karena itu, kerangka metodologis penelitian ini terdiri atas penetapan studi kasus, pengumpulan dan praproses data ADS-B, klasifikasi lintasan berbasis ROTL, serta analisis lintasan temporal dan spasial.

Penelitian ini difokuskan pada pesawat Kategori C yang mendarat pada Runway 06 dan keluar melalui Taxiway M2 di Bandar Udara Internasional Soekarno–Hatta. Penggunaan landas pacu, kategori pesawat, dan konfigurasi exit yang sama mengurangi variabilitas yang berkaitan dengan lokasi exit yang berbeda dan memungkinkan analisis difokuskan pada perbedaan perilaku lintasan pesawat. Dataset empiris terdiri atas 2.000 lintasan pendaratan valid yang tercatat antara Juli hingga Oktober 2025, dengan pesawat Boeing 737-800 dan Airbus A320 sebagai jenis pesawat yang paling dominan dalam dataset.

Kerangka metodologis penelitian ini diilustrasikan pada Gambar 1. Analisis dimulai dengan pengumpulan data lintasan pendaratan ADS-B historis, dilanjutkan dengan praproses data dan perhitungan ROTL untuk setiap penerbangan. Lintasan yang telah diproses selanjutnya diklasifikasikan ke dalam kelompok ROTL rendah dan tinggi, kemudian dianalisis menggunakan representasi temporal dan spasial dari ketinggian dan kecepatan darat pesawat. Tahap akhir membandingkan karakteristik lintasan kedua kelompok untuk mengidentifikasi pola operasional yang berkaitan dengan perbedaan runway occupancy time.

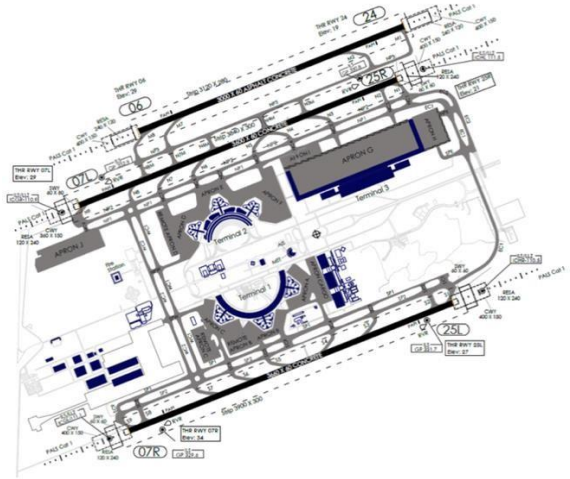


Gambar 1. Alur proses metodologi penelitian

Studi Kasus dan Sumber Data

Bandar Udara Internasional Soekarno–Hatta dipilih sebagai lokasi studi kasus karena tingginya permintaan lalu lintas serta pentingnya menjaga efisiensi pemanfaatan landas pacu. Analisis ini dibatasi secara khusus pada operasi pendaratan di Runway 06 dengan Taxiway M2 sebagai exit landas pacu. Pembatasan pengamatan pada satu konfigurasi landas pacu–exit memastikan bahwa lintasan yang dibandingkan dievaluasi dalam kerangka spasial yang konsisten dan meminimalkan pengaruh lokasi exit landas pacu yang berbeda-beda terhadap ROTL.

Konfigurasi spasial area studi disajikan pada Gambar 2. Analisis difokuskan secara khusus pada operasi pendaratan menggunakan Runway 06, dengan Taxiway M2 sebagai exit landas pacu yang sama untuk seluruh lintasan yang dipilih. Dengan mempertahankan konfigurasi landas pacu–exit yang sama, penelitian ini membangun referensi spasial yang konsisten untuk membandingkan karakteristik lintasan pesawat dan meminimalkan variabilitas yang berkaitan dengan lokasi exit landas pacu yang berbeda.



Gambar 2. Konfigurasi Bandar Udara Internasional Soekarno–Hatta

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, segmen operasional yang dipilih memberikan konfigurasi landas pacu–exit yang tetap bagi seluruh pengamatan yang dianalisis. Dengan demikian, perbedaan ROTL dalam sampel yang dipilih dapat dikaji dalam kerangka spasial yang sama, sehingga memberikan penekanan yang lebih besar pada variasi karakteristik lintasan pendaratan pesawat.

Data lintasan pesawat historis diperoleh dari Flightradar24 (FR24), yang menyediakan informasi berbasis ADS-B mencakup posisi, ketinggian, kecepatan darat, dan timestamp

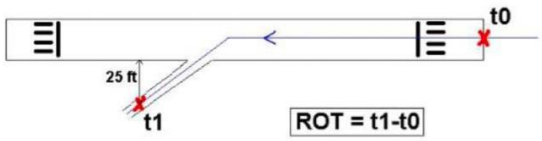
pesawat. Periode pengamatan mencakup Juli hingga Oktober 2025. Setelah dilakukan penyaringan data kedatangan berdasarkan penggunaan landas pacu, exit, dan kategori pesawat, diperoleh 2.000 lintasan pendaratan Kategori C yang valid untuk dianalisis. Dataset ini didominasi oleh pesawat Boeing 737-800 dan Airbus A320.

Untuk setiap pesawat, lintasan pendaratan dianalisis sejak saat pesawat melintasi threshold Runway 06 hingga sepenuhnya keluar landas pacu melalui Taxiway M2. ROTL dengan demikian didefinisikan sebagai:

$$ROTL_i = t_{exit,i} - t_{THR,i}$$

dengan $t_{THR,i}$ merepresentasikan waktu saat pesawat i melintasi threshold, dan $t_{exit,i}$ merepresentasikan waktu saat pesawat yang sama keluar landas pacu melalui Taxiway M2.

Batasan temporal yang digunakan untuk pengukuran ROTL diilustrasikan pada Gambar 3. Threshold crossing didefinisikan sebagai titik referensi awal (tTHR), sedangkan keluar landas pacu melalui Taxiway M2 merepresentasikan akhir dari interval runway occupancy (texit). Waktu yang berlalu di antara kedua peristiwa tersebut membentuk nilai ROTL yang diberikan pada masing-masing lintasan pendaratan



Gambar 3. Definisi ROTL

Definisi ini diterapkan secara konsisten pada seluruh 2.000 lintasan, sehingga memastikan bahwa perbedaan ROTL merepresentasikan variasi waktu yang dibutuhkan pesawat untuk melewati segmen operasional Runway 06–Taxiway M2 yang sama. Definisi ini memberikan batasan temporal yang konsisten untuk membandingkan lintasan pendaratan dengan durasi runway occupancy yang berbeda-beda.

Praproses Lintasan ADS-B

Data ADS-B mentah memiliki interval pelaporan yang tidak seragam serta jumlah observasi yang berbeda antar penerbangan. Oleh karena itu, data lintasan diproses menggunakan Python dengan pustaka pandas dan NumPy untuk membangun kerangka temporal yang konsisten pada seluruh penerbangan.

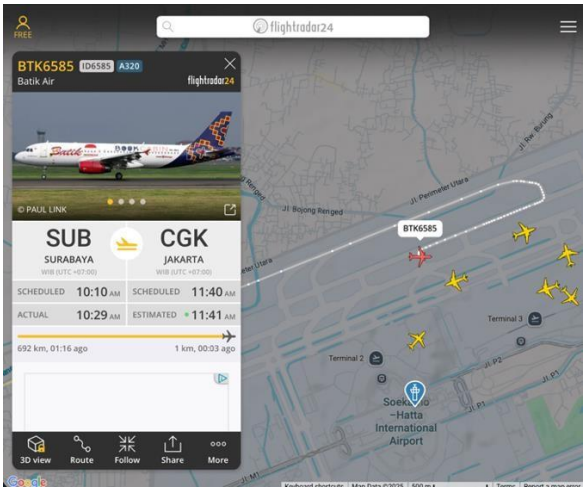
Setiap lintasan diinterpolasi ke dalam interval satu detik yang seragam. Setelah interpolasi, lintasan dipangkas sehingga observasi pertama bersesuaian dengan saat melintasi threshold (t = 0) dan observasi terakhir bersesuaian dengan saat keluar landas pacu melalui Taxiway M2. Prosedur ini menghasilkan rangkaian data (time-series) ketinggian, kecepatan darat, dan posisi pesawat yang tersinkronisasi sepanjang periode runway occupancy.

Untuk analisis temporal, waktu yang berlalu sejak melintasi threshold dihitung sebagai:

$$\Delta t_{i,j} = t_{i,j} - t_{THR,i}$$

dengan $t_{i,j}$ merepresentasikan timestamp observasi j untuk penerbangan i.

Contoh informasi lintasan pesawat yang diperoleh dari FR24 disajikan pada Gambar 4. Lintasan yang tercatat menyediakan posisi pesawat yang bereferensi waktu bersama dengan parameter penerbangan yang menjadi dasar rekonstruksi masing-masing pergerakan pendaratan. Data ini selanjutnya diproses dan distandardisasi ke dalam interval satu detik untuk membangun catatan lintasan yang dapat dibandingkan pada seluruh dataset.



Gambar 4. Contoh lintasan pendaratan dari FR24 untuk Runway 06–M2

Lintasan geografis yang ditunjukkan pada Gambar 4 memberikan contoh data sumber yang digunakan untuk mengidentifikasi pergerakan pesawat menuju Runway 06 dan kelanjutannya menuju Taxiway M2. Setelah praproses, hanya segmen runway occupancy yang relevan, yaitu dari saat melintasi threshold hingga keluar landas pacu, yang dipertahankan untuk analisis lintasan temporal dan spasial selanjutnya.

Referensi spasial juga ditetapkan relatif terhadap threshold Runway 06. Koordinat geografis pesawat digunakan untuk menentukan progres horizontal sepanjang lintasan pendaratan, sehingga kecepatan dan ketinggian dapat dievaluasi tidak hanya sebagai fungsi waktu yang berlalu, tetapi juga sebagai fungsi jarak horizontal dari threshold landas pacu. Dengan demikian, setiap lintasan yang diproses memuat empat dimensi utama untuk perbandingan selanjutnya, yaitu waktu yang berlalu, jarak horizontal, ketinggian, dan kecepatan darat.

Penggunaan representasi temporal dan spasial secara bersamaan menjadi penting karena dua pesawat dapat mencapai lokasi yang serupa pada landas pacu namun pada waktu yang berbeda, atau menunjukkan profil kecepatan yang berbeda pada posisi landas pacu yang sama. Penggabungan kedua domain ini memungkinkan karakterisasi perilaku lintasan pendaratan yang lebih lengkap.

Setelah praproses dan segmentasi lintasan, dihasilkan dataset terstruktur untuk 2.000 observasi pendaratan yang valid. Setiap catatan penerbangan memuat identitas pesawat beserta variabel utama yang diperlukan untuk analisis ROTL dan lintasan selanjutnya. Contoh representatif dari dataset empiris disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Contoh Representatif Dataset Pendaratan Empiris

File	Callsign	Kecepatan (kt)	Altitude (ft)	ROTL (s)
1. IU801.csv	SJV801	128.0	47.63	66
2. IU801.csv	SJV801	129.0	45.66	61
3. IU801.csv	SJV801	133.33	48.14	69
4. JT127.csv	LNI127	145.0	48.65	61
...	...	...	...	...
2000. GA209.csv	GIA209	145.78	58.27	62

Sumber: Data ADS-B FR24, diolah (2025)

Sebagaimana diilustrasikan pada Tabel 2-1, observasi pendaratan individual menunjukkan variasi pada kecepatan darat threshold, ketinggian threshold, dan ROTL. Perbedaan-perbedaan ini menjadi dasar empiris bagi klasifikasi lintasan selanjutnya. Keseluruhan dataset 2.000 observasi digunakan untuk perankingan ROTL, sedangkan kelompok ekstrem selanjutnya dipilih untuk perbandingan lintasan temporal dan spasial secara rinci.

Klasifikasi Lintasan Berbasis ROTL

Setelah ROTL dihitung untuk seluruh 2.000 penerbangan, lintasan-lintasan tersebut diurutkan berdasarkan waktu runway occupancy masing-masing. Untuk memperoleh kelompok operasional yang kontras, dipilih observasi 5% ROTL terendah dan 5% ROTL tertinggi. Masing-masing kelompok terdiri atas 100 lintasan pendaratan:

$$N_{Low} = 100$$
$$N_{High} = 100$$

Kelompok ROTL rendah merepresentasikan 100 penerbangan dengan waktu runway occupancy tersingkat dalam dataset, sedangkan kelompok ROTL tinggi merepresentasikan 100 penerbangan dengan waktu runway occupancy terpanjang.

Klasifikasi kelompok ekstrem ini digunakan untuk memberikan kontras empiris yang jelas antara lintasan pendaratan yang berkaitan dengan runway occupancy singkat dan panjang. Berbeda dengan analisis optimasi pada penelitian sebelumnya, penelitian ini tidak menggunakan kelompok ROTL rendah untuk menentukan kondisi threshold optimal. Sebaliknya, kedua kelompok diperlakukan sebagai sampel operasional yang diamati dan dibandingkan sepanjang lintasan pendaratan.

Perbandingan awal mempertimbangkan kondisi pesawat pada saat melintasi threshold, khususnya kecepatan darat dan ketinggian. Analisis sebelumnya terhadap dataset menunjukkan bahwa kelompok ROTL rendah memiliki rata-rata kecepatan threshold sebesar 148,42 kt, sedangkan kelompok ROTL tinggi memiliki nilai rata-rata 132,07 kt. Sebaliknya, rata-rata ketinggian threshold hanya berbeda tipis, yaitu 50,75 ft dan 51,43 ft. Kondisi threshold ini menjadi titik awal untuk mengkaji bagaimana kedua kelompok berkembang selanjutnya sepanjang lintasan pendaratan.

Analisis Lintasan Temporal

Analisis lintasan temporal dilakukan untuk mengkaji bagaimana ketinggian dan kecepatan darat pesawat berkembang sebagai fungsi waktu yang berlalu setelah melintasi threshold. Dua hubungan utama dievaluasi:

$$h = f(t)$$
$$V = f(t)$$

dengan h merepresentasikan ketinggian pesawat, V merepresentasikan kecepatan darat, dan t merepresentasikan waktu yang berlalu sejak melintasi threshold.

Profil altitude–waktu digunakan untuk mengkarakterisasi transisi dari fase airborne menuju ground setelah melintasi threshold. Perbedaan perkembangan temporal ketinggian memberikan informasi mengenai progres menuju touchdown dan transisi dari fase airborne menuju ground rollout.

Profil kecepatan–waktu digunakan untuk mengkaji evolusi kecepatan darat pesawat sejak melintasi threshold hingga touchdown, rollout, dan keluar landas pacu. Representasi ini memungkinkan perbedaan penurunan kecepatan antara operasi ROTL rendah dan tinggi dievaluasi pada referensi temporal yang sama.

Untuk masing-masing kelompok ROTL, lintasan individual disejajarkan pada saat melintasi threshold (t = 0). Karakteristik lintasan pada level kelompok kemudian dibandingkan untuk menentukan apakah terdapat perbedaan sistematis yang dapat diamati sepanjang sekuens pendaratan, bukan hanya pada threshold.

Analisis Lintasan Spasial

Selain waktu yang berlalu, karakteristik lintasan pesawat juga dievaluasi sebagai fungsi jarak horizontal dari threshold landas pacu. Analisis spasial mengkaji:

$$h = f(x)$$
$$V = f(x)$$

dengan x merepresentasikan jarak horizontal dari threshold Runway 06.

Profil altitude–jarak horizontal memberikan representasi spasial dari penurunan (descent) pesawat setelah melintasi threshold dan memungkinkan perbedaan transisi airborne-to-ground dikaji relatif terhadap posisi landas pacu.

Profil kecepatan–jarak horizontal menggambarkan bagaimana kecepatan darat pesawat berubah seiring progres pesawat di sepanjang landas pacu. Berbeda dengan hubungan kecepatan–waktu, representasi ini memungkinkan kedua kelompok ROTL dibandingkan pada posisi landas pacu yang setara. Representasi ini karenanya sangat berguna untuk mengidentifikasi apakah perbedaan runway occupancy disertai dengan pola spasial evolusi kecepatan yang berbeda selama pendaratan dan rollout.

Kombinasi analisis temporal dan spasial menghasilkan empat representasi lintasan yang saling melengkapi:

1. Ketinggian terhadap waktu yang berlalu;
2. Kecepatan darat terhadap waktu yang berlalu;
3. Ketinggian terhadap jarak horizontal; dan
4. Kecepatan darat terhadap jarak horizontal.

Secara bersama-sama, profil-profil ini digunakan untuk mengkarakterisasi perbedaan antara kelompok ROTL rendah dan tinggi sepanjang sekuens pendaratan.

Analisis Komparatif Karakteristik Lintasan Pendaratan

Tahap analisis akhir mengintegrasikan profil lintasan temporal dan spasial untuk mengkarakterisasi perbedaan operasional yang berkaitan dengan ROTL. Alih-alih hanya mengandalkan kondisi threshold, analisis ini mempertimbangkan progres perilaku pesawat sepanjang sekuens pendaratan:

Threshold crossing → transisi airborne/flare → touchdown → ground rollout → runway exit

Perbandingan antara kelompok ROTL rendah dan tinggi difokuskan pada perbedaan kondisi threshold dan evolusi ketinggian serta kecepatan selanjutnya. Apabila dapat diidentifikasi dari lintasan ADS-B yang telah diproses, progres touchdown dan karakteristik rollout juga dikaji untuk menentukan bagaimana perbedaan awal antar kelompok berkembang seiring pergerakan pesawat menuju Taxiway M2.

Interpretasi didasarkan terutama pada karakteristik level kelompok dari 100 lintasan ROTL rendah dan 100 lintasan ROTL tinggi. Lintasan individual dapat disajikan sebagai contoh representatif untuk mengilustrasikan pola tertentu; namun demikian, lintasan tersebut tidak diperlakukan sebagai bukti utama perbedaan antara kedua kelompok. Pembedaan ini memastikan bahwa kesimpulan didasarkan pada karakteristik lintasan yang sistematis, bukan pada peristiwa pendaratan yang bersifat individual.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik ROTL pada Pendaratan yang Diamati

Analisis terhadap 2.000 lintasan pendaratan pesawat Kategori C menunjukkan variasi yang cukup besar pada Runway Occupancy Time Landing (ROTL) di antara pesawat yang beroperasi pada konfigurasi Runway 06–Taxiway M2 yang sama. Nilai ROTL yang diamati berkisar antara sekitar 51 hingga 76 detik, yang menunjukkan bahwa pesawat yang menggunakan landas pacu dan exit yang sama dapat menunjukkan kinerja runway occupancy yang cukup berbeda.

Untuk mengkaji karakteristik lintasan yang berkaitan dengan perbedaan tersebut, dataset dibagi menjadi dua kelompok yang kontras, yaitu 5% observasi ROTL terendah dan 5% observasi ROTL tertinggi. Masing-masing kelompok terdiri atas 100 lintasan pendaratan. Klasifikasi ini menjadi dasar untuk membandingkan kondisi pesawat serta perkembangan temporal dan spasialnya sepanjang sekuens pendaratan.

Perbandingan ini secara sengaja didasarkan pada operasi ROTL rendah dan tinggi yang diamati, bukan pada lintasan optimal atau tidak efisien yang ditentukan sebelumnya. Oleh karena itu, analisis berikut mengkaji apakah perbedaan runway occupancy disertai dengan perbedaan sistematis pada kecepatan dan ketinggian pesawat sejak melintasi threshold hingga touchdown, rollout, dan keluar landas pacu.

Tabel 2. Karakteristik Threshold Kelompok ROTL Rendah dan Tinggi

Parameter	5% ROTL Terendah	5% ROTL Tertinggi	Selisih
Jumlah Lintasan	100	100	-
Rata-rata kecepatan threshold (kt)	148.42	132.07	16.35
Rata-rata ketinggian threshold (ft)	50.75	51.43	-0.68

Sumber: Hasil olah data ADS-B (2025)

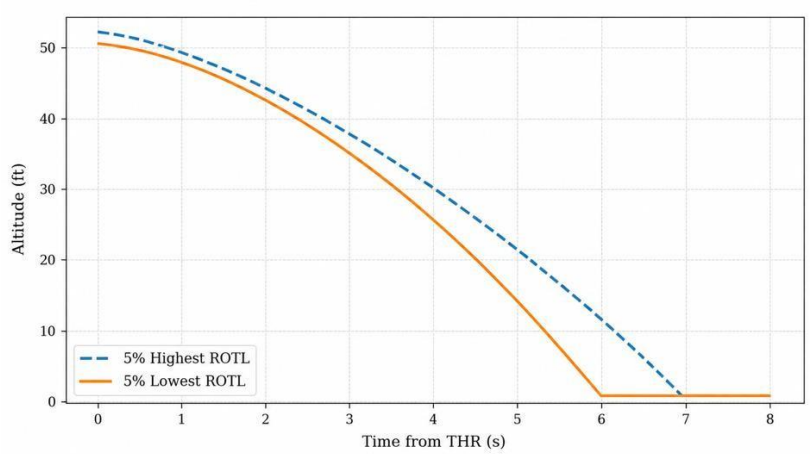
Sebagaimana dirangkum pada Tabel 2, perbedaan utama antara kedua kelompok ROTL teramati pada kecepatan darat threshold. Kelompok ROTL rendah melintasi threshold pada kecepatan darat rata-rata 148,42 kt, yang 16,35 kt lebih tinggi dibandingkan 132,07 kt yang tercatat pada kelompok ROTL tinggi. Sebagai perbandingan, perbedaan rata-rata ketinggian threshold hanya sebesar 0,68 ft. Perbedaan yang jauh lebih besar pada kecepatan dibandingkan pada ketinggian menunjukkan bahwa kedua kelompok memasuki sekuens pendaratan yang dianalisis dengan kondisi longitudinal yang berbeda secara nyata, sementara kondisi vertikalnya relatif sebanding. Perbedaan awal ini menjadi kondisi acuan bagi perbandingan lintasan temporal dan spasial selanjutnya.

Hasil ini menunjukkan bahwa kedua kelompok memulai periode runway occupancy pada kondisi kecepatan yang berbeda secara nyata, meskipun memiliki ketinggian threshold yang relatif serupa. Namun demikian, kondisi threshold semata belum menjelaskan bagaimana perbedaan tersebut berkembang sepanjang sisa sekuens pendaratan. Oleh karena itu, profil lintasan temporal dan spasial dikaji pada bagian berikut.

Karakteristik Temporal Lintasan Pendaratan

Karakteristik Altitude–Waktu

Profil altitude–waktu disejajarkan pada saat melintasi threshold, yang didefinisikan sebagai (t=0), untuk membandingkan perkembangan vertikal lintasan ROTL rendah dan tinggi menggunakan referensi temporal yang sama. Pada saat melintasi threshold, kedua kelompok menunjukkan rata-rata ketinggian yang serupa, yaitu 50,75 ft untuk kelompok ROTL rendah dan 51,43 ft untuk kelompok ROTL tinggi.



Gambar 5. Profil Altitude–Waktu Kelompok 5% ROTL Terendah Dan 5% ROTL Tertinggi

Gambar 5 menunjukkan bahwa kedua kelompok memulai lintasan yang dianalisis pada ketinggian threshold yang sebanding, yaitu sekitar 51 ft, sesuai dengan nilai yang dilaporkan pada Tabel 2. Namun demikian, profil ketinggian selanjutnya menunjukkan perbedaan (divergensi) selama transisi airborne-to-ground. Profil ROTL rendah mencapai ketinggian permukaan tanah pada sekitar 6 detik setelah melintasi threshold, sedangkan profil ROTL tinggi mencapai ketinggian permukaan tanah pada sekitar 7 detik. Perbedaan sekitar satu detik ini menunjukkan transisi airborne yang lebih singkat setelah melintasi threshold bagi kelompok ROTL rendah.

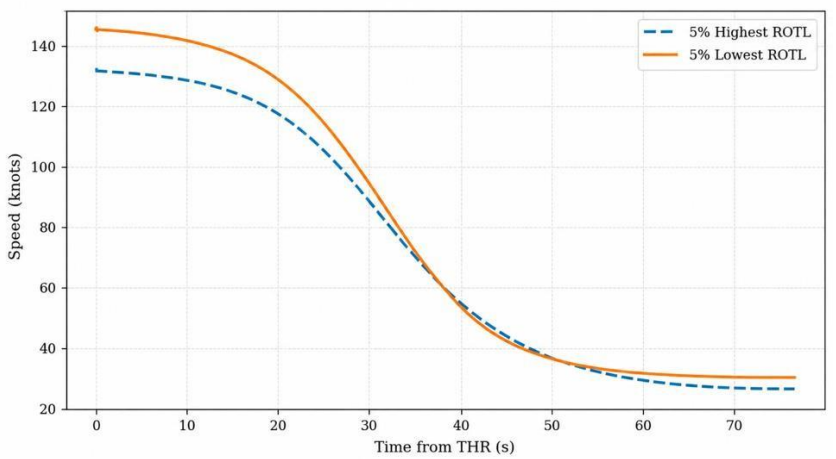
Meskipun perbedaan tersebut relatif kecil dalam durasi absolut, hal ini terjadi pada fase awal runway occupancy sehingga berkontribusi terhadap pemisahan temporal antara kedua kelompok sebelum ground rollout dimulai. Hasil ini juga menunjukkan bahwa ketinggian threshold semata memberikan informasi penjelas yang terbatas: meskipun ketinggian awal hampir identik, lintasan vertikal selanjutnya tidak berkembang secara identik.

Perbedaan kecil pada ketinggian awal menunjukkan bahwa kedua kelompok memasuki lingkungan landas pacu dari posisi vertikal yang relatif sebanding. Oleh karena itu, perbedaan ROTL yang cukup besar tidak dapat dijelaskan hanya oleh perbedaan besar pada ketinggian threshold.

Setelah melintasi threshold, profil altitude–waktu memberikan sarana untuk mengkaji transisi dari fase airborne menuju touchdown. Setiap pemisahan antara kedua profil selama interval ini mencerminkan perbedaan bagaimana lintasan vertikal berkembang setelah pesawat melintasi threshold. Berbeda dengan perbandingan yang hanya berdasarkan threshold, representasi temporal memungkinkan progres transisi pendaratan dievaluasi secara berkelanjutan, bukan hanya dari satu titik pengamatan.

Karakteristik Kecepatan–Waktu

Kontras yang jauh lebih jelas antara kedua kelompok ROTL teramati pada kondisi kecepatan awal. Pada saat melintasi threshold, kelompok ROTL rendah memiliki rata-rata kecepatan darat 148,42 kt, dibandingkan dengan 132,07 kt pada kelompok ROTL tinggi.



Gambar 6. Profil kecepatan darat–waktu kelompok 5% ROTL terendah dan 5% ROTL tertinggi

Gambar 6 menunjukkan bahwa perbedaan antara kedua kelompok tidak hanya terbatas pada saat melintasi threshold. Kelompok ROTL rendah memulai pada kecepatan darat rata-rata yang jauh lebih tinggi dan mempertahankan kecepatan yang lebih tinggi selama transisi pendaratan awal. Seiring bertambahnya waktu yang berlalu, kedua profil secara progresif menurun dan bergerak menuju kondisi kecepatan rendah yang serupa pada fase rollout akhir. Pemisahan antar profil dengan demikian mengecil seiring pesawat mendekati kondisi exit landas pacu.

Salah satu temuan penting dari profil ini adalah bahwa kecepatan threshold yang lebih tinggi tidak secara langsung berarti waktu runway occupancy yang lebih panjang dalam dataset yang diamati. Kelompok ROTL rendah memasuki interval runway occupancy pada kecepatan darat yang lebih tinggi, namun menyelesaikan segmen Runway 06–M2 dalam waktu yang lebih singkat. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan threshold tidak dapat diinterpretasikan secara independen dari evolusi kecepatan pesawat selanjutnya selama pendaratan dan rollout. Sebaliknya, lintasan kecepatan secara keseluruhan yang menentukan bagaimana kondisi kecepatan awal berkembang menuju kondisi runway vacating.

Perbedaan 16,35 kt pada (t=0) menunjukkan bahwa kedua kelompok memulai periode runway occupancy yang diukur dengan kondisi kecepatan yang berbeda secara nyata. Profil kecepatan–waktu selanjutnya memungkinkan perbedaan awal ini ditelusuri sepanjang touchdown dan ground rollout.

Representasi temporal ini menjadi sangat penting karena ROTL itu sendiri merupakan ukuran berbasis waktu. Oleh karena itu, perbedaan pada laju dan waktu evolusi kecepatan dapat secara langsung memengaruhi kapan pesawat mencapai kondisi yang diperlukan untuk keluar landas pacu melalui Taxiway M2. Alih-alih menginterpretasikan kecepatan threshold secara independen, pendekatan berbasis lintasan ini mempertimbangkan bagaimana kondisi kecepatan awal berkembang sepanjang keseluruhan periode runway occupancy.

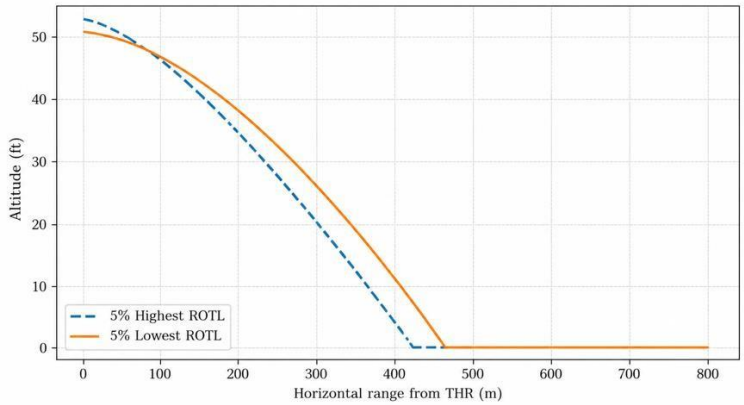
Perbandingan ini dengan demikian memperluas temuan pada level threshold dengan mengkaji apakah pemisahan kecepatan pesawat tetap bertahan, mengecil, atau berubah selama fase pendaratan dan rollout.

Karakteristik Spasial Lintasan Pendaratan

Profil lintasan temporal menggambarkan bagaimana kondisi pesawat berkembang seiring waktu yang berlalu, namun tidak secara langsung menunjukkan di mana perubahan tersebut terjadi di sepanjang landas pacu. Oleh karena itu, ketinggian dan kecepatan darat juga dievaluasi terhadap jarak horizontal dari threshold Runway 06.

Karakteristik Altitude–Jarak Horizontal

Hubungan altitude–jarak horizontal merepresentasikan lintasan vertikal sebagai fungsi progres pesawat dari threshold landas pacu.



Gambar 7. Profil altitude–jarak horizontal kelompok 5% ROTL terendah dan 5% ROTL tertinggi

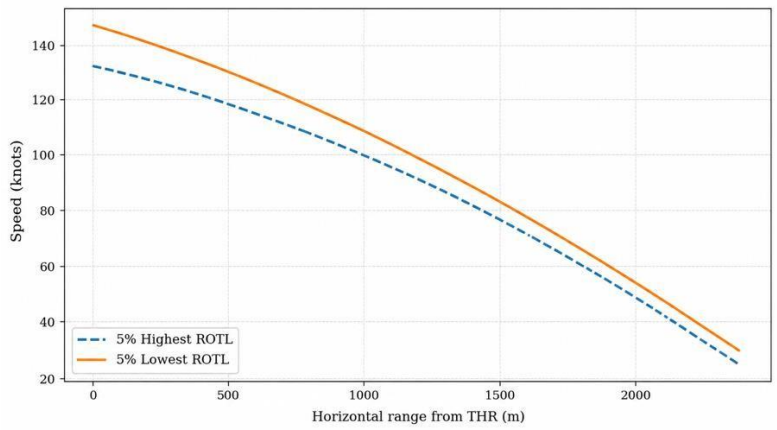
Gambar 7 membandingkan lintasan vertikal kelompok ROTL rendah dan tinggi sebagai fungsi jarak horizontal dari threshold landas pacu. Berbeda dengan representasi altitude–waktu, profil spasial ini memungkinkan kondisi vertikal pesawat dievaluasi pada posisi relatif landas pacu yang sebanding. Pemisahan spasial yang teramati selama transisi airborne-to-ground dengan demikian menunjukkan bahwa ketinggian threshold yang serupa dapat berkembang menjadi lintasan vertikal yang berbeda setelah melintasi threshold.

Karena kedua kelompok memiliki ketinggian threshold yang serupa, perbandingan spasial ini sangat berguna untuk mengkaji apakah penurunan (descent) mereka selanjutnya menuju permukaan landas pacu berkembang secara berbeda setelah melintasi threshold. Lokasi di mana ketinggian mendekati permukaan landas pacu juga dapat memberikan informasi mengenai progres touchdown relatif terhadap threshold.

Representasi ini melengkapi analisis altitude–waktu. Perbedaan ketinggian pada waktu tertentu yang telah berlalu belum tentu menunjukkan geometri vertikal yang berbeda, karena pesawat dapat bergerak sepanjang landas pacu dengan kecepatan yang berbeda. Dengan menyatakan ketinggian sebagai fungsi jarak horizontal, perilaku vertikal kedua kelompok dapat dibandingkan pada posisi landas pacu yang kurang lebih setara.

Karakteristik Kecepatan–Jarak Horizontal

Hubungan kecepatan–jarak horizontal memberikan representasi spasial dari manajemen kecepatan pesawat selama fase pendaratan dan rollout.



Gambar 8. Profil kecepatan darat–jarak horizontal kelompok 5% ROTL terendah dan 5% ROTL tertinggi

Gambar 8 menyajikan profil kecepatan darat yang bersesuaian sebagai fungsi jarak horizontal. Perbandingan ini menunjukkan bagaimana perbedaan awal 16,35 kt pada kecepatan threshold berkembang seiring pesawat bergerak menuju Taxiway M2. Representasi spasial ini melengkapi analisis kecepatan–waktu dengan menunjukkan apakah perbedaan kecepatan tetap bertahan pada posisi yang setara di sepanjang landas pacu, bukan hanya pada waktu yang setara.

Berbeda dengan representasi kecepatan–waktu, analisis ini membandingkan kecepatan pesawat pada posisi yang setara relatif terhadap threshold landas pacu. Representasi ini karenanya memberikan informasi tambahan mengenai bagaimana jarak landas pacu yang tersedia dimanfaatkan selama deselerasi dan progres menuju Taxiway M2.

Kelompok ROTL rendah dan tinggi memasuki profil spasial ini dengan kecepatan threshold yang berbeda secara nyata. Perkembangan profil selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan apakah perbedaan kecepatan ini tetap bertahan di sepanjang landas pacu dan di titik mana kedua lintasan mulai menyatu (converge) seiring pesawat mendekati kondisi exit landas pacu.

Kombinasi profil kecepatan–waktu dan kecepatan–jarak horizontal sangat bermanfaat karena sebuah pesawat dapat mengurangi kecepatan secara cepat terhadap waktu namun tetap menunjukkan pola deselerasi spasial yang berbeda. Evaluasi terhadap kedua representasi ini dengan demikian memberikan deskripsi yang lebih lengkap mengenai perilaku rollout yang berkaitan dengan hasil ROTL yang berbeda.

Analisis Terintegrasi Karakteristik Lintasan Pendaratan

Hasil gabungan menunjukkan bahwa ROTL sebaiknya dikaji sebagai hasil dari rangkaian kondisi pesawat, bukan semata-mata sebagai nilai waktu agregat. Kedua kelompok memulai sekuens pendaratan yang diukur dengan rata-rata ketinggian threshold yang hampir identik, namun rata-rata kecepatan threshold yang berbeda secara nyata. Kelompok ROTL rendah melintasi threshold pada 148,42 kt dibandingkan dengan 132,07 kt untuk kelompok ROTL tinggi, sementara nilai ketinggian yang bersesuaian hanya berbeda kurang dari 1 ft.

Kontras ini menetapkan kondisi awal yang penting bagi analisis lintasan selanjutnya. Namun demikian, kontribusi utama penelitian ini bukan sekadar identifikasi perbedaan kecepatan threshold tersebut, karena karakteristik threshold telah dikaji pada penelitian sebelumnya. Sebaliknya, profil temporal dan spasial memberikan kerangka untuk menelusuri bagaimana perbedaan yang teramati pada saat melintasi threshold berkembang melalui transisi airborne-to-ground dan rollout landas pacu selanjutnya.

Keempat representasi lintasan tersebut memberikan informasi yang saling melengkapi. Altitude–waktu menggambarkan perkembangan temporal menuju touchdown, sedangkan altitude–jarak horizontal menempatkan transisi vertikal ini dalam referensi spasial landas pacu. Demikian pula, kecepatan–waktu menggambarkan perkembangan temporal kecepatan pesawat selama runway occupancy, sementara kecepatan–jarak horizontal menunjukkan bagaimana kecepatan berubah relatif terhadap posisi landas pacu. Interpretasi gabungan keduanya dengan demikian menghubungkan kondisi awal pesawat pada saat melintasi threshold dengan perilaku pendaratan selanjutnya serta durasi runway occupancy yang dihasilkan.

Dari perspektif operasional, representasi berbasis lintasan ini bermanfaat karena dua pendaratan dengan nilai ROTL yang berbeda mungkin tidak hanya berbeda pada satu titik dalam proses pendaratan. Sebaliknya, hasil runway occupancy yang diamati dapat mencerminkan perbedaan yang berkembang sepanjang fase-fase lintasan yang berurutan. Oleh karena itu, evaluasi perilaku pesawat sepanjang sekuens pendaratan memberikan karakterisasi yang lebih rinci mengenai operasi ROTL rendah dan tinggi dibandingkan dengan parameter threshold atau nilai ROTL agregat yang dipertimbangkan secara terpisah.

Temuan ini mendukung penggunaan analisis lintasan ADS-B sebagai pendekatan empiris untuk mengkaji kinerja runway occupancy. Dengan merekonstruksi perilaku pesawat pada domain temporal dan spasial, perbedaan antara operasi ROTL rendah dan tinggi dapat dievaluasi sepanjang keseluruhan periode runway occupancy, sehingga memberikan wawasan operasional tambahan mengenai karakteristik lintasan yang berkaitan dengan ROTL. Temuan ini menjadi ***novelty*** penelitian, yaitu karakterisasi berbasis lintasan (trajectory-based) yang melengkapi analisis ROTL yang sebelumnya hanya berbasis pada parameter threshold dan nilai agregat.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini mengkaji karakteristik lintasan pendaratan pesawat yang berkaitan dengan Runway Occupancy Time Landing (ROTL) menggunakan 2.000 lintasan pendaratan berbasis ADS-B dari pesawat Kategori C yang beroperasi pada Runway 06 dan keluar melalui Taxiway M2 di Bandar Udara Internasional Soekarno–Hatta. Analisis membandingkan kelompok 5% ROTL terendah dan 5% ROTL tertinggi melalui representasi temporal dan spasial ketinggian serta kecepatan darat pesawat sejak melintasi threshold hingga keluar landas pacu. Berdasarkan temuan penelitian ini, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Perbedaan paling nyata antara kedua kelompok teramati pada kecepatan darat pesawat saat melintasi threshold. Kelompok ROTL rendah mencatat rata-rata kecepatan threshold sebesar 148,42 kt, dibandingkan dengan 132,07 kt pada kelompok ROTL tinggi, atau selisih sebesar 16,35 kt, sedangkan rata-rata ketinggian threshold relatif serupa yaitu 50,75 ft dan 51,43 ft.
2. Temuan ini menunjukkan bahwa hasil ROTL yang kontras berkaitan dengan karakteristik kecepatan awal yang berbeda secara nyata, meskipun kondisi ketinggian pada threshold landas pacu relatif sebanding.
3. Kerangka lintasan temporal dan spasial memungkinkan perilaku pesawat dikaji sepanjang sekuens pendaratan, melampaui perbandingan pada level threshold semata. Kombinasi representasi altitude–waktu, kecepatan–waktu, altitude–jarak horizontal, dan kecepatan–jarak horizontal memberikan perspektif yang saling melengkapi untuk mengkarakterisasi bagaimana perbedaan antara operasi ROTL rendah dan tinggi berkembang sejak melintasi threshold melalui transisi airborne-to-ground dan rollout landas pacu.
4. ROTL dengan demikian dapat dievaluasi tidak hanya sebagai durasi occupancy agregat, tetapi juga dalam kaitannya dengan evolusi kondisi pesawat sepanjang lintasan pendaratan.
5. Temuan ini menunjukkan potensi analisis lintasan ADS-B untuk memberikan karakterisasi empiris yang lebih rinci mengenai kinerja runway occupancy. Untuk kasus Runway 06–Taxiway M2, hasil penelitian menekankan relevansi karakteristik kecepatan pesawat dalam membedakan operasi ROTL rendah dan tinggi, sementara ketinggian threshold menunjukkan variasi yang jauh lebih kecil di antara kedua kelompok.

Keterbatasan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, analisis hanya dilakukan pada satu konfigurasi landas pacu dan exit (Runway 06–Taxiway M2) di satu bandar udara, sehingga hasilnya belum tentu dapat digeneralisasikan pada konfigurasi landas pacu atau bandar udara lain. Kedua, penelitian ini hanya mencakup pesawat Kategori C yang didominasi oleh Boeing 737-800 dan Airbus A320, sehingga karakteristik lintasan pendaratan pada kategori pesawat lain belum tergambarkan. Ketiga, analisis bersifat deskriptif-

komparatif berdasarkan data ADS-B historis, sehingga belum memperhitungkan faktor operasional lain seperti kondisi cuaca, kondisi permukaan landas pacu, interaksi lalu lintas, maupun perilaku pilot secara individual yang berpotensi turut memengaruhi ROTL.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan analisis dengan memasukkan faktor operasional tambahan, seperti jenis pesawat, kondisi meteorologi, kondisi permukaan landas pacu, interaksi lalu lintas, serta perilaku pendaratan yang bergantung pada pilot, guna memperkaya pemahaman mengenai variasi runway occupancy time. Selain itu, penerapan pendekatan berbasis lintasan ini pada konfigurasi landas pacu dan bandar udara lain dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai generalisasi temuan penelitian ini.

Kontribusi Author

Penulis pertama bertanggung jawab dalam perumusan konsep penelitian, pengolahan data ADS-B, analisis lintasan temporal dan spasial, serta penyusunan naskah. Penulis kedua berkontribusi dalam interpretasi hasil penelitian serta proses penelaahan dan penyempurnaan naskah. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir artikel yang diterbitkan.

REFERENSI

Airbus. (2025). *Airbus Global Market Forecast 2025–2044.* Airbus.

AirNav Indonesia. (2015). *Manual Perhitungan Kapasitas Runway* (Edisi ke-2, Dokumen No. 001/MAN-PKRN/DSPA-2/12/2015). Direktorat Keselamatan, Keamanan & Standarisasi, Perum LPPNPI.

AirNav Indonesia. (2024). *Laporan Tahunan 2024.* AirNav Indonesia.

EUROCONTROL. (2023). *Optimised Runway Occupancy Time Spacing for Arrivals (ROCAT Solution).* SESAR Joint Undertaking.

Federal Aviation Administration. (2024). *Airport Design* (Advisory Circular AC 150/5300-13B, Change 1). U.S. Department of Transportation.

Galagedera, M., & Samarasekara, K. (2021). Evaluation of the impact of runway characteristics on veer and occupancy time. *Journal of Air Transport Management, 95*, 102109.

Gao, H., Xie, Y., Yuan, C., He, X., & Niu, T. (2023). Prediction of aircraft arrival runway occupancy time based on machine learning. *International Journal of Computational Intelligence Systems, 16*, 150.

International Civil Aviation Organization. (2005). *Aerodrome Design Manual: Part 2. Taxiways, Aprons and Holding Bays* (Doc 9157, 4th ed.). ICAO.

Juniawan, A. F., & Putriekapuja, R. A. (2023). Runway occupancy time landing analysis of runway 06/24 at Soekarno-Hatta International Airport. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies, 39*(2), 352–356.

Kumar, V., Sherry, L., & Kicinger, R. (2010). Runway occupancy time extraction and analysis using surface track data. *Transportation Research Record, 2300*, 45–55.

Lim, Z. J. (2020). *Causal Effects of Landing Parameters on Runway Occupancy Time* (Tesis magister). Nanyang Technological University.

Maltinti, F., Flore, M., Pigozzi, F., & Coni, M. (2024). Optimizing airport runway capacity and sustainability through the introduction of rapid exit taxiways: A case study. *Sustainability, 16*(13), 5359.

Meijers, N. P. (2019). *Empirical Analysis of Runway Occupancy with Applications to Airport Capacity* (Tesis magister). Massachusetts Institute of Technology.

Nguyen, T. D., et al. (2022). Model generalization in arrival runway occupancy time prediction by feature equivalences. *arXiv preprint, arXiv:2201.11654.*

Pavlin, S., Zuzic, M., & Pavicic, S. (2006). Runway occupancy time as element of runway capacity. *Promet Traffic & Transportation*, *18*(4), 293–299.

Rosmayanti, R., Abimanyu, Y., Sonhaji, I., & Faridan, A. (2024). Evaluation of compliance with the runway occupancy time standard at Soekarno-Hatta International Airport. *Langit Biru: Jurnal Ilmiah Aviasi, 17*(2), 49–61.

Wibowo, P. S., Sembiring, J., & Indriyanto, T. (2025). Data-driven optimization of runway occupancy time landing: A case study on Runway 06 at Soekarno-Hatta International Airport. *Indonesian Journal of Aerospace, 32*(2), 159–176.