

# Optimalisasi Lintasan Penerbangan untuk Efisiensi dan Keberlanjutan Perusahaan Penerbangan: Sebuah Tinjauan Sistematis

Astri Rumondang Banjarnahor<sup>\*,1</sup>, Juliater Simarmata<sup>1</sup>, Yulianti Keke<sup>1</sup>, L Denny Siahaan<sup>1</sup>,  
Anindita Galuh Wardhani<sup>1</sup>, Deni Agus Kurniawan<sup>1</sup>, Muhajir Akbar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Transportasi dan Logistik Trisakti

Jl. IPN Kebun Nanas No 2, Cipinang Besar Selatan, Jakarta Timur, DKI Jakarta 13410, Indonesia

\*E-mail: [rumondangastri@gmail.com](mailto:rumondangastri@gmail.com)

Diterima: 2 Mei 2025, direvisi: 19 Juni 2025, disetujui: 14 Oktober 2025,  
tersedia daring: 22 Desember 2025, diterbitkan: 29 Desember 2025

## Abstrak

Penelitian ini mengkaji perkembangan optimisasi lintasan penerbangan dengan fokus pada penerbangan sipil dalam konteks manajemen lalu lintas udara dan *trajectory-based operation*. Tinjauan literatur sistematis dilakukan dengan mengikuti pedoman PRISMA 2020 terhadap 51 artikel yang teridentifikasi melalui basis data Scopus. Studi yang tidak relevan dengan domain optimisasi lintasan penerbangan sipil seperti pemasaran, *brand*, kepemimpinan, komunikasi nirkabel murni tanpa implikasi lintasan, maupun *spacecraft* dikeluarkan pada tahap penyaringan. Sebagian kecil kajian *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dipertahankan jika secara eksplisit membahas pengelolaan lintasan yang dapat ditransfer ke operasi penerbangan sipil. Hasil sintesis menunjukkan bahwa *Performance-Based Navigation* (PBN) dan *Automatic Dependent Surveillance–Broadcast* (ADS-B) diasosiasikan dengan peningkatan presisi lintasan serta potensi penurunan konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub>. *Continuous Climb Operations* (CCO) dan *Continuous Descent Operations* (CDO) berkontribusi terhadap pengurangan *fuel burn*, emisi CO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>, dan kebisingan di sekitar bandara dalam berbagai konteks operasional. Integrasi *trajectory-based operations* dengan *Air Traffic Flow Management* menunjukkan kecenderungan untuk meningkatkan prediktabilitas jadwal dan mengurangi delay pada tingkat jaringan. Pemetaan bukti disajikan melalui kerangka teknologi–indikator kinerja (*fuel burn*, emisi, waktu tempuh, delay, kebisingan), yang juga menyoroti keterbatasan bukti empiris pada konteks negara berkembang. Temuan ini memberikan dasar analitis bagi pengembangan kebijakan dan agenda riset lanjutan mengenai efisiensi dan dekarbonisasi penerbangan sipil.

**Kata kunci:** Efisiensi penerbangan, manajemen lalu lintas udara, navigasi berbasis kinerja, optimalisasi lintasan penerbangan, *trajectory-based operations*.

## Abstract

**Flight Trajectory Optimization for Aviation Efficiency and Sustainability: A Systematic Review:** This study reviews developments in flight trajectory optimization with a focus on civil aviation within the context of air traffic management and trajectory-based operations. A systematic literature review following PRISMA 2020 guidelines was conducted on 51 articles identified from the Scopus database. Studies outside the scope of civil flight trajectory optimization such as marketing, branding, leadership, purely wireless communication without trajectory implications, or spacecraft applications were excluded during screening. A limited number of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) studies were retained only when they explicitly address trajectory management concepts transferable to civil aviation operations. The synthesis indicates that Performance-Based Navigation (PBN) and Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) are associated with improved trajectory precision and potential reductions in fuel burn and CO<sub>2</sub> emissions. Continuous Climb Operations (CCO) and Continuous Descent Operations (CDO) contribute to reduced fuel consumption, CO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> emissions, and airport noise under various operational conditions. The integration of trajectory-based operations with Air Traffic Flow Management shows a tendency to enhance schedule predictability and reduce delays at the network level. The findings are organized through a technology–performance framework (*fuel burn*, emissions, travel time, delay, noise), highlighting research gaps in developing-country contexts. These results provide an analytical basis for future research and policy development in civil aviation efficiency and decarbonization.

**Keywords:** Air traffic management, flight efficiency, flight trajectory optimization, performance-based navigation, trajectory-based operations.

## 1. Pendahuluan

Pertumbuhan ekonomi global menunjukkan keterkaitan yang erat dengan kemajuan teknologi transportasi modern [1][2]. Dalam konteks ini, transportasi udara memainkan peran strategis sebagai pendorong utama integrasi pasar internasional melalui percepatan arus barang, jasa, dan mobilitas manusia lintas batas negara. Keunggulan mobilitas udara tidak hanya meningkatkan efisiensi rantai pasok global, tetapi juga memperluas akses terhadap peluang ekonomi antardaerah secara signifikan. Meskipun demikian, kontribusi positif tersebut tidak terlepas dari konsekuensi lingkungan yang semakin mendapat sorotan. Sejumlah laporan internasional mengindikasikan bahwa sektor penerbangan menyumbang

sekitar 2,5% dari total emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) global, dengan kecenderungan peningkatan seiring pertumbuhan permintaan perjalanan udara dalam jangka panjang [3][4][5]. Realitas ini menempatkan industri penerbangan pada posisi yang dilematis, yakni di satu sisi dituntut untuk menjaga efisiensi dan konektivitas global, sementara di sisi lain harus melakukan transformasi operasional guna menurunkan jejak karbon secara terukur, sistematis, dan berkelanjutan [6].

Dalam konteks tersebut, optimalisasi lintasan penerbangan (*flight trajectory optimization*) semakin dipandang sebagai pendekatan strategis untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan menurunkan emisi tanpa mengorbankan keselamatan maupun kapasitas operasional [7][8][9]. Pada awalnya, perencanaan lintasan penerbangan lebih berorientasi pada aspek keselamatan dan kepastian navigasi. Namun, kemajuan teknologi navigasi dan sistem manajemen lalu lintas udara telah mendorong pergeseran menuju pendekatan yang lebih dinamis dan terintegrasi, mencakup pengelolaan dimensi horizontal, vertikal, kecepatan, dan waktu secara simultan.

Penerapan teknologi seperti *Performance-Based Navigation* (PBN) dan *Automatic Dependent Surveillance–Broadcast* (ADS-B) meningkatkan presisi navigasi serta memungkinkan pengaturan lintasan yang lebih fleksibel secara *real-time* [10]. Selain itu, konsep operasional seperti *Continuous Climb Operations* (CCO) dan *Continuous Descent Operations* (CDO) dirancang untuk mengurangi konsumsi bahan bakar, khususnya pada fase lepas landas dan pendaratan yang relatif insentif energi. Di sisi lain, penggunaan *Sustainable Aviation Fuel* (SAF) juga dikaitkan dengan potensi pengurangan emisi siklus hidup yang signifikan, meskipun implementasinya masih menghadapi tantangan biaya dan ketersediaan. Berbagai studi menunjukkan potensi manfaat dari teknologi dan strategi tersebut, tetapi besarnya dampak sangat bergantung pada kondisi operasional, kesiapan infrastruktur, dan kerangka regulasi di masing-masing wilayah [11][12].

Literatur dalam satu dekade terakhir menunjukkan meningkatnya perhatian terhadap aspek teknis dan lingkungan dari optimalisasi lintasan penerbangan. Meskipun demikian, kajian yang ada masih terfragmentasi, baik dari segi metodologi maupun cakupan geografis [12]. Sebagian besar penelitian dilakukan di negara maju dengan sistem navigasi yang relatif mapan, sementara tantangan implementasi di negara berkembang seperti keterbatasan kapasitas teknis, kebutuhan investasi infrastruktur, dan kompleksitas regulasi belum banyak dikaji secara sistematis. Selain itu, perbedaan indikator kinerja dan pendekatan evaluasi antarstudi menyulitkan penyusunan gambaran yang komprehensif mengenai konsistensi bukti empiris yang tersedia.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan menyusun sintesis sistematis terhadap literatur mengenai optimalisasi lintasan penerbangan dalam penerbangan sipil. Tinjauan dilakukan dengan mengacu pada pedoman PRISMA 2020 untuk memastikan transparansi dalam proses seleksi dan evaluasi studi. Sebanyak 51 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dianalisis guna mengidentifikasi pola tematik, teknologi yang dikaji, indikator kinerja yang digunakan, serta kecenderungan hasil penelitian. Berbeda dengan tinjauan naratif sebelumnya, studi ini juga melengkapi analisis dengan penilaian mutu metodologis dan *evidence mapping* untuk memberikan gambaran yang lebih terstruktur mengenai kekuatan dan keterbatasan literatur yang ada.

Dengan menekankan hubungan antara teknologi optimalisasi lintasan dan indikator efisiensi operasional serta keberlanjutan lingkungan, tinjauan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi konseptual dan implikasi praktis bagi pengambil kebijakan, otoritas penerbangan, dan pelaku industri. Selain itu, hasil sintesis ini relevan dalam mendukung kerangka kebijakan internasional, seperti *CORSIA* dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya yang berkaitan dengan mitigasi perubahan iklim dan transportasi berkelanjutan [13].

Optimalisasi lintasan penerbangan dalam konteks penerbangan sipil berkembang sebagai bagian dari transformasi sistem manajemen lalu lintas udara modern. Secara konseptual, lintasan penerbangan tidak lagi dipahami semata sebagai jalur navigasi dua dimensi, melainkan sebagai trajektori empat dimensi (*4D trajectory*) yang mengintegrasikan posisi horizontal, ketinggian, waktu, dan kecepatan dalam satu kerangka operasional terkoordinasi [14]. Pendekatan ini sejalan dengan paradigma *Trajectory-Based Operations* (TBO) yang menekankan sinkronisasi antara pesawat, pengendali lalu lintas udara, dan sistem manajemen jaringan udara.

Dalam literatur navigasi udara, *Performance-Based Navigation* (PBN) diposisikan sebagai kerangka utama yang memungkinkan presisi navigasi berbasis kinerja sistem avionik dan prosedur yang distandarisasi. PBN mengurangi ketergantungan pada navigasi berbasis darat dan memungkinkan desain rute yang lebih fleksibel serta efisien. Sejalan dengan itu, *Automatic Dependent Surveillance–Broadcast* (ADS-B) memperkuat kapasitas pemantauan posisi pesawat secara *real-time*, sehingga mendukung peningkatan kesadaran situasional dan optimalisasi pemisahan antar pesawat [15].

Selain kerangka navigasi dan pengawasan, literatur operasional juga menekankan pentingnya optimalisasi fase kritis penerbangan. *Continuous Climb Operations* (CCO) dan *Continuous Descent Operations* (CDO) merupakan pendekatan prosedural yang dirancang untuk meminimalkan segmen penerbangan *level-off* yang umumnya meningkatkan konsumsi bahan bakar dan emisi. Kedua pendekatan ini bertujuan mempertahankan profil pendakian dan penurunan yang lebih stabil dan efisien secara energi, dengan tetap mempertimbangkan batasan ruang udara dan keselamatan.

Dalam perspektif sistemik, optimalisasi lintasan tidak dapat dipisahkan dari kerangka *Air Traffic Management* (ATM) secara keseluruhan. ATM modern mencakup pengelolaan kapasitas ruang udara, penjadwalan lalu lintas, serta koordinasi antar wilayah kendali. Oleh karena itu, optimalisasi lintasan sering kali dipadukan dengan strategi *Air Traffic Flow Management* (ATFM) untuk mengurangi *delay* sistemik dan meningkatkan prediktabilitas operasi jaringan udara.

Dari sudut pandang kinerja, literatur umumnya mengelompokkan dampak optimalisasi lintasan ke dalam beberapa indikator utama, yaitu efisiensi bahan bakar, reduksi emisi (CO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>), pengurangan waktu tempuh atau *delay*, serta mitigasi kebisingan di sekitar bandara. Meskipun indikator-indikator ini sering digunakan secara terpisah, pendekatan analitis yang lebih mutakhir menekankan pentingnya evaluasi multi-kriteria karena peningkatan pada satu dimensi kinerja tidak selalu menghasilkan perbaikan pada dimensi lainnya [16].

Kerangka konseptual penelitian ini dibangun dengan mengintegrasikan hubungan antara teknologi dan strategi operasional (seperti *PBN*, *ADS-B*, *CCO*, *CDO*, dan *TBO*) sebagai variabel intervensi, serta indikator kinerja operasional dan lingkungan sebagai variabel hasil. Dengan demikian, analisis dalam penelitian ini tidak hanya menginventarisasi teknologi yang digunakan, tetapi juga memetakan keterkaitannya dengan luaran yang terukur. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola konsistensi maupun variasi temuan di antara studi-studi yang dianalisis [17].

Melalui kerangka konseptual tersebut, bagian hasil selanjutnya akan menyajikan sintesis sistematis mengenai distribusi studi, kecenderungan metodologis, serta pemetaan bukti empiris berdasarkan hubungan antara teknologi optimasi lintasan dan indikator kinerja yang dilaporkan.

## 2. Metodologi

### 2.1. Desain Tinjauan dan Protokol PRISMA 2020

Penelitian ini dilaksanakan sebagai tinjauan literatur sistematis dengan mengacu pada pedoman PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) untuk memastikan transparansi, konsistensi prosedural, dan keterlacakan proses seleksi studi. Protokol tinjauan disusun sebelum pencarian literatur dilakukan dan mencakup perumusan pertanyaan penelitian, kerangka kelayakan studi, strategi pencarian, prosedur seleksi, mekanisme penilaian mutu, serta format ekstraksi data.

Proses identifikasi dan dokumentasi alur seleksi artikel didukung oleh perangkat lunak *Watase Uake Tools* yang digunakan untuk mengelola data referensi, mendokumentasikan tahapan penyaringan, serta menghasilkan visualisasi diagram PRISMA [18]. Meskipun perangkat lunak tersebut memfasilitasi pengelolaan administratif dan pelacakan proses, seluruh keputusan inklusi dan eksklusi ditetapkan secara independen oleh peneliti berdasarkan kriteria akademik yang telah ditentukan sebelumnya. Diagram alur PRISMA 2020 yang memuat tahapan identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi akhir disajikan dalam badan naskah.

2.2. Kerangka PECO

Seleksi studi dalam tinjauan ini didasarkan pada kerangka PECO (*Population, Exposure, Comparator, Outcome*) yang disesuaikan dengan karakteristik penelitian di bidang rekayasa dan manajemen operasional penerbangan.

Populasi (*Population*) mencakup operasi penerbangan sipil dalam konteks manajemen lalu lintas udara. *Exposure* merujuk pada berbagai strategi dan teknologi optimalisasi lintasan penerbangan, termasuk

*Performance-Based Navigation* (PBN), *Continuous Climb Operations* (CCO), *Continuous Descent Operations* (CDO), *Trajectory-Based Operations* (TBO), serta pendekatan optimalisasi lain yang relevan dalam sistem *Air Traffic Management* (ATM). *Comparator* tidak selalu tersedia mengingat sebagian besar studi berbasis simulasi; tetapi, apabila terdapat studi yang membandingkan lintasan konvensional dengan lintasan teroptimasi, studi tersebut tetap disertakan. *Outcome* difokuskan pada indikator kinerja operasional dan lingkungan yang terukur, seperti konsumsi bahan bakar, emisi CO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>, pengurangan *delay*, peningkatan kapasitas ruang udara, dan mitigasi kebisingan [18].

2.3. Strategi Pencarian dan Basis Data

Pencarian literatur dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis melalui basis data Scopus. Scopus dipilih karena memiliki cakupan yang luas terhadap jurnal internasional bereputasi, sistem pengindeksan yang terstandardisasi, serta menyediakan metadata yang komprehensif untuk mendukung proses seleksi dan pelacakan artikel secara sistematis. Penggunaan satu basis data utama juga dilakukan untuk menjaga konsistensi kualitas sumber serta menghindari duplikasi lintas basis data yang berpotensi memengaruhi transparansi proses seleksi [19].

Pencarian dibatasi pada artikel jurnal berbahasa Inggris yang diterbitkan dalam rentang waktu 2014–2024 guna merepresentasikan perkembangan terkini dalam optimalisasi lintasan penerbangan sipil. *String* pencarian yang digunakan adalah sebagai berikut: ("flight trajectory optimization" OR "flight path optimization" OR "trajectory-based operations" OR "continuous climb operations" OR "continuous descent operations" OR "performance-based navigation") AND ("fuel efficiency" OR "emissions reduction" OR CO<sub>2</sub> OR NO<sub>x</sub> OR "delay reduction" OR "sustainability") AND ("civil aviation" OR "air traffic management" OR ATM)

Seluruh hasil pencarian diekspor dan dikelola menggunakan perangkat lunak manajemen tinjauan sistematis untuk mendukung proses identifikasi, penyaringan, dan dokumentasi sesuai pedoman PRISMA 2020 menggunakan Watase Uake.

2.4. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi dan eksklusi ditetapkan secara eksplisit untuk memastikan konsistensi seleksi studi. Rincian kriteria tersebut disajikan pada Tabel 1.

2.5. Proses Seleksi Studi

Proses penyaringan dilakukan secara independen oleh dua penelaah untuk meminimalkan bias seleksi. Tahap pertama meliputi penilaian judul dan abstrak berdasarkan kesesuaian dengan kerangka PECO dan kriteria inklusi. Artikel yang memenuhi kriteria awal kemudian dievaluasi secara penuh pada tahap penilaian kelayakan [20].

Tabel 1. Kriteria inklusi dan eksklusi

| Aspek           | Kriteria Inklusi                                      | Kriteria Eksklusi                             |
|-----------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Fokus Studi     | Optimasi lintasan penerbangan sipil                   | Penerbangan militer atau antariksa            |
| Pendekatan      | Empiris, simulasi, atau pemodelan optimasi            | Tanpa metodologi yang jelas                   |
| Outcome         | Indikator kinerja terukur (fuel, emisi, delay, noise) | Tanpa indikator kinerja terukur               |
| Jenis Publikasi | Artikel jurnal peer-review                            | Editorial, prosiding singkat, non-peer-review |
| Bahasa & Tahun  | Bahasa Inggris, 2014–2024                             | Di luar kriteria tersebut                     |

Tingkat kesepakatan antarpenelaah dihitung menggunakan koefisien *Cohen's kappa* untuk mengukur konsistensi keputusan inklusi. Nilai kappa menunjukkan tingkat kesepakatan yang substansial. Setiap perbedaan pendapat diselesaikan melalui diskusi hingga tercapai konsensus.

Pada tahap pengambilan teks penuh, berbagai upaya dilakukan untuk menghindari eksklusi akibat keterbatasan akses, termasuk penggunaan langganan institusi, layanan interlibrary loan, korespondensi dengan penulis, dan pemanfaatan jaringan akademik. Hanya artikel yang tetap tidak dapat diakses setelah seluruh upaya terdokumentasi tersebut yang akhirnya dikeluarkan dari analisis [21].

## 2.6. Penilaian Mutu dan Risiko Bias

Penilaian mutu metodologis dilakukan menggunakan adaptasi *Mixed Methods Appraisal Tool* (MMAT) yang disesuaikan dengan karakteristik studi teknik dan pemodelan. Aspek yang dinilai meliputi kejelasan desain penelitian, transparansi data, prosedur validasi model, kekuatan analisis, serta potensi replikasi.

Setiap studi dikategorikan ke dalam kategori mutu tinggi, sedang, atau terbatas berdasarkan hasil penilaian tersebut. Penilaian mutu digunakan untuk memperkuat interpretasi temuan dan mengidentifikasi potensi risiko bias, khususnya pada studi yang sepenuhnya berbasis simulasi tanpa validasi empiris. Penilaian ini tidak digunakan sebagai dasar eksklusi kecuali ditemukan kelemahan metodologis yang signifikan [22].

Kategorisasi mutu tinggi, sedang, dan terbatas ditentukan berdasarkan penilaian terhadap lima aspek utama, yaitu kejelasan desain penelitian, transparansi data, prosedur validasi model, kekuatan analisis, dan relevansi operasional. Setiap studi dinilai secara terstruktur, dan hasil kategorisasi digunakan untuk memperkuat interpretasi temuan tanpa secara otomatis mengeksklusi studi kecuali terdapat kelemahan metodologis yang signifikan.

## 2.7. Prosedur Ekstraksi Data

Untuk menjamin konsistensi dan sistematisasi pengumpulan informasi, lembar ekstraksi data (data extraction sheet) disusun sebelum proses analisis. Variabel yang diekstraksi meliputi penulis dan tahun publikasi, konteks geografis, desain penelitian, jenis teknologi optimalisasi, sumber data, indikator kinerja, metode validasi, serta temuan utama [23].

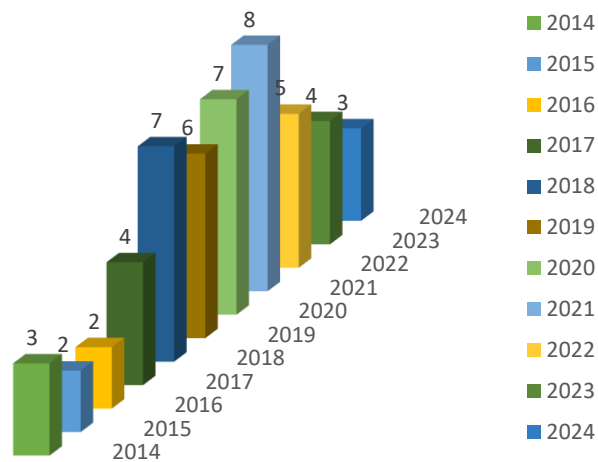
Proses ekstraksi dilakukan secara independen oleh dua penelaah dan diverifikasi silang untuk meminimalkan kesalahan pencatatan dan interpretasi. Data yang telah diverifikasi kemudian digunakan sebagai dasar penyusunan tabel karakteristik studi, penilaian mutu, dan pemetaan bukti pada bagian hasil.

Melalui tahapan yang terdokumentasi sesuai pedoman PRISMA 2020, sebanyak 51 studi memenuhi seluruh kriteria kelayakan dan dimasukkan dalam sintesis kualitatif akhir. Pendekatan berbasis satu basis data utama (Scopus), penyaringan independen ganda, penilaian mutu formal, serta prosedur ekstraksi data terstruktur memperkuat validitas dan reliabilitas tinjauan ini, meskipun heterogenitas desain penelitian membatasi kemungkinan dilakukannya meta-analisis kuantitatif [24].

# 3. Hasil dan Pembahasan

## 3.1. Trend Publikasi

Gambar 1 menggambarkan tren publikasi penelitian jalur penerbangan dari 2014 hingga 2024, yang mencerminkan peningkatan fokus pada optimalisasi operasi penerbangan, pengurangan dampak lingkungan, dan pemanfaatan teknologi canggih [20]. Perkembangan jumlah publikasi selama periode ini menunjukkan meningkatnya minat dan kemajuan yang signifikan di bidang ini. Pada 2014–2016, jumlah publikasi masih rendah, dengan hanya 2 hingga 3 artikel per tahun. Fase awal ini merupakan langkah pertama dalam penelitian yang berfokus pada pengurangan konsumsi bahan bakar dan penyesuaian rute penerbangan, yang mencerminkan upaya awal industri untuk mengatasi inefisiensi operasional dan keterbatasan teknologi yang ada [21].



Gambar 1. Jumlah publikasi

Memasuki periode 2017–2019, terjadi peningkatan jumlah publikasi yang signifikan, dengan puncaknya pada tahun 2018 mencapai 7 artikel. Peningkatan ini mencerminkan meningkatnya kesadaran akan pentingnya jalur penerbangan yang efisien, didorong oleh kemajuan teknologi komputasi dan alat pemodelan yang lebih canggih [22]. Penelitian pada fase ini juga mulai menyoroti kelestarian lingkungan, terutama dalam pengurangan emisi karbon.

Pada tahun 2020, jumlah publikasi tetap tinggi dengan 7 artikel, menandai konsolidasi teknologi yang dikembangkan sebelumnya. Tahun 2021 merupakan tonggak penting dengan jumlah publikasi tertinggi, mencapai 8 artikel. Transformasi digital global dan pandemi COVID-19 mendorong penelitian tentang integrasi kecerdasan buatan, pembelajaran mesin, dan *big data* dalam pengoptimalan jalur penerbangan [23].

Namun, pada tahun 2022, publikasi sedikit menurun menjadi 5 artikel, mencerminkan fase evaluasi terhadap dampak strategi yang telah diterapkan. Pada tahun 2023 dan 2024, jumlah publikasi tetap stabil, meskipun lebih rendah dari tahun-tahun puncak. Fokus penelitian bergeser ke integrasi UAV dalam manajemen ruang udara dan analitik data real-time untuk penyesuaian lintasan dinamis New atmospheric data model for constant altitude accelerated flight performance prediction calculations and flight trajectory optimization algorithms.

### 3.2. Hasil Seleksi Studi

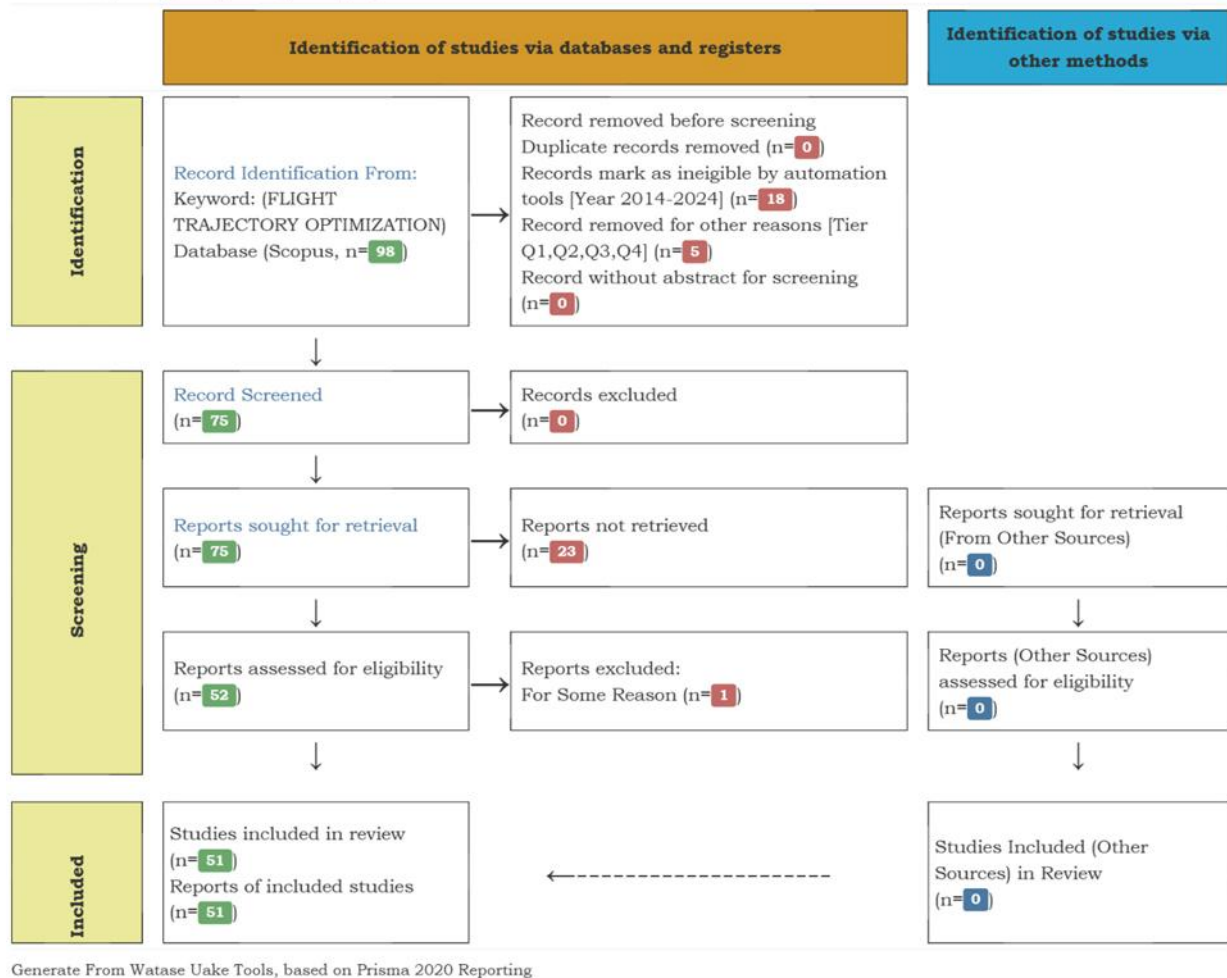
Proses seleksi studi dilakukan sesuai dengan pedoman PRISMA 2020 dan terdokumentasi secara sistematis menggunakan perangkat lunak *Watase Uake Tools*. Tahap identifikasi awal melalui basis data Scopus dengan string pencarian yang telah ditetapkan menghasilkan 98 artikel.

Sebelum tahap penyaringan, dilakukan eliminasi awal berdasarkan batasan tahun publikasi dan kriteria administratif. Sebanyak 18 artikel dieliminasi karena berada di luar rentang waktu 2014–2024. Selanjutnya, 5 artikel dihapus karena tidak memenuhi kriteria kualitas jurnal yang telah ditetapkan. Tidak ditemukan artikel duplikat dalam hasil pencarian, dan tidak ada artikel yang dieliminasi karena ketiadaan abstrak. Dengan demikian, sebanyak 75 artikel memasuki tahap penyaringan berbasis judul dan abstrak.

Pada tahap penyaringan, seluruh 75 artikel dinilai relevan secara tematik. Namun, dalam proses pengambilan teks penuh, 23 artikel tidak dapat diperoleh meskipun telah dilakukan upaya akses melalui langganan institusi dan sumber akademik yang tersedia. Oleh karena itu, 52 artikel berhasil diperoleh dalam bentuk teks penuh dan dilanjutkan ke tahap penilaian kelayakan [25].

Pada tahap evaluasi teks penuh, satu artikel dikeluarkan karena kelemahan metodologis yang signifikan dan kurangnya transparansi analitis. Dengan demikian, sebanyak 51 studi memenuhi seluruh kriteria kelayakan dan dimasukkan dalam sintesis kualitatif akhir. Diagram lengkap proses seleksi disajikan pada Gambar 2.

## Prisma Reporting: Flight Trajectory Optimization

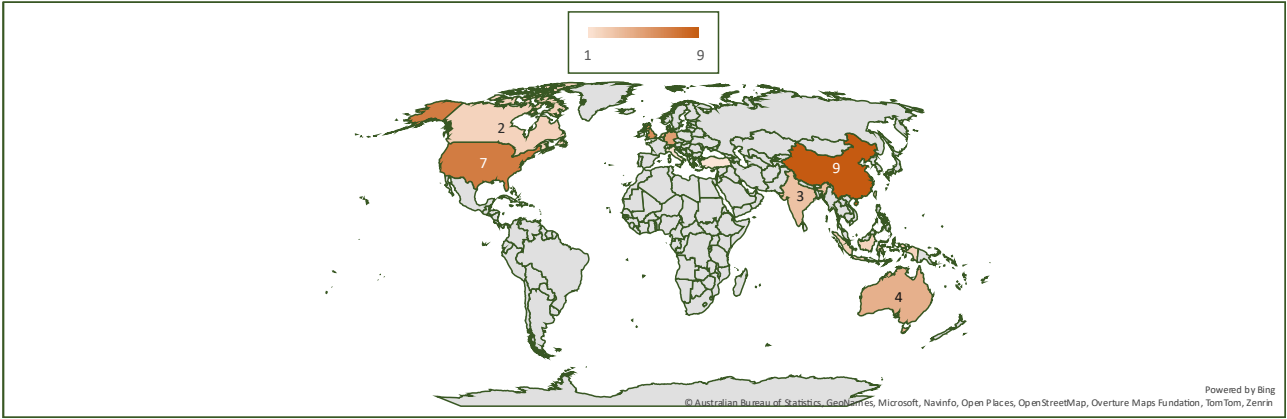


Gambar 2. Diagram alur PRISMA 2020 proses seleksi studi

## 3.3. Profil Publikasi dan Lokasi Penelitian

Secara temporal, tren jumlah publikasi menunjukkan bahwa riset optimalisasi lintasan penerbangan berkembang pesat setelah 2017. Pada periode awal, hanya sedikit studi yang mengkaji pengaruh teknologi navigasi dan manajemen lalu lintas udara terhadap efisiensi penerbangan, sementara setelahnya terjadi peningkatan publikasi yang menggabungkan aspek efisiensi operasional dan keberlanjutan lingkungan. Hal ini sejalan dengan meningkatnya tekanan regulasi dan komitmen industri untuk menurunkan emisi penerbangan [25].

Secara geografis, penelitian didominasi oleh negara-negara dengan infrastruktur penerbangan dan kapasitas riset yang kuat. China dan Amerika Serikat menjadi kontributor utama kajian PBN, ADS-B, dan optimalisasi rute yang berorientasi pada pengurangan *fuel burn* dan waktu tempuh. Australia dan beberapa negara Eropa lebih banyak berfokus pada penerapan CDO/CCO dan skema TBO/ATFM di bandara dengan lalu lintas padat, dengan indikator kinerja berupa penurunan *delay*, efisiensi waktu, dan reduksi kebisingan di area sekitar bandara. Di sisi lain, studi dari kawasan lain mulai mengeksplorasi *biofuel*/SAF dan kebijakan pasar karbon, dengan penekanan pada emisi CO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> dan implikasi ekonominya bagi maskapai [26]. Profil publikasi dan lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Profil publikasi dan lokasi penelitian

3.4. Karakteristik Studi yang Diinklusi

Karakter studi yang diinklusi ditunjukkan pada Tabel 2. Sebanyak 51 studi yang memenuhi kriteria kelayakan dianalisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi distribusi geografis, pendekatan metodologis, fokus teknologi, serta indikator kinerja yang digunakan. Analisis karakteristik menunjukkan bahwa sebagian besar studi menggunakan pendekatan simulasi dan pemodelan optimasi, dengan konsentrasi penelitian di kawasan Eropa dan Amerika Utara. Indikator kinerja yang paling sering digunakan adalah konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub>, sementara indikator kebisingan dan ketahanan sistem jaringan udara relatif lebih sedikit dianalisis [26].

3.5. Penilaian Mutu dan Risiko Bias

Penilaian mutu metodologis dilakukan menggunakan adaptasi *Mixed Methods Appraisal Tool* (MMAT). Hasil evaluasi dirangkum pada Tabel 3. Interpretasi hasil menunjukkan bahwa mayoritas studi berada pada kategori mutu sedang hingga tinggi. Namun demikian, dominasi studi berbasis simulasi tanpa implementasi operasional jangka panjang menunjukkan adanya potensi bias implementasi. Selain itu, variasi metode validasi dan heterogenitas indikator kinerja dapat memengaruhi konsistensi temuan antar studi [29].

3.6. Evidence Mapping

Untuk memberikan gambaran terstruktur mengenai distribusi bukti empiris, dilakukan pemetaan teknologi terhadap indikator kinerja utama (Tabel 4). Pemetaan ini menunjukkan bahwa fokus penelitian terkonsentrasi pada efisiensi bahan bakar dan reduksi emisi karbon. Sementara itu, aspek kebisingan dan ketahanan sistem jaringan udara (*network resilience*) relatif kurang dieksplorasi [27]. Temuan ini mengindikasikan adanya peluang penelitian lanjutan untuk mengintegrasikan evaluasi multi-kriteria yang lebih komprehensif.

Tabel 2. Karakteristik studi yang diinklusi (n = 51)

| Penulis & Tahun        | Wilayah       | Desain Penelitian | Fokus Teknologi | Sumber Data             | Indikator Kinerja     | Temuan Utama        |
|------------------------|---------------|-------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| Scheelhaase et al [27] | Eropa         | Simulasi          | CDO             | Data radar              | Fuel, CO <sub>2</sub> | Reduksi konsumsi    |
| López-Lago et al [26]  | Asia          | Model optimasi    | PBN             | Data lintasan           | Delay                 | Pengurangan delay   |
| Staples et al. [28]    | Amerika Utara | Empiris           | ADS-B           | Data penerbangan aktual | Emisi                 | Peningkatan presisi |

Tabel 3. Ringkasan penilaian mutu (n = 51)

| Kategori Mutu | Jumlah Studi | Karakteristik Umum                       |
|---------------|--------------|------------------------------------------|
| Tinggi        | 18           | Validasi model jelas dan data transparan |
| Sedang        | 26           | Simulasi dengan validasi terbatas        |
| Terbatas      | 7            | Metodologi kurang rinci                  |

**Tabel 4.** Pemetaan bukti empiris berdasarkan teknologi dan indikator kinerja

| Teknologi | <i>Fuel</i> | CO <sub>2</sub> | <i>Delay</i> | <i>Noise</i> | Jumlah Studi |
|-----------|-------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| PBN       | V           | V               | V            | -            | 12           |
| ADS-B     | V           | V               | V            | -            | 8            |
| CCO       | V           | V               | -            | V            | 9            |
| CDO       | V           | V               | -            | V            | 11           |
| TBO/ATFM  | -           | -               | V            | -            | 7            |
| Lainnya   | V           | V               | V            | -            | 4            |

Hasil sintesis sistematis terhadap 51 studi menunjukkan bahwa optimalisasi lintasan penerbangan dalam konteks penerbangan sipil secara umum diasosiasikan dengan peningkatan efisiensi operasional dan pengurangan dampak lingkungan [30]. Berdasarkan kerangka PECO yang digunakan, mayoritas penelitian memfokuskan pada *exposure* berupa penerapan teknologi dan strategi seperti *Performance-Based Navigation* (PBN), *Continuous Climb Operations* (CCO), *Continuous Descent Operations* (CDO), serta *Trajectory-Based Operations* (TBO), dengan *outcome* yang diukur melalui indikator konsumsi bahan bakar, emisi, *delay*, dan kebisingan [31].

Dalam dimensi efisiensi bahan bakar, sebagian besar studi menunjukkan kecenderungan bahwa pendekatan berbasis optimasi lintasan berkorelasi dengan penurunan konsumsi bahan bakar, terutama ketika dikombinasikan dengan prosedur CCO dan CDO [32]. Namun demikian, besaran pengurangan yang dilaporkan bervariasi antar studi dan sangat dipengaruhi oleh konteks operasional, struktur ruang udara, serta asumsi model yang digunakan [33]. Temuan ini mengindikasikan bahwa dampak efisiensi tidak bersifat universal, melainkan bergantung pada karakteristik sistem navigasi dan tingkat integrasi manajemen lalu lintas udara di masing-masing wilayah [34].

Pada aspek emisi, hasil *review* menunjukkan bahwa reduksi konsumsi bahan bakar secara konsisten diasosiasikan dengan penurunan emisi CO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> [35]. Meskipun demikian, sebagian besar bukti berasal dari studi berbasis simulasi, sehingga implikasi terhadap pengurangan emisi aktual dalam operasi jangka panjang masih memerlukan validasi empiris lebih lanjut [36]. Penilaian mutu metodologis memperlihatkan bahwa studi dengan kategori mutu tinggi umumnya menyertakan prosedur validasi model yang lebih jelas, sedangkan studi bermutu sedang cenderung mengandalkan asumsi operasional yang lebih sederhana [37].

Dalam konteks pengurangan *delay* dan peningkatan kapasitas ruang udara, teknologi seperti TBO dan integrasi dengan *Air Traffic Flow Management* (ATFM) menunjukkan kecenderungan meningkatkan prediktabilitas operasi [28]. Namun, variasi desain penelitian dan heterogenitas indikator kinerja menyebabkan perbandingan langsung antar studi menjadi terbatas. Hal ini mengindikasikan perlunya pendekatan evaluasi multi-kriteria yang lebih terstandarisasi dalam penelitian selanjutnya [38].

Dari perspektif kebisingan, hanya sebagian kecil studi yang secara eksplisit menganalisis dampak prosedur optimasi lintasan terhadap paparan kebisingan di sekitar bandara [39]. Meskipun prosedur CDO sering diasosiasikan dengan pengurangan kebisingan pada fase pendekatan, bukti empiris masih relatif terbatas dibandingkan dengan indikator bahan bakar dan emisi. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian pada dimensi sosial-lingkungan yang lebih luas [40].

Hasil penilaian mutu dan risiko bias juga memberikan konteks penting dalam menginterpretasikan temuan. Dominasi studi berbasis simulasi, meskipun menawarkan fleksibilitas analitis, berpotensi menimbulkan bias implementasi apabila asumsi model tidak sepenuhnya mencerminkan kompleksitas operasional nyata. Selain itu, konsentrasi penelitian pada negara dengan infrastruktur navigasi yang maju mengindikasikan adanya keterbatasan generalisasi terhadap konteks negara berkembang [41]. Dengan demikian, interpretasi hasil perlu dilakukan secara proporsional, dengan mempertimbangkan variasi metodologis dan konteks geografis studi.

Secara konseptual, hubungan antara *exposure* (teknologi optimasi lintasan) dan *outcome* (efisiensi serta keberlanjutan) menunjukkan pola yang relatif konsisten, meskipun kekuatan bukti bervariasi berdasarkan kualitas metodologis dan jenis data yang digunakan [37]. Temuan ini mengindikasikan

bahwa optimalisasi lintasan merupakan salah satu komponen penting dalam strategi dekarbonisasi sektor penerbangan, tetapi tidak dapat dipandang sebagai solusi tunggal. Integrasi dengan kebijakan energi, inovasi bahan bakar berkelanjutan, serta penguatan tata kelola ruang udara tetap diperlukan untuk menghasilkan dampak yang lebih komprehensif [42].

Meskipun tinjauan ini telah dilakukan secara sistematis dengan mengacu pada pedoman PRISMA 2020 serta dilengkapi dengan penilaian mutu metodologis, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasilnya [43].

Pertama, mayoritas studi yang diinklusi dalam sintesis ini menggunakan pendekatan simulasi dan pemodelan optimasi. Meskipun metode tersebut memungkinkan eksplorasi skenario operasional yang beragam dan pengujian berbagai konfigurasi lintasan, validasi empiris dalam konteks operasional nyata masih relatif terbatas [44]. Kondisi ini berpotensi menimbulkan bias implementasi, khususnya apabila asumsi model tidak sepenuhnya merepresentasikan kompleksitas sistem manajemen lalu lintas udara yang sesungguhnya.

Kedua, distribusi geografis penelitian cenderung terkonsentrasi pada negara dan wilayah dengan infrastruktur navigasi udara yang telah berkembang, seperti Eropa dan Amerika Utara. Konteks negara berkembang, yang mungkin menghadapi keterbatasan infrastruktur, sumber daya manusia, maupun kerangka regulasi, masih relatif kurang terwakili dalam literatur yang dianalisis [45]. Oleh karena itu, generalisasi temuan terhadap konteks operasional yang berbeda perlu dilakukan dengan kehati-hatian.

Ketiga, terdapat heterogenitas yang cukup tinggi dalam indikator kinerja yang digunakan antar studi. Variasi dalam definisi, metode pengukuran, serta cakupan indikator seperti konsumsi bahan bakar, emisi, *delay*, kapasitas, dan kebisingan membatasi konsistensi perbandingan langsung antar penelitian. Perbedaan pendekatan evaluasi ini juga memengaruhi kemampuan untuk menyusun sintesis kuantitatif yang terstandarisasi [46].

Keempat, penelitian ini tidak melakukan meta-analisis kuantitatif karena heterogenitas desain penelitian, jenis data, dan ukuran efek yang dilaporkan [9]. Sebagian besar studi menggunakan parameter dan skenario yang berbeda, sehingga tidak memungkinkan agregasi statistik yang valid tanpa mengorbankan integritas metodologis [27]. Oleh karena itu, sintesis yang dilakukan bersifat kualitatif-tematik dengan penekanan pada pola konsistensi dan variasi temuan.

Menyadari keterbatasan tersebut, hasil tinjauan ini sebaiknya dipahami sebagai representasi komprehensif atas bukti yang tersedia dalam periode kajian, tetapi tetap terbuka terhadap pembaruan seiring bertambahnya studi empiris lintas konteks dan pengembangan metodologi evaluasi yang lebih terstandarisasi.

#### 4. Kesimpulan

Tinjauan sistematis ini menyintesis 51 studi yang dipublikasikan dalam periode 2014–2024 untuk mengkaji perkembangan dan dampak optimalisasi lintasan penerbangan dalam konteks penerbangan sipil. Berdasarkan kerangka PECO yang digunakan, mayoritas penelitian menempatkan teknologi dan strategi seperti Performance-Based Navigation (PBN), Continuous Climb Operations (CCO), Continuous Descent Operations (CDO), serta Trajectory-Based Operations (TBO) sebagai bentuk intervensi utama, dengan indikator kinerja yang paling sering dianalisis meliputi konsumsi bahan bakar, emisi CO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>, dan pengurangan *delay*.

Secara umum, literatur menunjukkan kecenderungan bahwa optimalisasi lintasan diasosiasikan dengan peningkatan efisiensi operasional dan pengurangan dampak lingkungan dalam berbagai konteks studi. Namun demikian, kekuatan bukti bervariasi antar penelitian. Studi dengan mutu metodologis tinggi dan validasi yang lebih komprehensif cenderung memberikan estimasi dampak yang lebih terukur, sementara studi berbasis simulasi tanpa validasi eksternal memerlukan interpretasi yang lebih hati-hati. Variasi desain penelitian, asumsi model, serta indikator kinerja yang digunakan turut memengaruhi konsistensi temuan.

Hasil pemetaan bukti menunjukkan bahwa fokus penelitian masih terkonsentrasi pada efisiensi bahan bakar dan reduksi emisi, sedangkan dimensi kebisingan, ketahanan jaringan udara, serta konteks

operasional negara berkembang relatif kurang dieksplorasi. Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun optimalisasi lintasan merupakan komponen penting dalam strategi peningkatan efisiensi dan keberlanjutan penerbangan, pendekatan tersebut tidak berdiri sendiri dan perlu diintegrasikan dengan kebijakan manajemen ruang udara, investasi infrastruktur navigasi, serta inovasi teknologi lainnya.

Dari perspektif kebijakan, hasil tinjauan ini mengindikasikan bahwa implementasi teknologi optimasi lintasan berpotensi mendukung agenda efisiensi dan mitigasi emisi, khususnya apabila didukung oleh kerangka regulasi yang konsisten, harmonisasi prosedur antar wilayah, serta peningkatan kapasitas teknis. Namun, mengingat dominasi bukti berbasis simulasi dan konsentrasi geografis pada negara maju, kebijakan implementasi perlu mempertimbangkan kesiapan infrastruktur dan kapasitas institusional di masing-masing konteks nasional.

Untuk penelitian selanjutnya, diperlukan studi empiris berbasis data operasional jangka panjang guna memperkuat validasi temuan simulasi. Selain itu, pendekatan evaluasi multi-kriteria yang lebih terstandarisasi dapat membantu meningkatkan komparabilitas antar studi dan membuka peluang meta-analisis kuantitatif di masa depan. Penelitian lintas wilayah, khususnya di negara berkembang, juga penting untuk memahami variasi tantangan implementasi dan dampak kebijakan dalam konteks yang lebih beragam.

Perlu dicatat bahwa tidak seluruh referensi dalam daftar pustaka merupakan bagian dari 51 studi yang diinklusi dalam sintesis sistematis. Sebagian referensi digunakan sebagai landasan konseptual dan konteks kebijakan yang relevan dengan topik efisiensi dan keberlanjutan penerbangan sipil.

## Ucapan Terima Kasih

Penyelesaian naskah ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian dan memberikan saran dan masukan yang sangat konstruktif. Terima kasih juga kami sampaikan kepada tim pengelola jurnal dan tim editor yang telah berkenan menerbitkan artikel hasil penelitian kami.

## Daftar Pustaka

- [1] Y. K. Fu, "Airline brand image, passenger perceived value and loyalty towards full-service and low-cost carriers," *Tour. Rev.*, vol. 78, no. 6, pp. 1433–1451, 2023, doi: 10.1108/TR-07-2022-0369.
- [2] H. Pabla and H. Soch, "Up in the air! Airline passenger's brand experience and its impact on brand satisfaction mediated by brand love," *J. Air Transp. Manag.*, vol. 107, no. August 2021, p. 102345, 2023, doi: 10.1016/j.jairtraman.2022.102345.
- [3] J. Zhang *et al.*, "The new CORSIA baseline has limited motivation to promote the green recovery of global aviation," *Environ. Pollut.*, vol. 289, no. July, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117833.
- [4] J. Higham, S. A. Cohen, C. T. Cavaliere, A. Reis, and W. Finkler, "Climate change, tourist air travel and radical emissions reduction," *J. Clean. Prod.*, vol. 111, pp. 336–347, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.10.100.
- [5] C. Meske, I. Amojó, and C. Müller, "Online flight booking: digital nudging to decrease aviation-related carbon emissions," *Inf. Technol. People*, 2022, doi: 10.1108/ITP-03-2021-0172.
- [6] S. Gössling, D. Scott, and C. M. Hall, "Inter-market variability in CO2 emission-intensities in tourism: Implications for destination marketing and carbon management," *Tour. Manag.*, vol. 46, pp. 203–212, 2015, doi: 10.1016/j.tourman.2014.06.021.
- [7] M. WU, Z. SHI, T. XIAO, and H. ANG, "Flight trajectory optimization of sun-tracking solar aircraft under the constraint of mission region," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 34, no. 11, pp. 140–153, 2021, doi: 10.1016/j.cja.2021.03.022.
- [8] W. Tian, L. Liu, X. Zhang, and J. Shao, "Flight trajectory and energy management coupled optimization for hybrid electric UAVs with adaptive sequential convex programming method," *Appl. Energy*, vol. 364, no. April, p. 123166, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123166.
- [9] A. Selim and I. Ozkol, "Robust trajectory optimization of re-entry flight with prescribed endpoint region via sparse grid ensemble pseudospectral optimal control," *Adv. Sp. Res.*, vol. 72, no. 11, pp. 5102–5128, 2023, doi: 10.1016/j.asr.2023.09.041.
- [10] S. Pennapareddy, R. Srinivasan, and N. K., "A method to mitigate cyber exploits on automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) data transmissions," *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, 2024.
- [11] J. Rosenow, M. Lindner, and J. Scheiderer, "Advanced flight planning and the benefit of in-flight aircraft trajectory optimization," *Sustain.*, vol. 13, no. 3, pp. 1–18, 2021, doi: 10.3390/su13031383.
- [12] A. Machmudah *et al.*, "Flight Trajectories Optimization of Fixed-Wing UAV by Bank-Turn Mechanism," *Drones*, vol. 6, no. 3, 2022, doi: 10.3390/drones6030069.
- [13] R. Natarajan, H. Choset, and M. Likhachev, "Interleaving Graph Search and Trajectory Optimization for Aggressive Quadrotor Flight," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 5357–5364, 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3067298.
- [14] J. Simarmata, A. R. Banjarnahor, E. Hariningsih, A. Yosafat, and G. A. Barus, "Optimizing Digital Marketing For Aviation Selection: A Systematic Review Of Emerging Trends," *J. Bisnis Dan Akunt.*, vol. 26, no. 1, 2024, doi: 10.34208/jba.v26i1.2492.
- [15] A. R. Banjarnahor, J. Simarmata, S. Ritonga, and E. Liana, "From Theory to Practice: Systematic Literature Insights on Work Motivation via Transformational Leadership and Culture," *Indones. Manag. Account. Res.*, vol. 24, no. 1, pp. 89–114, 2025.
- [16] A. Sharma and S. Sharma, "Adoption of digital marketing in tourism SMEs: a review and research agenda," *Manag. Res. Rev.*, vol. 47, no. 7, pp. 1077–1095, 2024, doi: 10.1108/MRR-08-2021-0597.

- [17] L. Satalkina and G. Steiner, "Digital entrepreneurship and its role in innovation systems: A systematic literature review as a basis for future research avenues for sustainable transitions," *Sustain.*, vol. 12, no. 7, 2020, doi: 10.3390/su12072764.
- [18] M. M. Mariani, R. Perez-Vega, and J. Wirtz, "AI in marketing, consumer research and psychology: A systematic literature review and research agenda," *Psychol. Mark.*, vol. 39, no. 4, pp. 755–776, 2022, doi: 10.1002/mar.21619.
- [19] A. Jhawar, S. Varshney, and P. Kumar, "Sponsorship Disclosure on social media: literature review and future research agenda," *Manag. Rev. Q.*, pp. 1–29, 2023.
- [20] M. Lindner, J. H. Rosenow, T. Zeh, and H. Fricke, "In-flight aircraft trajectory optimization within corridors defined by ensemble weather forecasts," *Aerospace*, vol. 7, no. 10, pp. 1–18, 2020, doi: 10.3390/aerospace7100144.
- [21] S. Hartjes, M. E. G. van Hellenberg Hubar, and H. G. Visser, "Multiple-phase trajectory optimization for formation flight in civil aviation," *CEAS Aeronaut. J.*, vol. 10, no. 2, pp. 453–462, 2019, doi: 10.1007/s13272-018-0329-9.
- [22] S. Hartjes and H. G. Visser, "Efficient trajectory parameterization for environmental optimization of departure flight paths using a genetic algorithm," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.*, vol. 231, no. 6, pp. 1115–1123, 2017, doi: 10.1177/0954410016648980.
- [23] J. H. Lee, K. H. Park, Y. C. Ko, and M. S. Alouini, "A UAV-Mounted free space optical communication: Trajectory optimization for flight time," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 19, no. 3, pp. 1610–1621, 2020, doi: 10.1109/TWC.2019.2955475.
- [24] R. I. Dancila and R. M. Botez, "New atmospheric data model for constant altitude accelerated flight performance prediction calculations and flight trajectory optimization algorithms," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.*, vol. 235, no. 4, pp. 405–426, 2021, doi: 10.1177/0954410020945555.
- [25] A. Gardi, R. Sabatini, and S. Ramasamy, "Multi-objective optimisation of aircraft flight trajectories in the ATM and avionics context," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 83, pp. 1–36, 2016, doi: 10.1016/j.paerosci.2015.11.006.
- [26] M. López-Lago, J. Serna, R. Casado, and A. Bermúdez, "Present and future of air navigation: PBN operations and supporting technologies," *Int. J. Aeronaut. Sp. Sci.*, vol. 21, no. 2, pp. 451–468, 2020.
- [27] J. Scheelhaase, S. Maertens, W. Grimme, and M. Jung, "EU ETS versus CORSIA – A critical assessment of two approaches to limit air transport's CO2 emissions by market-based measures," *J. Air Transp. Manag.*, vol. 67, no. November 2017, pp. 55–62, 2018, doi: 10.1016/j.jairtraman.2017.11.007.
- [28] A. Bauen, A. Harris, C. Sim, N. Gudde, M. Prussi, and N. Scarlat, "CORSIA Lower Carbon Aviation Fuels: An Assessment of the Greenhouse Gas Emission Reduction Potential," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 22, 2022, doi: 10.3390/app122211818.
- [29] M. D. Staples, R. Malina, P. Suresh, J. I. Hileman, and S. R. H. Barrett, "Aviation CO2 emissions reductions from the use of alternative jet fuels," *Energy Policy*, vol. 114, pp. 342–354, 2018.
- [30] J. M. Cordero and D. Scarlatti, "The Perspective on Mobility Data from the Aviation Domain," *Big Data Anal. Time-Critical Mobil. Forecast. From Raw Data to Trajectory-Oriented Mobil. Anal. Aviat. Marit. Domains*, pp. 33–56, 2020.
- [31] B. Morrell *et al.*, "Comparison of Trajectory Optimization Algorithms for High-Speed Quadrotor Flight Near Obstacles," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 4399–4406, 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2868866.
- [32] L. Deori, S. Garatti, and M. Prandini, "4-D Flight Trajectory Tracking: A Receding Horizon Approach Integrating Feedback Linearization and Scenario Optimization," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 981–996, 2019, doi: 10.1109/TCST.2018.2810201.
- [33] D. Hodgkinson and R. Johnston, *Aviation Law and Drones*. 2018. doi: 10.4324/9781351332323.
- [34] S. Maertens, W. Grimme, J. Scheelhaase, and M. Jung, "Options to continue the EU ETS for aviation in a CORSIA-World," *Sustain.*, vol. 11, no. 20, pp. 1–19, 2019, doi: 10.3390/su11205703.
- [35] B. Payán-Sánchez, J. A. Plaza-Úbeda, M. Pérez-Valls, and E. Carmona-Moreno, "Social embeddedness for sustainability in the aviation sector," *Corp. Soc. Responsib. Environ. Manag.*, vol. 25, no. 4, pp. 537–553, 2018.
- [36] A. Sharma, S. K. Jakhar, and T. M. Choi, "Would CORSIA implementation bring carbon neutral growth in aviation? A case of US full service carriers," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 97, no. June, p. 102839, 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.102839.
- [37] R. S. F. Patrón and R. M. Botez, "Flight trajectory optimization through genetic algorithms for lateral and vertical integrated navigation," *J. Aerosp. Inf. Syst.*, vol. 12, no. 8, pp. 533–544, 2015, doi: 10.2514/1.1010348.
- [38] H. G. Visser and S. Hartjes, "Economic and environmental optimization of flight trajectories connecting a city-pair," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.*, vol. 228, no. 6, pp. 980–993, 2014, doi: 10.1177/0954410013485348.
- [39] D. Streimikiene, K. Lasickaitė, M. Skare, G. Kyriakopoulos, R. Dapkus, and P. A. Duc, "The impact of Corporate Social Responsibility on Corporate Image: Evidence of budget airlines in Europe," *Corp. Soc. Responsib. Environ. Manag.*, vol. 28, no. 2, pp. 925–935, 2021, doi: 10.1002/csr.2099.
- [40] Yowanda. H. B and Mawardi. M. K, "Aviation Marketing Strategy Conceptual Low Cost Carrier (LCC) dan Company Competitiveness," *J. Adm. Bisnis*, vol. 51, no. 2, pp. 168–178, 2017.
- [41] B. Seetanah, R. V. Sannasee, V. Teeroovengadam, and R. Nunkoo, "Air access liberalization, marketing promotion and tourism development," *Int. J. Tour. Res.*, vol. 21, no. 1, pp. 76–86, 2019, doi: 10.1002/jtr.2242.
- [42] N. El Gmili, M. Mjahed, A. El Kari, and H. Ayad, "Particle swarm optimization based proportional-derivative parameters for unmanned tilt-rotor flight control and trajectory tracking," *Automatika*, vol. 61, no. 2, pp. 189–206, 2020, doi: 10.1080/00051144.2019.1698191.
- [43] A. Vitali, M. Battipede, and A. Lerro, "Multi-objective and multi-phase 4d trajectory optimization for climate mitigation-oriented flight planning," *Aerospace*, vol. 8, no. 12, 2021, doi: 10.3390/aerospace8120395.
- [44] S. B. Mackenzie, P. M. Podsakoff, and G. A. Rich, "Transformational and Transactional Leadership and Salesperson Performance The Dangers of Poor Construct Conceptualization View project," *J. Acad. Mark. Sci.*, vol. 29, no. 2, pp. 115–134, 2001.
- [45] J. E. Dennis Jr, M. El-Alem, and M. C. Maciel, "A global convergence theory for general trust-region-based algorithms for equality constrained optimization," *SIAM J. Optim.*, vol. 7, no. 1, pp. 177–207, 1997.
- [46] Y. Ling, Y. Zhou, and Q. Luo, "Lévy Flight Trajectory-Based Whale Optimization Algorithm for Global Optimization," *IEEE Access*, vol. 5, no. c, pp. 6168–6186, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2695498.