Analisis Tolok Ukur *Continuous Descent Operations* di Bandara I Gusti Ngurah Rai

Mufti Arifin[1], Javensius Sembiring*, [1], dan Hari Muhammad[1]

[1]Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Ganesha 10, Jawa Barat, Bandung, 40132, Indonesia

*E-mail: javen.sembiring@itb.ac.id

Diterima: 1 Juli 2026, direvisi: 22 September 2026, disetujui: 30 September 2026,
tersedia daring: 22 Oktober 2026, diterbitkan: 23 Oktober 2026

Abstrak

Operasi turun kontinu atau *Continuous Descent Operations* (CDO) merupakan salah satu pendekatan peningkatan efisiensi kedatangan pesawat yang berpotensi mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi. Namun, besarnya peluang CDO sangat dipengaruhi oleh pola lintasan kedatangan aktual, termasuk variasi rute, *path extension*, dan vektoring. Penelitian ini bertujuan melakukan analisis tolok ukur CDO berbasis data *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B) pada lintasan kedatangan menuju Bandar Udara I Gusti Ngurah Rai (DPS) selama periode 1–7 Juni 2026. Pendekatan penelitian menggabungkan analisis lintasan ADS-B, *clustering* trajektori, ekstraksi rute inti berbasis medoid, pembentukan profil CDO berbasis kendala operasional, dan estimasi konsumsi bahan bakar serta emisi menggunakan OpenAP. Hasil utama pada subset turbofan menunjukkan bahwa skenario 1, yaitu *same-path* CDO *benchmark*, menghasilkan estimasi penghematan bahan bakar dan emisi CO_2 sebesar 11,16%, dengan tambahan waktu rata-rata 3,59 menit per penerbangan. Skenario 2, yaitu *core-route* CDO *benchmark*, menghasilkan penghematan bahan bakar dan emisi CO_2 sebesar 22,42%, dengan reduksi jarak rute sebesar 2,26% dan tambahan waktu rata-rata 2,70 menit per penerbangan. Hasil ini menunjukkan bahwa manfaat CDO perlu dibedakan antara peningkatan profil vertikal pada lintasan aktual dan skenario gabungan berbasis rute inti serta profil vertikal.

Kata kunci: ADS-B, Bandara I Gusti Ngurah Rai, CDO, OpenAP, tolok ukur.

Abstract

Benchmark Analysis of Continuous Descent Operations at I Gusti Ngurah Rai Airport: *Continuous Descent Operations (CDO) provide an operational approach for improving arrival efficiency by reducing fuel burn and emissions. However, the achievable CDO benefit depends strongly on actual arrival trajectory patterns, including route variability, path extension, and vectoring. This study benchmarks CDO opportunities using Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) arrival trajectories to I Gusti Ngurah Rai Airport (DPS) from 1 to 7 June 2026. The proposed approach combines ADS-B trajectory analysis, trajectory clustering, medoid-based core-route extraction, constraint-based CDO profile generation, and OpenAP-based fuel and emission estimation. The main results for the turbofan subset show that Scenario 1, the same-path CDO benchmark, reduced estimated fuel burn and CO_2 emissions by 11.16%, with an average time increase of 3.59 minutes per flight. Scenario 2, the core-route CDO benchmark, increased the estimated fuel and CO_2 reduction to 22.42%, with a route distance reduction of 2.26% and an average time increase of 2.70 minutes per flight. These findings indicate that CDO benchmarking should distinguish between vertical-profile improvement along actual route and combined core-route and vertical-profile improvement scenarios.*

***Keywords*:** *ADS-B, benchmarking, CDO, I Gusti Ngurah Rai Airport, OpenAP.*

1. Pendahuluan

Pertumbuhan permintaan transportasi udara yang pesat telah meningkatkan tekanan operasional dan lingkungan di wilayah *Terminal Maneuvering Area* (TMA) yang sering kali menjadi titik hambat (*bottleneck*) utama dalam sistem penerbangan global [1][2]. Sektor penerbangan menyumbang sekitar 2,5% dari emisi CO_2 global, di mana sebagian besar emisi dan polusi suara terkonsentrasi pada fase kedatangan di TMA. Untuk memitigasi dampak ini, *Continuous Descent Operations* (CDO) telah diidentifikasi sebagai teknik operasional utama dalam kerangka *Trajectory-Based Operations* (TBO). CDO memungkinkan pesawat turun dengan konfigurasi gaya hambat rendah dan daya dorong mesin pada kondisi *idle* sehingga secara signifikan mengurangi konsumsi bahan bakar dibandingkan prosedur *step-down descent* konvensional [3][4].

Penelitian saat ini telah bergeser dari optimalisasi teoretis menuju analisis berbasis data nyata menggunakan data *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B) [5][6]. Teknologi ini memberikan akses terhadap lintasan historis dengan resolusi tinggi untuk mengidentifikasi pola *traffic* melalui *unsupervised machine learning* [7]. Analisis klaster trajektori adalah tahap penting dalam

http://dx.doi.org/10.25104/wartaardhia.v52i1.3034.56-67
2528-4045/ 0215-9066 ©2026 Badan Kebijakan Transportasi, diterbitkan oleh Sekretariat Badan Kebijakan Transportasi.
Artikel ini *open access* dibawah lisensi CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)
Jurnal Warta Ardhia telah terakreditasi Sinta 4.

perencanaan trajektori untuk menentukan aliran lalu lintas penerbangan yang dominan [8]. *Spectral clustering* menjadi salah satu metode yang digunakan untuk mengelompokkan lintasan pesawat di TMA yang kompleks karena kemampuannya menangani dimensi data yang tinggi dan mengidentifikasi aliran *traffic* utama (*prevailing traffic flows*) secara objektif [6][9]. Integrasi data ini dengan model performa pesawat seperti OpenAP memungkinkan perhitungan konsumsi bahan bakar dan emisi secara presisi [10].

Meskipun manfaat CDO telah banyak divalidasi, implementasinya di bandara dengan kepadatan tinggi seperti Bandara I Gusti Ngurah Rai (DPS) sering kali tidak dapat dilaksanakan secara optimal karena intervensi taktis pengatur lalu lintas udara (*Air Traffic Control Officer*, ATCO), seperti *vectoring* atau segmen terbang datar (*level flight*) untuk menjaga separasi. Selain CDO tidak dapat dilaksanakan secara optimal, beban kerja ATCO juga meningkat untuk menjaga separasi tersebut [11]. Penggunaan topologi kedatangan seperti *trombone* atau *point merge system* terbukti dapat mengurangi beban kerja ATCO karena pesawat tidak perlu *vectoring* untuk menjaga separasi pada TMA [11][12].

Berbeda dengan Wang dkk. [6] yang melakukan *benchmarking* emisi CO_2 pada arus kedatangan dengan topologi *point merge system* (PMS) serta Zeng dkk. [8] yang memanfaatkan *trajectory clustering* untuk mengidentifikasi dan mengoptimalkan struktur pola kedatangan di terminal *airspace*, penelitian ini menempatkan *benchmarking* CDO sebagai tahap awal sebelum perancangan atau implementasi topologi kedatangan baru. Dengan demikian, penelitian ini tidak langsung mengasumsikan penerapan topologi tertentu, tetapi terlebih dahulu mengevaluasi lintasan aktual berbasis ADS-B untuk mengukur peluang efisiensi vertikal, *path extension*, dan potensi pengurangan emisi pada kondisi operasi eksisting. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan *spectral clustering*, ekstraksi *core trajectory* berbasis medoid, dan evaluasi bahan bakar dan emisi berbasis OpenAP sebagai kerangka pra-desain topologi kedatangan. Hasil *benchmarking* ini dapat digunakan untuk memperkuat kebutuhan pengembangan topologi kedatangan, seperti PMS atau *trombone*, terutama pada bandara yang belum menerapkan struktur kedatangan berbasis *sequencing* secara eksplisit.

Sebelum desain topologi kedatangan dilakukan, perlu diketahui potensi atau peluang efisiensi bahan bakar dan pengurangan dampak lingkungan (emisi dan kebisingan) dengan penerapan topologi tersebut. Evaluasi *environmental efficiency gap* di bandara di Indonesia belum banyak dilakukan dengan menggunakan ekstraksi *core trajectory* hasil *spectral clustering* sebagai referensi. Penelitian ini bertujuan menyusun *benchmarking* (tolok ukur) CDO berbasis data ADS-B di Bandara DPS, membangun profil CDO berbasis kandidat dan kendala operasional, serta mengevaluasi dampaknya terhadap konsumsi bahan bakar dan emisi CO_2 menggunakan model OpenAP.

2. Metodologi

2.1. Metode Pengumpulan Data

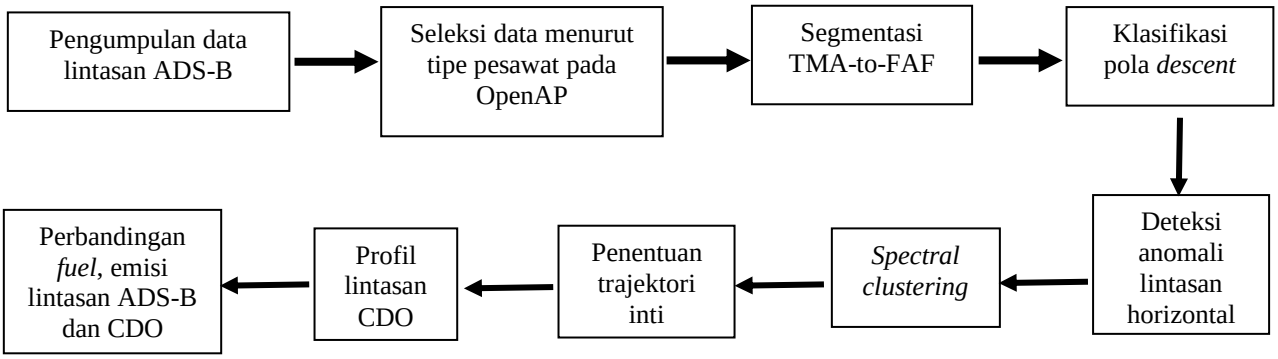
Data penelitian mencakup lintasan kedatangan berbasis ADS-B untuk penerbangan menuju Bandara DPS pada tanggal 1–7 Juni 2026 yang diperoleh dari layanan *flight tracking www.flightradar24.com*. Dataset memuat informasi data mentah terdiri atas titik lintasan kedatangan yang memuat informasi identitas penerbangan, waktu, koordinat *latitude-longitude*, ketinggian, *ground speed*, *vertical speed*, *track angle*, tipe pesawat, *origin-destination*, dan *runway landing*. Diperoleh 1.311 penerbangan untuk periode 1–7 Juni 2026.

2.2. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan secara bertahap dengan langkah-langkah seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pengolahan data dimulai dari seleksi data mentah lintasan ADS-B dan diakhiri dengan perbandingan efisiensi bahan bakar dan emisi CO_2.

Seleksi data mentah lintasan ADS-B untuk memastikan hanya data dari tipe pesawat yang tersedia dalam database OpenAP yang digunakan untuk evaluasi konsumsi bahan bakar. Tahap berikutnya adalah segmentasi TMA-to-FAF yang bertujuan mengambil bagian lintasan kedatangan dari batas *Terminal Maneuvering Area* (TMA) sampai *Final Approach Fix* (FAF). Koordinat FAF digunakan sebagai titik akhir segmentasi lintasan dalam TMA sesuai dengan profil CDO [13]. Pusat TMA menggunakan referensi BLI VOR/DME dengan koordinat $8.7505833^\circ\ LS, 115.1633056^\circ\ BT$. Berdasarkan data TMA BALI

EAST dan TMA BALI WEST, digunakan radius TMA115 NM. Titik awal segmen dipilih titik pada lintasan ADS-B yang berjarak 115 NM dari pusat TMA dan titik akhir adalah titik terdekat dengan FAF yang sesuai dengan *runway* saat *landing*. Jika informasi *runway* tidak tersedia, FAF dipilih berdasarkan jarak terdekat terhadap titik akhir lintasan. Data lintasan penerbangan diterima jika jarak titik akhir terhadap FAF tidak melebihi 10 NM.



Gambar 1. Diagram alir pengolahan data

Pada tahap klasifikasi pola *descent*, penerbangan dikelompokkan menjadi (1) lintasan dengan pola terbang jelajah kemudian *descent*, (2) lintasan sudah *descent* di titik awal, dan (3) lintasan yang tidak cukup masuk ke dalam kedua kelompok tersebut. Deteksi anomali lintasan horizontal dengan kriteria seperti pada Tabel 1 bertujuan memisahkan lintasan yang menunjukkan indikasi *holding* atau *path extension* yang berbeda secara signifikan agar tidak memengaruhi pembentukan trajektori inti. Deteksi anomali horizontal dilakukan dengan membandingkan panjang lintasan aktual terhadap jarak langsung TMA–FAF, perubahan *heading*, serta indikasi pola berputar atau *loop* pada lintasan. Berdasarkan indikator tersebut, lintasan diklasifikasikan menjadi nominal, *mild path extension*, *high path extension*, *possible vectoring*, dan *holding detected*. Lintasan dengan indikasi *holding* dikeluarkan dari dataset *clustering* karena dapat menggeser bentuk trajektori inti, sedangkan lintasan dengan klasifikasi lainnya tetap dipertahankan untuk merepresentasikan variasi operasi kedatangan aktual.

Tabel 1. Kriteria deteksi anomali horizontal

Komponen deteksi	Kriteria utama
Pre-processing track angle	*Distance-based trajectory subsampling* dengan interval 0,7 NM untuk mengurangi *noise track angle*
Minimum path	Panjang segmen < 10 NM
Holding lokal	*Local cumulative turn* ≥ 300°, *local loop ratio*≥ 2,0, dan *direct distance* ≤ 12 NM
Strong holding turns	*Local cumulative turn* ≥ 450° dan *direct distance* ≤ 18 NM
Revisit pattern	Lintasan kembali dekat ke area sebelumnya setelah *path separation* ≥ 10 NM, dengan jarak *revisit* ≤ 2,5 NM atau *local turn* ≥ 220°
Severe vectoring	*Cumulative turn* ≥ 500° dan *turn density* ≥ 5,5°/NM; atau *large turn count* ≥ 10; atau *direction change count* ≥ 8 dengan *cumulative turn* ≥ 350°
Possible vectoring	*Cumulative turn* ≥ 250° dan *turn density* ≥ 3,0°/NM; atau *large turn count* ≥ 5; atau *direction change count* ≥ 5; atau *very large turn count* ≥ 2
Mild path extension	*Path extension ratio* ≥ 1,25
High path extension	*Path extension ratio* ≥ 1,45
Nominal	Tidak memenuhi kriteria *holding*, *severe vectoring*, *possible vectoring*, atau *path extension*

Setelah jumlah penerbangan yang masuk proses *clustering* ditentukan, setiap lintasan perlu *resampling* dengan mengubah titik-titik lintasan ADS-B menjadi lintasan dengan jumlah titik yang seragam agar memudahkan perhitungan jarak antarlintasan. Tahap berikutnya adalah *clustering* dengan tujuan mengelompokkan lintasan horizontal kedatangan yang memiliki pola serupa. Jarak antar lintasan dihitung berdasarkan vektor hasil *resampling*.

Validasi klaster dilakukan terhadap klaster yang dihasilkan untuk memastikan bahwa hasil pengelompokan lintasan tidak bergantung pada satu konfigurasi parameter. Evaluasi dilakukan terhadap variasi jumlah titik *resampling*, yaitu N=50, N=100, dan N=150, serta variasi jumlah klaster k=2 sampai k=8. Metrik validasi internal yang digunakan meliputi *silhouette score*, Davies-Bouldin index, dan Calinski-Harabasz index. Selain itu, dilakukan analisis stabilitas menggunakan *bootstrap* dengan 30 pengulangan dan 80% sampel penerbangan pada setiap pengulangan. Stabilitas hasil *clustering* dievaluasi menggunakan Adjusted Rand Index (ARI) dan Normalized Mutual Information (NMI). Analisis sensitivitas *resampling* juga dilakukan dengan membandingkan hasil *clustering* pada N=50 terhadap N=100 dan N=150 pada jumlah klaster yang sama.

Trajektori inti pada setiap klaster dipilih menggunakan pendekatan medoid yaitu lintasan anggota klaster yang memiliki jarak total minimum terhadap seluruh anggota klaster. Trajektori inti digunakan sebagai referensi pembuatan profil trajektori acuan. Parameter yang dihitung meliputi panjang lintasan, durasi terbang turun, tinggi awal, tinggi FAF, *ground speed*, *vertical speed*, jarak mendatar terbang turun, jarak terbang datar, dan jarak terbang menanjak. Profil CDO dibuat berdasarkan konstrain utama berikut: (1) pesawat terbang *descent* secara kontinu, (2) kecepatan maksimum pesawat udara di bawah tinggi 10.000 ft adalah 250 knot, (3) *vertical speed* maksimum adalah 3500 fpm, dan (4) *gradient* penurunan berada di antara nilai minimum dan maksimum.

Profil kandidat CDO dibentuk dengan mempertahankan lintasan horizontal dari trajektori inti, sedangkan profil vertikal direkonstruksi berdasarkan jarak ternormalisasi dari TMA *entry* menuju FAF. Jarak ternormalisasi didefinisikan sebagai:

$$u = \frac{s}{s_{end}} \tag{1}$$

dengan s adalah jarak sepanjang lintasan dari TMA *entry* dan s_{end} adalah total jarak lintasan sampai FAF. Profil altitude kandidat CDO dihitung menggunakan:

$$h_{CDO}(u) = h_0 - (h_0 - h_f)u^p \tag{2}$$

dengan h_0 adalah ketinggian awal segmen, h_f adalah ketinggian akhir di FAF, dan p adalah eksponen pembentuk profil *descent*. Lima kandidat profil CDO yang dievaluasi adalah *early descent*, *linear nominal*, *delayed descent*, *speed efficient*, dan *conservative*. Nilai $p < 1$ merepresentasikan profil *early descent*, $p = 1$ merepresentasikan profil *linear nominal*, sedangkan $p > 1$ merepresentasikan profil *delayed descent*. Kandidat akhir dipilih berdasarkan fungsi objektif berbasis *fuel* dan waktu:

$$J = 0{,}70\left(\frac{F_{CDO}}{F_{actual}}\right) + 0{,}30\left(\frac{T_{CDO}}{T_{actual}}\right) + P \tag{3}$$

dengan *F* adalah estimasi *fuel burn*, *T* adalah waktu tempuh, dan *P* adalah penalti jika kandidat melanggar kendala operasional.

Evaluasi *fuel burn* dilakukan menggunakan model *fuel flow* OpenAP dengan menghitung *fuel burn* untuk setiap segmen pada setiap lintasan aktual dan kandidat CDO. Data angin tidak tersedia pada ADS-B sehingga *ground speed* digunakan sebagai pendekatan *true airspeed*. Evaluasi CO_2 berdasarkan *fuel burn* dengan indeks 3,16 kg CO_2 untuk setiap satu kg *fuel burn*.

Parameter numerik dan konfigurasi algoritmik utama yang digunakan dalam pengolahan lintasan, *clustering*, pembentukan profil CDO, dan evaluasi emisi dirangkum pada Tabel 2. Tabel ini berfungsi sebagai ringkasan parameter teknis dari berbagai tahap dalam metodologi.

Tabel 2. Parameter teknis tahapan metodologi

Tahapan	Parameter	Nilai
Segmentasi TMA-FAF	Radius TMA	115 NM
Segmentasi TMA-FAF	Koordinat BALI/DPS	$8{,}7505833°\ LS, 115{,}1633056°\ BT$.
Segmentasi TMA-FAF	Koordinat FAF	$8{,}752179°\ LS, 115{,}0707464°\ BT$.
Segmentasi TMA-FAF	Jarak maksimum ke FAF	10 NM
Resampling lintasan	Jumlah titik yang diuji	N=50, 100, 150
Spectral clustering	Jumlah klaster	k=2-8
Validasi cluster	Metrik internal	Silhouette, Davies-Bouldin, Calinski-Harabasz
Validasi cluster	Bootstrap	30 pengulangan, 80% sampel
Kendala CDO	Batas kecepatan	250 knots dibawah 10.000 ft
Kendala CDO	*Vertical speed* maksimum	3500 fpm
Emisi	Faktor CO_2	3,16 kg CO_2/kg fuel

2.3 Analisis Data

Analisis tolok ukur CDO dilakukan dengan dua skenario. Skenario pertama disebut *same-path* CDO *benchmark*, yaitu evaluasi profil CDO pada lintasan horizontal aktual setiap *flight*. Skenario kedua disebut *core-route* CDO *benchmark*, yaitu evaluasi profil CDO menggunakan rute inti berbasis medoid pada klaster yang sama. Dengan demikian, skenario kedua merepresentasikan tolok ukur gabungan antara perbaikan pola lintasan horizontal dan profil vertikal.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil

Jumlah penerbangan yang diperoleh dari tanggal 1–7 Juni 2026 sebagai data mentah adalah 1311 lintasan. Filter data awal dilakukan berdasarkan tipe pesawat yang terdapat pada OpenAp, dilanjutkan dengan segmen yang valid dari batas TMA ke titik FAF dengan hasil terdapat pada Tabel 3. Sebagian besar lintasan dimulai dari batas TMA dan hanya 40 lintasan dimulai dari titik di dalam TMA. Rute pendek seperti Lombok–Denpasar memiliki jarak terbang kurang dari 115NM. Berdasarkan lintasan terbang dari batas TMA, terdapat 693 penerbangan yang memiliki profil terbang datar kemudian *descent*, 348 penerbangan dengan profil *descent*, dan 83 penerbangan dengan profil yang tidak dapat dimasukkan dalam kedua kriteria tersebut.

Tabel 3. Jumlah penerbangan hasil filter data lintasan ADS-B

Parameter	Jumlah Penerbangan
Total *flight* awal	1311
Flight valid OpenAP	1132
Valid TMA-to-FAF flights	1124
Boundary-entry flights	1084
Starts-inside-TMA flights	40
Cruise/level then descent	693
Already descent	348
Unclear	83

Berdasarkan klasifikasi lintasan horizontal, lintasan normal yang tidak memiliki segmen *extension*, *holding*, atau *vectoring* kurang dari 50% seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Hal ini berarti potensi untuk efisiensi cukup besar.

Tabel 4. Klasifikasi lintasan horizontal

Parameter	Jumlah penerbangan	Persentase (%)
Nominal	469	43,27
Mild path extension	361	33,30
Holding detected	160	14,76
Mild path extension high ratio	58	5,35
Possible vectoring	36	3,32

Penerbangan dengan lintasan *holding* tidak dimasukkan dalam *spectral clustering* sehingga terdapat 924 lintasan yang masuk dalam proses *clustering*. Sebelum ekstraksi trajektori inti, dilakukan uji validasi klaster untuk menentukan konfigurasi clustering yang stabil. Hasil validasi seperti terlihat pada Tabel 5 menunjukkan bahwa konfigurasi k=3 memberikan struktur pengelompokan awal yang konsisten pada berbagai jumlah titik *resampling*. Pada konfigurasi N=50 dan k=3, diperoleh *Silhouette score* sebesar 0,5988, Davies-Bouldin index sebesar 0,5709, dan Calinski-Harabasz index sebesar 1449,40. Nilai metrik pada N=100 dan N=150 juga menunjukkan hasil yang sangat dekat sehingga struktur awal k=3 dinilai stabil terhadap perubahan resolusi *resampling*.

Tabel 5. Validasi klaster

N	k	Silhouette	Davies–Bouldin	Calinski–Harabasz
50	3	0,5988	0,5709	1449,40
100	3	0,6008	0,5739	1502,37
150	3	0,6011	0,5732	1511,58

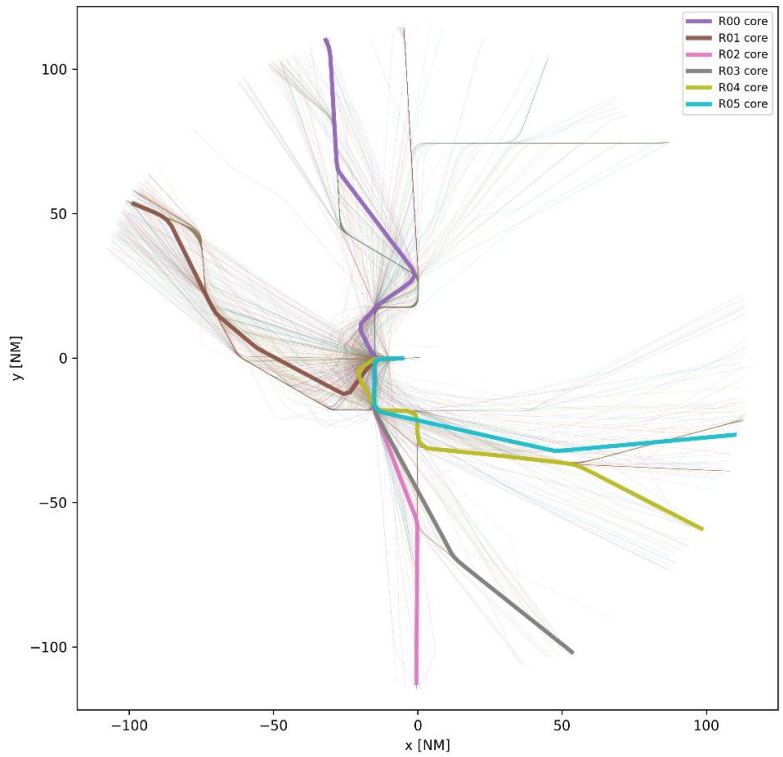
Stabilitas hasil *clustering* juga diuji menggunakan *bootstrap*. Hasil *bootstrap* dengan 30 pengulangan dan 80% sampel menunjukkan rata-rata ARI sebesar 0,9783 dan NMI sebesar 0,9815. Selain itu, analisis sensitivitas resampling menunjukkan bahwa perbandingan N=50 terhadap N=100 dan N=150 menghasilkan ARI sebesar 0,9968 dan NMI sebesar 0,9934. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur pengelompokan lintasan relatif stabil terhadap variasi sampel maupun variasi jumlah titik *resampling*.

Tiga *cluster* awal (G00, G01, G02) tersebut kemudian diperiksa lebih lanjut untuk menilai homogenitas pola lintasan di dalam setiap *cluster*. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa dua *cluster* awal masih memiliki variasi pola lintasan yang cukup besar sehingga dilakukan *refinement* untuk memperoleh representasi pola kedatangan yang lebih spesifik. *Cluster* G00 dipecah menjadi dua subcluster, sedangkan cluster G02 dipecah menjadi tiga *subcluster*. *Cluster* G01 dipertahankan karena telah menunjukkan pola lintasan yang relatif homogen. Dengan demikian, diperoleh enam *refined* cluster, yaitu R00 sampai R05, yang digunakan untuk ekstraksi trajektori inti dan pembentukan profil CDO. Hasil *refined clustering* menghasilkan enam klaster trajektori dengan trajektori inti untuk setiap klaster, seperti terlihat pada Gambar 2 dan Tabel 6.

Tabel 6. Trajektori inti untuk tiap klaster hasil *spectral clustering*

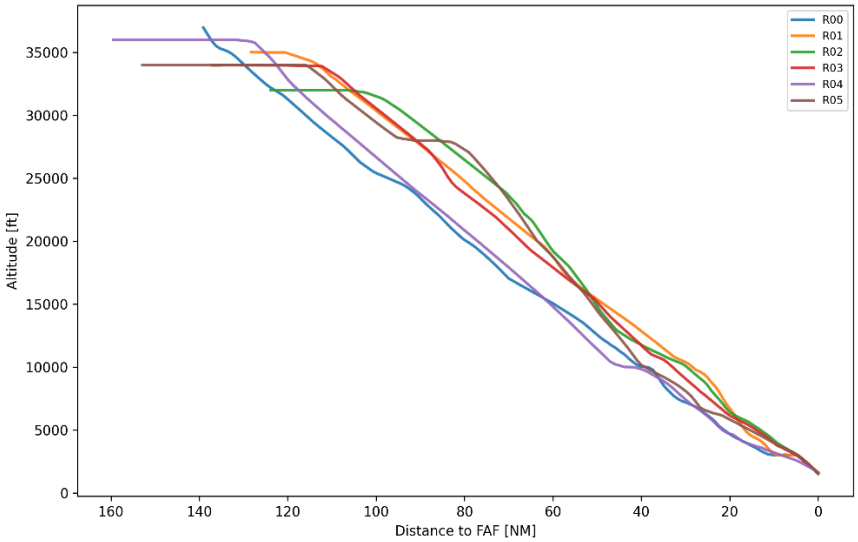
Klaster	Jumlah penerbangan	Persentase	Tipe Pesawat	Panjang Lintasan (NM)	Durasi (min)
R00	322	34,85%	A320[a]	139,09	28,75
R01	325	35,17%	A320	128,28	23,32
R02	54	5,84%	A21N[b]	123,86	21,08
R03	39	4,22%	B38M[c]	137,09	22,93
R04	77	8,33%	B38M	159,52	28,12
R05	107	11,58%	A21N	152,88	25,68

[a]A320 = Airbus A320, [b]A21N = Airbus A321Neo, [c]B38M = Boeing 737Max-8



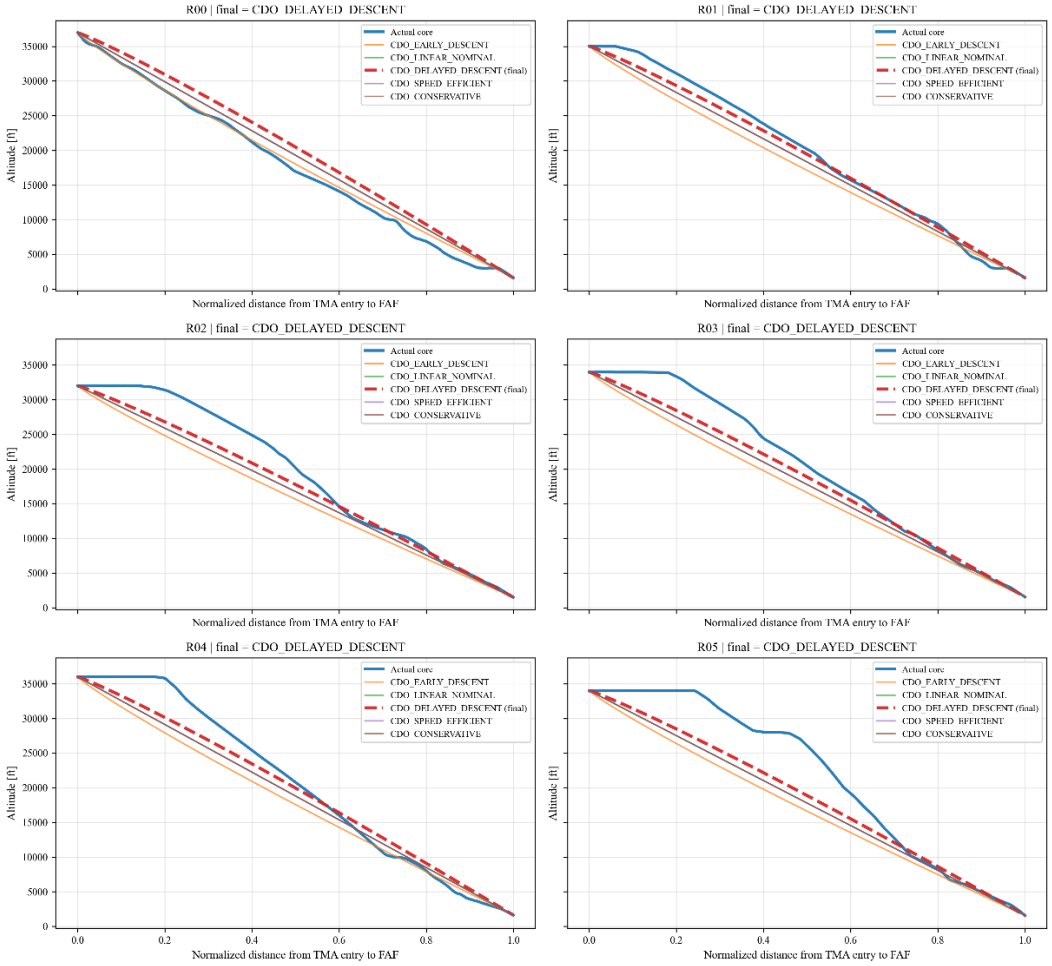
Gambar 2. Trajektori inti untuk setiap klaster lintasan ADS-B

Berdasarkan profil vertikal aktual trajektori inti yang ditunjukkan pada Gambar 3, seluruh klaster memiliki segmen *climb* sebesar 0%, sehingga seluruh trajektori inti menunjukkan pola penurunan tanpa kenaikan ketinggian yang signifikan. Namun, masih terdapat segmen level pada setiap klaster dengan nilai yang berbeda. Persentase segmen level masing-masing adalah 7,71% pada R00, 10,44% pada R01, 17,49% pada R02, 18,52% pada R03, 25,03% pada R04, dan 34,09% pada R05. Dengan demikian, R05 memiliki proporsi segmen level terbesar, sedangkan R00 memiliki proporsi segmen level terkecil. Profil aktual ini kemudian digunakan sebagai dasar pembentukan kandidat profil CDO pada masing-masing klaster.



Gambar 3. Profil *altitude* trajektori inti untuk setiap klaster

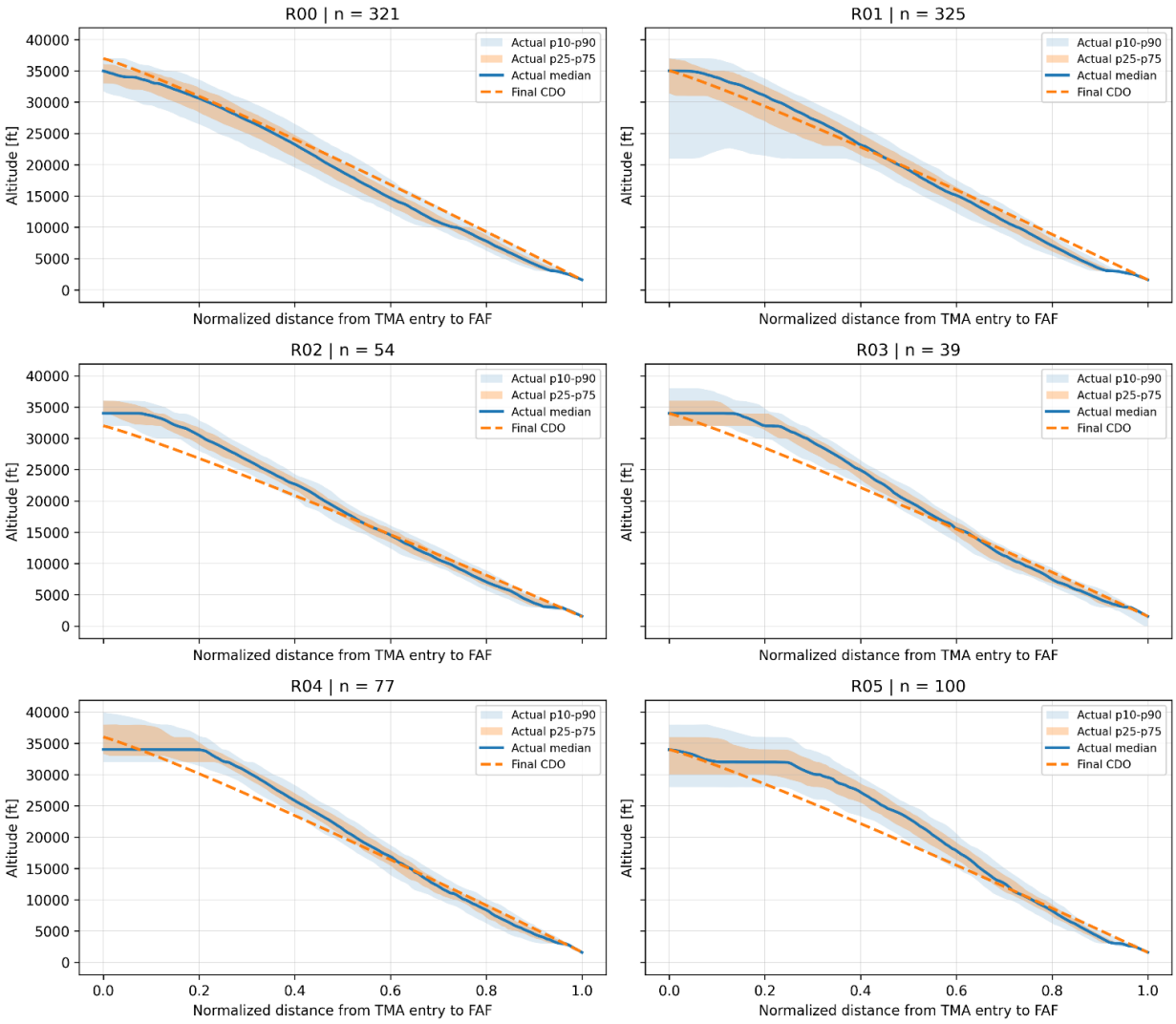
Pada tahap pembentukan kandidat CDO, lima profil kandidat dievaluasi untuk setiap klaster, yaitu (1) *early descent*, (2) *linear normal*, (3) *delayed descent*, (4) *speed efficient*, dan (5) *conservative*. Hasil pemilihan berbasis evaluasi *fuel* dan waktu menunjukkan bahwa kandidat *delayed descent* terpilih sebagai profil CDO akhir untuk seluruh klaster seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kandidat profil CDO untuk setiap klaster.

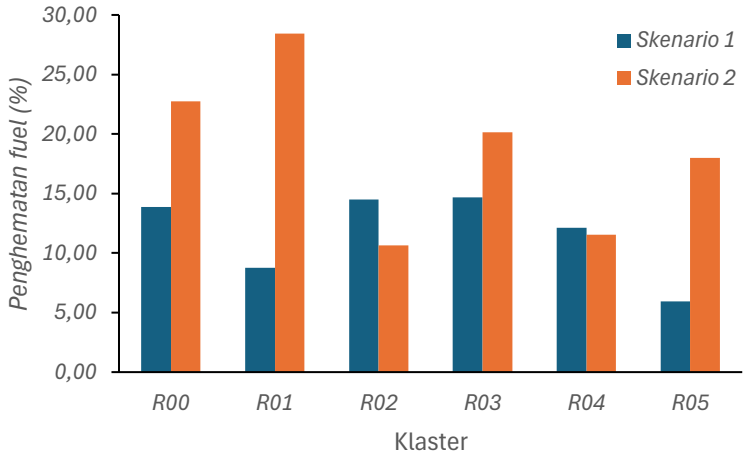
Profil altitude untuk setiap klaster dari lintasan aktual dan profil CDO akhir ditunjukkan pada Gambar 5. Pada evaluasi terhadap enam trajektori inti, perhitungan estimasi konsumsi bahan bakar menggunakan OpenAp [10] menghasilkan total *fuel* aktual sebesar 2.319,73 kg, sedangkan total fuel pada profil CDO akhir sebesar 2.124,99 kg. Dengan demikian, total penghematan *fuel* pada enam trajektori inti adalah 194,73 kg atau 8,39%. Penghematan emisi CO_2 yang diperoleh adalah 615,36 kg atau 8,39%. Dari sisi waktu, total waktu tempuh profil CDO akhir meningkat 23,88 menit terhadap total waktu aktual, dengan rata-rata peningkatan waktu sebesar 3,98 menit per trajektori inti.

Setelah profil CDO akhir ditentukan berdasarkan trajektori inti, evaluasi dilakukan pada seluruh penerbangan dengan tipe pesawat turbofan pada seluruh klaster. Lintasan pesawat turboprop tidak konsisten dengan pola CDO pesawat turbofan sehingga dikeluarkan dari analisis. Skenario pertama yang mempertahankan lintasan horizontal melibatkan sebanyak 916 *flight* dengan total *fuel* aktual sebesar 547.974,11 kg berkurang menjadi 486.800,56 kg, sehingga menghasilkan penghematan *fuel* sebesar 61.173,56 kg atau 11,16%. Penghematan CO_2 yang diperoleh sebesar 193.308,44 kg atau 11,16%, dengan rata-rata peningkatan waktu sebesar 3,59 menit per lintasan *descent*.



Gambar 5. Perbandingan lintasan aktual terhadap profil CDO final dari setiap klaster.

Sementara itu, hasil skenario kedua yang membandingkan setiap *flight* aktual terhadap rute inti dan profil CDO akhir pada klaster yang sama, total *fuel* aktual sebesar 547.974,11 kg berkurang menjadi 425.125,19 kg. Penghematan *fuel* yang diperoleh sebesar 122.848,92 kg atau 22,42%, sedangkan penghematan CO_2 sebesar 388.202,60 kg atau 22,42%. Skenario ini juga menghasilkan pengurangan jarak lintasan sebesar 2,26%, dengan rata-rata peningkatan waktu sebesar 2,70 menit per *flight*. Perbandingan penghematan *fuel* dari kedua skenario untuk setiap klaster dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Persentase penghematan *fuel* total pada setiap klaster

3.2. Pembahasan

Hasil validasi menunjukkan bahwa konfigurasi k=3 merupakan struktur awal *clustering* yang stabil pada variasi jumlah titik resampling. Namun, pemeriksaan pola lintasan menunjukkan bahwa sebagian klaster awal masih memiliki heterogenitas internal, sehingga dilakukan *refinement* terhadap cluster G00 dan G02. Proses ini menghasilkan enam *refined* cluster yang merepresentasikan pola kedatangan dominan di Bandara DPS. Hasil ini sejalan dengan penelitian Wang dkk. yang menghasilkan 5 klaster di bandara Shanghai Pudong (PVG) [6], Lim dkk. dengan 4 klaster di bandara Singapura Changi (SIN) [7], dan Chen dkk. dengan 5 klaster di bandara Kunming Changshu (KMG) [14].

Nilai penghematan bahan bakar rata-rata 66,78 kg per penerbangan pada skenario pada skenario 1 dibawah hasil penghematan pada penelitian oleh Xue dkk. yang melaporkan bahwa penerapan CDO pada tujuh bandara besar di China dapat mengurangi *fuel consumption* rata-rata sekitar 139 kg per penerbangan [15]. Penghematan pada skenario 1 dalam penelitian ini lebih rendah karena hanya mengubah profil vertikal pada lintasan horizontal aktual tanpa menghilangkan pemanjangan rute, *vectoring*, atau ketidakefisienan lateral.

Skenario 2 menghasilkan penghematan yang lebih besar dibandingkan skenario 1 dengan rata-rata 134,12 kg per penerbangan. Skenario 2 menggabungkan perubahan profil vertikal dan penggantian lintasan horizontal aktual dengan trajektori inti pada klaster yang sama. Skenario 2 menghasilkan penghematan *fuel* dan emisi CO_2 sebesar 22,42%, pengurangan jarak lintasan sebesar 2,26%, sedangkan skenario 1 menghasilkan penghematan *fuel* dan emisi 11,16 %. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan rute inti berbasis medoid pada skenario *core-route* CDO *benchmark* memberikan kontribusi tambahan terhadap estimasi penghematan bahan bakar dan emisi, terutama pada lintasan yang sebelumnya mengalami *path extension*, *vectoring*, atau ketidakefisienan lateral. Hal ini konsisten dengan penelitian Olive dkk. yang menunjukkan bahwa evaluasi efisiensi kedatangan perlu mempertimbangkan aspek prosedur, *holding*, pola lintasan, konsumsi bahan bakar, dan emisi secara bersamaan karena ketidakefisienan kedatangan tidak hanya berasal dari profil vertikal [15]. Estimasi pengurangan konsumsi bahan bakar untuk skenario 1 dan skenario 2 pada penelitian ini hanya dilakukan pada segmen *descent* yang dikaji.

Penggunaan OpenAP dalam penelitian ini memberikan kerangka estimasi *fuel* dan emisi yang terbuka dan dapat direplikasi. OpenAP telah dikembangkan sebagai *aircraft performance model* berbasis *open aircraft surveillance data* dan *literature models*, dengan komponen model *kinematic*, dinamik, dan *fuel flow* [10]. Namun, hasil *fuel burn* tetap perlu diinterpretasikan sebagai estimasi komparatif, bukan data konsumsi bahan bakar aktual dari maskapai. Hal ini karena data ADS-B tidak menyediakan informasi angin, massa aktual pesawat, konfigurasi flap, *thrust setting*, dan instruksi ATC (*Air Traffic Control*) secara langsung. Penelitian ini menggunakan *ground speed* sebagai pendekatan *true airspeed* karena data angin tidak tersedia. Selain itu, pengaruh angin pada analisis klaster juga belum dimasukkan mengingat arah angin dapat memiliki pengaruh pada perubahan klaster [14].

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data ADS-B, *clustering* trajektori, ekstraksi rute inti berbasis medoid, dan evaluasi *fuel-emission* menggunakan OpenAP dapat digunakan untuk membangun tolok ukur peluang *continuous descent operations* (CDO) pada kedatangan menuju Bandara I Gusti Ngurah Rai. Validasi *spectral clustering* menunjukkan bahwa konfigurasi awal k=3 memiliki struktur yang stabil, sedangkan *refinement* terhadap klaster yang masih heterogen menghasilkan enam *refined cluster* yang merepresentasikan pola lintasan kedatangan dominan menuju FAF.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa peluang efisiensi CDO berbeda antar pola lintasan. Skenario *same-path* CDO *benchmark* memberikan estimasi manfaat dari perbaikan profil vertikal pada lintasan aktual, dengan penghematan bahan bakar dan emisi CO_2 sebesar 11,16%. Sementara itu, skenario *core-route* CDO *benchmark* menunjukkan potensi manfaat yang lebih besar, yaitu 22,42%, karena menggabungkan profil CDO dengan rute inti berbasis medoid. Namun, kedua skenario memiliki konsekuensi operasional berupa penambahan waktu tempuh rata-rata, sehingga penerapan CDO perlu

mempertimbangkan keseimbangan antara penghematan bahan bakar, emisi, kapasitas kedatangan, dan kebutuhan separasi lalu lintas.

Implikasi operasional dari hasil penelitian ini adalah bahwa evaluasi peluang CDO sebaiknya dilakukan secara spesifik berdasarkan cluster atau pola rute kedatangan, bukan hanya berdasarkan rata-rata seluruh penerbangan. Pola lintasan yang menunjukkan *path extension, possible vectoring*, atau variasi rute yang besar dapat menjadi prioritas untuk evaluasi prosedur kedatangan, pengurangan intervensi vektoring, atau pengembangan topologi kedatangan seperti *point merge system* dan *trombone*. Dengan demikian, hasil *benchmarking* ini dapat digunakan sebagai dasar untuk memperkuat kebutuhan desain topologi kedatangan sebelum implementasi prosedur baru dilakukan.

Penelitian ini memiliki keterbatasan, yaitu hasil *fuel burn* dan emisi masih bersifat estimasi komparatif berbasis OpenAP karena belum memasukkan data angin, kondisi performa aktual pesawat, instruksi ATC, serta kendala separasi secara langsung. Studi lanjutan perlu mengintegrasikan faktor-faktor tersebut dan memperluas periode data untuk mengevaluasi kelayakan operasional penerapan topologi kedatangan yang mendukung CDO.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan dukungan sarana dan fasilitas sehingga penelitian dan penulisan artikel ini dapat terlaksana dengan baik.

Deklarasi

Kontribusi Penulis

Mufti Arifin: Penulisan – Draf Awal, Penulisan – Telaah dan Penyuntingan, Kurasi Data, Visualisasi. Javensius Sembiring: Penulisan – Telaah dan Penyuntingan, Konseptualisasi, Validasi, Supervisi. Hari Muhammad: Konseptualisasi, Validasi, Supervisi.

Pernyataan Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pendanaan di sektor publik, komersial, maupun nirlaba.

Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang diketahui yang dapat dianggap memengaruhi penelitian yang dilaporkan dalam artikel ini.

Penggunaan Kecerdasan Artifisial atau Teknologi Berbantuan Kecerdasan Artifisial

Dalam proses penyusunan karya ini, penulis tidak menggunakan alat, layanan, atau teknologi berbantuan kecerdasan artifisial. Seluruh isi karya disusun, ditelaah, dan dipertanggungjawabkan sepenuhnya oleh penulis.

Daftar Pustaka

[1] J. Bao, J. Zhang, Y. Chen, Z. Zhang, dan J. Kang, "A semantic-embedded multi-view graph to sequence learning approach for air traffic flow prediction in the terminal maneuvering area of multi-airport system," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 155, hlm. 111054, Sep 2025, doi: 10.1016/j.engappai.2025.111054.

[2] R. K. Cecen dan F. Aybek Çetek, "Optimising aircraft arrivals in terminal airspace by mixed integer linear programming model," *The Aeronautical Journal*, vol. 124, no. 1278, hlm. 1129–1145, Agu 2020, doi: 10.1017/aer.2020.15.

[3] D. Gui, M. Le, Z. Huang, dan A. D'Ariano, "A Decision Support Framework for Aircraft Arrival Scheduling and Trajectory Optimization in Terminal Maneuvering Areas," *Aerospace*, vol. 11, no. 5, hlm. 405, Mei 2024, doi: 10.3390/aerospace11050405.

[4] W. Li, L. Yang, Y. Chen, H. Zhang, dan Z. Zhao, "Multi-Objective Optimization of CDO Trajectory in a Flexible Airspace Structure," dalam *2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, IEEE, Sep 2020, hlm. 3C3-1-3C3-15. doi: 10.1109/ICNS50378.2020.9222882.

[5] H. Hardell, A. Lemetti, T. Polishchuk, dan L. Smetanová, "Evaluation of the Sequencing and Merging Procedures at Three European Airports Using Opensky Data," dalam *The 9th OpenSky Symposium*, Basel Switzerland: MDPI, Jan 2022, hlm. 13. doi: 10.3390/engproc2021013013.

[6] C. Wang, C. Xu, W. Li, S. Li, dan S. Sun, "Four-Dimensional Trajectory Optimization for CO2 Emission Benchmarking of Arrival Traffic Flow with Point Merge Topology," *Aerospace*, vol. 11, no. 8, hlm. 673, Agu 2024, doi: 10.3390/aerospace11080673.

[7] Z. J. Lim, I. Dhief, D. T. Pham, S. Alam, dan D. Delahaye, "A Data-Driven Framework for Modelling Complexity in Terminal Manoeuvring Area," dalam *SESAR Innovation Days*, 2024.

[8] W. Zeng, Z. Xu, Z. Cai, X. Chu, dan X. Lu, "Aircraft Trajectory Clustering in Terminal Airspace Based on Deep Autoencoder and Gaussian Mixture Model," *Aerospace*, vol. 8, no. 9, hlm. 266, Sep 2021, doi: 10.3390/aerospace8090266.
[9] Z. Zhang, A. Zhang, C. Sun, J. Guan, dan X. Huang, "The Reliability Analysis of Air Traffic Network Based on Trajectory Clustering of Terminal Area," *IEEE Access*, vol. 8, hlm. 75035–75042, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988586.
[10] J. Sun, J. M. Hoekstra, dan J. Ellerbroek, "OpenAP: An Open-Source Aircraft Performance Model for Air Transportation Studies and Simulations," *Aerospace*, vol. 7, no. 8, hlm. 104, Jul 2020, doi: 10.3390/aerospace7080104.
[11] R. Sáez, X. Prats, T. Polishchuk, dan V. Polishchuk, "Traffic synchronization in terminal airspace to enable continuous descent operations in trombone sequencing and merging procedures: An implementation study for Frankfurt airport," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 121, hlm. 102875, Des 2020, doi: 10.1016/j.trc.2020.102875.
[12] Y. Tian, D. Xing, L. Wan, dan B. Ye, "Study on the Optimization Method of Point Merge Procedure Based on Benefit in the Terminal Area," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2020, hlm. 1–12, Apr 2020, doi: 10.1155/2020/5757948.
[13] C. Feng, C. Wang, H. Chen, C. Xu, dan J. Wang, "Cooperative Low-Carbon Trajectory Planning of Multi-Arrival Aircraft for Continuous Descent Operation," *Aerospace*, vol. 11, no. 12, hlm. 1024, Des 2024, doi: 10.3390/aerospace11121024.
[14] J. Chen, J. Wang, F. Li, dan L. Zou, "Impact of rainy season on approach trajectories in high-altitude airport terminal maneuvering area: a clustering analysis," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, hlm. 30455, Agu 2025, doi: 10.1038/s41598-025-13232-8.
[15] D. Xue, S. Du, B. Wang, W.-L. Shang, N. Avogadro, dan W. Y. Ochieng, "Low-carbon benefits of aircraft adopting continuous descent operations," *Appl. Energy*, vol. 383, hlm. 125390, Apr 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125390.
[16] X. Olive, J. Sun, L. Basora, dan E. Spinielli, "Environmental inefficiencies for arrival flights at European airports," *PLoS One*, vol. 18, no. 6, hlm. e0287612, Jun 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0287612.