

Optimalisasi Jalur Lintasan Pendaratan Berbasis *Required Navigation Procedures* (RNP) menggunakan Metode Simulasi Studi Kasus Bandar Udara Husein Sastranegara Bandung

Imam Sonhaji^{*1}, Ichyu Machmiyana¹, Djoko Jatmoko¹

¹Program Studi Lalu Lintas Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Banten, 15028, Indonesia

E-mail: *imam.sonhaji@ppicurug.ac.id

Diterima: 22 Maret 2023, disetujui: 26 Mei 2023, diterbitkan online: 30 Juni 2023

Abstrak

ICAO merekomendasikan untuk program pencapaian *capacity* and *efficiency* dilakukan melalui model penerapan *Performance Based Navigation* (PBN), dengan fleksibilitas rute terbang saat ini belum tergambar pola terbang yang mendapatkan jarak terbang yang lebih pendek. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan model terbang dalam rangka optimalisasi jarak tempuh terbang pesawat yang menggunakan *instrument approach procedure* berbasis *RNP approach*. Penelitian menggunakan Metodologi kuantitatif dengan model penelitian eksperimen (*Pre experimental one-shot case study*). Hasilnya adalah pola terbang pada lintasan melengkung (*arc segment*) dengan penerapan kecepatan minimal mulai *Initial Approach Fix* (IAF) sebesar ($V=210$ knot) ini menghasilkan efisiensi jarak terbang sebesar 8 % serta penghematan bahan bakar sebesar 1.5 % dibandingkan dengan *current procedure*. Penerapan prosedur penerbangan berbasis RNP Approach (RNP Arc) sangat sesuai pada daerah dengan kontur pegunungan.

Kata kunci: performance-based navigation, required navigation performance, simulasi, jarak terbang, konsumsi bahan bakar.

Abstract

ICAO recommends that the capacity and efficiency achievement program be carried out through the Performance Based Navigation (PBN) application model, with the flexibility of flight routes currently not yet illustrated flight patterns that get shorter flight distances. This study aims to produce a flight model to optimize the flight distance of aircraft using an instrument approach procedure based on the RNP approach. The study used a quantitative methodology with an experimental research model (experimental one-shot case study). The result is a flight pattern on a curved trajectory (arc segment) with the application of a minimum speed starting from the Initial Approach Fix (IAF) of ($V = 210$ knots), Resulting in flight distance efficiency of 8% and fuel savings of 1.5% compared to the current procedure. Applying flight procedures based on the RNP Approach (RNP Arc) is very suitable in areas with mountainous contours.

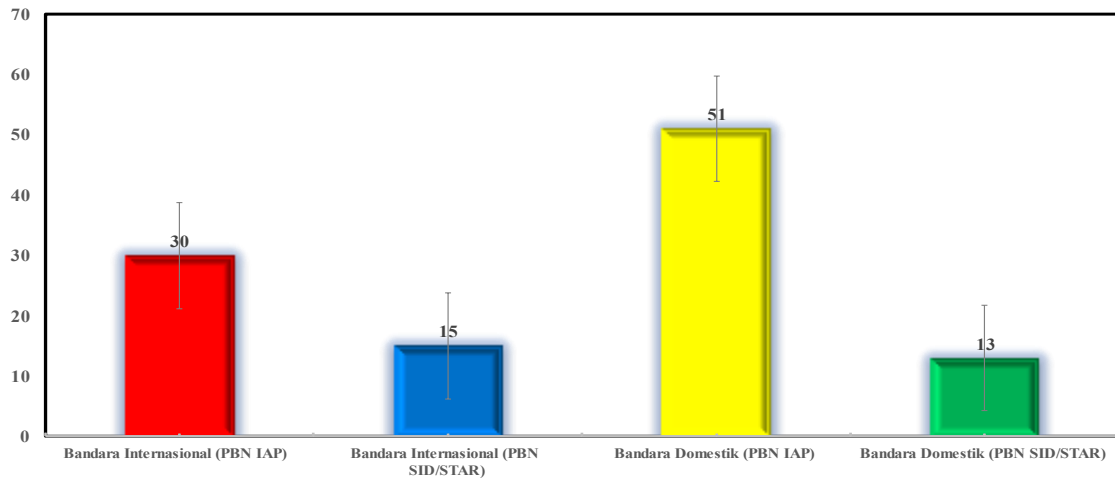
Keywords: performance-based navigation, required navigation performance, simulation, flying distance, fuel consumption

1. Pendahuluan

International Civil Aviation Organization (ICAO) memprediksikan bahwa penerbangan domestik dan internasional akan mencapai 6 (enam) Milyar pada tahun 2030 [1]. Sehingga ICAO mengharuskan setiap negara anggotanya untuk terus mengembangkan tatanan pengelolaan penerbangan sipilnya menuju penerbangan yang mengedepankan aspek *safety, capacity and efficiency, security and facilitation, economic development, dan environment protection*. *Air Navigation Capacity and Efficiency* merupakan suatu konsep yang akan diterapkan 20 tahun ke depan untuk dapat memastikan harmonisasi seluruh negara anggota secara global untuk berinovasi dalam mengelola implementasi optimalisasi teknologi yang ada namun tetap fokus kepada aspek keselamatan [2].

ICAO merekomendasikan untuk program pencapaian *capacity and efficiency* dilakukan melalui model penerapan *Performance Based Navigation* (PBN). PBN merupakan konsep bernavigasi pesawat terbang dengan mengoptimalkan kinerja peralatan pada pesawat dengan ketentuan khusus pada jalur (*ATS route*) dan prosedur pendaratan (*Instrument Approach Procedure*) ataupun dalam design ruang udara tertentu [3].

PBN terdiri dari model yakni *Area Navigation* (RNAV) dan *Required Navigation Performance* (RNP) dimana kedua model tersebut memiliki perbedaan RNP dilengkapi *onboard monitoring* dan *alert*, sedangkan RNAV tidak dilengkapi [4]. Baik RNAV dan RNP memiliki tujuan untuk meningkatkan kapasitas dan efisiensi bahan bakar tanpa mengurangi aspek keselamatan serta ramah lingkungan [5].



Sumber : [2]

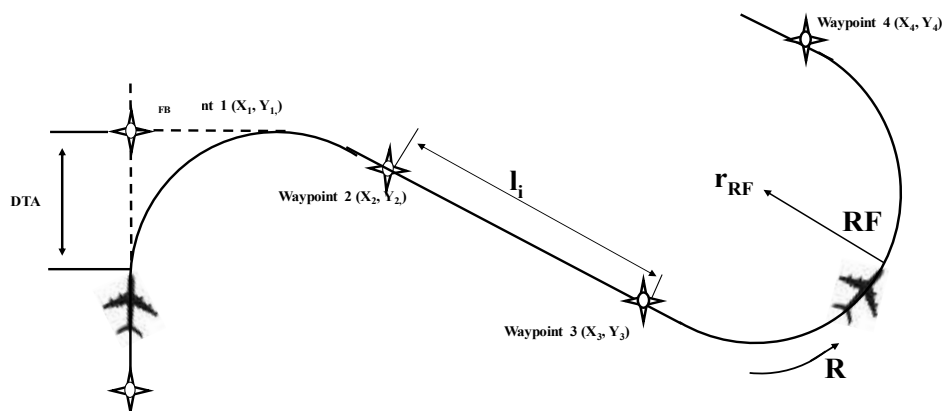
Gambar 1. Data implementasi PBN di Indonesia

Sumber : [2]

Gambar 1 menunjukkan bahwa Indonesia adalah negara anggota ICAO yang terus mengikuti rencana global yang dicanangkan oleh ICAO untuk dapat memastikan seluruh wilayah udara Indonesia dapat terimplementasi *Performance Based Navigation* (PBN). Permasalahan yang ditemukan adalah *flight procedure design* pada *instrument approach procedure* (IAP) berbasis RNP *approach* belum pernah diujikan melalui perhitungan algoritme sederhana melalui pengujian simulator untuk mendapatkan model formula yang dapat memberikan alternatif solusi efisiensi bahan bakar melalui efisiensi jarak tempuh terbang sebuah pesawat.

Research gap pada penelitian ini adalah prosedur berbasis PBN didesain untuk peningkatan efisiensi penerbangan namun setiap prosedur belum dapat memberikan perhitungan secara kuantitatif besaran efisiensi yang dihasilkan pada rute tersebut baik secara efisiensi jarak ataupun efisiensi penggunaan bahan bakar.

Tantangan ke depan dalam pengelolaan ruang udara *Air traffic Management* (ATM) adalah transformasi dan adaptasi sistem navigasi pesawat ke dalam model pengelolaan berbasis *Performance Based Navigation* (PBN) [6]. PBN dikenal dengan 2 (dua) model dari *navigation specification* (navspec) yakni *Area Navigation* (RNAV) dan *Required Navigation Performance* (RNP), dan keduanya memiliki kelebihan jalur lebih pendek, hemat bahan bakar dan ramah lingkungan serta dapat meningkatkan kapasitas ruang udara [7]. *Required Navigation Performance* (RNP) merupakan sistem navigasi pesawat yang memberikan fleksibilitas terbang dari satu poin ke poin lainnya dengan akurasi yang terjamin sehingga aspek keselamatan dan efisiensi tetap tercapai [8].



Sumber : [9]

Gambar 2. Struktur Rute RNP

Pada prosedur terbang berbasis RNP, rute tersusun dari *waypoint* dan *leg*. *Leg* merupakan komponen yang menghubungkan 2 (dua) *waypoint* melalui 2 (dua) model yakni *Track to Fix* (TF) dan *Radius to Fix* (RF) [8]. Penerapan rute berbasis RNP juga diimplementasikan pada *Instrument Approach Procedure* (IAP). IAP merupakan serangkaian manuver yang telah ditentukan sebelumnya untuk pesawat yang beroperasi secara teratur dari awal memulai fase *approach* sampai ke titik dari mana pendaratan dapat dilakukan secara *visual* [10].

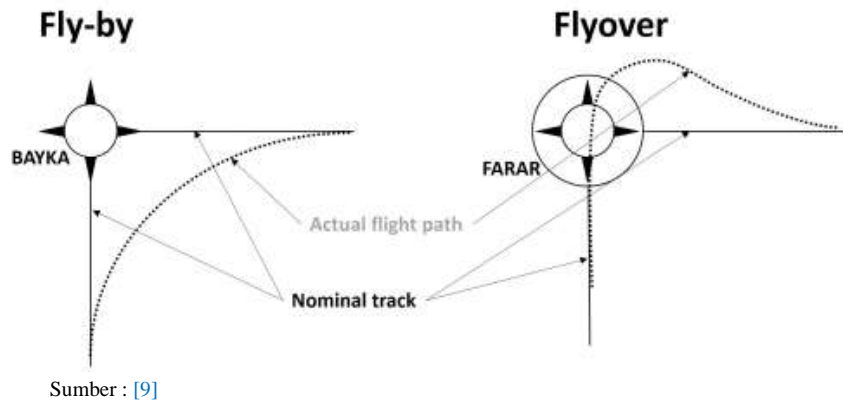
Di China peningkatan penerbangan pada *low level/ altitude* atau dikenal dengan *general aviation* (GA), PBN menjadi kunci dalam pengelolaan ruang udara (*Airspace planning*) dan peningkatan efisiensi dan rasionalitinya. [11]. Penerapan PBN dengan konsep *dynamic approach and landing procedures* mengarahkan pesawat akan terbang mengikuti jalur dengan desain menghindari area pemukiman sekitar bandara, mengurangi kebisingan dan emisi gas buang, menghindari area dengan cuaca yang buruk untuk mencegah *incident* dan *accidents*, serta mengurangi *landing distance* hingga 56% dibandingkan rute sebelumnya [1]. Penerapan model PBN dengan konsep *point merge* dalam rangka optimalisasi prosedur penerbangan dapat digunakan untuk mengurangi waktu terbang, konsumsi bahan bakar pesawat, dan efek terhadap lingkungan [12]. RNP *approach procedure* didesain dengan memperhatikan aspek *safety* melalui proteksi area terbang dan pembatasan ketinggian dari *obstruction* yang ada sehingga menghasilkan jalur terbang yang hemat bahan bakar dan ramah terhadap lingkungan [13]. Penelitian [14] hasilnya menunjukkan bahwa meskipun kebisingan dan emisi sebanding dengan penggunaan bahan bakar, namun dapat dikurangi dengan membuat jalur penerbangan yang didesain dengan *low idle-thrust* dan konsep PBN *Route* menjadi solusi dalam mencapainya. Penelitian [15] menunjukkan bahwa PBN menjadi solusi terkait kebisingan akibat pertumbuhan *traffic* penerbangan, selain itu kedepannya PBN lebih fokus pada penggunaan satelit dalam peralatan navigasi yang berada di darat seperti, NDB, VOR, DME dan lainnya sehingga menghasilkan jalur penerbangan yang lebih presisi dan akurat, dan serta efisiensi bahan bakar pesawat dapat terwujud. Dibandingkan dengan penelitian sejenis diatas, Penelitian ini memposisikan bahwa jalur atau rute berbasis PBN dapat dioptimalisasikan untuk memperoleh jarak terbang yang pendek sehingga dapat menghasilkan penghematan bahan bakar melalui metode ekperimental.

Prosedur PBN memiliki fleksibilitas terbang pada rute yang dipilih sehingga memberikan opsi bagi pilot untuk bisa mendapatkan jarak terbang yang lebih pendek, namun saat ini setiap prosedur pendaratan PBN belum dilengkapi pola terbang yang teruji sebagai panduan pilot dalam menghasilkan rute terbang terpendek. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan pola penerapan kecepatan terbang dalam rangka optimalisasi jarak tempuh terbang pesawat yang menggunakan *instrument approach procedure* berbasis RNP *approach* dalam rangka efisiensi penggunaan bahan bakar pesawat. sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan gambaran kepada pilot dan ATC dalam penerapan *Performance-Based Navigation* (PBN) terutama untuk RNP *approach procedure*.

2. Metodologi

Penelitian ini merupakan penelitian metodologi kuantitatif dengan model penelitian eksperimen. Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan Simulator *Air Traffic Control* (ATC) Micronav Sim sebagai *tool* untuk mengolah dan menginput data lapangan, seperti tergambar pada Gambar 6. Bentuk penelitian ini dengan jenis *Pre experimental one-shot case study*, yakni memberikan *treatment* atau perlakuan khusus pada suatu variabel kemudian diobservasi hasilnya lapangan [16]. Metode ini dipilih dengan dasar efektifitas dan biaya dibanding apabila diimplementasi dengan menggunakan pesawat langsung ke lapangan oleh karena itu eksperimen dicoba melalui proses simulasi. Adapun parameter yang digunakan berasal dari performa pesawat dan data lapangan atau data prosedur pada bandara tempat uji.

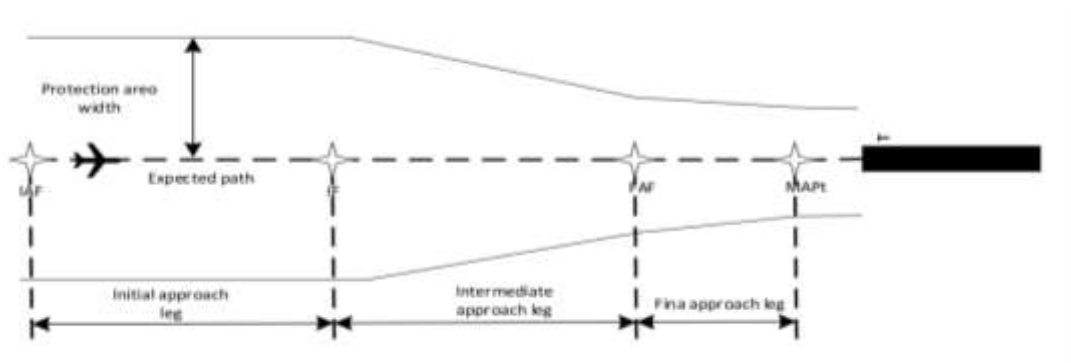
Waypoint merupakan titik spesifik geometric yang digunakan untuk membentuk rute *Area Navigation* (RNAV) atau untuk membentuk jalur penerbangan pesawat [9]. Adapun jenisnya terbagi menjadi 2 yakni *fly-by* dan *fly over*.



Sumber : [9]

Gambar 3. Fly-by dan Flyover.

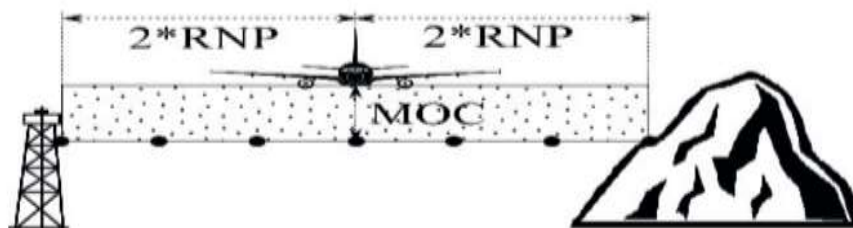
Gambar 3 memberikan gambaran pembeda diantara *waypoint fly-by* dan *waypoint flyover*, *waypoint fly-by* merupakan *waypoint* yang membutuhkan antisipasi belokan untuk memungkinkan intersepsi ke segmen atau rute prosedur berikutnya, sedangkan *waypoint flyover* merupakan *waypoint* yang dimulai untuk bergabung dengan segmen atau prosedur berikutnya.



Sumber : [9]

Gambar 4. Leg RNP Approach Procedure

Gambar 4 Menjelaskan bahwa *Instrument approach procedure* (IAP) berbasis RNP memiliki beberapa segment yakni [9], *Initial Approach (IA) Leg Segment*, *Intermediate Approach (I) Final Approach (FA) Leg*.



Sumber : [9]

Gambar 5. Lebar jalur dan minimal ketinggian (MOC)

Jalur penerbangan didesain dengan memperhatikan ketinggian *obstacle* di area yang akan dilewati [9]. Setiap jalur penerbangan tingginya adalah ketinggian *obstacle* ditambah dengan jarak minimal atau disebut dengan *minimal obstacle clearance* (MOC) dengan tujuan agar setiap pesawat yang melewati jalur nya terlindungi seperti yang tertera pada Gambar 5.

$$H_{\text{path}} - \text{MOC} - H_{\text{terrain}} \geq 0 \quad (1)$$

Pada persamaan (1) menunjukan bahwa ketinggian pesawat pada jalur penerbangan harus lebih besar dibandingkan ketinggian terrain dan Minimum Obstacle clearance (MOC) yang ditentukan [9].

Tabel 1. Nilai RNP dan MOC

App Segment	RNP Value (NM)	MOC (m)
Initial	1	300
Intermediate	1	150
Final	0.3	0

Sumber: [17]

Tabel 1 merupakan dasar standar penentuan ketinggian jalur penerbangan yang didesign agar pesawat yang melintasi jalur tersebut terlindungi dari *obstacle* atau *terrain* yang ada [17].

Tabel 2. *Speed Restriction (knot)*

Approach Segment	Cat C	Cat C (min)	Cat D	Cat D (min)
Initial	240	210	250	210
Intermediate	240	180	250	180
Final	160	140	185	165

Sumber : [17]

Tabel 2 merupakan batasan kecepatan pesawat saat melaksanakan IAP pada *Category C* (Medium) dan juga *Category D* (Heavy) sehingga pengaturan kecepatan dapat dilakukan lebih awal oleh seorang pilot selama melaksanakan IAP.

2.1. Lokasi

Bandar udara Husein Sastranegara merupakan bandara yang berada di Kota Bandung Jawa Barat, Bandara terserbut merupakan bandara enclave sipil yang artinya bandara yang merupakan pangkalan militer TNI-AU yang juga melayani penerbangan sipil. Dari segi kontur wilayah, Bandara Husein Sastranegara Bandung berada pada daerah pegunungan dimana posisi bandara berada ditengah-tengah beberapa gunung. Hal ini menjadikan bandara yang memiliki ciri khas yang berbeda sehingga memerlukan dukungan prosedur yang berbeda juga.

2.2. Metode Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data pada penelitian ini adalah menggunakan data sekunder pada *instrument approach procedure* (IAP) berbasis *Required Navigation Performance* (RNP) Bandara Internasional Husein Sastranegara Bandung yang sudah dipublikasikan oleh Direktorat Jenderal Perhubungan Udara.

2.3. Formula Matematika

Data diolah berasal dari observasi pada waktu simulasi ke dalam ATC (Micronav Sim). Data *waypoint*, data posisi *latitude* dan *longitude* akan diinputkan kedalam simulator ATC (Micronav Sim) dengan beberapa paramenter sebagai berikut :

$$X = (X_1, Y_1, V_1, \dots, X_{(n-1)}, Y_{(n-1)}, V_{(n-1)}) \quad (2)$$

dimana X merupakan posisi pesawat saat melewati *waypoint*. x_1 adalah posisi latitude *waypoint* 1, y_1 posisi longitude *waypoint* 1, v_1 kecepatan pesawat pada *waypoint* 1 tersebut.

$$R \leq 3^0 \text{ per second} \quad (3)$$

R merupakan rate turn yakni standar 360 derajat dalam waktu 2 menit atau setara dengan 3^0 per second.

$$\omega \leq 20^0 \quad (4)$$

ω merupakan *bank angle* pesawat saat melakukan manuver memutar

$$\theta_{FB} \leq 90^0 \quad (5)$$

θ_{FB} merupakan sudut yang dibentuk dari perpotongan manuver memutar pesawat terhadap track yang selanjutnya.

$$r_{RF} \leq (V + V_{wind\ speed}) / (20 \times \pi \times R) \quad (6)$$

r_{RF} merupakan radius dari track yang melengkung/ memutar, sedangkan V merupakan kecepatan pesawat saat manuver melengkung/ memutar, $V_{wind\ speed}$ merupakan kecepatan angin.

Perhitungan *fuel consumption* pada fase *descent* dilakukan dengan mengikuti perhitungan (Eurocontrol Experimental Centre, 2004).

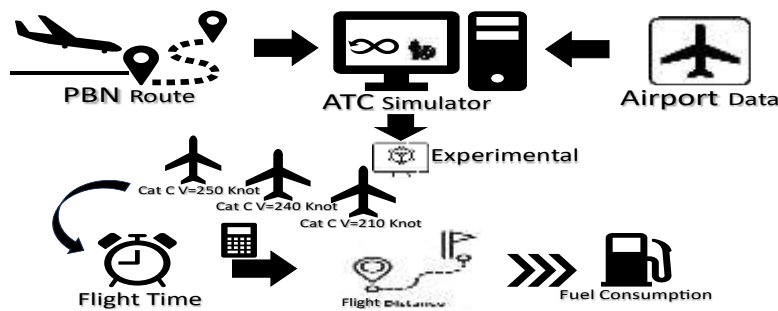
$$F_{min} = C_{f3} (1 - h/C_{f4}) \quad (7)$$

F_{min} merupakan fuel consumption minimal yang dihitung, sedangkan C_{f3} adalah *1st descent fuel flow coefficient* (kg/min) dan C_{f4} merupakan *2nd descent fuel flow coefficient* (feet), h merupakan ketinggian pesawat (feet).

2.4. Analisis Data

Sumber: hasil analisis, 2022

Gambar 6 merupakan tahapan dalam melaksanakan eksperimen, data yang sudah diolah dan disusun ke dalam sebuah scenario dan diinputkan kedalam simulator. Hasilnya disajikan dalam bentuk gambar, grafik dan tabel sehingga dapat dianalisis secara deskriptif. Selanjutnya proses penyimpulan dengan menggunakan model Miles & Huberman [19], dimana aktivitasnya meliputi reduksi data (*data reduction*), penyajian data (*data display*) serta penarikan kesimpulan dan verifikasi (*conclusion drawing/ verification*).



Sumber: hasil analisis, 2022

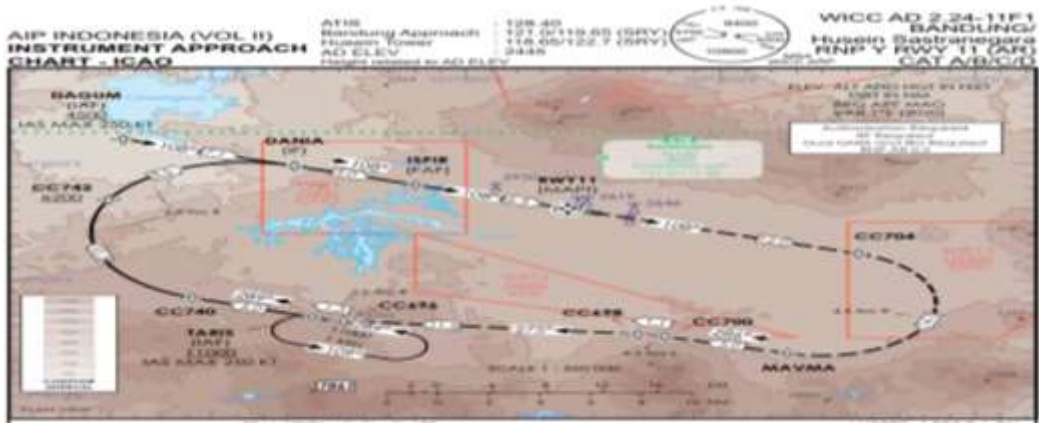
Gambar 6. Alur Eksperimental

Sumber: hasil analisis, 2022

Gambar 6 merupakan alur ekaperimental dengan melakukan pengamatan terhadap ketiga pesawat tersebut dengan membandingkan jarak terbang yang dihasilkan. Optimal apabila jarak yang dihasilkan lebih pendek dari rute terbang yang sebelum, observasi terhadap ATC simulator dilakukan terhadap waktu terbang, pola lintasan yang dibentuk sehingga dapat terlihat optimalisasi yang dapat dicapai. Jarak normal pada rute sebelumnya sejauh 35 Nm dimulai dari poin Taris sebagai IAF, sehingga apabila jarak tempuh yang dihasilkan kurang dari nilai 35 NM, maka dapat dikatakan optimal.

3. Hasil dan Pembahasan

Konsep navigasi pesawat udara dengan model *performance-based navigation* (PBN) dapat diterapkan dengan jenis *RNP Arc*. *RNP Arc* didesain dengan mengandalkan kemampuan pesawat untuk menjaga posisi terbang pesawat unt'uk tetap akurat di jalurnya meskipun jalur berkelok atau berbetuk lingkaran.



Sumber : [20]
Gambar 7. IAP RWY 11 Bandara Husein Sastra Negara Bandung

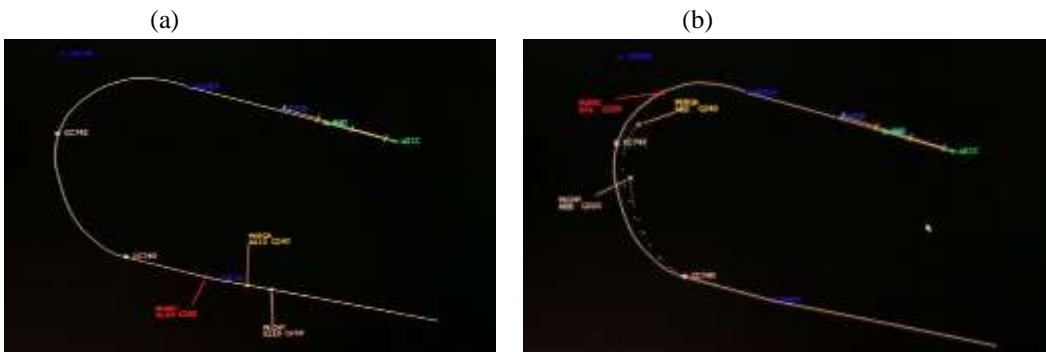
Sumber : [20]
Gambar 7 diatas merupakan prosedur terbang RNP Arc yang diterapkan pada *Instrument Approach Procedure* (IAP) RWY 11. Prosedur ini dimulai dari poin “Taris” sebagai *Initial Approach Fix* (IAF) dilanjutkan ke poin “Dania” sebagai *Intermediate Approach Fix* (IF) dan menuju poin “ISPIR” sebagai *Final Approach Fix* (FAF).

Tabel 3. Tabel Kode RNP Y RWY 11

SERIAL	PATH	WAYPOINT	COURSE	DIST	ALTITUDE	SPEED	NAVSPEC
010	TF	TARIS (IAF)	289	5	+11000	-250	RNP1
020	TF	CC740	6.0 ARC	10.2			RNP 0.3
030	RF	CC742	6.0 ARC	8.5	+6200		RNP 0.3
040	RF	DANIA (IF)		5			RNP 0.3
050	TF	ISPIR (FAF)		6.3	@4500		RNP 0.3
060	TF	RWY 11 (MAPT)					RNP APCH

Sumber : [20]

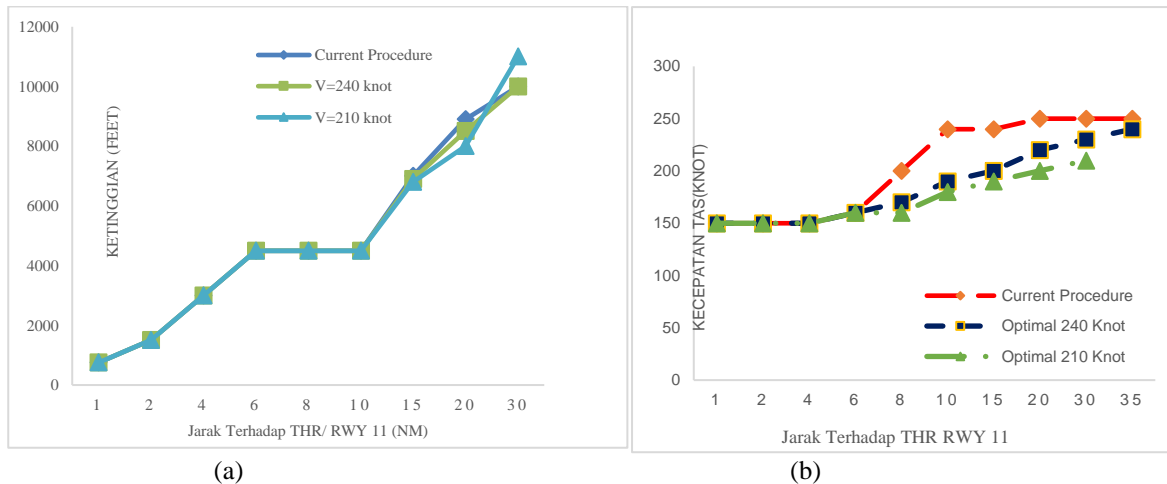
Tabel 3 diatas merupakan data *waypoint* yang ada di IAP RWY 11 beserta ketinggian yang tentukan, untuk prosedur tersebut ketinggian pesawat dimulai dari level 11.000 kaki pada poin “TARIS”. Selanjutnya pesawat memulai turun sampai ke poin “ISPIR” pada ketinggian 4.500 kaki.



Sumber: *hasil analisis*), 2022
Gambar 8. Eksperimen (a) *Initial Approach Fix* (AIF) Taris (b) Jalur CC740 dan CC742

Sumber: *hasil analisis*), 2022
Gambar 8 ab merupakan eksperimen melalui simulasi terhadap IAP Runway 11 di laboratorium simulator ATC (Micronav Sim) dengan beberapa langkah sebagai berikut :
a. Input data lat/long posisi Runway 11/ 29

- b. Input data posisi lat/long dari masing – masing *waypoint* yakni point “Taris”, “CC740”, “CC742”, “Dania” dan “Isfir”
- c. Input data exercise simulasi dengan pesawat category C (medium) / Airbus 320.
- d. Input parameter *aircraft performance* sesuai dengan kondisi yang ada.
- e. Ujicoba dijalankan dengan menyiapkan 1 (satu jenis pesawat A320) pesawat dengan 3 dengan pola perlakuan yakni 1 dengan kecepatan seperti prosedur yang ada saat ini, 1 pesawat dengan kecepatan maksimal yang diperbolehkan ($V=240$ knot), serta 1 pesawat dengan kecepatan minimal yakni ($V=210$ knot).

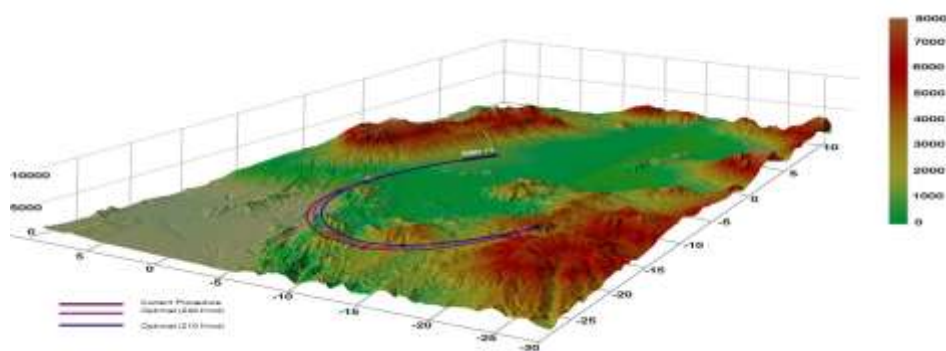


Sumber : hasil analisis, 2022

Gambar 9. profil pesawat (a). Ketinggian terhadap jarak RWY (b) Kecepatan terhadap jarak RWY

Sumber : hasil analisis, 2022

Gambar 9 perbandingan kecepatan pesawat terhadap jarak terhadap runway, nilai kecepatan pesawat akan selalu menyesuaikan jarak tempuh dari setiap *waypoint* yang dilalui. Pada rute memutar, pesawat membutuhkan nilai *bank angle* sesuai *turn radius* pada ketinggian tertentu [8]. Pada eksperimen tersebut besar *bank angle* dibuat dengan memperhatikan kenyamanan yakni tidak lebih dari 20^0 , sedangkan *turn radius* ditetapkan melalui ketentuan standar yakni 3^0 /detik.



Sumber : hasil analisis, 2022

Gambar 10.Ilustrasi Rute Terbang

Sumber : hasil analisis, 2022

Gambar 10 merupakan ilustrasi yang dibuat setelah semua data diinput kedalam simulator dan dijalankan sehingga dapat memberikan gambaran secara komprehensif manuver pesawat saat menggunakan prosedur yang ada serta prosedur optimalisasi dengan kecepatan ($V=240$ Knot) dan ($V=210$ Knot). Terdapat perbedaan radius terbang pesawat dengan penerapan kecepatan tersebut, sehingga dampak dari optimalisasi tersebut terlihat pada rute terbang yang lebih pendek.

Tabel 4. Hasil Optimalisasi Instrument Approach Procedure (IAP)

Prosedur IAP	Waktu Tempuh (sec)	Bahan Bakar (lb)	Panjang Jalur (NM)
IAP (Initial V = 250 Knot)	560	502.8	35
Optimalisasi IAP (Initial V = 240 Knot)	557	500.7	33.8
Optimalisasi IAP (Initial V = 210 Knot)	548	495.2	30.9

Sumber : hasil analisis, 2022

Tabel 4 menunjukkan bahwa untuk optimalisasi rute pada *Instrument Approach Procedure* (IAP) dapat dilakukan pada jalur lurus (*straight segment*) dengan kecepatan terbang (V) lebih tinggi maka jarak terbang akan pendek, namun pada rute terbang yang berkelok atau memutar (*arc segment*) maka kecepatan minimum menjadikan rute terbang lebih pendek. Kecepatan pesawat pada *initial approach fix* (iap) pada point “Taris” menggunakan kecepatan minimal yakni **210 knot** pada ketinggian **11.000 kaki** akan menghasilkan jarak terbang yang lebih pendek serta konsumsi bahan bakar yang lebih hemat, karena *fuel consumption* akan lebih besar pada pesawat yang terbang dengan kecepatan tinggi namun pada ketinggian yang rendah karena membutuhkan power yang lebih besar [21].

Simulasi model pesawat dengan kecepatan maksimal (**V=240 knot**) ini menghasilkan efisiensi jarak terbang sebesar **2,8 %** serta penghematan bahan bakar sebesar **0.4 %** sedangkan Simulasi model pesawat dengan kecepatan minimum (**V=210 knot**) ini menghasilkan efisiensi jarak terbang sebesar **8 %** serta penghematan bahan bakar sebesar **1.5 %** dibandingkan dengan *current procedure*, hal ini dapat terus dikembangkan untuk fase penerbangan selanjutnya.

Setiap bandara dengan kontur daerah pegunungan, diterapkan prosedur PBN berbasis RNP dengan jalur penerbangan berbentuk lengkungan (*arc segment*). Optimalisasi *trajectory* dapat dilakukan pada rute melengkung tersebut dengan penerapan pola terbang dengan kecepatan minimal (*minimum speed restriction*) pada semua kategori pesawat sehingga mendapatkan jarak tempuh terbang yang efektif, sehingga penghematan *fuel consumption* dapat tercapai. Penelitian ini tidak berlaku pada prosedur terbang dengan lintasan terbang lurus (*straight segment*) sehingga perlu penelitian lanjutan sebagai pelengkap pada Optimalisasi *trajectory*. ICAO terus menerus menggaungkan dalam aspek environment protection, salah satunya dengan penerapan rute berbasis PBN guna penghematan *fuel consumption* karena peningkatan efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi dapat secara signifikan mengurangi karbon emisi yang dihasilkan [22][23]. Penghematan *fuel consumption* pada pesawat akan memberikan kontribusi besar dalam penurunan biaya operasional penerbangan, hal ini akan memberikan dampak besar pada operator pesawat atau airline [24], fakta tersebut menunjukkan bahwa peran *air traffic management* dalam mendukung peningkatan profit dari operator pesawat atau airline.

4. Kesimpulan

Penerapan prosedur penerbangan berbasis *RNP Arc* sangat sesuai pada daerah dengan kontur pegunungan karena memiliki akurasi yang tinggi sehingga rute yang melengkung menjadi lebih tepat. Untuk studi kasus Bandara Husein Sastranegara Bandung, simulasi model menunjukkan bahwa dengan penerapan kecepatan minimal (v=210 knot) dihasilkan efisiensi jarak sebesar 8% dan penghematan bahan bakar sebesar 1.5%. Optimalisasi *trajectory* jalur terbang lengkung (*arc segment*) dapat diperoleh dari penerapan pola terbang dengan kecepatan rendah atau minimal pada semua kategori pesawat sehingga mendapatkan mengurangi jarak terbang, dan *fuel consumption* yang lebih kecil. Untuk itu, rekomendasi

penelitian dengan metodologi sejenis dapat dilakukan untuk rute terbang dengan jenis lintasan lurus (*straight segment*).

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Direktur PPI Curug yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini dan juga Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (PusPPM) Politeknik Penerbangan Indonesia Curug yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] U. Kale, I. Jankovics, A. Nagy, and D. Rohács, "Towards sustainability in air traffic management," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 10, pp. 1–18, 2021, doi: 10.3390/su13105451.
- [2] International Civil Aviation Organization (ICAO), "Air Navigation Capacity and Efficiency," <https://www.icao.int/airnavigation/Pages/default.aspx>.
- [3] ICAO, *Performance-based Navigation (PBN) Manual*. 2008.
- [4] D. A. Pamplona, A. G. De Barros, and C. J. P. Alves, "Fast-Time Simulation," pp. 1–18, 2021.
- [5] W. Schuster and W. Ochieng, "Performance requirements of future Trajectory Prediction and Conflict Detection and Resolution tools within SESAR and NextGen: Framework for the derivation and discussion," *Journal of Air Transport Management*, vol. 35, pp. 92–101, 2014, doi: 10.1016/j.jairtraman.2013.11.005.
- [6] Y. Yang, Z. Gao, and C. He, "Stochastic terminal flight arrival and departure scheduling problem under performance-based navigation environment," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 119, no. July, p. 102735, 2020, doi: 10.1016/j.trc.2020.102735.
- [7] M. W. Sawyer, K. A. Berry, A. Henderson, R. Rohde, and D. Liskey, "A Proactive Assessment of the Changing Non-conformance Risk Profile for Arrival and Departure Procedures in NextGen," *Procedia Manufacturing*, vol. 3, no. Ahfe, pp. 2967–2973, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.836.
- [8] T. Hasegawa, T. Tsuchiya, and R. Mori, "Optimization of Approach Trajectory Considering the Constraints Imposed on Flight Procedure Design," *Procedia Engineering*, vol. 99, pp. 259–267, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.534.
- [9] ICAO, *Doc 8168*, vol. I, no. November. 2018.
- [10] T. J. Nichols, "Approaches Operating Under Title 14 of the Code of Federal Regulations," 2017.
- [11] J. Mu, "Base on PBN's General Aviation Airspace Planning Research," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 538, no. 1, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/538/1/012060.
- [12] Y. Tian, D. Xing, L. Wan, and B. Ye, "Study on the Optimization Method of Point Merge Procedure Based on Benefit in the Terminal Area," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/5757948.
- [13] L. Zhu, J. Wang, Y. Wang, Y. Ji, and J. Ren, "DRL-RNP: Deep Reinforcement Learning-Based Optimized RNP Flight Procedure Execution," *Sensors*, vol. 22, no. 17, 2022, doi: 10.3390/s22176475.
- [14] E. Otero, U. Tengzelius, and B. Moberg, "Flight Procedure Analysis for a Combined Environmental Impact Reduction: An Optimal Trade-Off Strategy," *Aerospace*, vol. 9, no. 11, p. 683, 2022, doi: 10.3390/aerospace9110683.
- [15] M. E. Eagan and R. Gundry, "Airport noise and performance-based navigation: A force for good or evil?," *Journal of Airport Management*, vol. 12, no. 4, pp. 359–369, 2018.
- [16] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*, no. April. 2019.
- [17] International Civil Aviation Organisation, "Required Navigation Performance Authorization Required (RNP AR) Procedure Design Manual - Doc 9905," p. 94, 2021.
- [18] EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, *The Base of Aircraft Data (Bada)*, no. 10. 2004.
- [19] R. Hanfiani, *Manajemen Program Pendidikan Inklusif*. 2021.
- [20] Kementerian Perhubungan, "AIP INDONESIA (VOL II) INSTRUMENT APPROACH CHART - ICAO Bandung Approach BANDUNG / Husein Sastranegara RNP Y RWY 11 (AR)," vol. II, no. Vol II, p. 696, 2022.
- [21] R. Sáez and X. Prats, "Time-based-fuel-efficient aircraft descents: Thrust-idle descents along re-negotiated routes vs. powered descents along published routes," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 114, no. September 2022, pp. 1–19, 2023, doi: 10.1016/j.trd.2022.103563.
- [22] W. Liao, Y. Fan, and C. Wang, "Exploring the equity in allocating carbon offsetting responsibility for international aviation," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 114, no. September 2022, p. 103566, 2023, doi: 10.1016/j.trd.2022.103566.
- [23] M. Zhang, A. Filippone, and N. Bojdo, "Multi-objective optimisation of aircraft departure trajectories," *Aerospace Science and Technology*, vol. 79, no. x, pp. 37–47, 2018, doi: 10.1016/j.ast.2018.05.032.
- [24] S. Dožić and M. Kalić, "An AHP approach to aircraft selection process," *Transportation Research Procedia*, vol. 3, no. July, pp. 165–174, 2014, doi: 10.1016/j.trpro.2014.10.102.