



Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran
<http://journal.universitaspahlawan.ac.id/index.php/jrpp>
 Volume 8 Nomor 2, 2025
 P-2655-710X e-ISSN 2655-6022

Submitted : 29/05/2025
Reviewed : 03/06/2025
Accepted : 05/06/2025
Published : 07/06/2025

Evan Steven¹
 Dian Anggraini²
 Irvan³

PEMANFAATAN SPACE-BASED ADS-B DALAM OPTIMALISASI LAYANAN RUANG UDARA PAPUA

Abstrak

Manajemen lalu lintas udara yang efisien dan aman merupakan tantangan utama dalam sistem navigasi penerbangan, terutama di wilayah geografis yang menantang seperti Papua, yang masih memiliki titik kosong dalam pengawasan lalu lintas udara karena keterbatasan infrastruktur radar berbasis darat. Teknologi Space-Based Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) muncul sebagai solusi inovatif dengan jangkauan yang lebih luas dan akurasi tinggi tanpa bergantung pada infrastruktur darat. Studi ini menganalisis pemanfaatan ADS-B Berbasis Antariksa dalam mengoptimalkan layanan wilayah udara Papua, mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efektivitasnya, dan mengevaluasi kesiapan penerapannya di Indonesia melalui analisis deskriptif, studi kasus internasional, dan pendekatan statistik. Temuan menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki potensi yang signifikan untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi lalu lintas udara karena jangkauan globalnya, akurasi data yang tinggi, dan efisiensi biaya jangka panjang dibandingkan dengan radar berbasis darat. Namun, tantangan tetap ada, termasuk tidak adanya regulasi nasional, biaya operasional yang tinggi, dan kesiapan integrasi dengan sistem manajemen lalu lintas udara yang ada. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan pengembangan regulasi nasional, analisis biaya-manfaat yang lebih mendalam, perbaikan infrastruktur komunikasi, dan pelatihan sumber daya manusia untuk memastikan penerapan ADS-B berbasis antariksa secara optimal, menjadikannya solusi utama dalam meningkatkan keselamatan penerbangan dan mendukung sistem pengawasan udara yang lebih efisien di Indonesia.

Kata kunci: ADS-B Berbasis Antariksa, Pengawasan Lalu Lintas Udara, Blank Spot, Optimalisasi Wilayah Udara, Papua.

Abstract

Efficient and safe air traffic management is a major challenge in aviation navigation systems, especially in geographically challenging regions such as Papua, which still has blank spots in air traffic surveillance due to limited ground-based radar infrastructure. The Space-Based Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) technology emerges as an innovative solution with wider coverage and high accuracy without relying on ground infrastructure. This study analyzes the utilization of Space-Based ADS-B in optimizing Papua's airspace services, identifies factors influencing its effectiveness, and evaluates the readiness for its implementation in Indonesia through descriptive analysis, international case studies, and a statistical approach. The findings indicate that this technology has significant potential to enhance air traffic safety and efficiency due to its global coverage, high data accuracy, and long-term cost efficiency compared to ground-based radar. However, challenges remain, including the absence of national regulations, high operational costs, and the readiness of integration with existing air traffic management systems. Therefore, this study recommends the development of national regulations, a more in-depth cost-benefit analysis, improvements in communication infrastructure, and human resource training to ensure the optimal implementation of Space-Based ADS-B, making it a key solution in enhancing flight safety and supporting a more efficient air surveillance system in Indonesia.

Keywords: ADS-B Space-Based, Air Traffic Surveillance, Blank Spots, Airspace Optimization, Papua.

^{1,2,3,4}Diploma IV Teknik Navigasi Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia, Curug, Indonesia
 email: evansteven87@gmail.com, diananggraini@ppicurug.ac.id, irvan@airnavindonesia.co.id

PENDAHULUAN

Layanan navigasi udara merupakan elemen fundamental dalam menjamin keselamatan serta efisiensi operasional penerbangan. Layanan ini mencakup penyediaan informasi nautikal, layanan kesiapsiagaan, pencarian dan penyelamatan, serta pengendalian lalu lintas udara. Berdasarkan Annex 11 ICAO, layanan navigasi udara harus dilaksanakan dengan standar prosedur yang konsisten, koordinasi antarlembaga yang terintegrasi, serta dukungan teknologi yang memadai untuk memastikan keselamatan penerbangan (ICAO, 2020).

Pelayanan navigasi udara di Indonesia dikelola oleh Perusahaan Umum (Perum) Lembaga Penyelenggara Pelayanan Navigasi Penerbangan Indonesia (LPPNPI), yang dikenal dengan nama AirNav Indonesia. AirNav mengelola wilayah ruang udara seluas 7.789.268 km² yang terbagi dalam dua Flight Information Region (FIR), yaitu FIR Jakarta dengan cakupan 842.725 km² yang dikoordinasikan melalui Jakarta Air Traffic Service Center (JATSC), dan FIR Ujung Pandang seluas 4.946.543 km² melalui Makassar Air Traffic Service Center (MATSC). Sebagai satu-satunya penyelenggara navigasi udara nasional, AirNav Indonesia memiliki peran penting dalam memastikan layanan navigasi memenuhi standar keselamatan dan regulasi yang berlaku (AirNav Indonesia, 2023). Sistem pengawasan seperti radar sekunder, ADS-B, dan multilaterasi sangat penting dalam mendukung layanan navigasi yang sesuai regulasi. Berdasarkan Annex 10 ICAO, pengawasan harus memberikan cakupan penuh tanpa blank spot, khususnya di wilayah geografis menantang seperti pegunungan (ICAO, 2018).

Salah satu tantangan utama dalam pengawasan lalu lintas udara di Indonesia adalah keberadaan area blank spot, khususnya di wilayah Papua yang memiliki topografi ekstrem dan sulit dijangkau untuk pembangunan infrastruktur navigasi (Diklatkerja, 2023). Untuk mengatasi tantangan ini, penerapan teknologi Space-Based ADS-B menjadi solusi yang memungkinkan pengawasan lalu lintas udara yang lebih luas, mencakup area blank spot yang sebelumnya tidak terjangkau oleh radar dan ADS-B berbasis darat, sehingga meningkatkan keselamatan dan efisiensi dalam pengelolaan ruang udara.

Berdasarkan penelitian Batubara, Gultom, dan Bura (2020), kurang optimalnya kinerja radar akibat adanya hambatan (obstacle) dapat menciptakan blank spot yang berisiko menjadi jalur bagi pesawat asing tanpa terdeteksi pada ketinggian tertentu. Sebagai solusi, mereka menyarankan pemanfaatan sistem drone atau UAV untuk memberikan data ISR (Intelligence, Surveillance, Reconnaissance) terhadap pesawat berkecepatan rendah di wilayah blank spot yang tidak terjangkau radar aktif. Dengan teknologi ini, pengawasan lalu lintas udara dapat dilakukan lebih akurat dan menyeluruh, sehingga meningkatkan efisiensi operasional serta keselamatan penerbangan. Untuk memahami lebih lanjut bagaimana pemanfaatan teknologi ini dapat dioptimalkan, diperlukan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang telah membahas sistem surveillance penerbangan, ADS-B, serta teknologi pendukung lainnya.

Space-Based ADS-B menawarkan cakupan global dengan memanfaatkan satelit untuk mengirim data posisi pesawat secara real-time, menjangkau wilayah yang sulit dijangkau sistem berbasis darat. Teknologi ini berpotensi meningkatkan keselamatan dan efisiensi penerbangan, khususnya di wilayah terpencil seperti Papua, tanpa memerlukan infrastruktur mahal, serta menawarkan layanan langganan yang lebih ekonomis bagi ANSP. Dengan adanya latar belakang di atas, diusulkan sebuah penelitian dengan judul “Pemanfaatan Space-Based ADS-B Dalam Optimalisasi Layanan Ruang Udara Papua”.

METODE

Pendekatan Penelitian

Menurut Creswell, J. W. (2010) Untuk mendapatkan faktor faktor maka digunakan metode mixed methods. Menurut, penelitian metode campuran merupakan pendekatan yang mengombinasikan atau mengasosiasikan bentuk kualitatif dan kuantitatif. juga menyatakan bahwa metode penelitian kombinasi (mixed methods) adalah suatu metode penelitian yang menggabungkan metode kuantitatif dan kualitatif untuk digunakan secara bersama-sama dalam suatu kegiatan penelitian, sehingga diperoleh data yang lebih komprehensif, valid, reliabel, dan objektif (Sugiyono, 2012). Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode campuran (Mixed Methods) yang menggabungkan pendekatan kuantitatif dan kualitatif. Berikut adalah table rincian tahapan penelitian dengan metode mix method.

Lokasi dan Subjek Penelitian

Penelitian ini berfokus pada ruang udara Indonesia, terutama di area yang teridentifikasi

blank spot, yaitu wilayah yang tidak tercakup oleh ADS-B dan radar berbasis darat. Fokus utama penelitian adalah wilayah kontrol Ujung Pandang FIR di wilayah Upper Papua, yang dikenal memiliki keterbatasan cakupan pengawasan surveillance. Pemilihan lokasi penelitian dilakukan berdasarkan data yang diperoleh dari AirNav Indonesia Cabang Makassar Air Traffic Service Center (MATSC). Subjek penelitian ini adalah analisis terhadap pemanfaatan teknologi Space-Based ADS-B (ADS-B berbasis satelit) untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Penelitian ini juga mencakup evaluasi terhadap kesiapan teknis, operasional, dan infrastruktur yang diperlukan untuk implementasi teknologi Space-Based ADS-B sebagai solusi pengawasan yang lebih efektif di wilayah blank spot Indonesia, khususnya pada area Makassar FIR.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yang meliputi studi literatur, pengumpulan data kuantitatif, pengumpulan data kualitatif, simulasi, interpretasi dan penyusunan rekomendasi.

- (1) Studi Literatur dilakukan dengan mengumpulkan data dari jurnal, artikel ilmiah, dan manual book Space-Based ADS-B. Langkah ini bertujuan untuk memahami spesifikasi teknis teknologi tersebut serta potensi penerapannya di Indonesia. Selain itu, studi kasus implementasi di negara lain digunakan sebagai referensi perbandingan.
- (2) Pengumpulan data kuantitatif dilakukan dengan mengukur area blank spot menggunakan RASS Tool dan aplikasi radar untuk mendeteksi kualitas sinyal pada wilayah tanpa jangkauan radar konvensional. Data mencakup lokasi, kualitas, dan jangkauan sinyal sebelum dan sesudah penerapan Space-Based ADS-B. Hasil awal menunjukkan keterbatasan radar di wilayah udara Papua karena topografi dan jarak.
- (3) Pengumpulan data kualitatif dengan melakukan wawancara narasumber dari para pakar teknisi surveillance.
- (4) Simulasi dilakukan untuk memodelkan jangkauan Space-Based ADS-B terhadap daerah blank spot yang telah teridentifikasi.
- (5) Interpretasi dan Penyusunan Rekomendasi dengan cara menganalisis hasil pengukuran dan simulasi untuk menentukan kesiapan implementasi teknologi Space-Based ADS-B di Indonesia. Rekomendasi disusun berdasarkan hasil evaluasi teknis dan analisis kualitatif.

Penentuan Parameter

Penelitian ini menggunakan sejumlah parameter untuk mengevaluasi kelayakan implementasi Space-Based ADS-B yaitu : (1) Luas Wilayah Indonesia: Menggunakan data (2) luas geografis untuk menentukan kebutuhan cakupan layanan. Volume Ruang Udara: Menghitung total volume ruang udara untuk menentukan kebutuhan layanan teknologi ini.

Output Penelitian

Hasil akhir dari penelitian ini adalah evaluasi kesiapan implementasi Space-Based ADS-B di Indonesia. Evaluasi ini mencakup identifikasi daerah blank spot, kelayakan teknis pemasangan, dan rekomendasi untuk optimalisasi layanan ruang udara nasional. Secara rinci, output penelitian mencakup:

- 2.1.1. Identifikasi Daerah Blank Spot. Penelitian ini menghasilkan peta wilayah udara Indonesia yang mengidentifikasi area-area blank spot, yaitu daerah yang tidak terjangkau oleh radar dan ADS-B berbasis darat. Informasi ini mencakup lokasi geografis, luas wilayah blank spot, serta kualitas sinyal di area tersebut berdasarkan pengukuran menggunakan tool RASS.
- 2.1.2. Analisis kelayakan implementasi Space-Based ADS-B di Indonesia mencakup evaluasi spesifikasi teknis—terutama jangkauan sinyal—terhadap kondisi geografis dan kebutuhan ruang udara. Kajian meliputi aspek teknis, ekonomis, dan operasional, serta dampaknya terhadap efisiensi, keselamatan penerbangan, perluasan cakupan pengawasan, dan pengurangan risiko keterlambatan.
- 2.1.3. Perbandingan dengan Implementasi di Negara Lain. Penelitian ini juga menghasilkan komparasi antara implementasi Space-Based ADS-B di negara-negara yang telah mengadopsinya dengan potensi implementasi di Indonesia. Hasil ini menunjukkan kelebihan dan kekurangan penerapan teknologi ini di negara-negara lain, yang kemudian dijadikan acuan untuk memitigasi tantangan serupa di Indonesia.
- 2.1.4. Simulasi Cakupan Teknologi Space-Based ADS-B. Penelitian ini memberikan hasil simulasi jangkauan sinyal Space-Based ADS-B terhadap wilayah blank spot yang telah

teridentifikasi. Simulasi ini membantu menggambarkan bagaimana teknologi ini mampu mengatasi keterbatasan radar dan ADS-B berbasis darat, terutama di wilayah terpencil, lautan, dan area dengan kondisi geografis yang sulit dijangkau.

2.1.5. Rekomendasi implementasi Space-Based ADS-B di Indonesia mencakup aspek strategis, dengan prioritas pada wilayah yang memiliki tingkat urgensi tinggi dan cakupan blank spot yang luas. Implementasi dilakukan secara bertahap, dimulai dari instalasi perangkat keras, pelatihan sumber daya manusia, hingga penyesuaian regulasi. Diperlukan pula infrastruktur pendukung seperti pusat kendali dan sistem pemrosesan data satelit. Penerapan yang tepat diharapkan meningkatkan efisiensi navigasi udara, keselamatan penerbangan, serta optimalisasi rute penerbangan nasional.

2.1.6. Implementasi teknologi Space-Based ADS-B memberikan manfaat jangka panjang yang signifikan bagi pengelolaan ruang udara Indonesia. Teknologi ini meningkatkan keamanan dan efisiensi penerbangan di seluruh wilayah, termasuk area terpencil yang sebelumnya sulit dijangkau oleh sistem pemantauan konvensional. Selain itu, Space-Based

ADS-B memperkuat pengawasan terhadap aktivitas penerbangan ilegal, sehingga meningkatkan kontrol dan kedaulatan wilayah udara nasional. Dengan rute penerbangan yang lebih efisien, teknologi ini juga berkontribusi pada optimalisasi pengelolaan ruang udara, mengurangi konsumsi bahan bakar, serta meningkatkan ketepatan waktu penerbangan. Lebih jauh, implementasi sistem ini mendukung Indonesia dalam menjadi salah satu negara dengan teknologi pengelolaan ruang udara modern yang diakui secara internasional, memperkuat posisi strategis dalam industri penerbangan global.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sukses Faktor Dalam Pemanfaatan Space Based ADS-B

Pembahasan ini disusun melalui beberapa tahapan strategis yang dirancang untuk menggali secara mendalam faktor-faktor kunci kesuksesan dalam pemanfaatan Space-Based ADS-B, yaitu:

Study Literatur :

Mengumpulkan sumber data dari document Aireon, Manual Topsky ATC System, Jurnal Ilmiah dan study case .

Dokument Aireon

Berdasarkan dokumen dari Aireon dapat dijelaskan spesifikasi Space Based Sistem

Space-Based ADS-B Aireon memiliki beberapa parameter teknis utama:

Tabel 5. Spesifikasi Teknis Space Based ADS-B

Parameter	Nilai
Frekuensi Operasional	1090 MHz Extended Squitter (1090ES)
Konstelasi Satelit	66 satelit Iridium NEXT
Interval Pembaruan Data	Setiap 8 detik
Format Data	ASTERIX CAT021
Akurasi Posisi	Menggunakan GNSS resolusi tinggi
Kecepatan Transmisi Data	660.8 bps per target
Keamanan Data	Enkripsi berbasis protokol VPN

Tabel 6. ATM Performance

Parameter	Procedural	ADS-C	SSR	ADS-B Ground Station	Aireon
Avionics	HF for Pilot Position Reports	FANS 1/A	Mode S or ATCRBS Transponder	1090ES ADS-B (DO-260 versions 0, 1, 2)	1090ES ADS-B (DO-260 versions 0, 1, 2)
Range	Varies	1300 NM	200 NM (varies with altitude)	200 NM (varies with altitude)	1100 NM

System Coverage	HF Coverage Areas	No Polar / Subscribed Only	Line of Sight Limitation	Line of Sight Limitation	Continuous Global Coverage
Availability	< 98%	≥ 99.9%	≥ 99.9%	same	≥ 99.9%
Latency	~ 400 seconds	RSP 180:	≤ 1.5s to the ATM Automation Platform	Same	≤ 1.5s to the ATM Automation Platform
Update Interval	30-60 minutes	~14 minutes	< 8 – 12s	< 8s	< 8s*
Possible Separation	≥ 80 / 100 NM	≥ 30 / 45 NM	En Route: 5NM	En Route: 5NM	Oceanic: ≤ 15NM, Terrestrial En Route: 5NM

Tabel 7. Performance Requirements

Parameter	ATS Surveillance Requirements (EUROCAE)	Aireon
Surveillance Data-link Requirements	Variable Per Region (DO-260 Version 0, 1, 2)	Accepts all 1090ES ADS-B (DO-260 Versions 0, 1, 2)
Data Format to Customer	ASTERIX CAT021, CAT023, CAT025, FAA CAT033, CAT023	ASTERIX CAT021, CAT023, CAT025, FAA CAT033, CAT023, or through business system
Availability	≥ 99.9%	≥ 99.9%
Update Interval	≤ 8s at 95%	Guaranteed at a UI of ≤ 8s* at 95% (ATS surveillance) or API definable by non-ANSP customer

Thales TopSky-ATC (sumber: manual ATC system MATSC)

Spesifikasi Interface ADS-B ground station to TopSky-ATC Sistem komunikasi ADS- B dideskripsikan berdasarkan model referensi Open System Interconnection (OSI) yang terdiri dari tujuh lapisan dapat dilihat di tabel 8.

Tabel 8. Open System Interconnection (OSI)

Layer OSI	Protokol	Deskripsi
Layer 7-6	Asterix Standard	Format data ADS-B
Layer 5	Tidak ada	Tidak digunakan
Layer 4	UPD (RFC 768)	Protokol transportasi data
Layer 3	Ipv4, Multicast, ICMP, ARP, IGMPv2	Protokol jaringan
Layer 2	MAC (ISO/IEC 8802-3)	Data Link
Layer 1	Fast Ethernet (ISO/IEC 8802-3u)	100 Mbps RJ45

Sumber: Manual book ATC system MATSC

Tabel 9. Struktur Struktur Data ASTERIX 021

FRN	Data Item	Deskripsi	Wajib ?
1	1021/010	Data Source Identifier	Y
2	1021/040	Target Deskripsi	Y
3	1021/030	Time of Day	Y
4	1021/130	Position (WGS-84)	Y
5	1021/080	Target address	Y

6	1021/140	Geometric Altitude	U
7	1021/090	Figure of merit	Y
8	1021/210	Link Teknologi	U
9	1021/230	Roll Angle	U
10	1021/145	Flight level	U

(Catatan “Y” = wajib, “U”) = Opsional untuk penggunaan di masa depan

Study kasus dari negara-negara yang sudah menerapkan Space Based ADS-B.

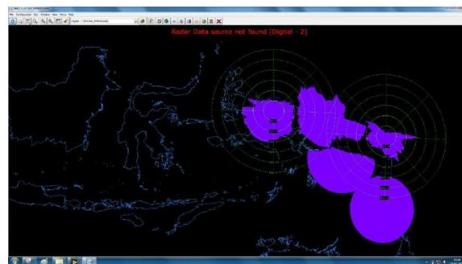
Tabel 11. Studi kasus

No	Faktor Sukses	Filipina (CAAP - Manila FIR) https://aireon.com/civil-aviation-authority-of-the-philippines-to-use-aireon-data-for-air-traffic-surveillance/	Prancis (DSNA - Cayenne FIR) https://aireon.com/frances-dsna-to-use-aireons-space-based-ads-b-data-for-cayenne-fir/	Papua Nugini (NSPL - Port Moresby FIR) https://aireon.com/papua-new-guinea-renews-contract-with-aireon-for-space-based-ads-b/
1.	Dukungan Regulasi	CAAP memiliki regulasi yang mendukung transformasi sistem pengawasan udara dengan mengadopsi teknologi baru secara cepat.	DSNA bekerja dengan standar Eropa yang memastikan regulasi yang selaras dengan ICAO dan ANSP lainnya.	NSPL telah mengadopsi regulasi berbasis layanan yang memungkinkan efisiensi operasional dengan Aireon sejak 2020.
2	Infrastruktur & Teknologi	Sistem ATM modern memungkinkan integrasi ADS-B berbasis satelit dengan ATC yang sudah ada.	Sebelumnya telah menggunakan ADS-B ground-based, sehingga transisi ke ADS-B berbasis satelit lebih mudah dilakukan.	NSPL telah menggunakan ADS-B satelit selama 4 tahun, dengan sistem ATC yang kompatibel.
3	Kebutuhan Operasional	Manila FIR memiliki 3 juta km ² , termasuk wilayah samudra yang sulit diawasi dengan radar darat.	Cayenne FIR memiliki 2,8 juta km ² , dengan area laut yang luas dan berbatasan dengan FIR yang sudah menggunakan ADS-B satelit.	Port Moresby FIR mencakup 1,6 juta km ² dengan medan pegunungan ekstrem yang sulit dijangkau dengan radar darat.
4	Kerja Sama dengan Aireon	Mengadopsi data Aireon untuk meningkatkan efisiensi & keselamatan, mengikuti langkah negara maju seperti Singapura & India.	DSNA bekerja sama dengan Aireon & ANSP lain (ASECNA, COCESNA, DC-ANSP, Nav Portugal) untuk memastikan integrasi regional yang baik.	NSPL merupakan pengadopsi awal teknologi Aireon, menjadikannya contoh sukses dalam penggunaan ADS-B berbasis satelit di wilayah Pasifik.
5	Peningkatan Keselamatan & Efisiensi	Visibilitas penuh di atas samudra memungkinkan kontrol yang lebih baik atas lalu lintas domestik & internasional.	Pengurangan pemisahan pesawat di rute trans-Atlantik Selatan meningkatkan kapasitas dan efisiensi lalu lintas udara.	Real-time monitoring dari ground hingga 60.000 kaki membantu meningkatkan pemisahan pesawat yang lebih aman.
6	Keuntungan Ekonomi & Keberlanjutan	Efisiensi bahan bakar dan reduksi pemisahan pesawat memberikan manfaat ekonomi bagi maskapai.	Implementasi pencarian & penyelamatan berbasis satelit (Aireon Locate) meningkatkan keamanan di area terpencil.	Mengurangi biaya infrastruktur radar darat, yang sulit dipasang di wilayah berbukit dan beriklim ekstrem.

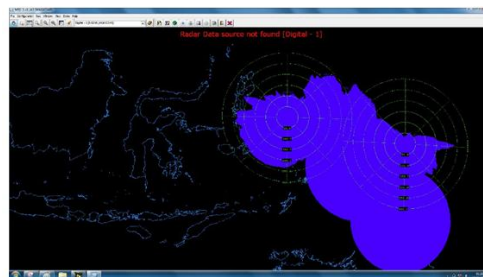
7	Best Practice	Belajar dari negara-negara tetangga seperti Singapura & India dalam adopsi ADS-B berbasis satelit.	Memanfaatkan pengalaman Eropa & Amerika Utara dalam mengoptimalkan sistem ATC dengan teknologi terbaru.	NSPL menjadi studi kasus terbaik di Pasifik, karena sukses memanfaatkan ADS-B satelit di darat & lautan.
---	---------------	--	---	--

Identifikasi area blank spot

Identifikasi area blank spot di ruang udara Papua menggunakan RASS-R dengan menggunakan aplikasi CMC dan memetakan wilayah udara Papua yang membutuhkan layanan sapace based. Pada hasil groundcheck tersebut dapat ditemukan beberapa area yang tidak tercover oleh surveillance, otomatis pesawat yang melewati di area tersebut tidak mendapatkan pelayanan surveillance bisa dikatakan pelayanan tidak optimal.



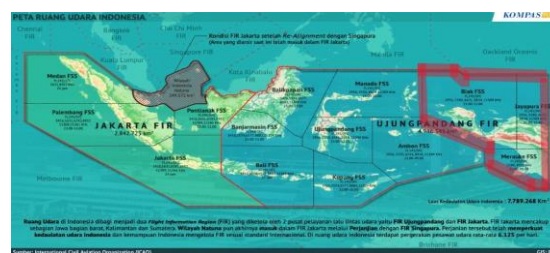
Gambar 10. Coverage ADS-B FL 150



Gambar 11. Coverage ADS-B FL 350

Data FIR Makassar

Hasil dari analisis data FIR Indonesia dapat diperoleh batasan wilayah ruang udara Upper Papua dapat dilihat pada gambar 4.3. Dari analisis ini, diidentifikasi wilayah Papua yang membutuhkan optimalisasi layanan pemantauan udara melalui Space-Based ADS-B.



Gambar 12. Indonesia Flight Information Region (FIR) Wilayah Upper Papua

Kesiapan Penerapan Teknologi Space-Based ADS-B

Dalam mendukung kesiapan penerapan teknologi Sapce-Based ADS-B dilakukan metode kualitatif dengan wawancara ke narasumber. Wawancara dari narasumber Bpk. D.I selaku pakar sureveillance yang saat ini menjabat sebagai Assistant Vice President of Surveillance Facility Planning di kantor Pusat AirNav Indonesia. Berikut hasil wawancara dari narasumber:

Tabel 12. Hasil wawancara

Aspek	Hasil Wawancara
Prinsip Kerja Space-Based ADS-B	Teknologi Space-Based ADS-B beroperasi dengan menangkap sinyal transponder pesawat pada frekuensi 1090 MHz melalui satelit Low Earth Orbit (LEO). Data tersebut dikirim ke server penyedia layanan sebelum diteruskan ke Air Traffic Control (ATC) di Indonesia. Berbeda dengan ADS-B Ground Station, sistem ini tidak bergantung pada infrastruktur darat.
Faktor Penyebab Blank Spot di Papua	Wilayah Papua memiliki medan geografis yang menantang, seperti pegunungan tinggi dan hutan lebat, yang menghambat propagasi sinyal radar dan ADS-B berbasis darat. Keterbatasan infrastruktur, seperti listrik dan akses transportasi, juga menjadi kendala utama dalam pemasangan Ground Station.
Keunggulan Teknologi Space-Based ADS-B	Space-Based ADS-B mampu mengatasi keterbatasan topografi karena sinyal transponder pesawat langsung diterima oleh satelit tanpa terhalang gunung atau faktor geografis lainnya. Teknologi ini memungkinkan cakupan pengawasan hampir 100%, meningkatkan keselamatan dan efisiensi lalu lintas udara.
Akurasi dan Keandalan Data	Akurasi data Space-Based ADS-B sebanding dengan ADS-B Ground Station, karena posisi pesawat ditentukan oleh Flight Management System (FMS) di dalam pesawat. Namun, terdapat latensi dalam transmisi data, meskipun masih dalam batas toleransi operasional.
Integrasi dengan Sistem Manajemen Lalu Lintas Udara	Data dari Space-Based ADS-B dikirim melalui Service Delivery Point (SDP) yang tersedia di Indonesia
Kendala Implementasi	1. Biaya operasional tinggi, karena hanya ada satu penyedia layanan, yaitu Aireon. 2. Belum adanya regulasi nasional yang mengatur pemanfaatan Space-Based ADS-B. 3. Infrastruktur komunikasi dan jaringan yang masih perlu ditingkatkan agar sistem berjalan optimal.
Keamanan Data dan Sistem	Data Space-Based ADS-B dikirim melalui server internasional, sehingga memerlukan sistem keamanan yang kuat untuk mencegah ancaman siber. SDP yang digunakan telah dilengkapi dengan firewall, namun regulasi terkait perlindungan data masih perlu diperjelas.
Kesiapan Sumber Daya Manusia (SDM)	SDM perlu dilatih dalam pengelolaan data dari SDP, konfigurasi sistem, serta troubleshooting perangkat. Saat ini, SDP belum dikelola langsung oleh AirNav Indonesia, sehingga diperlukan mekanisme kerja sama yang jelas antara AirNav dan penyedia layanan.
Rekomendasi Implementasi	1. Menyusun regulasi nasional yang mendukung pemanfaatan Space-Based ADS-B. 2. Melakukan analisis biaya dan manfaat (cost-benefit analysis) sebelum investasi. 3. Meningkatkan infrastruktur komunikasi, terutama dengan menambahkan SDP di wilayah Papua. 4. Memastikan keamanan data dan jaringan melalui penguatan regulasi dan sistem pemantauan. 5. Melakukan pelatihan SDM agar dapat mengelola sistem Space-Based ADS-B secara mandiri.

Kesimpulan	Implementasi Space-Based ADS-B berpotensi meningkatkan efisiensi pengawasan lalu lintas udara, khususnya di wilayah blank spot seperti Papua. Namun, terdapat beberapa tantangan, seperti biaya operasional tinggi, keterbatasan regulasi, serta infrastruktur komunikasi yang masih perlu dikembangkan. Oleh karena itu, strategi yang matang dan dukungan penuh dari regulator serta pemangku kepentingan diperlukan agar teknologi ini dapat diimplementasikan secara optimal.
------------	---

Hasil Analisis Data Penelitian

Dari triangulasi data yang menggabungkan studi literatur, analisis RASS, data geospasial, dokumentasi, dan wawancara, diperoleh beberapa hasil analisis yaitu :

Space Based ADS-B

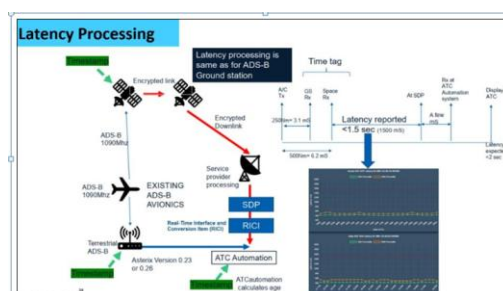
Cara kerja Space Based ADS-B. Pesawat memancarkan sinyal ADS-B yang mengandung data seperti: Posisi GPS, Ketinggian dan kecepatan, Heading dan track angle, Nomor registrasi pesawat, Status penerbangan (on-ground/in-flight). Sinyal ini ditangkap oleh satelit Low Earth Orbit (LEO) yang menangkap sinyal ADS-B di seluruh dunia. Satelit meneruskan data ADS-B mentah ke stasiun bumi untuk diproses lebih lanjut. Pengiriman data ke Aireon Preprocessing and Distribusi (APD). Data ADS-B yang diterima oleh satelit dikirim ke APD yaitu data dari berbagai satelit, memfilter sinyal ADS-B yang tidak lengkap, dan menyesuaikan waktu penerimaan data (timestamp synchronization).

Pemrosesan Data dalam Service Delivery Point (SDP), Setelah melewati APD, data dikirim ke SDP yang bertugas memfilter, mengonversi, dan mendistribusikan data yang siap digunakan oleh pengguna. Data Cleaning & Filtering berfungsi untuk menghapus data yang tidak valid akibat gangguan sinyal atau interferensi dan menggabungkan data dari beberapa sumber (satelit berbeda) untuk mendapatkan informasi pesawat yang lebih akurat.

Validasi Data (Integrity Check & Synchronization) berfungsi untuk memeriksa keakuratan informasi yang diterima menggunakan algoritma verifikasi dan melakukan sinkronisasi waktu (time-stamping) dengan menyesuaikan data ADS-B ke dalam zona waktu yang sama. Data Conversion & Formatting dalam Modul RICI berfungsi untuk mengonversi format data ke dalam standar yang dibutuhkan sistem ATC dan menggunakan protokol ASTERIX (All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange) untuk menyajikan data dalam format standar dunia penerbangan. Format Data yang Digunakan dalam SDP dikonversi menjadi ASTERIX Category 21.

Setelah diproses dan diformat dengan benar, data dikirim ke sistem otomasi ATC melalui jaringan yang aman. Dengan adanya firewall dan konversi data sebelum masuk ke sistem otomatisasi, keamanan dan integritas data tetap terjaga. Data ini digunakan untuk menampilkan posisi pesawat di radar monitor ATC otomation sehingga dapat mencegah tabrakan pesawat udara dengan memprediksi jalur pesawat dan mengelola lalu lintas udara secara efisien.

Proses latency dalam pemrosesan data ADS-B (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast) digunakan dalam sistem pengawasan penerbangan. Pengiriman data dari pesawat dengan sinyal ADS-B pada frekuensi 1090 MHz. Data ini dikirim melalui dua jalur utama: terrestrial ADS-B (via ground station) dan satelit (via encrypted link). Data yang dikirim melalui satelit dienkripsi sebelum diteruskan melalui encrypted downlink ke penyedia layanan. Penyedia layanan melakukan pemrosesan data sebelum dikirim ke SDP (Service Delivery Point). Data dari satelit maupun ADS-B terrestrial diproses oleh Real-Time Interface and Conversion Item (RICI).

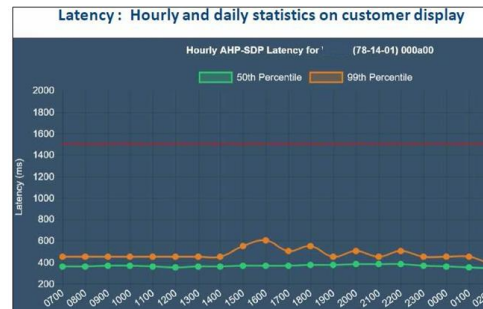


Gambar 13. Proses pengolahan latency

Pada gambar 13 Diagram waktu di bagian atas gambar menunjukkan tahapan waktu yang dibutuhkan dalam beberapa bagian proses, termasuk:

- 3,1 milisecond untuk transmisi 250 nautical miles (Nm).
- 6,2 milisecond untuk transmisi 500 Nm.
- Beberapa milisecond tambahan di SDP dan sistem otomatisasi ATC.

Hasil akhir menunjukkan latency kurang dari 1,5 detik (1500 ms), di bawah ambang batas latency yang diharapkan, yaitu kurang dari 2 detik.



Gambar 14. Grafik Latency Sumber : Aireon

Dengan sistem enkripsi dan pemrosesan berkecepatan tinggi melalui SDP dan RIC1, data dapat diteruskan ke ATC dalam waktu kurang dari 2 detik, memastikan keakuratan dan keandalan dalam pengawasan lalu lintas udara.

Topsky ATC System di MATSC (Makassar Air Traffic Service Center)

Berdasarkan dokumen MATSC ADS-B ICD menyebutkan bahwa sistem TopSky-ATC System menerima data ADS-B dari stasiun ground dengan format ASTERIX CAT021 dan berkomunikasi melalui UDP/IP multicast. Parameter utama ADS-B dalam Topsky dapat dilihat di tabel 13.

Tabel 13. Parameter utama Topsky

Parameter	Nilai
Protokol Data	ASTERIX CAT 021
Interval Pembaruan Data	Setiap 8 detik
Akurasi Posisi	Berdasarkan GNSS resolusi tinggi
Kecepatan Transmisi Data	660.8 bps per target
Bandwith Minimum	1 Mbps
Keamanan Data	Enkripsi berbasis protokol VPN
Jenis Pesan	1000 pesan/detik dalam format biner

Kesesuaian Space-Based ADS-B Aireon untuk di MATSC

Berdasarkan data spesifikasi Space Based ADS-B dan ATC system yang ada di MATSC dapat disimpulkan dalam tabel 14.

Tabel 14. Kesiapan integrasi ke ATC System

Parameter	Nilai
Kompatibilitas Format Data	Sistem MATSC menggunakan ASTERIX CAT021 format data sama dengan Space-Based ADS-B
	Tidak memerlukan konversi data, sehingga integrasi dapat dilakukan dengan mudah.
Integrasi Jaringan dan transportasi data	MATSC menggunakan UDP/IP multicast, yang didukung oleh Aireon.
	MATSC memiliki alokasi port 50000 untuk ADS-B, sementara Aireon dapat dikonfigurasi untuk mendukung port yang sama.

Keamanan dan Enkripsi	Mbps Aireon menggunakan enkripsi VPN berbasis IPsec, yang dapat disesuaikan dengan standar keamanan MATSC.
Latensi dan Kecepatan Pembaruan	Aireon memiliki latensi <2 detik, yang lebih cepat dibandingkan beberapa sistem ground-based.
Jenis Pesan Integrasi Jaringan dan Transportasi Data	Update posisi pesawat setiap 8 detik atau kurang, sesuai dengan kebutuhan ATC.

Analisis hasil wawancara oleh pakar teknik surveillance

Berdasarkan hasil wawancara dengan pakar teknik surveillance oleh Bapak Dedy Iskandar, terdapat beberapa faktor sukses dalam mengatasi Area Blank Spot di wilayah Papua dan kesiapan pemanfaatan pengimplementasian Sapce Based ADS-B.

Faktor Penyebab Blank Spot di Papua memiliki tantangan geografis yang kompleks dengan medan hutan yang sulit, pegunungan tinggi, serta keterbatasan infrastruktur seperti akses jalan dan listrik. Kondisi ini membuat pemasangan sistem pengawasan berbasis darat (ground-based surveillance) menjadi sulit dan mahal. Banyak area yang tidak dapat terjangkau oleh radar konvensional maupun ground-based ADS-B karena adanya hambatan topografi.

Keunggulan Teknologi Space-Based ADS-B menawarkan solusi efektif untuk mengatasi blank spot di Papua. Teknologi ini memungkinkan sinyal dari pesawat diterima langsung oleh satelit tanpa terhalang oleh hambatan geografis. Hal ini memastikan cakupan pengawasan yang lebih luas dibandingkan sistem berbasis darat.

Dari segi akurasi, Space-Based ADS-B setara dengan ADS-B ground-based karena posisi pesawat ditentukan oleh Flight Management System (FMS) di pesawat itu sendiri. Satu perbedaan utama terletak pada latensi data yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan ground-based ADS-B, tetapi masih dalam batas toleransi yang diizinkan oleh regulasi internasional. Beberapa langkah yang perlu dilakukan agar implementasi Space-Based ADS-B berjalan optimal di Papua, antara lain:

Tabel 15. Langkah-langkah Implementasi

No	Aspek	Langkah yang diperlukan
1	Penyusunan Regulasi	Membuat kebijakan nasional untuk mendukung implementasi ADS-B Space-Based.
2	Integrasi dengan ATM System	Menerapkan ADS-B Space-Based untuk upper airspace di Jakarta dan Makassar FIR, serta mengembangkan integrasi untuk lower airspace di Papua.
3	Studi dan Evaluasi Biaya	Melakukan kajian cost-benefit analysis untuk menilai efisiensi biaya dan keuntungan operasional.
4	Pelatihan SDM	Menyediakan pelatihan bagi tenaga ahli untuk mengelola data dari Service Delivery Point (SDP) dan melakukan pemeliharaan sistem.

Studi Kasus dan Pembelajaran dari Negara Lain menurut narasumber Bpk. Dedy Iskandar beberapa negara telah mengadopsi Space-Based ADS-B dengan berbagai hasil:

Tabel 16. Study Kasus Negara lain

No	Negara	Uraian
1	Singapura	Menggunakan Space-Based ADS-B karena keterbatasan lahan untuk pemasangan fasilitas ground-based.
2	Papua Nugini	Mengadopsi sistem ini karena kondisi geografisnya yang mirip dengan Papua, yaitu hutan lebat dan daerah terpencil.
3	Amerika Serikat	Meskipun telah melakukan uji coba, mereka tidak mengadopsi sistem ini karena pertimbangan biaya yang tinggi dan ketersediaan infrastruktur ground-based yang sudah memadai.

Beberapa tantangan utama yang dihadapi dalam implementasi Space-Based ADS-B di Papua meliputi:

Tabel 17. Tantangan Utama dalam implementasi Space-Based ADS-B

No	Aspek	Deskripsi
1	Regulasi yang Belum Siap	ICAO regional Asia-Pasifik belum memiliki standar teknis yang spesifik untuk sistem ini.
2	Biaya yang Tinggi	Biaya operasional yang dibebankan kepada AirNav menjadi tantangan tersendiri, mengingat biaya penggunaan Space-Based ADS-B dihitung per sektor dan per pesawat.
3	Keterbatasan Kompetitor	Saat ini, hanya satu penyedia layanan Space-Based ADS-B di dunia, yaitu Aireon, sehingga tidak ada alternatif lain dalam proses pengadaan.

Study kasus dari negara negara-negara yang sudah menerapkan Sapce-Based ADS-B

Berdasarkan studi kasus dari negara-negara yang telah berhasil mengimplementasikan Space-Based ADS-B, seperti Filipina, Prancis, dan Papua Nugini, terdapat beberapa faktor

utama yang berkontribusi terhadap kesuksesan adopsi teknologi ini dalam pengawasan lalu lintas udara.

Dukungan Regulasi dan Kebijakan Pemerintah Keberhasilan implementasi Space- Based ADS-B sangat dipengaruhi oleh dukungan regulasi yang kuat dari otoritas penerbangan sipil di masing-masing negara. Keberhasilan implementasi Space-Based ADS-B juga ditentukan oleh kesiapan infrastruktur dan sistem manajemen lalu lintas udara yang telah dimodernisasi. Kebutuhan Operasional dan Efisiensi Pengawasan Udara. Setiap negara yang mengadopsi Space-Based ADS-B memiliki tantangan geografis dan kebutuhan operasional yang unik, yang menjadikan teknologi ini sebagai solusi yang optimal.

Keberhasilan adopsi Space-Based ADS-B juga bergantung pada kerja sama dengan penyedia layanan satelit seperti Aireon. dampak terhadap keselamatan dan efisiensi operasional implementasi Space-Based ADS-B memberikan keuntungan signifikan dalam keselamatan dan efisiensi lalu lintas udara. Aspek ekonomi dan keberlanjutan dari segi ekonomi adopsi teknologi Space-Based ADS-B memberikan manfaat dalam efisiensi bahan bakar, pengurangan pemisahan pesawat, serta penghematan biaya infrastruktur radar darat.

Hasil Empiris

Gambaran Umum Pemanfaatan Space-Based ADS-B

Teknologi Space-Based Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) merupakan sistem pengawasan lalu lintas udara yang memungkinkan pesawat untuk mengirimkan informasi posisi, kecepatan, dan arah penerbangan langsung ke satelit. Teknologi ini menjadi solusi untuk mengatasi keterbatasan radar konvensional dan ADS-B ground-based, terutama di wilayah dengan medan yang sulit seperti Papua.

Indonesia memiliki wilayah udara yang luas, dengan banyak area yang sulit dijangkau oleh sistem pengawasan konvensional. Blank spot dalam pengawasan lalu lintas udara masih menjadi tantangan, terutama di daerah pegunungan dan perairan yang luas. Oleh karena itu, implementasi ADS-B Space-Based diharapkan dapat meningkatkan keselamatan dan efisiensi layanan navigasi udara. Dari hasil data yang dikumpulkan keunggulan Space Based ADS-B dengan Ground station ADS-B dapat dilihat pada tabel 18.

Tabel 18. Perbedaan Space-Based ADS-B dengan Ground Station ADS-B

Keunggulan	Space-Based ADS-B	Ground Station ADS-B
Cakupan Wilayah	Global, mencakup seluruh dunia, termasuk lautan dan daerah terpencil.	Terbatas pada area yang memiliki infrastruktur ground station.
Hambatan Geografis	Tidak terpengaruh oleh pegunungan, hutan, atau medan geografis lainnya.	Cakupan dapat terhalang oleh gunung, bangunan, atau kondisi geografis lainnya.

Infrastruktur	Tidak memerlukan pembangunan stasiun darat di lokasi sulit dijangkau.	Membutuhkan ground station di berbagai lokasi, termasuk daerah terpencil
Biaya Operasional	Lebih rendah dalam jangka panjang karena tidak ada pemeliharaan fisik di lokasi darat.	Lebih tinggi karena membutuhkan pemeliharaan dan perawatan ground station..
Keandalan	Tidak tergantung pada infrastruktur darat yang bisa rusak atau mengalami gangguan.	Bergantung pada kondisi dan pemeliharaan ground station.
Monitoring pesawat di Laut & Daerah remote respon waktu nyata	Bisa melacak pesawat di atas laut dan wilayah terpencil.	Tidak bisa mencakup wilayah lautan atau daerah tanpa ground station.

Faktor Penyebab Blank Spot dalam Pengawasan Lalu Lintas Udara

Hasil penelitian menunjukkan beberapa faktor utama penyebab blank spot di Papua: (1) Kondisi geografis berupa medan yang kompleks, seperti pegunungan tinggi, menghambat propagasi sinyal radar dan ADS-B berbasis darat; (2) Terbatasnya infrastruktur, seperti akses listrik dan jaringan komunikasi yang minim, menyulitkan pembangunan stasiun darat; dan (3) Faktor keamanan, di mana ketidakstabilan di beberapa wilayah meningkatkan risiko gangguan atau kerusakan fasilitas pengawasan berbasis darat dibandingkan solusi berbasis satelit. Dari permasalahan tersebut, Space-Based ADS-B menjadi solusi karena tidak bergantung pada infrastruktur darat dan dapat menerima sinyal langsung dari pesawat melalui satelit, sehingga mampu mengatasi kendala geografis dan keamanan.

Space-Based ADS-B unggul dibanding sistem berbasis darat dalam hal cakupan dan efisiensi. Satelit mampu menjangkau wilayah luas tanpa terhalang topografi, mengeliminasi kebutuhan pembangunan ground station di area terpencil. Sistem ini juga lebih efisien secara infrastruktur dan biaya, dengan operasional jangka panjang yang minim pemeliharaan fisik.

Akurasi dan Keandalan Data informasi posisi pesawat ditentukan langsung oleh Flight Management System (FMS) di dalam pesawat, sehingga memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Tidak ada perbedaan signifikan dalam akurasi antara ADS-B ground-based dan Space-Based, karena sumber datanya sama. Latensi yang Masih dalam Batas Regulasi masih berada di bawah batas toleransi ICAO (< 2000 ms). Dalam uji coba sebelumnya, latensi sekitar 1000 ms, yang masih dalam batas aman untuk digunakan dalam manajemen lalu lintas udara.

Tantangan dalam Implementasi Space-Based ADS-B di Indonesia

Meskipun memiliki banyak keunggulan, terdapat beberapa tantangan dalam implementasi ADS-B Space-Based di Indonesia. Belum Adanya regulasi penggunaan Space- Based ADS-B di Indonesia masih belum tersedia. ICAO regional Asia Pasifik juga belum menetapkan standar teknis yang spesifik terkait implementasi sistem ini. Biaya Implementasi layanan ADS-B Space-Based cukup mahal, dan saat ini hanya Aireon yang menyediakan layanan tersebut tanpa kompetitor. Perlu kajian cost-benefit sebelum diimplementasikan secara luas di Indonesia. Integrasi dengan Sistem Navigasi Udara yang Ada Sistem manajemen lalu lintas udara harus mampu mengakomodasi data dari Space-Based ADS-B tanpa mengganggu operasional yang sudah ada.

Kesiapan Sumber Daya Manusia (SDM)

Diperlukan pelatihan teknis bagi personel teknis untuk mengelola dan menganalisis data dari ADS-B Space-Based. Kerja sama dengan negara-negara yang telah menerapkan sistem ini perlu dilakukan untuk memperoleh best practice dalam implementasi.

Rekomendasi Implementasi Space-Based ADS-B di Indonesia

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa rekomendasi agar implementasi Space-Based ADS-B di Indonesia dapat berjalan dengan baik: (1) Menyusun Regulasi yang mendukung agar implementasi dapat dilakukan secara legal dan sesuai dengan standar internasional. (2) Melakukan Kajian Biaya dan Manfaat untuk memastikan bahwa investasi ini memberikan manfaat yang sebanding dengan biaya yang dikeluarkan. (3) Meningkatkan Kesiapan SDM harus diberikan kepada personel yang akan mengelola dan memelihara sistem.

Menjalin Kerjasama dengan Regulator dan maskapai perlu dilakukan agar sistem ini dapat diadopsi secara luas tanpa kendala teknis.

SIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain : (1) Keberhasilan pemanfaatan Space-Based ADS-B ditentukan oleh dukungan regulasi, dan kesiapan infrastruktur ATM. Implementasi yang optimal memerlukan integrasi sistem ATC, dukungan ekonomi, dan penerapan best practice dari negara yang telah sukses mengadopsi teknologi ini.

(2) Teknologi ini mampu mengatasi blank spot untuk optimalisasi pengawasan ruang udara Papua. Kesiapannya diperlukan regulasi nasional, peningkatan infrastruktur komunikasi, serta pelatihan SDM agar mampu mengelola sistem secara mandiri.

SARAN

Saran yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain : (1) Pemerintah dan AirNav Indonesia perlu merancang kebijakan regulasi yang mengakomodasi penerapan Space-Based ADS-B. (2) Program pelatihan bagi teknisi dalam menjaga performance perangkat dari Space-Based ADS-B.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, T., Hendra, O., & Aziz, M. R. K. (2024). Blank spot area analysis using ADS-B framework: An Indonesia international airport case study. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 39(8), 4–17.
- Ahmed, H., Khan, H., & Khan, M. A. (2023). A survey on security and privacy of Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) protocol: Challenges, potential solutions and future directions. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.23535726.v1>
- Aireon LLC. (2024, Desember 5). Civil Aviation Authority of the Philippines to use Aireon data for air traffic surveillance. Aireon. <https://aireon.com/civil-aviation-authority-of-the-philippines-to-use-aireon-data-for-air-traffic-surveillance/>
- Aireon LLC. (2024, Desember 5). France's DSNA to use Aireon's space-based ADS-B data for Cayenne FIR. Aireon. <https://aireon.com/frances-dsna-to-use-aireons-space-based-ads-b-data-for-cayenne-fir/>
- Aireon LLC. (2020, November 27). Papua New Guinea renews contract with Aireon for space-based ADS-B. Aireon. <https://aireon.com/papua-new-guinea-renews-contract-with-aireon-for-space-based-ads-b/>
- Aireon. (2021). Space-Based ADS-B Overview. Aireon. AirNav Indonesia. (2012). Profil AirNav Indonesia.
- Baruta, I. (2018). Disruptive innovation in an institutionalized environment: Space-based ADS-B in the air traffic management industry. Retrieved
- Batubara, F. D., Gultom, R. A. G., & Bura, R. O. (2020). Desain konseptual integrasi sistem drone/UAV dan sensor radar pasif sebagai fungsi situasional blank spot filler sistem radar pertahanan udara (Studi: Satuan Radar 211 Tanjung Kait). *Jurnal Teknologi Penginderaan*, 2(1), 1–30.
- Creswell, J. W. (2010). *Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Dalimunthe, R. S. A. A. B., & Rosmayanti, L. (2024). Pengaruh Air Traffic Service Surveillance System terhadap pelayanan lalu lintas penerbangan di AirNav Indonesia Cabang Medan. *Jurnal Science and Social Research*, 7(4), 1664–1675.
- Diklatkerja. (2023). Tragedi Penerbangan Trigana Air Service 267: Kecelakaan Mematikan di Papua dan Tantangan Navigasi Udara. <https://www.diklatkerja.com/blog/tragedi-penerbangan-trigana-air-service-267-kecelakaan-mematikan-di-papua-dan-tantangan-navigasi-udara>
- Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2002). Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor SKEP/113/VI/2002 tentang Kriteria Penempatan Fasilitas Elektronika dan Listrik Penerbangan. Jakarta.
- Garcia, M. A., Dolan, J., & Hoag, A. (2017, April). Aireon's initial on-orbit performance analysis of space-based ADS-B. In 2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) (pp. 4A1-1–4A1-8). IEEE.

- <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2017.8011919>
- Hariato, B. (2019). Studi eksperimental penerima ADS-B menggunakan RTL 1090 dan RTL-SDR R820T2 di Bandara Juanda Surabaya. *Jurnal Penelitian*, 4(3), 20–28. <https://doi.org/10.46491/jp.v4e3.346.20-28>
- ICAO. (2021). Global Navigation Satellite System (GNSS) and Surveillance. International Civil Aviation Organization.
- International Civil Aviation Organization. (2014). Annex 10 - Aeronautical Telecommunications - Volume IV: Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems (Edisi ke-5). <https://store.icao.int/en/annex-10-aeronautical-telecommunications- volume-iv-surveillance-radar-and-collision-avoidance-systems>
- International Civil Aviation Organization. (2024). Annex 2: Rules of the Air (Edisi ke-11). <https://store.icao.int/en/annex-2-rules-of-the-air>
- INDOTIPIKOR. (2024). AirNav Indonesia sebagai satu-satunya BUMN pengelola layanan navigasi penerbangan di Indonesia.com.
- International Civil Aviation Organization. (2024). Annex 2: Rules of the Air (Edisi ke-11). <https://store.icao.int/en/annex-2-rules-of-the-air>
- International Civil Aviation Organization. (2019). Global Air Navigation Plan (Edisi ke-6). <https://www.icao.int/airnavigation/Pages/GANP.aspx>
- International Civil Aviation Organization. (2014). Annex 10 to the Convention on Aeronautical Telecommunications, Volume IV – Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems (5th ed.). Montreal, Canada: ICAO.
- International Civil Aviation Organization. (2018). Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications. ICAO.
- International Civil Aviation Organization. (2018). Annex 11 – Air Traffic Services (1st ed.). Montreal, Canada: ICAO.
- International Civil Aviation Organization. (2022, February). Global Aeronautical Distress and Safety System (GADSS) Virtual Workshop, 8–10 February.
- International Civil Aviation Organization. (2024). Annex 2 to the Convention on International Civil Aviation: Rules of the Air. Montreal, Canada: ICAO.
- Intersoft Electronics. (2021). Communication Blank Spot and Its Impact. Intersoft Electronics.
- Intersoft Electronics. (2021). Radar Analysis Support System (RASS) Overview. Intersoft Electronics.
- Intersoft Electronics. (2021). Radar Analysis Support System (RASS) for Sites. Intersoft Electronics.
- Intersoft Electronics. (2021). Radar Analysis Support System (RASS) Real-time Tools. Intersoft Electronics.
- Intersoft Electronics. (2023). Radar Analysis Support System (RASS) Technical Overview. <https://intersoft-electronics.com/rass-technical-overview>
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2013). Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 47 Tahun 2013 tentang Penyediaan Pelayanan Navigasi. Jakarta.