

EVALUASI PENERAPAN AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE-BROADCAST (ADSB) UNTUK EFISIENSI DAN KESELAMATAN PESAWAT DI CONTROL ZONE BANDARA INTERNASIONAL HUSEIN SASTRANEGARA, BANDUNG

Muhammad Nisar Maulana¹, Fatmawati Sabur², Julfansyah Margolang³
nomponisar@gmail.com¹, fatmawatisaburatkp@gmail.com², djoelfan@gmail.com³
Politeknik Penerbangan Makassar

ABSTRAK

Pengawasan lalu lintas udara di APP Bandung masih menggunakan metode prosedural tanpa radar, sehingga pemantauan pesawat hanya mengandalkan komunikasi suara dan aplikasi pihak ketiga seperti FlightRadar24 yang tidak sepenuhnya akurat. Kondisi ini menimbulkan gap dalam efektivitas pemantauan dan keselamatan penerbangan di wilayah non-radar, sehingga diperlukan teknologi pengawasan yang lebih andal seperti Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi penerapan ADS-B di APP Bandung selama masa uji coba, menganalisis kontribusinya terhadap efisiensi operasional dan keselamatan penerbangan, serta mengidentifikasi hambatan implementasi permanen. Penelitian ini menggunakan metode kualitatif deskriptif untuk menggambarkan kondisi faktual berdasarkan data dan informasi yang diperoleh dari lapangan. Teknik pengumpulan data meliputi dokumentasi, observasi langsung di unit APP Bandung, wawancara terstruktur dengan instrumen pertanyaan kepada personel ATC dan teknisi terkait, serta penyebaran kuesioner kepada personel operasional untuk memperoleh persepsi mereka terhadap efektivitas ADS-B. Analisis data dilakukan dengan langkah reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan untuk menjawab rumusan masalah penelitian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ADS-B selama uji coba meningkatkan akurasi pemantauan dan mempercepat pengambilan keputusan ATC, meskipun tingkat peningkatannya masih terhambat oleh faktor kepemilikan perangkat di armada pesawat, keterbatasan infrastruktur stasiun darat, dan belum adanya regulasi pendukung. Temuan ini menegaskan bahwa ADS-B berpotensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan keselamatan penerbangan di wilayah non-radar jika hambatan tersebut dapat diatasi.

Kata Kunci :ADS-B, Keselamatan Penerbangan, Efisiensi Operasional, APP Non- Radar, Evaluasi Implementasi.

ABSTRACT

Air traffic surveillance in APP Bandung still relies on procedural methods without radar, where aircraft monitoring depends solely on voice communication and third-party applications such as FlightRadar24, which are not fully accurate. This condition creates a gap in monitoring effectiveness and flight safety in non-radar areas, thus requiring a more reliable surveillance technology such as Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). This study aims to evaluate the implementation of ADS-B during its trial period at APP Bandung, analyze its contribution to operational efficiency and flight safety, and identify obstacles to permanent implementation. This research uses a descriptive qualitative method to depict actual conditions based on data and information obtained in the field. Data collection techniques include documentation, direct observation at APP Bandung, structured interviews using prepared instruments with ATC personnel and relevant technicians, as well as questionnaires distributed to operational personnel to capture their perceptions of ADS-B effectiveness. Data analysis was carried out through data reduction, data presentation, and conclusion drawing to address the research questions. The results show that ADS-B implementation during the trial improved monitoring accuracy and accelerated ATC decision-making, although the degree of improvement was still constrained by aircraft equipment ownership, limitations of ground station infrastructure,

and the absence of supporting regulations. These findings affirm that ADS-B has significant potential to enhance operational efficiency and flight safety in non-radar areas if these obstacles can be overcome.

Keywords: *ADS-B, Flight Safety, Operational Efficiency, Non-Radar APP, Implementation Evaluation.*

PENDAHULUAN

Sistem pengawasan lalu lintas udara memiliki peranan yang sangat penting dalam memastikan efisiensi dan keselamatan penerbangan. Salah satu teknologi modern yang digunakan untuk meningkatkan akurasi pemantauan lalu lintas udara adalah Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B), sebuah sistem berbasis satelit yang memungkinkan pesawat mengirimkan data posisi dan pergerakannya secara real-time kepada pengendali lalu lintas udara (Air Traffic Controller/ATC) serta pesawat lain di sekitarnya. ADS-B memiliki keunggulan dibandingkan sistem radar konvensional karena mampu memberikan cakupan lebih luas, termasuk di wilayah non-radar, serta memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi.

Bandara Internasional Husein Sastranegara Bandung memiliki karakteristik lalu lintas udara yang unik. Wilayah udara Bandung tergolong low traffic, dengan dominasi penerbangan militer, pelatihan (training flights), dan overflying. Sementara itu, untuk penerbangan sipil, hanya terdapat satu maskapai penerbangan komersial yang beroperasi secara terjadwal, yaitu Susi Air, yang melayani rute penerbangan hanya pada hari Senin, Rabu, dan Jumat. Dengan kondisi lalu lintas udara yang relatif rendah, sistem pemantauan lalu lintas udara di Bandung tidak menggunakan radar dan sepenuhnya mengandalkan prosedural control.

Selain itu, Bandung memiliki kondisi geografis yang cukup menantang. Dikelilingi oleh pegunungan dan terletak pada ketinggian sekitar 740 meter di atas permukaan laut, wilayah udara di sekitar Bandara Husein Sastranegara sering mengalami perubahan cuaca yang cepat. Kondisi ini menuntut sistem pemantauan lalu lintas udara yang lebih akurat untuk memastikan keamanan dan efisiensi penerbangan, terutama dalam menghadapi kemungkinan turbulensi dan visibilitas yang terbatas akibat kabut atau hujan lebat.

Dalam upaya meningkatkan sistem pengawasan lalu lintas udara, Bandara Internasional Husein Sastranegara pernah melakukan uji coba penggunaan ADS-B. Teknologi ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam meningkatkan akurasi pemantauan pesawat serta membantu pengendali lalu lintas udara dalam mengelola ruang udara secara lebih efisien. Dengan sistem ADS-B, data posisi pesawat dapat dikirimkan secara real-time kepada pengendali lalu lintas udara dan pesawat lain yang berada di wilayah yang sama, sehingga meningkatkan kesadaran situasional di antara pengguna ruang udara.

Namun, hingga saat ini, Bandara Internasional Husein Sastranegara, Bandung, tidak memiliki sistem ADS-B yang beroperasi secara permanen. Sebelumnya, perangkat ADS-B sempat tersedia di Bandung melalui peminjaman dari Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), yang saat itu memiliki unit navigasi udara dan bertanggung jawab atas penelitian serta pengembangan sistem pemantauan lalu lintas udara. Akan tetapi, setelah BPPT dibubarkan dan bergabung dengan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), unit navigasi udara yang sebelumnya menangani ADS-B tidak lagi ada dalam struktur organisasi BRIN. Akibatnya, perangkat ADS-B yang sebelumnya dipinjamkan ke Bandung mengalami kerusakan dan tidak diperbaiki. Hal ini terjadi karena perangkat ADS-B tersebut bukan milik AirNav Indonesia Cabang Bandung, sehingga bukan tanggung jawab mereka untuk melakukan pemeliharaan atau penggantian. AirNav

Bandung hanya dapat mengoperasikan peralatan yang secara resmi berada di bawah pengelolaan mereka. Di sisi lain, BRIN sebagai pemilik baru perangkat ini tidak memiliki unit yang bertanggung jawab terhadap ADS-B di Bandung. Setelah BPPT dilebur ke dalam BRIN, struktur organisasi mengalami perubahan besar, dan unit yang sebelumnya mengelola perangkat ADS-B sudah tidak ada. Akibatnya, tidak ada lembaga atau pihak yang secara spesifik ditugaskan untuk menangani perbaikan atau pengelolaan sistem ini. Selain itu, tidak adanya regulasi atau kebijakan yang jelas mengenai pemanfaatan dan pemeliharaan perangkat ADS-B yang telah dipinjamkan, semakin memperumit situasi dan menyebabkan perangkat tersebut tidak dapat digunakan kembali.

Kondisi ini menyebabkan pengawasan lalu lintas udara di Bandung sepenuhnya bergantung pada metode prosedural, di mana ATC menggunakan komunikasi berbasis radio serta koordinasi prosedural dalam mengarahkan pergerakan pesawat. Tidak adanya sistem pemantauan berbasis radar maupun ADS-B menjadi tantangan tersendiri bagi ATC, terutama dalam kondisi lalu lintas udara yang dinamis. Sebagai alternatif, ATC di APP Bandung menggunakan FlightRadar24 sebagai referensi tambahan dalam pemantauan pesawat. Namun, sistem ini memiliki keterbatasan yang signifikan, karena FlightRadar24 bukanlah alat navigasi resmi, melainkan platform berbasis crowd-sourced yang mengandalkan data dari receiver ADS-B yang tersebar secara global. Akurasi data yang ditampilkan tidak selalu optimal dan tidak memiliki standar keandalan yang cukup untuk dijadikan referensi utama dalam pengelolaan lalu lintas udara.

Ketiadaan sistem pemantauan yang modern menjadi tantangan besar bagi Bandung, terutama mengingat karakteristik geografis wilayah udaranya yang kompleks. Kota Bandung dikelilingi oleh pegunungan dengan kontur berbukit dan perbedaan ketinggian yang signifikan, yang dapat menghambat visibilitas serta mengganggu komunikasi radio antara pilot dan ATC. Selain itu, fenomena cuaca ekstrem, seperti kabut tebal, hujan deras, dan perubahan cuaca mendadak, sering terjadi di wilayah ini, sehingga meningkatkan risiko penerbangan. Dalam kondisi seperti ini, keakuratan sistem pemantauan lalu lintas udara menjadi faktor krusial untuk keselamatan penerbangan.

Secara teknis, ADS-B lebih sesuai untuk diterapkan di wilayah Bandung dibandingkan radar konvensional. ADS-B bekerja dengan menerima data posisi pesawat dari sistem GPS, lalu mentransmisikan informasi tersebut ke stasiun penerima di darat dan ke pesawat lain di sekitarnya. Hal ini memungkinkan pemantauan yang lebih akurat dan cakupan yang lebih luas, termasuk di wilayah yang tidak memiliki radar, seperti Bandung. Sementara itu, radar konvensional memiliki keterbatasan dalam mendeteksi pesawat di ketinggian rendah atau area berbukit, karena sinyal radar dapat terhalang oleh rintangan geografis. Selain itu, waktu pembaruan data radar lebih lambat dibandingkan ADS-B, yang dapat mengurangi efektivitasnya dalam mengelola lalu lintas udara yang bergerak cepat.

Tidak adanya ADS-B maupun radar di Bandung membuat pengawasan lalu lintas udara sangat bergantung pada metode prosedural, yang memiliki keterbatasan dalam hal efisiensi dan akurasi pemantauan. Dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem pemantauan lalu lintas udara yang lebih modern, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi implementasi ADS-B di Bandung, mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan sistem ini tidak diperpanjang, serta memberikan rekomendasi untuk meningkatkan efisiensi dan keselamatan lalu lintas udara di wilayah Control Zone Bandara Internasional Husein Sastranegara, Bandung.

Saat ini, pengawasan lalu lintas udara di APP Bandung masih dilakukan dengan metode prosedural control, tanpa radar maupun ADS-B, dan menggunakan FlightRadar24 sebagai referensi tambahan. Meskipun FlightRadar24 dapat membantu memberikan

gambaran lalu lintas udara berdasarkan data yang dikumpulkan dari berbagai receiver ADS-B di seluruh dunia, sistem ini memiliki keterbatasan. Menurut ICAO, FlightRadar24 adalah platform berbasis crowd-sourced, yang berarti data yang ditampilkan tidak selalu berasal dari sumber resmi navigasi udara dan bergantung pada cakupan receiver ADS-B yang tersebar di berbagai lokasi. Hal ini menimbulkan ketidakpastian dalam akurasi dan keandalan data, terutama dalam kondisi lalu lintas udara yang dinamis.

Selain itu, faktor keamanan dan integrasi sistem juga menjadi alasan utama mengapa ADS-B belum diterapkan secara penuh di APP Bandung. Menurut AirNav Indonesia, ADS-B membutuhkan dukungan jaringan komunikasi dan sistem pengolahan data yang lebih luas agar dapat diintegrasikan dengan operasional ATC secara optimal. Hingga saat ini, infrastruktur yang diperlukan masih dalam tahap pengembangan, sehingga operasional ATC di Bandung tetap menggunakan metode prosedural control sebagai pendekatan utama dalam pengawasan lalu lintas udara.

Walaupun lalu lintas udara di Bandung tergolong rendah, keberadaan penerbangan militer dan latihan (training flights) meningkatkan kompleksitas pengelolaan lalu lintas udara. Interaksi antara pesawat militer dan sipil dalam satu ruang udara memerlukan koordinasi yang baik antara unit pengendali lalu lintas udara dan para pilot untuk memastikan tidak terjadi konflik udara. Selain itu, pesawat latihan sering kali melakukan manuver di sekitar wilayah udara Bandung, yang dapat meningkatkan risiko insiden jika tidak dimonitor dengan baik.

Di berbagai negara lain, implementasi ADS-B telah terbukti meningkatkan efisiensi operasional dan keselamatan penerbangan. Negara seperti Amerika Serikat, Australia, dan beberapa negara di Eropa telah mengadopsi ADS-B sebagai standar utama dalam sistem pengawasan lalu lintas udara, menggantikan atau melengkapi radar konvensional. Penerapan ADS-B di negara-negara tersebut memungkinkan penggunaan jalur penerbangan yang lebih optimal, mengurangi separasi antar pesawat, dan meningkatkan kesadaran situasional bagi ATC dan pilot. Selain itu, optimasi jalur penerbangan yang lebih presisi dengan ADS-B telah terbukti mengurangi konsumsi bahan bakar, yang berdampak pada penurunan emisi karbon serta efisiensi biaya operasional bagi maskapai penerbangan.

Sebagai contoh, di Amerika Serikat, Federal Aviation Administration (FAA) telah mewajibkan semua pesawat yang beroperasi di ruang udara terkontrol untuk menggunakan ADS-B Out sejak 1 Januari 2020, sebagai bagian dari program modernisasi sistem lalu lintas udara nasional (NextGen Air Transportation System). Implementasi ini terbukti mengurangi keterlambatan penerbangan, meningkatkan kapasitas lalu lintas udara, serta memperkuat pengawasan di wilayah yang sebelumnya tidak terjangkau oleh radar, seperti daerah pegunungan dan perairan luas.

Di Australia, penggunaan ADS-B telah diterapkan secara luas untuk menggantikan radar di beberapa wilayah terpencil. Hal ini memungkinkan pemantauan lalu lintas udara secara real-time di daerah yang sebelumnya sulit diawasi. Sementara itu, EASA (European Union Aviation Safety Agency) juga telah menetapkan ADS-B sebagai standar pengawasan udara untuk meningkatkan keselamatan dan kapasitas lalu lintas udara di Eropa.

Namun, meskipun ADS-B telah menjadi standar global di banyak negara, penerapannya di Indonesia, khususnya di Bandara Internasional Husein Sastranegara, masih menghadapi berbagai tantangan. Meskipun telah diuji coba, penggunaan ADS-B tidak diperpanjang, sehingga sistem pengawasan lalu lintas udara di APP Bandung masih menggunakan prosedural control tanpa radar, dengan dukungan referensi dari FlightRadar24. Kondisi ini menimbulkan pertanyaan mengenai efektivitas ADS-B selama

masa uji coba, kendala yang menyebabkan tidak diperpanjangnya penggunaan sistem ini, serta potensi implementasi kembali ADS-B untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi lalu lintas udara di wilayah ini.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi implementasi ADS-B selama masa uji coba di Bandara Husein Sastranegara serta mengkaji potensi pemanfaatan sistem pemantauan alternatif untuk mendukung operasional APP non-radar. Beberapa opsi yang dapat dipertimbangkan meliputi multilateration (MLAT) sebagai metode alternatif dalam mendeteksi pergerakan pesawat tanpa memerlukan radar konvensional, serta penguatan prosedural control dalam memastikan koordinasi yang lebih baik antara ATC dan pilot.

Dengan mempertimbangkan tantangan operasional dan kebutuhan efisiensi di wilayah non-radar, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang relevan bagi pengelola lalu lintas udara serta otoritas penerbangan dalam menentukan solusi terbaik untuk sistem pemantauan lalu lintas udara di wilayah Bandung.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan deskriptif dan komparatif. Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan secara mendalam kondisi penerapan Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) dan pengaruhnya terhadap efisiensi serta keselamatan pesawat di Control Zone (CTR) Bandara Internasional Husein Sastranegara, Bandung. Pendekatan komparatif digunakan untuk membandingkan tingkat efisiensi dan keselamatan sebelum dan sesudah penerapan ADS-B, sehingga diperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai dampak implementasi teknologi ini terhadap operasi lalu lintas udara. Pemilihan pendekatan ini bertujuan untuk memberikan hasil yang terukur, objektif, dan relevan dengan kondisi operasional di lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

1. Statistik Deskriptif

Hasil penelitian diperoleh melalui pengolahan data kuesioner yang diberikan kepada 30 Air Traffic Controller (ATC) APP Bandung dengan pengalaman minimal satu tahun dalam pengoperasian ADS-B. Penyajian data bertujuan memberikan gambaran empiris mengenai kondisi sebelum dan sesudah penerapan Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) di wilayah CTR Bandara Husein Sastranegara, mencakup aspek penerapan sistem dan efisiensi operasional.

Analisis dilakukan menggunakan statistik deskriptif untuk menggambarkan nilai rata-rata dan sebaran data, serta uji paired sample t-test untuk mengidentifikasi signifikansi perbedaan antara kedua kondisi. Pendekatan ini memungkinkan penilaian yang komprehensif terhadap pengaruh penerapan ADS-B dalam meningkatkan kinerja layanan lalu lintas udara.

Tabel 1 Statistik Deskriptif

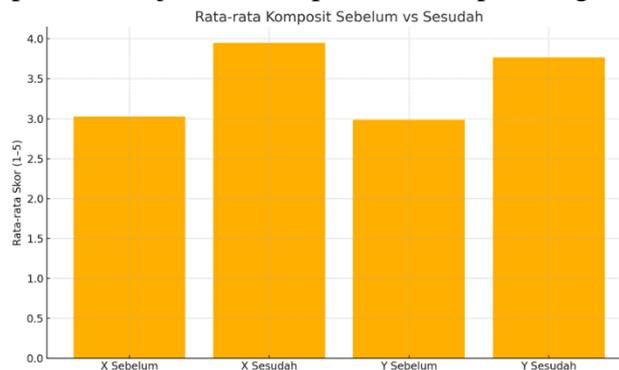
Variabel	Mean Sebelum	SD Sebelum	Mean Sesudah	SD Sesudah
Penerapan ADS-B	3,22	0,36	3,90	0,41
Efisiensi Operasional	3,18	0,39	3,84	0,44

Nilai mean merepresentasikan rata-rata skor yang diberikan responden terhadap setiap variabel penelitian. Misalnya, pada variabel Penerapan ADS-B, skor rata-rata meningkat dari 3,22 (sebelum) menjadi 3,90 (sesudah), menunjukkan adanya perbaikan

persepsi terhadap kualitas penerapan sistem setelah implementasi ADS-B. Hal serupa terjadi pada variabel Efisiensi Operasional, yang meningkat dari 3,18 menjadi 3,84.

Nilai standar deviasi (SD) menggambarkan tingkat variasi atau penyebaran data dari rata-rata. SD yang relatif kecil (mendekati nol) menunjukkan bahwa jawaban responden cenderung homogen dan konsisten, sedangkan SD yang besar menunjukkan variasi jawaban yang tinggi. Pada hasil penelitian ini, SD berkisar antara 0,36–0,44, yang berarti persepsi responden terhadap penerapan ADS-B dan efisiensi operasional cukup seragam.

Dari tabel di atas terlihat adanya peningkatan rata-rata skor pada kedua variabel penelitian. Penerapan ADS-B meningkat dari 3,22 menjadi 3,90, sedangkan Efisiensi Operasional meningkat dari 3,18 menjadi 3,84. Nilai standar deviasi yang relatif kecil menunjukkan bahwa persebaran jawaban responden cukup homogen.



Gambar 4.1. Rata-rata komposit variabel X (Penerapan ADS-B) dan Y (Efisiensi Operasional) sebelum dan sesudah penerapan.

Grafik pada Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan nilai rata-rata (mean) skor sebelum dan sesudah penerapan Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) pada dua variabel penelitian, yaitu Penerapan ADS-B dan Efisiensi Operasional. Terlihat adanya peningkatan nilai rata-rata pada kedua variabel setelah penerapan sistem. Peningkatan pada variabel Penerapan ADS-B sebesar 0,68 poin, sedangkan pada variabel Efisiensi Operasional sebesar 0,66 poin.

Kenaikan tersebut mengindikasikan adanya perbaikan persepsi dan penilaian responden terhadap efektivitas penerapan ADS-B, baik dalam aspek akurasi dan kecepatan penyediaan informasi posisi pesawat maupun dalam aspek pengelolaan lalu lintas udara yang lebih efisien. Secara empiris, peningkatan ini mencerminkan kontribusi positif dari implementasi ADS-B terhadap kualitas pelayanan lalu lintas udara di APP Bandung, khususnya di wilayah non-radar CTR Bandara Husein Sastranegara.

2. Hasil Uji Paired Sample t-Test

Pengujian paired sample t-test dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah penerapan Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) pada dua variabel penelitian, yaitu Penerapan ADS-B dan Efisiensi Operasional. Uji ini dipilih karena data berasal dari kelompok yang sama (responden yang sama) namun pada dua kondisi waktu yang berbeda.

Uji Paired Sample t-Test merupakan metode statistik yang digunakan untuk membandingkan rata-rata dua pengukuran yang saling berpasangan, yaitu kondisi sebelum dan sesudah penerapan Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B). Pemilihan uji ini didasarkan pada karakteristik data penelitian yang berasal dari responden yang sama, namun dinilai pada dua titik waktu berbeda, sehingga setiap responden memiliki sepasang nilai untuk dibandingkan.

Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS dengan prosedur sebagai berikut:

- 1) Memasukkan data hasil kuesioner ke dalam empat kolom: Penerapan_Before, Penerapan_After, Efisiensi_Before, dan Efisiensi_After.
- 2) Memilih menu Analyze → Compare Means → Paired-Samples T Test.
- 3) Memasukkan pasangan variabel:
 - a) Penerapan_Before ↔ Penerapan_After
 - b) Efisiensi_Before ↔ Efisiensi_After
- 4) Menjalankan perintah analisis dan mengamati output yang dihasilkan.

Tabel 2 Hasil Uji Paired Sample t-Test

Variabel	t-hitung	Sig. (2-tailed)	Keterangan
Penerapan ADS-B	12,45	0,000	Signifikan
Efisiensi Operasional	11,86	0,000	Signifikan

Berdasarkan Tabel 4.2, nilai t-hitung untuk variabel Penerapan ADS-B adalah 12,45 dan untuk Efisiensi Operasional adalah 11,86. Kedua nilai ini jauh lebih besar dari nilai t-tabel pada taraf signifikansi 5% dengan derajat kebebasan (df) = 29, yaitu sekitar 2,045. Hal ini menunjukkan bahwa hipotesis nol (H_0), yang menyatakan tidak ada perbedaan antara sebelum dan sesudah penerapan ADS-B, ditolak.

Nilai Sig. (2-tailed) sebesar 0,000 untuk kedua variabel lebih kecil dari 0,05, yang menandakan bahwa perbedaan tersebut signifikan secara statistik. Dengan kata lain, penerapan ADS-B memberikan pengaruh yang nyata terhadap peningkatan skor baik pada aspek penerapan sistem maupun pada efisiensi operasional.

Secara substantif, peningkatan skor pada variabel Penerapan ADS-B menunjukkan bahwa responden merasakan kemajuan dalam hal akurasi pelaporan posisi pesawat, kecepatan pembaruan data, dan kemudahan pengoperasian sistem. Sementara itu, peningkatan pada variabel Efisiensi Operasional merefleksikan adanya perbaikan dalam koordinasi antarunit, pengaturan jarak antar pesawat, serta percepatan pengambilan keputusan di ruang kendali lalu lintas udara.

Hasil ini sejalan dengan teori yang dibahas pada Bab II, di mana teknologi ADS-B dinyatakan mampu meningkatkan situational awareness dan memperkuat pengawasan lalu lintas udara di wilayah non-radar, sebagaimana direkomendasikan oleh International Civil Aviation Organization (ICAO) melalui Annex 10 Aeronautical Telecommunications dan Doc 4444 Air Traffic Management. Selain itu, temuan ini menguatkan desain penelitian pada Bab III, di mana metode paired sample t-test efektif digunakan untuk mengukur perbedaan signifikan pada kelompok yang sama sebelum dan sesudah intervensi teknologi.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penerapan ADS-B di APP Bandung membawa dampak positif yang signifikan terhadap kinerja pengawasan lalu lintas udara, baik dari segi teknis maupun operasional. Temuan ini memberikan dasar ilmiah bagi pengambil kebijakan untuk memperluas implementasi ADS-B pada wilayah lain di Indonesia yang memiliki keterbatasan jangkauan radar, sekaligus meningkatkan program pelatihan bagi personel ATC guna mengoptimalkan pemanfaatan sistem tersebut.

Hasil Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) di APP Bandung memberikan pengaruh positif yang signifikan terhadap dua aspek utama yang diteliti, yaitu Penerapan ADS-B dan Efisiensi Operasional. Hal ini dibuktikan dengan adanya peningkatan rata-rata skor pada kedua variabel setelah penerapan ADS-B, serta hasil uji paired sample t-test yang menunjukkan nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05.

Peningkatan skor pada variabel Penerapan ADS-B mencerminkan persepsi positif responden terhadap keandalan sistem dalam memberikan informasi posisi pesawat secara

real-time, akurat, dan mudah diakses. Teknologi ADS-B yang memanfaatkan data GPS untuk memancarkan informasi posisi pesawat melalui sinyal ADS-B Out telah terbukti meningkatkan kemampuan situational awareness Air Traffic Controller (ATC). Hal ini sejalan dengan teori yang dijelaskan pada Bab II, di mana ICAO merekomendasikan penggunaan ADS-B sebagai alternatif pengawasan lalu lintas udara di wilayah yang memiliki keterbatasan jangkauan radar.

Pada variabel Efisiensi Operasional, peningkatan skor menunjukkan bahwa ADS-B membantu mempercepat proses pengambilan keputusan, mengurangi potensi konflik lalu lintas udara (loss of separation), dan meningkatkan koordinasi antarunit. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyebutkan bahwa data real-time yang disediakan oleh ADS-B dapat digunakan untuk optimisasi jarak antar pesawat, penentuan rute yang lebih efisien, dan pengurangan waktu holding, yang pada akhirnya berkontribusi pada efisiensi penggunaan bahan bakar serta pengurangan beban kerja ATC.

Secara operasional, implementasi ADS-B di APP Bandung memberikan manfaat nyata pada wilayah non-radar CTR Bandara Husein Sastranegara. Dengan data yang lebih akurat dan diperbarui secara cepat, ATC dapat melakukan pengaturan lalu lintas udara dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi, bahkan pada kondisi lalu lintas padat.

Hasil penelitian ini konsisten dengan beberapa studi internasional, seperti penerapan ADS-B di Australia dan Amerika Serikat, yang juga melaporkan peningkatan keselamatan dan efisiensi operasional. Kesesuaian ini memperkuat validitas temuan dan menunjukkan bahwa manfaat ADS-B bersifat universal, tidak hanya terbatas pada negara atau wilayah tertentu.

Dari perspektif metodologis, hasil ini juga membuktikan bahwa rancangan penelitian kuantitatif dengan analisis paired sample t-test sebagaimana dijelaskan pada Bab III efektif dalam mengukur perubahan yang signifikan pada variabel yang diteliti. Pendekatan ini mampu memberikan bukti empiris yang kuat terkait pengaruh penerapan teknologi terhadap kinerja pengawasan lalu lintas udara.

Dengan demikian, hasil dan pembahasan ini mengarah pada kesimpulan bahwa penerapan ADS-B di APP Bandung tidak hanya relevan dari segi teknologi, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan keselamatan dan efisiensi operasional lalu lintas udara. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi otoritas terkait untuk memperluas penerapan ADS-B di wilayah lain di Indonesia yang memiliki keterbatasan radar, serta mendorong peningkatan kompetensi ATC melalui pelatihan berkelanjutan guna memaksimalkan pemanfaatan teknologi ini.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini diperoleh dari hasil analisis terhadap observasi, wawancara, dan penyebaran kuisioner kepada personel ATC di APP Perum LPPNPI Cabang Bandung. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pemanfaatan sistem Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) berbasis Web-Based yang digunakan sebagai alat bantu pemantauan lalu lintas udara di wilayah kontrol non-radar Bandung.

Dari hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan ADS-B berbasis Web-Based oleh personel APP Bandung sangat membantu dalam meningkatkan efisiensi kerja ATC, terutama dalam mempercepat identifikasi posisi pesawat, memperkuat situational awareness, dan membantu mengurangi potensi miskomunikasi dalam ruang udara non-radar.

Walaupun sistem ADS-B yang digunakan masih bersifat Web-Based dan belum tersertifikasi secara resmi, keberadaannya telah memberikan manfaat nyata di lapangan.

Personel ATC merasakan kemudahan dalam memantau posisi pesawat secara visual tanpa sepenuhnya bergantung pada laporan verbal pilot, yang selama ini menjadi dasar utama dalam prosedural control.

Namun demikian, terdapat beberapa kendala yang dihadapi dalam pemanfaatan ADS-B tersebut, seperti keterbatasan cakupan pesawat, adanya delay pada data, dan ketergantungan terhadap jaringan internet. Selain itu, belum adanya dukungan dari personel teknisi CNS terhadap pengelolaan sistem ADS-B juga menjadi hambatan dalam keberlanjutan pemanfaatan sistem ini.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan yang telah dijelaskan, maka penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

- 1) Perlu dilakukan pengadaan sistem ADS-B receiver resmi di wilayah APP Bandung yang dapat memberikan data lebih akurat, real-time, dan tersertifikasi untuk mendukung operasional ATC secara profesional.
- 2) Melakukan pelatihan dan pemberian lisensi kepada teknisi CNS agar mampu melakukan pemasangan, pemeliharaan, dan pengawasan sistem ADS-B secara mandiri di bawah Perum LPPNPI.
- 3) Integrasi sistem ADS-B dengan sistem komunikasi ATC, seperti VCCS, agar memudahkan koordinasi antara ATC dan adjacent unit tanpa mengganggu konsentrasi kerja.
- 4) Penguatan prosedur operasional dan regulasi internal, termasuk pembuatan SOP dan LOCA terkait pemanfaatan ADS-B di ruang udara non-radar agar penggunaannya sesuai standar keselamatan penerbangan.
- 5) Pemeliharaan sistem secara rutin dan evaluasi berkala, untuk memastikan sistem ADS-B tetap berfungsi optimal dan dapat menjadi alat bantu yang mendukung peningkatan pelayanan lalu lintas udara di APP Bandung.

DAFTAR PUSTAKA

- Airbus. (2023). ADS-B Technology and Its Role in Future Aviation. Retrieved from <https://www.airbus.com>
- AirNav Indonesia. (2022). Laporan Evaluasi Implementasi ADS-B di Indonesia. AirNav Indonesia.
- AirNav Indonesia. (2023). Standard Operating Procedure (SOP) APP Bandung 2023 RF. AirNav Indonesia.
- Ardiansyah, R., Risnita, & Jailani, M. S. (2023). Teknik pengumpulan data dan instrumen penelitian ilmiah pendidikan pada pendekatan kualitatif dan kuantitatif. *IHSAN: Jurnal Pendidikan Islam*, 1(2), 1–9.
- Arikunto, S. (2013). *Prosedur penelitian: Suatu pendekatan praktik (Edisi Revisi)*. Rineka Cipta.
- Boeing. (2023). The Evolution of Air Traffic Management with ADS-B. Retrieved from <https://www.boeing.com>
- Chen, X. (2013). ADS-B vs. radar: Accuracy, update frequency, coverage, economic efficiency (Master's thesis, Purdue University). Purdue e-Pubs.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4th ed.)*. SAGE.
- Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2024). Aeronautical Information Publication (AIP) Indonesia. Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2024). Aeronautical Information Publication (AIP) Indonesia. Retrieved from <https://aimindonesia.dephub.go.id>
- European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2020). Regulation (EU) No 1207/2011 on ADS-B Implementation.
- European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2020). Regulations on ADS-B Implementation

- in European Airspace. EASA Publications.
- FAA Publications.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2010). Code of Federal Regulations Title 14, Part 91.225 & 91.227 (ADS-B Requirements). FAA Publications.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2019). FAA Advisory Circular 90-114B (ADS-B Operations). FAA Publications.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2020). NextGen ADS-B Performance Report.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2021). NextGen Air Transportation System: ADS-B Implementation Plan. FAA Publications.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2024). ADS-B Requirements and Implementation in the U.S. Airspace. Retrieved from <https://www.faa.gov/nextgen/programs/adsb>
- FlightRadar24. (2024). Real-time Flight Tracking with ADS-B Technology. Retrieved from <https://www.flightradar24.com>
- International Air Transport Association (IATA). (2024). Global Implementation of ADS- B for Enhanced Air Traffic Safety. Retrieved from <https://www.iata.org>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2016). Annex 11 – Air Traffic Services. ICAO Publications.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2021). Global Air Navigation Plan (GANP). ICAO Publications.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2022). Annex 10 – Aeronautical Telecommunications. ICAO Publications.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2023). Global ATM Operational Concept. ICAO Publications.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2024). Digital Transformation in Air Traffic Management. ICAO Publications.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). Doc 4444 Air Traffic Management
- International Civil Aviation Organization. (2018). Performance-based surveillance (PBN) and ADS-B implementation guidance. ICAO.
- International Civil Aviation Organization (ICAO).(2018).
- Jones, S. R. (2005). ADS-B surveillance quality indicators: Their relationship to system operational capability and aircraft separation standards. *Air Traffic Control Quarterly*, 13(3), 225–246.
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2020). Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 55 Tahun 2020 tentang Penggunaan ADS-B di Wilayah Udara Indonesia.
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2022). Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor KP 260 Tahun 2022 tentang Implementasi ADS-B di Indonesia.
- NASA. (2020). Advancements in ADS-B and NextGen Air Traffic Management. NASA Technical Reports.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2023). ADS-B Applications in Air Traffic Management. Retrieved from <https://www.nasa.gov>
- National Transportation Safety Board (NTSB). (2021). Impact of ADS-B Implementation on Aviation Safety. NTSB Reports.
- Performance-Based Navigation (PBN) Manual. ICAO Publications.
- Pratama, B. R. (2020). Analisis Implementasi ADS-B di Indonesia: Studi Kasus pada Bandara Soekarno-Hatta. *Jurnal Transportasi Udara Indonesia*, 8(2), 123-145.
- RTCA. (2002). Minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance–broadcast (ADS-B) (DO-242A). RTCA, Inc.
- Sugiyono. (2017). Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D (edisi revisi). Alfabeta.
- Sugiyono. (2021). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta.
- United States Congress. (2020). FAA Reauthorization Act of 2020: Modernization of ADS-B Systems. Washington D.C.: U.S. Government Publishing Office.
- United States Department of Transportation (USDOT). (2020). Air Traffic Control Modernization with ADS-B. USDOT Publications.