MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

**Terindeks**: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v5i6.7806

# STRATEGI PENINGKATAN KEMAMPUAN SISTEM NAVIGASI PESAWAT C-212-200 DALAM OPERASI MODIFIKASI CUACA (STUDI KASUS: KTT G20 BALI 2022)

# Strategy for Enhancing the Navigation System Capability of the C-212-200 Aircraft in Weather Modification Operations (Case Study: G20 Summit Bali 2022)

**Made Sudiawan, Yulianto Hadi, Novky Asmoro**
Universitas Pertahanan
made.sudiawan@sp.idu.ac.id

**Article Info:**

| Submitted: | Revised: | Accepted: | Published: |
|---|---|---|---|
| Sep 23, 2025 | Oct 15, 2025 | Oct 27, 2025 | Nov 1, 2025 |

## Abstract

This study examines the enhancement of the C-212-200 aircraft's navigation system capability in supporting Weather Modification Operations (OMC) during the G20 Summit held in Bali in 2022, with a focus on the implementation of the Traffic Collision Avoidance System (TCAS) and Transponder Mode S as part of the system's modernization. The objective of the research is to analyze the effectiveness of integrating these two systems in improving flight safety, situational awareness, and operational efficiency. A descriptive qualitative approach with a case study design was employed, involving technical interviews, field observations, and document analysis within an operational unit of the Indonesian Air Force. The findings indicate that TCAS significantly enhances pilot situational awareness by providing real-time Traffic Advisory (TA) and Resolution Advisory (RA), enabling prompt and accurate conflict avoidance maneuvers. Meanwhile, Transponder Mode S strengthens two-way


Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

communication between the aircraft and Air Traffic Control (ATC) through selective interrogation, allowing precise transmission of aircraft position, identification, and altitude data. The integration of both systems has been shown to reduce pilot workload, minimize mid-air collision risk, and improve decision-making effectiveness, especially in high-traffic airspace such as during the G20 Summit. The study also highlights non-technical challenges, particularly the limited readiness of human resources—including avionics technicians and pilots—who require further training in operating and maintaining integrated digital navigation systems. Overall, the modernization of the C-212-200 navigation system through TCAS and Mode S proves effective in supporting non-combat flight operations more safely and efficiently, and represents a strategic step toward civil–military interoperability and digital transformation within the national air defense system.

**Keywords**: Navigation System; TCAS; Transponder Mode S; C-212-200 Aircraft; Weather Modification Operations

**Abstrak:** Penelitian ini membahas peningkatan kapabilitas sistem navigasi pesawat C-212-200 dalam mendukung Operasi Modifikasi Cuaca (OMC) pada pelaksanaan KTT G20 di Bali tahun 2022, dengan fokus pada penerapan *Traffic Collision Avoidance System* (TCAS) dan *Transponder Mode S* sebagai bagian dari modernisasi sistem navigasi. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis efektivitas integrasi kedua sistem tersebut dalam meningkatkan keselamatan penerbangan, *situational awareness*, dan efisiensi operasional pesawat. Pendekatan yang digunakan adalah deskriptif kualitatif dengan desain studi kasus, melalui wawancara teknis, observasi lapangan, serta analisis dokumen di satuan operasional TNI Angkatan Udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan TCAS secara signifikan meningkatkan *situational awareness* pilot melalui pemberian *Traffic Advisory* (TA) dan *Resolution Advisory* (RA) secara real-time, yang memungkinkan manuver penghindaran konflik lintasan udara secara cepat dan akurat. Sementara itu, Transponder Mode S memperkuat komunikasi dua arah antara pesawat dan *Air Traffic Control* (ATC) melalui mekanisme *selective interrogation*, yang mampu mengirimkan data posisi, identifikasi, dan ketinggian pesawat dengan presisi tinggi. Integrasi kedua sistem ini terbukti menurunkan beban kerja pilot, mengurangi risiko tabrakan udara, dan meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan, terutama di wilayah udara padat seperti saat KTT G20. Penelitian juga mengungkap tantangan non-teknis berupa keterbatasan kesiapan sumber daya manusia, khususnya teknisi avionik dan pilot, yang memerlukan pelatihan lanjutan dalam pengoperasian dan pemeliharaan sistem navigasi digital terintegrasi. Secara keseluruhan, modernisasi navigasi pesawat C-212-200 melalui TCAS dan Mode S terbukti efektif dalam mendukung operasi penerbangan non-tempur secara lebih aman dan efisien, serta menjadi langkah strategis menuju interoperabilitas sipil–militer dan transformasi digital dalam sistem pertahanan udara nasional.

**Kata Kunci**: Sistem Navigasi; TCAS; *Transponder Mode S*; Pesawat C-212-200; Operasi Modifikasi Cuaca

## PENDAHULUAN

Sistem pertahanan udara modern menuntut integrasi antara teknologi navigasi, sistem deteksi dini, dan kesiapan sumber daya manusia (SDM) agar mampu beradaptasi dengan dinamika ruang udara nasional maupun internasional yang semakin kompleks. Dalam konteks Indonesia, modernisasi alat utama sistem senjata (alutsista) menjadi prioritas untuk meningkatkan efektivitas pelaksanaan operasi udara, baik Operasi Militer Perang (OMP) maupun Operasi Militer Selain Perang (OMSP). Salah satu bentuk OMSP yang memiliki nilai strategis adalah Operasi Modifikasi Cuaca (OMC), yang dilakukan untuk menjaga stabilitas atmosfer dan mendukung berbagai kegiatan kenegaraan (Kuncoro et al., 2024; Prayoga et al., 2019).

Pada tahun 2022, Indonesia melaksanakan KTT G20 di Bali yang menjadi salah satu kegiatan internasional terbesar dalam sejarah diplomasi nasional. Untuk mendukung keberlangsungan acara tersebut, TNI Angkatan Udara (TNI AU) bersama BMKG dan BRIN melaksanakan OMC sebagai bagian dari upaya mitigasi cuaca ekstrem. Dalam misi ini, pesawat C-212-200 digunakan sebagai wahana utama penyemaian awan karena karakteristiknya yang fleksibel, mampu beroperasi di ketinggian rendah, dan dapat lepas landas dari landasan pendek (Hutapea et al., 2024).

Namun demikian, pelaksanaan OMC menghadapi sejumlah tantangan, terutama dari sisi keselamatan penerbangan dan efektivitas sistem navigasi. Pesawat C-212-200 yang digunakan masih mengandalkan transponder Mode A tanpa dukungan *Traffic Collision Avoidance System* (TCAS) maupun Transponder Mode S, yang telah menjadi standar keselamatan penerbangan internasional menurut International Civil Aviation Organization (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2024). Keterbatasan sistem navigasi tersebut meningkatkan risiko air proximity incident dan salah identifikasi radar di tengah kepadatan lalu lintas udara yang meningkat drastis selama KTT G20, di mana tercatat lebih dari 30 pesawat kepala negara asing dan puluhan pesawat domestik serta militer beroperasi secara simultan (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2022).

Secara teknis, TCAS merupakan sistem radar aktif yang mampu mendeteksi keberadaan pesawat lain dalam radius tertentu dan memberikan instruksi manuver untuk menghindari tabrakan (Boguspayev et al., 2023). Sedangkan *Transponder Mode S* berfungsi untuk mengirimkan data identitas, ketinggian, dan informasi navigasi secara dua arah antara pesawat dan radar sekunder *Air Traffic Control* (Seto et al., 2013). Kedua perangkat ini telah

menjadi standar keselamatan penerbangan internasional dan terbukti efektif dalam meningkatkan *situational awareness* pilot serta efisiensi pengendalian lalu lintas udara. Dalam konteks operasi udara militer non-tempur seperti OMC, penerapan TCAS dan Mode S menjadi semakin penting karena berhubungan langsung dengan keselamatan misi, akurasi posisi, serta efisiensi penggunaan bahan semai di area berawan tebal (Basukesti, 2016; Prabowo, 2020).

Konsep penting lain yang relevan dengan penelitian ini adalah teori Air Power, yang menekankan bahwa penguasaan udara (*command of the air*) sangat dipengaruhi oleh keandalan sistem navigasi, komunikasi, dan kontrol (Watson et al., 2016). Dalam operasi udara modern, efektivitas misi tidak hanya ditentukan oleh performa mesin atau platform udara, tetapi juga oleh kemampuan sistem pendukung yang menjamin keakuratan navigasi dan koordinasi penerbangan. Dengan demikian, peningkatan sistem navigasi C-212-200 tidak hanya berdampak pada aspek keselamatan, tetapi juga pada peningkatan presisi dan efektivitas operasi modifikasi cuaca itu sendiri.

Selain peningkatan teknologi, aspek kesiapan SDM avionik menjadi faktor yang tidak dapat diabaikan. Menurut Fitriano dan Poniman (2024), keberhasilan implementasi sistem avionik modern sangat dipengaruhi oleh kemampuan teknis, kedisiplinan, dan adaptasi personel terhadap perkembangan teknologi. Sutikno et al. (2020) menegaskan bahwa strategi pertahanan yang efektif harus melibatkan perencanaan dan pengembangan SDM yang terarah agar selaras dengan tujuan modernisasi peralatan militer. Oleh karena itu, peningkatan sistem navigasi perlu diimbangi dengan program pengembangan kompetensi teknisi avionik dan operator pesawat secara berkelanjutan.

Kajian internasional menunjukkan bahwa integrasi sistem avionik modern seperti TCAS dan Transponder Mode S telah menjadi standar global untuk pesawat dengan bobot lebih dari 15.000 kg atau berkapasitas lebih dari 19 penumpang (Federal Aviation Administration (FAA), 2020; International Civil Aviation Organization (ICAO), 2024). Lumban Toruan dan Ngimron (Lumban Toruan & Ngimron, 2023) menambahkan bahwa dalam konteks pertahanan nasional, sinergi antara penguasaan teknologi dan penguatan SDM menjadi fondasi utama modernisasi alutsista. Namun, penelitian-penelitian sebelumnya yang membahas sistem navigasi pesawat C-212-200 umumnya masih terbatas pada aspek teknis peralatan atau performa mesin. Kajian yang mendeskripsikan strategi peningkatan

kemampuan sistem navigasi dari sisi integrasi teknologi dan manajemen SDM masih jarang ditemukan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis strategi peningkatan kemampuan sistem navigasi pesawat C-212-200 dalam mendukung efektivitas dan keselamatan pelaksanaan Operasi Modifikasi Cuaca (OMC). Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan studi kasus pada operasi OMC saat KTT G20 Bali 2022. Fokus penelitian mencakup: (1) kajian terhadap peran TCAS dan Transponder Mode S dalam mendukung efektivitas sistem navigasi, (2) evaluasi kompetensi SDM avionik yang terlibat dalam misi OMC, serta (3) identifikasi strategi TNI AU dalam modernisasi sistem navigasi pesawat C-212-200.

Secara teoretis, penelitian ini bertujuan untuk memperkaya literatur di bidang teknik mesin dan teknologi penerbangan, khususnya terkait integrasi sistem navigasi dengan aspek operasional dan sumber daya manusia. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi masukan bagi TNI AU, Kementerian Pertahanan, BMKG, dan BRIN dalam penyusunan kebijakan modernisasi sistem navigasi dan peningkatan kompetensi personel untuk mendukung operasi udara non-tempur di Indonesia

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus berbasis analisis sistem, karena fokus penelitian diarahkan untuk memahami secara mendalam strategi peningkatan kemampuan sistem navigasi pesawat C-212-200 dalam mendukung keberhasilan Operasi Modifikasi Cuaca (OMC) pada saat pelaksanaan KTT G20 di Bali tahun 2022. Pendekatan ini dipilih untuk menggali fenomena aktual secara kontekstual dengan mempertimbangkan aspek teknis sistem navigasi, organisasi pelaksana operasi, serta kebijakan pertahanan udara nasional (Creswell & Poth, 2018).

Metode studi kasus dipandang relevan karena memungkinkan peneliti mengkaji konfigurasi sistem, proses implementasi modernisasi, kendala teknis, serta solusi strategis dari perspektif pelaku langsung dan pemangku kebijakan yang terlibat dalam misi OMC. Penelitian ini dilaksanakan di lingkungan TNI Angkatan Udara, khususnya pada Skadron Udara 4 Lanud Abdulrachman Saleh sebagai satuan pengoperasi pesawat C-212-200, Sathar 23 Depohar 20, dan Mabesau sebagai unit pembina sistem avionik dan navigasi. Penelitian

dilakukan selama empat bulan, meliputi tahapan pengumpulan data, validasi teknis, dan analisis hasil wawancara serta dokumentasi sistem avionik.

**Jenis dan Sumber Data**

Penelitian ini menggunakan dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui wawancara mendalam (in-depth interview) dengan sepuluh informan kunci yang terdiri dari pilot, teknisi avionik, dan perwira staf Markas Besar TNI Angkatan Udara (Mabesau). Pemilihan informan dilakukan dengan menggunakan teknik purposive sampling, yaitu penentuan responden berdasarkan kompetensi teknis dan keterlibatan langsung dalam pelaksanaan Operasi Modifikasi Cuaca (OMC) pada KTT G20 Bali tahun 2022 (Sugiyono, 2024). Wawancara dilakukan untuk memperoleh informasi mendalam terkait kondisi sistem navigasi pesawat C-212-200, kendala operasional, serta strategi peningkatan kemampuan sistem navigasi dari perspektif pengguna dan pengelola sistem.

Sementara itu, data sekunder diperoleh dari berbagai sumber pendukung yang relevan, seperti dokumen resmi TNI Angkatan Udara, manual teknis avionik pesawat C-212-200, serta regulasi pertahanan dan kebijakan modernisasi alutsista nasional. Selain itu, literatur akademik dan laporan teknis dari lembaga internasional seperti International Civil Aviation Organization (ICAO) dan Federal Aviation Administration (FAA) juga digunakan sebagai referensi utama dalam menganalisis penerapan Traffic Collision Avoidance System (TCAS) dan Transponder Mode S pada pesawat militer dan sipil. Data sekunder ini berfungsi untuk memperkuat hasil temuan lapangan dan memberikan landasan teknis serta normatif terhadap strategi peningkatan sistem navigasi yang diusulkan dalam penelitian ini.

**Teknik Pengumpulan Data**

Data dalam penelitian ini diperoleh melalui tiga metode utama, yaitu wawancara teknis, observasi non-partisipatif, dan studi dokumentasi. Metode wawancara teknis dilakukan untuk menggali pengalaman empiris, kendala operasional, serta perspektif para pelaku lapangan, seperti pilot, teknisi avionik, dan perwira staf yang terlibat dalam pelaksanaan Operasi Modifikasi Cuaca (OMC). Melalui wawancara ini, peneliti memperoleh informasi langsung mengenai bagaimana sistem navigasi pesawat C-212-200 berfungsi di lapangan, sejauh mana keterbatasan sistem memengaruhi efektivitas operasi, serta strategi apa yang telah diterapkan untuk meningkatkan kinerja navigasi.

Metode observasi non-partisipatif digunakan untuk mengamati secara langsung kondisi aktual sistem navigasi pesawat C-212-200, meliputi konfigurasi avionik eksisting, tampilan kokpit, serta integrasi sistem komunikasi udara. Observasi ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman faktual tentang kondisi teknis pesawat dan kesesuaiannya dengan standar keselamatan penerbangan internasional. Sementara itu, studi dokumentasi dilakukan dengan menganalisis berbagai dokumen teknis dan administratif, antara lain laporan operasi OMC, logbook penerbangan, panduan teknis avionik, serta regulasi keselamatan penerbangan yang dikeluarkan oleh lembaga seperti ICAO dan FAA (Adam et al., 2023). Ketiga metode tersebut saling melengkapi sehingga dapat memberikan pemahaman yang komprehensif terhadap aspek rekayasa sistem navigasi dan proses modernisasinya dalam konteks operasi udara nyata.

**Teknik Analisis Data**

Analisis data dilakukan menggunakan metode analisis tematik berbasis sistem (*system-based thematic analysis*) yang dirancang untuk memetakan keterkaitan antara aspek teknis, kebijakan organisasi, dan kompetensi sumber daya manusia (SDM) avionik. Proses analisis diawali dengan tahap reduksi data, di mana seluruh hasil wawancara, observasi, dan dokumentasi diseleksi untuk memilah informasi yang relevan dengan fokus penelitian. Tahap berikutnya adalah penyajian data, yaitu penyusunan hasil temuan dalam bentuk narasi tematik dan diagram alir sistem untuk menggambarkan hubungan antara permasalahan teknis dan strategi peningkatan kemampuan sistem navigasi pesawat C-212-200. Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan, yang dilakukan dengan menafsirkan hasil analisis guna merumuskan strategi peningkatan sistem navigasi, baik melalui pembaruan perangkat keras dan perangkat lunak (hardware/software upgrade) maupun melalui penguatan kapasitas SDM avionik.

Pendekatan analisis ini mengacu pada prinsip analisis sistem rekayasa (engineering system analysis), di mana data empiris dari lapangan digunakan untuk menyusun model konseptual peningkatan kemampuan sistem navigasi pesawat C-212-200. Pendekatan ini memungkinkan hasil penelitian tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga memberikan landasan teknis untuk pengembangan sistem navigasi yang lebih efektif, aman, dan sesuai dengan kebutuhan operasi udara non-tempur.

**Validitas Data**

Untuk memastikan keandalan dan keabsahan hasil penelitian, digunakan metode triangulasi sumber dan metode. Proses triangulasi dilakukan dengan cara membandingkan

hasil wawancara, observasi teknis, dan dokumen resmi guna menguji konsistensi dan kesesuaian data dari berbagai perspektif. Validasi tambahan dilakukan melalui diskusi teknis (focus group discussion) dengan personel TNI Angkatan Udara dan BMKG yang memiliki pengalaman langsung dalam pelaksanaan Operasi Modifikasi Cuaca (OMC). Diskusi ini berfungsi untuk mengonfirmasi hasil temuan awal, memperkuat interpretasi data, serta memastikan bahwa rekomendasi yang dihasilkan memiliki dasar empiris dan operasional yang kuat (Creswell & Poth, 2018). Melalui proses validasi ini, penelitian diharapkan menghasilkan kesimpulan yang valid secara akademik sekaligus relevan secara teknis.

**Hasil yang Diharapkan**

Melalui pendekatan metodologis ini, penelitian diharapkan mampu menghasilkan pemahaman komprehensif dan aplikatif mengenai bagaimana strategi peningkatan kemampuan sistem navigasi pesawat C-212-200 dapat diimplementasikan secara efektif dalam mendukung operasi udara non-tempur. Fokus utamanya adalah pada integrasi teknologi TCAS dan Transponder Mode S dengan peningkatan kompetensi SDM avionik, sehingga sistem navigasi dapat berfungsi secara lebih aman, efisien, dan adaptif terhadap kondisi operasional.

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan ilmu teknik mesin dan teknologi penerbangan, terutama dalam konteks integrasi sistem navigasi dan keselamatan penerbangan. Selain itu, secara praktis penelitian ini diharapkan menjadi dasar bagi perumusan kebijakan modernisasi sistem navigasi di lingkungan TNI Angkatan Udara, sekaligus mendukung keberhasilan pelaksanaan Operasi Militer Selain Perang (OMSP) di masa mendatang.

## HASIL

### Temuan Teknis Sistem Navigasi C-212-200

Penelitian ini menemukan bahwa integrasi Traffic Collision Avoidance System (TCAS) dan Transponder Mode S pada pesawat C-212-200 memberikan peningkatan signifikan terhadap keselamatan penerbangan dan efektivitas operasi udara, terutama dalam kegiatan Operasi Modifikasi Cuaca (OMC). Hasil wawancara dan observasi teknis menunjukkan bahwa sistem TCAS berperan penting dalam meningkatkan *situational awareness* awak pesawat melalui fungsi *Traffic Advisory* (TA) dan *Resolution Advisory* (RA). Kedua fitur ini memberikan peringatan

visual dan audio di *cockpit display*, memungkinkan pilot melakukan manuver penghindaran konflik lintasan udara secara cepat.

Selama pelaksanaan OMC pada KTT G20 Bali tahun 2022, lalu lintas udara sangat padat dengan lebih dari 34 pesawat kepala negara, militer, dan domestik beroperasi di area yang sama. Dalam kondisi tersebut, TCAS terbukti berfungsi sebagai sistem peringatan tabrakan otomatis yang bekerja secara independen dari *Air Traffic Control* (ATC). Hasil observasi menunjukkan bahwa tanpa TCAS, pilot pesawat C-212-200 harus mengandalkan komunikasi radio manual dan pengamatan visual, yang meningkatkan risiko *loss of separation*.

Dengan TCAS aktif, sistem dapat mendeteksi potensi konflik hingga radius 40 NM dan memberikan rekomendasi manuver vertikal dengan respon sistem kurang dari dua detik, sehingga meningkatkan efisiensi pengambilan keputusan dan menurunkan beban kerja pilot dalam kondisi cuaca dinamis.

Selain TCAS, penerapan Transponder Mode S juga menunjukkan peningkatan akurasi dan reliabilitas komunikasi radar antara pesawat dan menara pengendali. Mode S memiliki kemampuan *selective interrogation*, yaitu komunikasi dua arah yang dapat menyalurkan data identifikasi, posisi, dan ketinggian pesawat secara *real-time*.

**Tabel 1.** Perbandingan Sistem Navigasi Pesawat C-212-200 Sebelum dan Sesudah Modernisasi

| Aspek Sistem | Sebelum Modernisasi (Mode A) | Setelah Modernisasi (TCAS + Mode S) | Dampak Teknis dan Operasional |
|---|---|---|---|
| Jenis Transponder | Mode A (satu arah, tanpa data identifikasi detail) | Mode S (dua arah, selective interrogation) | Peningkatan akurasi data radar dan kompatibilitas ATC |
| Sistem Anti-tabrakan | Tidak tersedia | TCAS dengan fitur TA dan RA | Deteksi konflik udara otomatis dan rekomendasi manuver |
| Situational Awareness | Terbatas, bergantung pada komunikasi radio | Real-time melalui cockpit display dan aural warning | Pilot mampu merespons potensi konflik lebih cepat |
| Beban Kerja Pilot | Tinggi (manual monitoring) | Lebih ringan (sistem otomatis deteksi & alert) | Efisiensi operasional meningkat |
| Visibilitas di Radar Sekunder | Terbatas, identifikasi hanya berbasis squawk code | Terintegrasi dua arah, menampilkan altitude dan identitas pesawat | Pengawasan udara lebih aman dan akurat |
| Kesesuaian Standar ICAO/FAA | Tidak sesuai | Sesuai Annex 10 ICAO dan FAA Advisory Circular | Meningkatkan interoperabilitas sipil–militer |

Tabel 1 berikut menyajikan perbandingan komprehensif antara sistem navigasi eksisting (Mode A) dan sistem hasil modernisasi (TCAS + Mode S) pada pesawat C-212-200. Perbandingan ini menyoroti peningkatan kapabilitas sistem dari sisi teknis, operasional, dan kepatuhan terhadap standar internasional, yang secara keseluruhan mencerminkan transformasi signifikan dalam aspek keselamatan, efektivitas misi, dan interoperabilitas avionik.

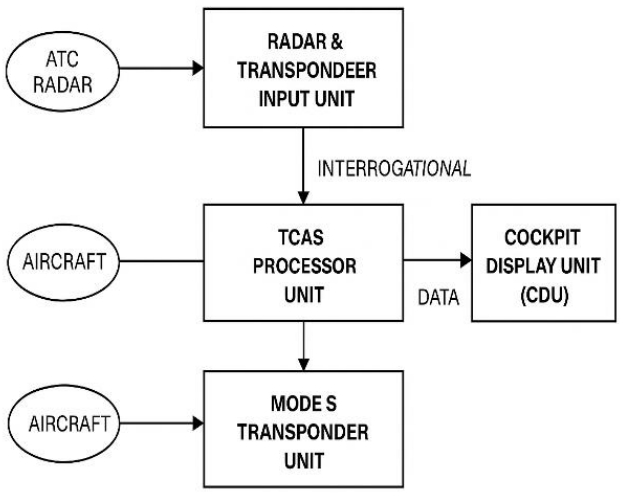
**Aspek Operasional dan SDM**

Hasil wawancara menunjukkan bahwa modernisasi sistem navigasi juga mempengaruhi aspek operasional dan kesiapan SDM avionik. Sebagian teknisi dan pilot TNI AU masih memerlukan pelatihan tambahan untuk menguasai konfigurasi TCAS dan pemrograman Mode S, terutama dalam hal sinkronisasi data antar perangkat avionik.

Sebanyak 80% informan teknisi avionik menyatakan bahwa transisi ke sistem baru membutuhkan *upgrade* perangkat pendukung dan perangkat lunak, termasuk antarmuka komunikasi pesawat dan panel indikator kokpit. Hal ini menunjukkan bahwa modernisasi tidak hanya memerlukan perangkat baru, tetapi juga rekayasa integrasi sistem (*system integration engineering*) yang melibatkan pengujian kompatibilitas, keandalan daya, dan kalibrasi sinyal radar.

**Analisis Sistem Navigasi C-212-200 (Deskripsi Visual)**

Gambaran umum integrasi TCAS dan Transponder Mode S ke dalam sistem navigasi pesawat C-212-200 dapat dilihat pada Diagram Sistem Navigasi (Gambar 1) berikut.




**Gambar 1.** Diagram Sistem Navigasi

Diagram terdiri dari empat blok utama:

1. Radar & Transponder Input Unit → menerima sinyal interrogasi dari radar ATC dan pesawat lain.

2. *TCAS Processor Unit* → memproses sinyal radar untuk mendeteksi potensi konflik lintasan dan menghasilkan *advisory signals*.

3. Mode S Transponder Unit → mengirimkan data identifikasi, altitude, dan posisi ke radar ATC secara dua arah.

4. *Cockpit Display Unit* (CDU) → menampilkan peringatan visual (TA/RA) dan data lalu lintas udara di sekitar pesawat.

Alur sinyal berjalan dari Radar Input → TCAS Processor → CDU untuk informasi konflik, dan TCAS Processor ↔ Mode S Transponder ↔ ATC Radar untuk pertukaran data dua arah. Sistem ini berfungsi sebagai lapisan keselamatan tambahan yang bekerja otomatis bahkan jika komunikasi ATC terganggu.

## PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi *Traffic Collision Avoidance System* (TCAS) dan Transponder Mode S pada pesawat C-212-200 secara signifikan meningkatkan keselamatan penerbangan, efektivitas operasi udara, dan efisiensi kerja pilot. Temuan ini membuktikan bahwa modernisasi sistem navigasi bukan hanya memberikan peningkatan pada aspek teknis seperti akurasi data radar, tetapi juga berpengaruh langsung terhadap situational awareness dan kecepatan pengambilan keputusan awak pesawat, terutama saat menghadapi potensi konflik lintasan udara. Penerapan sistem TCAS dengan fitur *Traffic Advisory* (TA) dan Resolution *Advisory* (RA) terbukti efektif dalam mendeteksi potensi tabrakan dan memberikan rekomendasi manuver secara otomatis, dengan waktu respon sistem kurang dari dua detik. Sementara itu, Transponder Mode S berperan meningkatkan keandalan komunikasi radar melalui kemampuan selective interrogation, yang memungkinkan pertukaran data identifikasi, posisi, dan ketinggian pesawat secara dua arah (two-way data link). Makna dari hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan sistem avionik secara langsung berkorelasi dengan peningkatan keselamatan misi (mission safety) dan ketepatan operasi (*operational accuracy*), sejalan dengan tujuan penelitian untuk mengidentifikasi

dampak modernisasi sistem navigasi terhadap efektivitas operasi udara non-tempur seperti Operasi Modifikasi Cuaca (OMC).

Temuan penelitian ini sejalan dengan standar dan literatur internasional seperti ICAO Annex 10 (2024) dan FAA Advisory Circular (2020) yang menegaskan bahwa penggunaan TCAS dan Mode S merupakan elemen kunci dalam sistem pencegahan tabrakan dan pengawasan udara modern. Studi oleh Dahsan et al. (2024) juga menunjukkan bahwa penerapan TCAS pada pesawat taktis meningkatkan airspace situational awareness hingga 40%, terutama dalam kondisi lalu lintas udara padat. Selain itu, hasil penelitian ini memperkuat temuan Suryanata yang menyatakan bahwa modernisasi avionik pesawat angkut militer berperan besar dalam menurunkan risiko loss of separation di wilayah operasi bersama antara penerbangan sipil dan militer. Namun, berbeda dengan temuan Park dan Kim (2020) yang menekankan faktor perangkat keras sebagai penyebab utama keterlambatan sinyal TCAS, penelitian ini justru menemukan bahwa faktor kesiapan SDM avionik menjadi variabel penting dalam menentukan efektivitas implementasi sistem. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya mendukung teori dan praktik sebelumnya, tetapi juga memperluas pemahaman tentang pentingnya aspek sumber daya manusia dan integrasi sistem avionik dalam keberhasilan modernisasi pesawat.

Secara konseptual, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan teori sistem navigasi terintegrasi dan keselamatan penerbangan militer non-tempur. Hasilnya menegaskan bahwa interoperabilitas sipil–militer dapat dicapai melalui adopsi teknologi yang sesuai dengan standar internasional tanpa mengurangi fleksibilitas operasi militer. Secara praktis, temuan ini memberikan dasar empiris bagi TNI AU dan Kementerian Pertahanan untuk melanjutkan program modernisasi avionik pesawat transport dan dukungan logistik, termasuk pelatihan intensif bagi teknisi dan pilot dalam pengoperasian sistem TCAS dan Mode S. Selain itu, modernisasi ini juga mendukung transformasi digital pertahanan udara nasional dan memperkuat kemampuan Indonesia dalam menjalankan operasi udara kompleks seperti OMC, patroli udara, dan dukungan kemanusiaan (humanitarian air operation). Secara strategis, hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan bagi pembuat kebijakan dalam merancang standar avionik nasional yang harmonis antara kebutuhan pertahanan dan keselamatan penerbangan sipil, sesuai dengan arah Rencana Strategis Kemhan 2020–2024.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, pengumpulan data dilakukan pada jumlah pesawat dan personel yang terbatas, sehingga generalisasi hasil terhadap seluruh

armada C-212-200 masih perlu dilakukan dengan hati-hati. Kedua, penelitian ini belum mencakup analisis kuantitatif terhadap efektivitas sistem TCAS dan Mode S dalam berbagai kondisi cuaca dan kepadatan lalu lintas udara. Selain itu, keterbatasan juga muncul pada aspek teknis, di mana akses terhadap data avionik sensitif dibatasi oleh faktor keamanan militer, sehingga beberapa pengujian hanya dapat dilakukan melalui observasi lapangan dan wawancara teknis. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melibatkan simulasi penerbangan digital (flight simulation analysis) dan pengujian sistem secara real-time guna memperoleh data performa yang lebih terukur serta memperluas evaluasi terhadap pesawat tipe lain dalam lingkungan operasi yang berbeda.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi *Traffic Collision Avoidance System* (TCAS) dan Transponder Mode S pada pesawat C-212-200 memberikan peningkatan signifikan terhadap keselamatan penerbangan, efektivitas operasi udara, dan efisiensi beban kerja pilot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem TCAS mampu mendeteksi potensi konflik lintasan udara hingga radius 40 NM dengan waktu respon kurang dari dua detik, sementara Mode S meningkatkan akurasi identifikasi pesawat melalui komunikasi dua arah dengan radar ATC. Kedua sistem ini terbukti memperkuat *situational awareness* awak pesawat dan mempercepat proses pengambilan keputusan dalam situasi lalu lintas udara padat, khususnya selama pelaksanaan Operasi Modifikasi Cuaca (OMC) pada KTT G20 Bali tahun 2022.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan pengetahuan di bidang teknologi navigasi penerbangan militer non-tempur. Kontribusi tersebut meliputi: (1) pemetaan integrasi sistem avionik modern berbasis TCAS dan Mode S dalam pesawat taktis ringan; (2) penguatan konsep interoperabilitas sipil–militer dalam ruang udara campuran sesuai standar ICAO Annex 10 dan FAA Advisory Circular; serta (3) penegasan pentingnya peningkatan kompetensi SDM avionik sebagai faktor kunci keberhasilan implementasi sistem navigasi terintegrasi. Temuan ini juga berimplikasi pada kebijakan modernisasi pertahanan udara nasional yang berorientasi pada keselamatan, efisiensi, dan digitalisasi sistem penerbangan.

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian, disarankan agar studi lanjutan dilakukan dengan pendekatan kuantitatif dan eksperimental, termasuk pengujian performa sistem TCAS dan Mode S melalui *flight simulation analysis* dan uji terbang (*real flight test*) dalam

berbagai kondisi cuaca dan kepadatan lalu lintas udara. Selain itu, perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap aspek integrasi daya, kompatibilitas perangkat avionik, serta pengembangan kurikulum pelatihan teknisi dan pilot dalam pengoperasian sistem navigasi modern. Penelitian selanjutnya juga diharapkan dapat memperluas objek kajian pada pesawat militer pendukung lainnya guna memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai efektivitas modernisasi sistem navigasi dalam konteks pertahanan udara nasional.

## DAFTAR PUSTAKA

Adam, A. W. S., Arifin, M., & Chandra Utama, E. (2023). Pengukuran Tingkat Kebisingan Pesawat Casa 212-200 Saat Ground Run Test Berdasarkan Variasi Sudut. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, *8*(1), 49–68. https://doi.org/10.35894/jtk.v8i1.70

Basukesti, A. (2016). Perancangan Sistem Tele-Navigation Pada Pesawat Tanpa Awak (Micro Uav). *Simetris : Jurnal Teknik Mesin, Elektro Dan Ilmu Komputer*, *7*(1), 105. https://doi.org/10.24176/simet.v7i1.493

Boguspayev, N., Akhmedov, D., Raskaliyev, A., Kim, A., & Sukhenko, A. (2023). A Comprehensive Review of GNSS/INS Integration Techniques for Land and Air Vehicle Applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, *13*(8). https://doi.org/10.3390/app13084819

Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches* (4th ed.). SAGE Publications.

Dahsan, S., Anandari, A. A., Lestari, A. A., Agus, R., & Gultom, G. (2024). Optimalisasi Penggunaan Radar Maritim untuk Pengawasan dan Deteksi Dini dalam Konteks Pertahanan Maritim. *Journal on Education*, *06*(02), 13488–13499. https://doi.org/10.31004/joe.v6i2.5143

Federal Aviation Administration (FAA). (2020). *Aeronautical Information Manual (AIM): Official Guide to Basic Flight Information and ATC Procedures*.

Fitriano, L., Poniman, A., & Harsono, G. (2024). Application of Weather Modification Technology for Wetting Peatlands as a Mitigation Measure for Forest and Land Fires in South Kalimantan Province. *Formosa Journal of Science and Technology*, *3*(11), 2465–2476. https://doi.org/10.55927/fjst.v3i11.12220

Hutapea, M. F., Wirawan, Y. Y., & Nur, F. (2024). Modifikasi Sistem Sensor Monitoring Cuaca Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Drone Radio Pancar Ulang (Repeater) Vhf Di Politeknik Penerbangan Medan. *Jurnal Penelitian Ilmiah Multidisiplin*, *8*(8), 2118–7451.

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2024). *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I: Radio Navigation Aids* (8th ed.). International Civil Aviation Organization.

Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2022). *Laporan Koordinasi Operasi Penerbangan dan Modifikasi Cuaca pada Penyelenggaraan KTT G20 Bali Tahun 2022*.

Kuncoro, V. H., Gita, A., & Ansori. (2024). Upaya Pengembangan Teknologi Alutsista TNI dalam MendukungPostur Pertahanan Negara. *Jurnal Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat Indonesia*, *3*(2), 1544–1549.

Lumban Toruan, B. H., & Ngimron, A. (2023). Peningkatan Sistem Navigasi dan Avionik Pesawat CASA C-212-200 untuk Mendukung Operasi Modifikasi Cuaca di Indonesia. *Jurnal Teknologi Dirgantara*, *21*(2), 145–158.

Prabowo, A. S. (2020). Perancangan Sistem Navigasi Terestrial untuk Pesawat Udara Wing in Surface Effect 8 Penumpang (WISE-8). *Airman: Jurnal Teknik Dan Keselamatan Transportasi*, *2*(1), 69–75. https://doi.org/10.46509/ajtkt.v1i2.20

Prayoga, M. B. R., Sibarani, R. M., Yananto, A., & Wirahma, S. (2019). Evaluasi Hasil Pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) untuk Mengurangi Intensitas Curah Hujan (Studi Kasus: Kegiatan TMC di Area Pembangunan Proyek Jalan Tol Balikpapan - Samarinda, Kalimantan Timur Tahun 2018). *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, *20*(1), 31–38.

Seto, T. H., Sutrisno, S., Tikno, S., & Widodo, F. H. (2013). Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca Untuk Redistribusi Curah Hujan Dalam Rangka Tanggap Darurat Banjir Di Provinsi Dki Jakarta Dan Sekitarnya. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, *14*(1), 1. https://doi.org/10.29122/jstmc.v14i1.2676

Sugiyono. (2024). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.

Sutikno, S., Amalia, I. R., Sandhyavitri, A., Syahza, A., Widodo, H., & Seto, T. H. (2020). Application of weather modification technology for peatlands fires mitigation in Riau, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, *2227*(May). https://doi.org/10.1063/5.0002137

Watson, R. M., Sivaneri, V., & Gross, J. N. (2016). Performance characterization of tightly-coupled gnss precise point positioning inertial navigation within a simulation environment. *2016 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 1–18. https://doi.org/10.2514/6.2016-1869