Analisis Risiko Operasional VCCS pada ATC Radar Simulator

Ayub Wimatra*[, 1], Yuyun Suprapto[2], Muhammad Caesar Akbar[1], Darmeli Nasution[3]

[1]Program Studi Teknologi Pemeliharaan Pesawat Udara, Politeknik Penerbangan Medan
Jl. Penerbangan No 85, Medan, Sumatera Utara 20131, Indonesia
[2]Program Studi Teknik Navigasi Udara, Politeknik Penerbangan Surabaya
Jl. Jemur Andayani I/73, Surabaya 60236, Indonesia
[3]Program Studi Teknologi Informasi, Universitas Pembangunan Panca Budi
Jl. Jend. Gatot Subroto KM 4.5 Sei Sikambing, Medan, Sumatera Utara 20128, Indonesia

*E-mail: ayub83wimatra@gmail.com

Diterima: 14 Januari 2026, direvisi: 23 Februari 2026, disetujui: 24 April 2026,
tersedia daring: 22 Oktober 2026, diterbitkan: 23 Oktober 2026

Abstrak

Voice Communication Control Switching System (VCCS) merupakan salah satu komponen penting dalam mendukung komunikasi pada ATC Radar Simulator. Keandalan operasional sistem komunikasi menjadi faktor yang perlu diperhatikan karena gangguan yang terjadi dapat mempengaruhi efektivitas proses simulasi komunikasi penerbangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi risiko operasional pada VCCS menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Data penelitian diperoleh melalui pengujian operasional sistem sebanyak 700 siklus pengoperasian. Hasil pengujian menghasilkan 35 *failure event* yang kemudian dikelompokkan ke dalam lima *failure mode*, yaitu koneksi gagal antara aplikasi VCCS dan ESP8266 (F1), perpindahan kanal komunikasi gagal (F2), *response system delay* lebih dari 2 detik (F3), aplikasi VCCS *crash/hang* (F4), dan sistem tidak tersedia (F5). Analisis FMEA dilakukan menggunakan parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) untuk menentukan prioritas risiko berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN). Hasil penelitian menunjukkan bahwa F3 memiliki nilai RPN tertinggi sebesar 45 sehingga menempati prioritas risiko pertama, diikuti oleh F1 dengan nilai RPN sebesar 28. Temuan ini menunjukkan bahwa risiko operasional utama pada VCCS berkaitan dengan keterlambatan respons sistem dan stabilitas konektivitas komunikasi yang berpotensi menyebabkan keterlambatan kendali operator dan menurunkan kelancaran simulasi komunikasi penerbangan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi masukan dalam upaya pengelolaan risiko dan peningkatan keandalan operasional sistem komunikasi pada ATC Radar Simulator.

Kata kunci: ATC Radar Simulator, *failure mode and effects analysis* (FMEA), *risk priority number* (RPN), risiko operasional, *voice communication control switching system* (VCCS).

Abstract

Operational Risk Analysis of Voice Communication Control Switching System (VCCS) in an ATC Radar Simulator*: The Voice Communication Control Switching System (VCCS) is a critical component supporting communication functions within an Air Traffic Control (ATC) Radar Simulator. Operational reliability of communication systems is essential because system disruptions may affect the effectiveness of aviation communication simulation activities. This study aims to identify the operational risks associated with the VCCS using the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method. Research data were obtained through operational testing consisting of 700 operating cycles. The testing process identified 35 failure events, which were subsequently classified into five failure modes: failed connection between the VCCS application and ESP8266 (F1), failed communication channel switching (F2), system response delay exceeding 2 seconds (F3), VCCS application crash or hang (F4), and system unavailability (F5). FMEA was performed using the Severity (S), Occurrence (O), and Detection (D) parameters, which were assessed based on failure frequency, operational impact on communication performance, and the system's ability to detect disturbances during testing. The results indicate that F3 achieved the highest RPN value of 45, making it the highest-priority operational risk, followed by F1 with an RPN value of 28. These findings indicate that the primary operational risks of the VCCS are related to delayed system response and unstable communication connectivity, which may cause delayed operator control and reduce the smoothness of aviation communication simulation. The results of this study provide useful insights for risk management and operational reliability improvement of communication systems used in ATC Radar Simulator environments.*

Keywords**:** *ATC radar simulator, failure mode and effects analysis (FMEA), operational risk, risk priority number (RPN), voice communication control switching system (VCCS).*

1. Pendahuluan

Sistem komunikasi merupakan salah satu komponen utama dalam penyelenggaraan pelayanan lalu lintas udara karena berfungsi sebagai media pertukaran informasi antara pengatur lalu lintas udara (*air traffic controller*), pilot, dan unit pelayanan navigasi penerbangan lainnya. Keandalan komunikasi sangat menentukan efektivitas penyampaian instruksi, koordinasi operasional, serta kelancaran pengelolaan lalu lintas udara [1][2]. Seiring perkembangan teknologi penerbangan, sistem komunikasi mengalami

http://dx.doi.org/10.25104/warlit.v35i1.2070
2528-4045/ 0215-9066 ©2026 Badan Kebijakan Transportasi, diterbitkan oleh Sekretariat Badan Kebijakan Transportasi.
Artikel ini *open access* dibawah lisensi CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)
Jurnal Warta Ardhia telah terakreditasi Sinta 4.

transformasi menuju arsitektur berbasis jaringan digital dan Internet Protocol (IP) yang memungkinkan integrasi layanan komunikasi secara lebih fleksibel dan efisien [3][4]. Selain meningkatkan kapasitas dan fleksibilitas layanan, perkembangan tersebut juga menuntut kemampuan sistem komunikasi untuk mempertahankan kontinuitas operasional dalam berbagai kondisi penggunaan. Oleh karena itu, aspek keandalan dan pengelolaan risiko operasional menjadi bagian penting dalam pengembangan sistem komunikasi penerbangan modern [5].

Salah satu sistem yang berperan penting dalam pengelolaan komunikasi suara adalah *Voice Communication Control Switching System* (VCCS), yaitu pusat pengendalian komunikasi yang memungkinkan operator melakukan pemilihan kanal, pengaturan jalur komunikasi suara, serta pengelolaan koneksi komunikasi selama operasional berlangsung. Perkembangan teknologi komunikasi berbasis IP mendorong VCCS semakin terintegrasi dengan perangkat lunak, jaringan data, dan perangkat komunikasi digital [6][7]. Dalam lingkungan pendidikan dan pelatihan penerbangan, VCCS digunakan sebagai bagian dari *Air Traffic Control* (ATC) Radar Simulator untuk mendukung simulasi komunikasi antara pengatur lalu lintas udara dan pengguna ruang udara, sehingga performa sistem turut mempengaruhi kualitas komunikasi serta efektivitas proses pembelajaran. Penggunaan ATC Radar Simulator memungkinkan proses pembelajaran berlangsung pada lingkungan yang menyerupai operasi nyata melalui integrasi perangkat komunikasi, perangkat lunak, dan fasilitas pendukung sehingga kompetensi operasional dapat dikembangkan secara aman dan terstruktur [8].

Meningkatnya integrasi perangkat keras, perangkat lunak, dan jaringan komunikasi menyebabkan sistem komunikasi modern menghadapi berbagai risiko operasional, seperti gangguan komunikasi, keterlambatan respons, kegagalan koneksi, dan gangguan peralatan yang dapat menurunkan kualitas layanan [9][10]. Pada sistem komunikasi penerbangan, kondisi tersebut perlu mendapat perhatian karena komunikasi merupakan salah satu elemen penting dalam mendukung keselamatan dan kelancaran operasional [7]. Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa komunikasi penerbangan merupakan bagian dari infrastruktur kritis yang memerlukan pengelolaan risiko berkelanjutan [11] termasuk melalui identifikasi sumber kegagalan dan karakteristik gangguan operasional untuk mendukung peningkatan performa serta keberlangsungan layanan komunikasi [12][13].

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi risiko operasional adalah *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Metode ini memungkinkan identifikasi mode kegagalan yang berpotensi terjadi pada suatu sistem, analisis dampak yang ditimbulkan, serta penentuan prioritas risiko berdasarkan tingkat keparahan (*severity*), frekuensi kejadian (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa FMEA merupakan metode yang efektif untuk mendukung proses pengambilan keputusan dalam manajemen risiko karena mampu memberikan prioritas penanganan terhadap sumber risiko yang paling signifikan [14][15]. Perkembangan penelitian FMEA juga menunjukkan adanya peningkatan pemanfaatan metode tersebut pada sistem yang memiliki tuntutan keandalan tinggi, termasuk sistem elektronik, sistem berbasis jaringan, dan infrastruktur kritis [14][16].

Penelitian terdahulu mengenai *Voice Communication Control Switching System* (VCCS) umumnya berfokus pada analisis kerusakan perangkat dan tindakan perbaikan setelah gangguan terjadi. Studi oleh Octavianie dan Putra [10], menganalisis gangguan pada *Voice Control Unit* (VCU) yang disebabkan oleh suhu ruangan yang tidak normal, gangguan konektivitas, serta kondisi perangkat yang mengalami *hang*. Meskipun penelitian tersebut memberikan gambaran teknis mengenai sumber kegagalan perangkat, pendekatan yang digunakan masih bersifat deskriptif dan korektif sehingga belum mampu memberikan prioritas risiko kegagalan secara kuantitatif. Di sisi lain, perkembangan penelitian komunikasi *Air Traffic Control* (ATC) modern lebih banyak menitikberatkan pada penerapan kecerdasan buatan, khususnya *Automatic Speech Recognition* (ASR), untuk meningkatkan akurasi komunikasi dan menurunkan beban kerja *controller* [5][9]. Selain itu, beberapa penelitian juga mulai membahas diagnosis kegagalan dan efisiensi prosedur perbaikan pada peralatan radio penerbangan [12][13]. Namun, penelitian-penelitian tersebut masih memberikan perhatian yang terbatas terhadap aspek keandalan infrastruktur *switching* VCCS sebagai media komunikasi utama. Sementara itu, metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) telah banyak digunakan sebagai pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi,

dan memprioritaskan risiko kegagalan pada berbagai sistem teknik [15][17], tetapi penerapannya pada sistem VCCS, khususnya dalam lingkungan *ATC Radar Simulator*, masih sangat terbatas. Oleh karena itu, masih terdapat kesenjangan penelitian dalam evaluasi risiko operasional VCCS secara sistematis. Untuk menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini menerapkan metode FMEA untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan memprioritaskan *failure mode* kritis pada sistem VCCS berbasis IoT melalui pengujian operasional sebanyak 700 siklus.

Kebaruan utama penelitian ini terletak pada penerapan FMEA berbasis data pengujian operasional aktual (700 siklus) untuk mengevaluasi risiko operasional VCCS berbasis IoT pada lingkungan ATC Radar Simulator, yang belum banyak dibahas pada penelitian sebelumnya. Penelitian ini diarahkan untuk menjawab dua pertanyaan utama, yaitu *failure mode* apa saja yang muncul selama pengoperasian Voice Communication Control Switching System (VCCS) pada ATC Radar Simulator berdasarkan hasil pengujian operasional, dan bagaimana prioritas risiko dari setiap *failure mode* berdasarkan analisis *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi risiko operasional pada *Voice Communication Control Switching System* (VCCS) yang digunakan pada ATC Radar Simulator menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Analisis dilakukan berdasarkan data hasil pengujian operasional sistem selama 700 siklus pengoperasian untuk mengidentifikasi *failure mode* yang terjadi, menentukan prioritas risiko berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN), serta memperoleh gambaran mengenai sumber risiko utama yang berpotensi mempengaruhi operasional sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mendukung pengelolaan risiko operasional pada sistem komunikasi penerbangan serta menjadi dasar bagi upaya peningkatan performa dan keberlangsungan layanan komunikasi pada lingkungan simulator penerbangan.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk menganalisis risiko operasional pada *Voice Communication Control Switching System* (VCCS) yang digunakan pada ATC Radar Simulator. Analisis dilakukan berdasarkan data hasil pengujian sistem selama 700 siklus pengoperasian.

2.1. Objek Penelitian

Sistem yang menjadi objek penelitian merupakan *Voice Communication Control Switching System* (VCCS) berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dikembangkan untuk mendukung operasional *Air Traffic Control* (ATC) Radar Simulator di Politeknik Penerbangan Medan. Sistem ini mengintegrasikan aplikasi VCCS berbasis Android, mikrokontroler ESP8266, jaringan *Wireless Local Area Network* (WLAN), serta antarmuka pengendalian komunikasi untuk melakukan proses pemilihan kanal, monitoring status komunikasi, dan pengendalian perangkat komunikasi secara *real-time* dalam lingkungan simulasi. Penelitian ini difokuskan pada evaluasi risiko operasional sistem tersebut selama pengujian sebanyak 700 siklus sehingga hasil penelitian merepresentasikan karakteristik operasional VCCS pada lingkungan simulator dan tidak secara langsung digeneralisasikan pada sistem komunikasi *Air Traffic Control* operasional.

Penelitian difokuskan pada analisis risiko operasional yang muncul selama pengoperasian sistem. Risiko operasional dalam penelitian ini didefinisikan sebagai potensi gangguan yang dapat mempengaruhi fungsi komunikasi, ketersediaan layanan, maupun efektivitas operasional VCCS selama digunakan pada lingkungan ATC Radar Simulator. Risiko tersebut diidentifikasi berdasarkan kejadian kegagalan (*failure event*) yang muncul selama proses pengujian sistem.

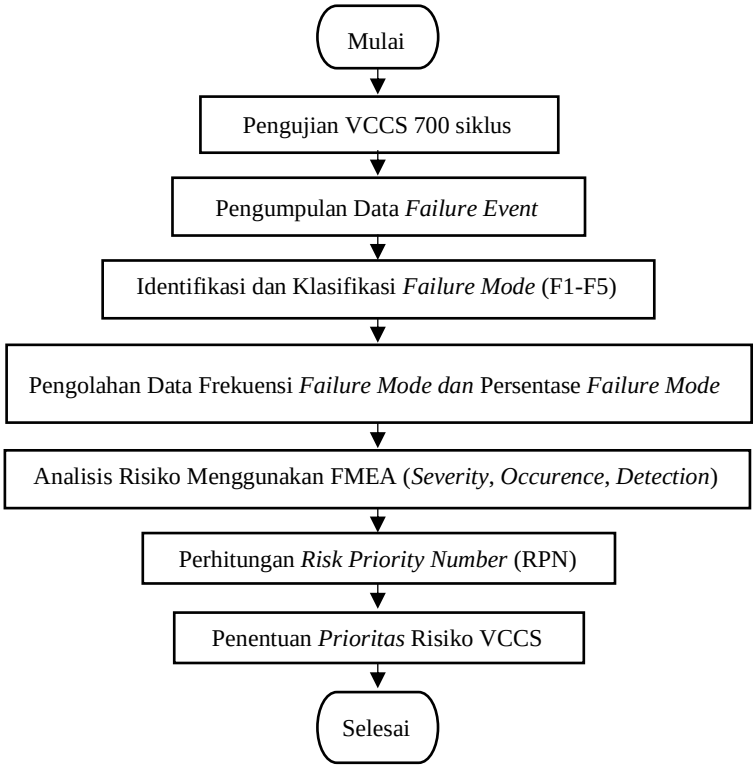
2.2. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui pengujian operasional VCCS sebanyak 700 siklus pengoperasian. Pengujian dilaksanakan secara bertahap yang terdiri atas 100 siklus pada tahap pertama, 200 siklus pada tahap kedua, dan 400 siklus pada tahap ketiga. Setiap siklus merepresentasikan satu

rangkaian operasi sistem yang meliputi proses aktivasi perangkat, koneksi komunikasi antara aplikasi dan perangkat kendali, perpindahan kanal komunikasi, serta proses monitoring kondisi sistem.

Secara lebih rinci, satu siklus pengoperasian VCCS terdiri atas enam tahapan. Pertama, observer menjalankan aplikasi VCCS pada perangkat Android sambil mengaktifkan *stopwatch* untuk mengamati waktu respons awal dan mencatat kegagalan apabila terjadi *crash*, *hang*, atau aplikasi gagal dijalankan. Kedua, aplikasi secara otomatis melakukan koneksi ke ESP8266 dan mengaktifkan kanal komunikasi 1 sebagai kanal default, sementara observer mencatat waktu hingga sistem berhasil terkoneksi dan kanal aktif. Ketiga, operator melakukan perpindahan kanal dari kanal 1 ke kanal 2, kemudian observer mengukur waktu *switching* dan mencatat kegagalan apabila perpindahan kanal tidak berhasil. Keempat, observer menekan tombol *Push-to-Talk* (PTT) pada perangkat audio sambil mengaktifkan *stopwatch* untuk mengukur waktu respons transmisi hingga indikator *TX On* pada aplikasi Android menyala. Kelima, aplikasi VCCS ditutup untuk mengakhiri satu siklus pengujian. Keenam, prosedur yang sama diulang pada siklus berikutnya hingga total 700 siklus tercapai. Seluruh pengujian diamati oleh tiga observer secara bergantian setiap 100 siklus di bawah supervisi langsung peneliti utama untuk menjaga konsistensi pencatatan data. Pengujian dilakukan pada jaringan WLAN lokal menggunakan router Ubiquiti UniFi 6 Pro dengan konfigurasi *LAN only* tanpa akses internet eksternal, dengan 11 klien aktif yang terhubung pada jaringan yang sama selama pengujian berlangsung.

Tahapan penelitian yang dilakukan mulai dari pengumpulan data hingga penentuan prioritas risiko operasional VCCS menggunakan metode FMEA ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian analisis risiko operasional VCCS menggunakan FMEA

Selama pengujian berlangsung dilakukan observasi terhadap seluruh kondisi yang berpotensi mengganggu operasional sistem. Setiap kejadian yang menyebabkan penurunan fungsi, gangguan komunikasi, atau ketidaksesuaian kinerja sistem dicatat sebagai *failure event*. Data yang dikumpulkan meliputi jenis gangguan, frekuensi kejadian, serta kondisi sistem pada saat gangguan terjadi. Seluruh data hasil observasi kemudian direkapitulasi sebagai dasar identifikasi risiko operasional pada VCCS.

2.3. Pengolahan Data

Data hasil pengujian yang diperoleh selama 700 siklus pengoperasian terlebih dahulu direkapitulasi untuk memperoleh jumlah total *failure event* yang terjadi pada sistem. Setiap *failure event* yang

teridentifikasi selama pengujian kemudian dikelompokkan berdasarkan karakteristik gangguan yang muncul sehingga diperoleh kategori *failure mode* yang mewakili sumber risiko operasional pada VCCS.

Dalam penelitian ini digunakan dua basis perhitungan persentase yang berbeda sesuai tujuan analisis. Basis pertama adalah total failure event yang tercatat selama pengujian (Nf = 35), yang digunakan untuk menggambarkan distribusi relatif masing-masing failure mode terhadap seluruh kejadian kegagalan. Basis kedua adalah total siklus pengoperasian sistem (Nc = 700), yang digunakan untuk menghitung tingkat kejadian (occurrence rate) masing-masing failure mode pada analisis FMEA. Pemisahan basis perhitungan ini dilakukan agar analisis distribusi kegagalan dan penentuan nilai Occurrence pada FMEA merepresentasikan dua aspek yang berbeda, yaitu dominasi relatif kegagalan dan probabilitas kemunculan kegagalan selama operasi sistem.

Berdasarkan hasil identifikasi dan klasifikasi data, *failure event* yang ditemukan selama pengujian diklasifikasikan ke dalam lima *failure mode*, yaitu (F1) koneksi gagal antara aplikasi VCCS dan ESP8266, (F2) perpindahan kanal komunikasi gagal, (F3) *response system delay* lebih dari 2 detik, (F4) aplikasi VCCS mengalami *crash* atau *hang*, dan (F5) sistem tidak tersedia (*system unavailable*).

Setelah proses klasifikasi selesai, dilakukan perhitungan frekuensi masing-masing *failure mode* untuk mengetahui jumlah kejadian yang terjadi selama pengujian. Frekuensi *failure mode* dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$F_i = \sum FE_i \tag{1}$$

dimana F_i adalah frekuensi *failure mode* ke-i dan FE_i adalah jumlah *failure event* yang termasuk dalam *failure mode* ke-i.

Persentase distribusi *failure mode* terhadap total *failure event* dihitung menggunakan Persamaan (2). Persamaan ini digunakan untuk menggambarkan proporsi masing-masing *failure mode* terhadap seluruh kejadian kegagalan yang tercatat selama pengujian.

$$P_i = \frac{n_i}{N_f} \times 100\% \tag{2}$$

dimana P_i adalah persentase kejadian *failure mode* ke-i (%), n_i adalah jumlah kejadian *failure mode* ke-i, dan N_f adalah total *failure event* yang tercatat selama pengujian (35).

Hasil perhitungan persentase distribusi digunakan untuk menggambarkan dominasi relatif masing-masing *failure mode* yang muncul selama pengujian. Informasi ini membantu mengidentifikasi *failure mode* yang paling sering muncul sebagai dasar analisis distribusi risiko operasional pada VCCS. Untuk analisis FMEA, nilai *Occurrence* tidak ditentukan berdasarkan distribusi *failure* terhadap total *failure event*, melainkan berdasarkan tingkat kejadian (*occurrence rate*) masing-masing *failure mode* terhadap total siklus pengoperasian sistem. *Occurrence rate* dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$OR_i = \frac{n_i}{N_c} \times 100\% \tag{3}$$

diaman OR_i adalah persentase kejadian *failure mode* ke-i (%), n_i adalah jumlah kejadian *failure mode* ke-i, dan N_c adalah total siklus pengoperasian sistem (700).

Hasil perhitungan occurrence rate digunakan sebagai dasar penentuan nilai Occurrence (O) pada FMEA sesuai kriteria pada Tabel 1. Semakin tinggi occurrence rate yang dihasilkan, semakin besar nilai Occurrence yang diberikan.

Data hasil pengolahan selanjutnya digunakan sebagai dasar penentuan nilai *Occurrence* serta untuk mengidentifikasi *failure mode* yang paling dominan selama pengujian. Informasi tersebut menjadi input pada analisis FMEA untuk menentukan prioritas risiko operasional masing-masing *failure mode*.

Tabel 1. Kriteria penilaian Occurrence (O) berdasarkan 700 siklus pengoperasian

Nilai O	Persentase Kejadian
1	< 1%
2	1–2%
3	2–3%
4	3–5%
5	5–10%
6	10–15%
7	15–20%
8	20–30%
9	30–50%
10	> 50%

Sumber: Disusun peneliti berdasarkan karakteristik operasional VCCS dan prinsip penilaian risiko FMEA

2.4. Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi dan menentukan prioritas risiko operasional pada *Voice Communication Control Switching System* (VCCS). Metode FMEA dipilih karena mampu mengidentifikasi mode kegagalan yang berpotensi terjadi pada sistem, mengevaluasi dampak yang ditimbulkan, serta menentukan tingkat prioritas risiko berdasarkan kombinasi tingkat keparahan, frekuensi kejadian, dan kemampuan deteksi kegagalan [14][15].

Penentuan kriteria *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) pada penelitian ini ditetapkan sebelum pengujian sebagai instrumen analisis FMEA dengan mempertimbangkan karakteristik operasional VCCS, dampak kegagalan terhadap fungsi komunikasi, frekuensi kejadian kegagalan, serta kemampuan sistem dalam mendeteksi gangguan operasional. Penyusunan kriteria tersebut mengacu pada prinsip manajemen risiko dan keandalan sistem komunikasi penerbangan yang menekankan aspek keselamatan, kontinuitas layanan, dan ketersediaan sistem sebagaimana direkomendasikan dalam *ICAO Annex 10* tentang *Aeronautical Telecommunications* dan *ICAO Safety Management Manual* [18][19]. Pada penelitian ini, indikator *response system delay* (F3) secara spesifik didefinisikan sebagai keterlambatan waktu respons sejak tombol *Push-to-Talk* (PTT) diaktifkan hingga indikator *TX On* pada aplikasi Android menyala. Delay lebih dari 2 detik dikategorikan sebagai *failure* karena berpotensi mengganggu kelancaran transmisi suara secara *real-time* pada simulasi komunikasi ATC.

Pemberian skor *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* untuk setiap *failure mode* dilakukan oleh peneliti utama (*principal investigator*) sebagai *subject matter expert* yang memahami arsitektur dan karakteristik operasional VCCS berdasarkan kriteria penilaian yang telah ditetapkan, dengan mempertimbangkan karakteristik gangguan dan hasil observasi selama 700 siklus pengoperasian. Justifikasi pemberian skor untuk masing-masing *failure mode* ditunjukkan pada Tabel 2.

Parameter Severity digunakan untuk menggambarkan tingkat dampak yang ditimbulkan oleh suatu *failure mode* terhadap operasional sistem. Semakin tinggi nilai *Severity*, semakin besar pengaruh kegagalan terhadap fungsi komunikasi dan keberlangsungan operasional VCCS. Kriteria penilaian *Severity* ditunjukkan pada Tabel 3.

Parameter *Detection* digunakan untuk menunjukkan kemampuan sistem dalam mendeteksi kegagalan sebelum menimbulkan dampak yang lebih besar terhadap operasional. Semakin tinggi nilai *Detection*, semakin sulit kegagalan tersebut dikenali oleh sistem. Kriteria penilaian *Detection* ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 2. Justifikasi penilaian SOD pada *failure mode*

Failure Mode	Justifikasi *Severity*	Justifikasi *Occurrence*	Justifikasi Detection
F1	Kegagalan koneksi menyebabkan fungsi monitoring dan kendali tidak dapat dijalankan sehingga berdampak besar pada operasi	Kejadian tergolong rendah (1–2% dari total 700 siklus).	Mudah terdeteksi melalui status koneksi aplikasi
F2	Kegagalan perpindahan kanal menyebabkan operator tidak dapat memilih kanal komunikasi yang diinginkan sehingga fungsi komunikasi terganggu	Kejadian sangat jarang (<1% dari total 700 siklus)	Mudah dikenali melalui indikator kanal aktif
F3	Delay respons menghambat transmisi suara *real-time* dan mengganggu komunikasi operasional	Frekuensi kejadian tertinggi (2–3% dari total 700 siklus)	Tidak selalu langsung dikenali tanpa pengukuran waktu
F4	*Crash* atau *hang* menghentikan fungsi monitoring dan kendali aplikasi	Kejadian sangat jarang (<1%)	Kondisi *crash/hang* langsung terlihat oleh operator
F5	Sistem tidak tersedia menyebabkan seluruh fungsi VCCS berhenti total	Kejadian sangat jarang (<1%)	Kegagalan langsung dapat dikenali ketika sistem tidak dapat beroperasi

Sumber: Disusun peneliti berdasarkan hasil pengujian operasional VCCS, expert judgment, dan analisis FMEA (2026)

Tabel 3. Kriteria penilaian *Severity* (S)

Nilai S	Kriteria Dampak
1–2	Tidak berpengaruh terhadap operasi
3–4	Gangguan kecil, fungsi utama tetap berjalan
5–6	Gangguan sedang, sebagian fungsi terganggu
7–8	Gangguan besar, fungsi utama tidak berjalan optimal
9–10	Kegagalan kritis, sistem tidak dapat digunakan

Sumber: Disusun peneliti berdasarkan karakteristik operasional VCCS dan prinsip keandalan sistem komunikasi penerbangan

Tabel 4. Kriteria penilaian *Detection* (D)

Nilai D	Kemampuan Deteksi
1	Pasti terdeteksi
2–3	Sangat mudah terdeteksi
4–5	Mudah terdeteksi
6–7	Agak sulit terdeteksi
8–9	Sulit terdeteksi
10	Hampir tidak dapat dideteksi

Sumber: Disusun peneliti berdasarkan kemampuan deteksi gangguan pada sistem VCCS.

Nilai *Occurrence* diperoleh berdasarkan frekuensi kejadian masing-masing *failure mode* yang telah dihitung pada tahap pengolahan data menggunakan kriteria yang ditunjukkan pada Tabel 1. Selanjutnya nilai *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN) sebagai indikator tingkat prioritas risiko. Perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) dilakukan melalui perkalian nilai Severity, Occurrence, dan Detection sebagaimana digunakan pada pendekatan FMEA konvensional [14][20].

$$RPN = S \times O \times D \tag{4}$$

dimana RPN adalah *Risk Priority Number*, S adalah *Severity*, O adalah *Occurrence*, dan D adalah *Detection*.

Nilai RPN yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menentukan urutan prioritas risiko pada masing-masing *failure mode*. Semakin tinggi nilai RPN yang dihasilkan, semakin tinggi prioritas penanganan risiko yang diperlukan. Oleh karena itu, prioritas risiko dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan peringkat nilai RPN dari yang tertinggi hingga terendah. Hasil analisis FMEA digunakan untuk mengidentifikasi *failure mode* yang memiliki tingkat risiko tertinggi serta menentukan prioritas penanganan risiko operasional pada VCCS yang digunakan pada ATC Radar Simulator.

Penelitian ini memiliki beberapa batasan metodologis. Analisis risiko difokuskan pada Voice Communication Control Switching System (VCCS) yang digunakan dalam lingkungan ATC Radar Simulator, sehingga hasil penelitian merepresentasikan karakteristik operasional sistem pada lingkungan simulasi dan tidak dimaksudkan untuk menggambarkan secara langsung risiko operasional sistem komunikasi *Air Traffic Control* (A TC) yang digunakan dalam layanan penerbangan sebenarnya. Penetapan skor *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* masih bergantung pada *expert judgment* peneliti utama yang didasarkan pada karakteristik operasional sistem dan hasil observasi selama pengujian. Selain itu, pengujian operasional dibatasi pada 700 siklus sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi operasional jangka panjang maupun lingkungan komunikasi penerbangan yang lebih kompleks. Evaluasi *residual risk* juga belum dilakukan karena tindakan mitigasi yang diusulkan masih berada pada tahap *recommended action* dan belum diimplementasikan pada sistem aktual.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian operasional VCCS selama 700 siklus pengoperasian menghasilkan sejumlah failure event yang terdokumentasi dalam failure event log sebagai dasar analisis risiko operasional sistem. Setiap kejadian kegagalan diverifikasi berdasarkan hasil observasi selama pengujian untuk memastikan kesesuaiannya dengan karakteristik gangguan yang terjadi sebelum dilakukan proses identifikasi failure mode. Data hasil pengujian selanjutnya diolah untuk mengidentifikasi distribusi failure mode, menentukan tingkat prioritas risiko menggunakan metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), serta mengevaluasi implikasi risiko yang muncul terhadap operasional ATC Radar Simulator. Pembahasan difokuskan pada identifikasi sumber risiko utama, penentuan prioritas risiko berdasarkan nilai Risk Priority Number (RPN), dan interpretasi hasil analisis dalam konteks operasional sistem komunikasi penerbangan.

3.1. Distribusi Risiko Operasional VCCS

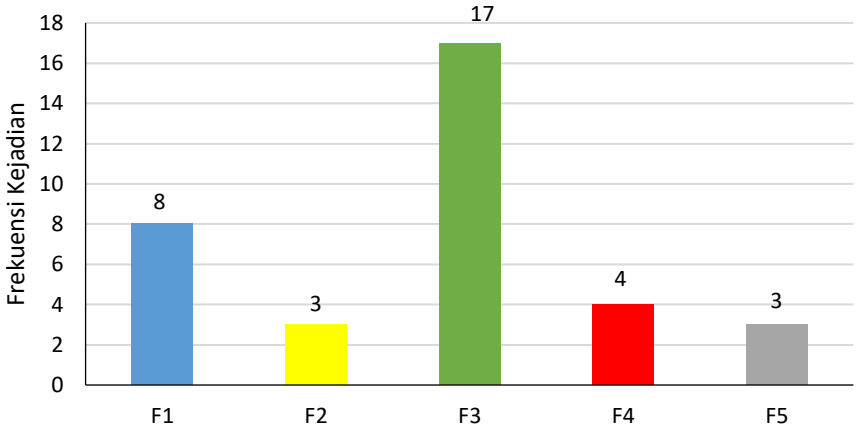
Pengujian operasional VCCS selama 700 siklus menghasilkan 35 *failure event* yang teridentifikasi pada lima failure *mode*. Seluruh *failure event* yang tercatat selama 700 siklus pengujian terlebih dahulu direkap pada lembar *Failure Event Log*. Setiap kejadian kemudian diverifikasi berdasarkan hasil observasi selama pengujian dan diklasifikasikan ke dalam kategori *failure mode* berdasarkan kesamaan karakteristik gangguan, komponen sistem yang terlibat, serta dampaknya terhadap operasional VCCS. Melalui proses klasifikasi tersebut diperoleh lima *failure mode* yang mewakili seluruh kejadian kegagalan selama pengujian dan selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Distribusi kejadian menunjukkan bahwa risiko operasional tidak tersebar secara merata pada seluruh *failure mode*, melainkan terkonsentrasi pada beberapa jenis gangguan tertentu. Kondisi ini menunjukkan bahwa sumber risiko utama pada sistem lebih banyak dipengaruhi oleh karakteristik kegagalan tertentu dibandingkan oleh seluruh fungsi sistem secara keseluruhan. Distribusi kejadian pada masing-masing *failure mode* disajikan pada Tabel 5.

Berdasarkan Tabel 5 terlihat bahwa distribusi *failure event* tidak tersebar secara merata pada seluruh *failure mode*. Untuk memperjelas perbandingan frekuensi kejadian antar *failure mode*, distribusi tersebut divisualisasikan pada Gambar 2.

Tabel 5. Distribusi *failure event* berdasarkan *failure mode*

Failure Mode	Deskripsi	Frekuensi	Persentase (%)
F1	Koneksi gagal antara aplikasi VCCS dan ESP8266	8	22,9
F2	Perpindahan kanal komunikasi gagal	3	8,6
F3	Response system delay > 2 detik	17	48,6
F4	Aplikasi VCCS crash/hang	4	11,4
F5	Sistem tidak tersedia	3	8,6
Total		35	100

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian (2026).



Sumber: Hasil pengolahan data penelitian (2026).

Gambar 2. Distribusi *failure event* berdasarkan *failure mode*

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa *failure mode* F3 (*response system delay* lebih dari 2 detik) merupakan kegagalan yang paling sering terjadi dengan jumlah 17 kejadian atau 48,6% dari total *failure event*. Selanjutnya, *failure mode* F1 (koneksi gagal antara aplikasi VCCS dan ESP8266) tercatat sebanyak 8 kejadian atau 22,9%. Adapun *failure mode* F4 (aplikasi VCCS *crash* atau *hang*) tercatat sebanyak 4 kejadian atau 11,4%, sedangkan F2 (perpindahan kanal komunikasi gagal) dan F5 (sistem tidak tersedia) masing-masing tercatat sebanyak 3 kejadian atau 8,6%.

Distribusi tersebut menunjukkan bahwa lebih dari dua pertiga *failure event* yang terjadi selama pengujian berasal dari dua *failure mode* utama, yaitu F3 dan F1. Secara kumulatif kedua *failure mode* tersebut menyumbang 71,4% dari seluruh kejadian kegagalan yang tercatat. Temuan ini mengindikasikan bahwa risiko operasional VCCS cenderung terkonsentrasi pada aspek respons sistem dan konektivitas komunikasi dibandingkan pada fungsi perpindahan kanal maupun ketersediaan sistem secara umum.

Dari perspektif operasional, dominasi F3 menunjukkan bahwa keterlambatan respons sistem masih menjadi sumber gangguan yang paling sering muncul selama pengujian. Kondisi ini mengindikasikan adanya faktor-faktor yang mempengaruhi kecepatan pertukaran data atau waktu pemrosesan perintah pada sistem. Sementara itu, munculnya F1 menunjukkan bahwa stabilitas komunikasi antara aplikasi VCCS dan perangkat ESP8266 masih menjadi aspek yang perlu diperhatikan karena secara langsung mempengaruhi keberlangsungan proses monitoring dan pengendalian perangkat.

Sebaliknya, frekuensi kejadian pada F2, F4, dan F5 relatif lebih rendah dibandingkan dua *failure mode* utama tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme perpindahan kanal, stabilitas aplikasi, dan ketersediaan sistem secara umum telah mampu beroperasi dengan baik selama pengujian. Meskipun demikian, frekuensi kejadian tidak selalu mencerminkan tingkat prioritas risiko yang sebenarnya karena setiap *failure mode* dapat memiliki tingkat dampak dan kemampuan deteksi yang berbeda. Dalam pendekatan FMEA, penentuan prioritas risiko dilakukan melalui kombinasi parameter *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* sehingga menghasilkan penilaian risiko yang lebih komprehensif dibandingkan hanya berdasarkan frekuensi kejadian [14][15]. Oleh karena itu, diperlukan analisis lanjutan menggunakan FMEA untuk menentukan prioritas risiko dari masing-masing *failure mode* yang teridentifikasi selama pengujian.

3.2. Analisis Failure Mode Dominan

Berdasarkan hasil observasi selama pengujian dan pencatatan pada Failure Event Log, sebagian besar kejadian kegagalan tidak terjadi secara acak, tetapi menunjukkan pola yang konsisten pada aspek respons sistem dan konektivitas komunikasi. Pola tersebut terlihat dari dominasi failure mode F3 dan F1 yang secara kumulatif menyumbang 71,4% dari seluruh failure event. Temuan ini menunjukkan bahwa sumber risiko operasional VCCS lebih banyak berkaitan dengan performa komunikasi data dibandingkan dengan kegagalan fungsi perangkat secara keseluruhan. Oleh karena itu, analisis penyebab pada setiap failure mode dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik arsitektur sistem, hasil observasi selama pengujian, serta mekanisme operasional VCCS yang digunakan pada ATC Radar Simulator.

Dominasi F3 mengindikasikan bahwa keterlambatan respons sistem merupakan sumber gangguan operasional yang paling sering muncul selama pengujian [7]. Pada sistem komunikasi berbasis jaringan, waktu respons dipengaruhi oleh proses pertukaran data, kinerja perangkat pengendali, serta stabilitas komunikasi antar komponen sistem. Munculnya *response delay* menunjukkan bahwa meskipun sistem masih dapat menjalankan fungsi komunikasi, performa layanan yang dihasilkan belum selalu berada pada kondisi optimal. Temuan tersebut konsisten dengan pola *failure event* yang tercatat pada *Failure Event Log*, di mana sebagian besar gangguan terjadi pada proses pertukaran data antara aplikasi VCCS dan perangkat kendali sebelum memengaruhi fungsi komunikasi secara keseluruhan. Dalam lingkungan komunikasi penerbangan, kualitas layanan komunikasi tidak hanya ditentukan oleh keberhasilan pengiriman informasi, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam memberikan respons yang cepat dan konsisten terhadap perintah yang diberikan [4][5].

Dari perspektif operasional, keterlambatan respons yang terjadi secara berulang berpotensi menurunkan efektivitas proses komunikasi pada simulator. Meskipun pengujian dilakukan pada lingkungan simulasi, karakteristik gangguan tetap memberikan gambaran mengenai potensi penurunan kualitas layanan apabila kondisi serupa terjadi pada sistem komunikasi yang digunakan secara intensif. Oleh karena itu, tingginya frekuensi kejadian F3 menunjukkan bahwa aspek performa komunikasi dan waktu respons sistem perlu menjadi perhatian dalam pengembangan maupun pengelolaan VCCS.

Secara teknis, dominasi *failure mode* F3 kemungkinan dipengaruhi oleh beberapa faktor operasional, antara lain latensi komunikasi data pada jaringan WLAN, waktu pemrosesan perintah pada mikrokontroler ESP8266, proses switching relay *Push-to-Talk* (PTT), serta kepadatan lalu lintas komunikasi pada jaringan selama pengujian. Pengujian dilakukan menggunakan jaringan *LAN-only* dengan 11 *client* aktif sehingga meskipun lingkungan pengujian bersifat terkendali, beban komunikasi antar perangkat tetap dapat menimbulkan variasi waktu respons. Kondisi ini menunjukkan bahwa performa VCCS tidak hanya ditentukan oleh keberhasilan fungsi switching, tetapi juga oleh efisiensi komunikasi data antar komponen sistem.

Selain F3, *failure mode* F1 juga menunjukkan kontribusi yang cukup signifikan terhadap total risiko operasional sistem. Kegagalan koneksi antara aplikasi VCCS dan ESP8266 mengindikasikan adanya gangguan pada proses komunikasi data yang menjadi penghubung antara perangkat pengendali dan perangkat komunikasi. Berbeda dengan F3 yang masih memungkinkan sistem menjalankan fungsi setelah terjadi keterlambatan respons, kegagalan koneksi pada F1 berpotensi menghentikan proses pertukaran data sehingga fungsi monitoring dan pengendalian tidak dapat berlangsung sebagaimana mestinya.

Munculnya F1 menunjukkan bahwa stabilitas koneksi merupakan faktor penting dalam menjaga keberlangsungan operasional sistem komunikasi berbasis IoT. Berdasarkan hasil observasi selama pengujian, kegagalan koneksi umumnya ditandai dengan terputusnya komunikasi antara aplikasi VCCS dan ESP8266 sehingga fungsi monitoring dan pengendalian tidak dapat dijalankan sampai proses koneksi berhasil dipulihkan. Pola tersebut menunjukkan bahwa stabilitas koneksi menjadi prasyarat utama bagi keberlangsungan operasi sistem berbasis IoT. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa keandalan komunikasi data merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi performa sistem komunikasi modern karena seluruh proses pengendalian dan pertukaran informasi bergantung pada keberhasilan koneksi antar perangkat [3][11]. Dengan demikian, meskipun frekuensi kejadian F1 lebih rendah dibandingkan F3, dampaknya terhadap kontinuitas operasional sistem tetap perlu mendapat perhatian karena secara langsung berkaitan dengan keberhasilan fungsi komunikasi.

Hasil observasi selanjutnya adalah kemunculan *Failure mode* F2 yang memiliki frekuensi kejadian relatif rendah sehingga menunjukkan bahwa mekanisme perpindahan kanal telah bekerja dengan baik selama pengujian. Meskipun frekuensi kegagalan perpindahan kanal komunikasi relatif rendah, kegagalan ini tetap berpotensi mengganggu kesinambungan komunikasi apabila perpindahan kanal tidak berlangsung sesuai perintah operator. Berdasarkan hasil observasi selama pengujian, penyebab kejadian F2 umumnya berkaitan dengan proses eksekusi perpindahan kanal yang melibatkan komunikasi antara aplikasi VCCS, ESP8266, dan rangkaian kendali. Hal ini menunjukkan bahwa keandalan mekanisme *switching* tidak hanya dipengaruhi oleh perangkat keras, tetapi juga oleh keberhasilan sinkronisasi perintah kendali pada seluruh komponen sistem.

Pada observasi kegagalan aplikasi *failure mode* F4, ditemukan dalam jumlah kejadian yang relatif rendah selama pengujian, menunjukkan bahwa aplikasi memiliki tingkat stabilitas yang baik. Namun demikian, apabila kondisi tersebut terjadi, operator kehilangan kemampuan melakukan pemantauan maupun pengendalian VCCS hingga aplikasi kembali berfungsi. Berdasarkan hasil observasi selama pengujian, penyebab kejadian F4 berkaitan dengan ketersediaan *cache memory* perangkat android yang sebagian besar kejadian bersifat sementara dan dapat dipulihkan melalui proses *restart* aplikasi sehingga nilai *Occurrence* tetap rendah meskipun tingkat *Severity* dinilai tinggi.

Kegagalan ketersediaan sistem *failure mode* F5 selama observasi hanya terjadi beberapa kali selama pengujian. *Failure mode* F5 menunjukkan kondisi ketika sistem tidak dapat digunakan untuk mendukung proses komunikasi. Frekuensi kejadian yang rendah selama pengujian menunjukkan bahwa VCCS secara umum memiliki tingkat ketersediaan sistem yang baik, dimana penyebabnya berkaitan dengan kualitas modul perangkat keras mikrokontroler dan susunan perintahnya. Meskipun demikian, konsekuensi operasional dari kondisi ini cukup signifikan karena seluruh fungsi komunikasi dan pengendalian tidak dapat dijalankan selama gangguan berlangsung. Oleh karena itu, meskipun nilai *Occurrence* relatif rendah, *failure mode* ini tetap memerlukan perhatian dalam strategi mitigasi risiko.

Secara keseluruhan, analisis terhadap lima *failure mode* menunjukkan bahwa risiko operasional VCCS selama pengujian lebih banyak dipengaruhi oleh aspek performa komunikasi dan konektivitas data dibandingkan dengan kegagalan fungsi perangkat secara keseluruhan. Dominasi *failure mode* F3 dan F1 menunjukkan bahwa sumber risiko operasional tidak tersebar secara merata pada seluruh fungsi sistem, melainkan terkonsentrasi pada proses pertukaran data dan stabilitas komunikasi antar komponen. Sementara itu, *failure mode* F2, F4, dan F5 yang memiliki frekuensi kejadian lebih rendah tetap memberikan informasi penting mengenai karakteristik risiko sistem, terutama terkait keandalan mekanisme *channel switching*, stabilitas aplikasi, dan ketersediaan layanan. Temuan ini sejalan dengan karakteristik sistem komunikasi berbasis jaringan yang sangat dipengaruhi oleh kualitas pertukaran data antar komponen sistem [4]. Oleh karena itu, peningkatan keandalan operasional VCCS perlu diprioritaskan pada pengurangan keterlambatan respons sistem, peningkatan stabilitas koneksi komunikasi, serta penguatan koordinasi antar komponen sistem untuk meminimalkan potensi gangguan operasional.

Meskipun analisis distribusi kegagalan memberikan gambaran mengenai sumber risiko dominan, frekuensi kejadian saja belum cukup untuk menentukan tingkat prioritas penanganan risiko. Setiap *failure mode* dapat memiliki tingkat dampak dan kemampuan deteksi yang berbeda sehingga diperlukan evaluasi yang lebih komprehensif menggunakan metode FMEA. Oleh karena itu, tahap berikutnya dilakukan analisis *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* untuk menentukan prioritas risiko berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN).

3.3. Prioritas Risiko Berdasarkan FMEA

Analisis distribusi *failure event* menunjukkan bahwa risiko operasional VCCS tidak tersebar secara merata pada seluruh *failure mode*. Namun demikian, frekuensi kejadian saja belum cukup untuk menentukan tingkat prioritas penanganan risiko karena setiap *failure mode* memiliki tingkat dampak dan kemampuan deteksi yang berbeda. Oleh karena itu, dilakukan analisis menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk menentukan prioritas risiko berdasarkan kombinasi parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). Nilai *Occurrence* pada Tabel 6 diperoleh berdasarkan *occurrence rate* masing-masing *failure mode* terhadap total 700 siklus pengoperasian, bukan terhadap total *failure event*. Hasil perhitungan FMEA untuk masing-masing *failure mode* disajikan pada Tabel 6.

Hasil analisis menunjukkan bahwa F3 (*response system delay* lebih dari 2 detik) memiliki nilai *RPN* tertinggi sebesar 45 sehingga menempati peringkat pertama prioritas risiko operasional pada VCCS. Nilai tersebut diperoleh dari kombinasi nilai *Severity* sebesar 5, *Occurrence* sebesar 3, dan *Detection* sebesar 3. Nilai *Severity* sebesar 5 diberikan karena keterlambatan respons sistem tidak menghentikan operasi sepenuhnya, namun menurunkan performa kendali operator. Nilai *Occurrence* sebesar 3 diperoleh dari frekuensi kejadian tertinggi, yaitu 17 kejadian dari 700 siklus pengoperasian (2,43%). Sementara itu, nilai *Detection* sebesar 3 menunjukkan bahwa keterlambatan respons tidak selalu langsung teridentifikasi oleh sistem dan umumnya dikenali melalui observasi operator selama pengoperasian. Meskipun tingkat

Tabel 6. Hasil analisis FMEA dan Prioritas Risiko Operasional VCCS

Rank	*Failure Mode*	*Potential Cause*	*Effect of Failure*	*Existing Control/Monitor*	S	O	D	RPN	*Recommended Action*
1	*Response system delay* > 2 detik (F3)	Latensi komunikasi data di jaringan, beban proses mikrokontroler, atau *network congestion*	Operator mengalami keterlambatan kendali	Observasi waktu respons sistem secara langsung	5	3	3	45	Optimasi komunikasi data dan peningkatan efisiensi pemrosesan sistem
2	Koneksi APK–ESP8266 gagal (F1)	Gangguan koneksi WLAN, atau ketidakstabilan tegangan ESP8266	Sistem tidak dapat melakukan *monitoring* dan kendali perangkat	Pemeriksaan koneksi jaringan dan *reconnect* manual	7	2	2	28	Optimasi kestabilan jaringan dan penambahan mekanisme *auto-reconnect*
3	Perpindahan kanal gagal (F2)	keterlambatan perintah dari aplikasi, atau kegagalan respons proses switching	Radio pemancar tidak berpindah ke kanal yang dipilih	Verifikasi status kanal melalui antarmuka aplikasi	7	1	2	14	Validasi logika perintah aplikasi dan sinkronisasi proses switching kanal
4	Sistem tidak tersedia (F5)	Gangguan catu daya atau kegagalan perangkat utama	Seluruh fungsi VCCS tidak dapat digunakan	Pemeriksaan status daya dan perangkat	10	1	1	10	Penyediaan *backup power* dan inspeksi perangkat berkala
5	Aplikasi VCCS *crash/hang* (F4)	*Bug* aplikasi atau kegagalan proses pada perangkat Android	Fungsi *monitoring* dan kendali terhenti	Restart aplikasi secara manual	9	1	1	9	Perbaikan stabilitas aplikasi dan pengujian *software robustness*

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian (2026).
Catatan: Residual risk belum dievaluasi karena tindakan mitigasi masih berupa recommended action dan memerlukan pengujian lanjutan setelah implementasi rekomendasi.

dampaknya tidak setinggi F4 maupun F5, frekuensi kejadian F3 yang relatif lebih tinggi menyebabkan nilai *Occurrence* meningkat sehingga menghasilkan *RPN* terbesar dibandingkan *failure mode* lainnya. Meskipun *Application Crash/Hang* (F4) memiliki tingkat keparahan (*Severity*) yang tinggi karena berpotensi menghentikan fungsi pemantauan dan pengendalian sistem, nilai RPN yang diperoleh tidak menjadi yang tertinggi. Hal ini disebabkan karena selama 700 siklus pengujian frekuensi kejadiannya relatif rendah (*Occurrence*) dan kondisi tersebut dapat segera dikenali serta dipulihkan melalui proses *restart* aplikasi (*Detection*)Temuan ini menunjukkan bahwa keterlambatan respons sistem merupakan risiko operasional yang paling perlu mendapat perhatian dalam pengelolaan VCCS.

Hasil FMEA pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa prioritas risiko bersifat sensitif terhadap perubahan nilai *Severity*, *Occurrence*, maupun *Detection*. Sebagai contoh, apabila nilai *Occurrence* pada F3 meningkat satu tingkat dari 3 menjadi 4 akibat peningkatan frekuensi gangguan, maka nilai RPN akan meningkat dari 45 menjadi 60. Sebaliknya, apabila optimasi sistem berhasil menurunkan nilai *Detection* dari 3 menjadi 2 melalui peningkatan kemampuan deteksi dini, maka nilai RPN F3 akan menurun menjadi 30. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan kecil pada parameter penilaian dapat memengaruhi tingkat prioritas risiko dan urutan penanganan yang dihasilkan.

Berikutnya, F1 (koneksi gagal antara VCCS dan ESP8266) memperoleh nilai *RPN* sebesar 28 dan menempati peringkat kedua prioritas risiko. Nilai *Severity* sebesar 7 diberikan karena kegagalan koneksi menyebabkan fungsi *monitoring* dan pengendalian perangkat tidak dapat dijalankan secara normal. Nilai *Occurrence* sebesar 2 diperoleh dari 8 kejadian selama 700 siklus pengoperasian (1,14%), sedangkan nilai *Detection* sebesar 2 menunjukkan bahwa gangguan relatif mudah terdeteksi melalui indikator status koneksi pada aplikasi. Kegagalan koneksi pada *failure mode* ini berpotensi menghambat fungsi *monitoring* dan pengendalian perangkat karena komunikasi antara aplikasi dan perangkat tidak dapat berlangsung sebagaimana mestinya. Meskipun frekuensi kejadiannya lebih rendah dibandingkan F3, nilai *Severity* yang relatif tinggi menyebabkan F1 tetap menjadi salah satu risiko yang perlu diperhatikan. Selanjutnya, F2 (perpindahan kanal komunikasi gagal) memperoleh nilai *RPN* sebesar 14 dan berada pada peringkat ketiga prioritas risiko. Nilai *Severity* sebesar 7 diberikan karena kegagalan perpindahan kanal secara langsung memengaruhi fungsi komunikasi radio, sedangkan nilai *Occurrence* sebesar 1 dan *Detection* sebesar 2 menunjukkan bahwa gangguan jarang terjadi dan relatif mudah dikenali.

Menariknya, F4 (aplikasi VCCS *crash/hang*) dan F5 (sistem tidak tersedia) memiliki nilai *Severity* yang paling tinggi, masing-masing sebesar 9 dan 10. Nilai *Severity* yang tinggi pada F4 diberikan karena kondisi *crash* atau *hang* menyebabkan fungsi kendali terhenti secara langsung, sedangkan F5 memperoleh nilai maksimum karena kondisi *system unavailable* menyebabkan seluruh fungsi VCCS tidak dapat digunakan. Namun demikian, kedua *failure mode* tersebut hanya memperoleh nilai *RPN* sebesar 9 dan 10 sehingga berada pada peringkat prioritas yang lebih rendah. Kondisi ini disebabkan frekuensi kejadian kedua *failure mode* tersebut sangat rendah, masing-masing hanya 4 kejadian (0,57%) dan 3 kejadian (0,43%) dari 700 siklus pengoperasian, serta gangguan yang terjadi dapat dikenali dengan sangat mudah ketika muncul (*Detection* = 1). Temuan ini menunjukkan bahwa tingkat keparahan yang tinggi tidak selalu menghasilkan prioritas risiko tertinggi apabila tidak diikuti oleh frekuensi kejadian yang signifikan dan tingkat kesulitan deteksi yang lebih besar.

Meskipun analisis *FMEA* pada penelitian ini telah berhasil mengidentifikasi prioritas risiko operasional utama pada VCCS, evaluasi *residual risk* belum dilakukan dalam penelitian ini. *Residual risk* merupakan tingkat risiko yang masih tersisa setelah tindakan mitigasi diterapkan dan efektivitasnya divalidasi melalui pengujian lanjutan [20]. Dalam penelitian ini, tindakan mitigasi yang diusulkan masih berada pada tahap *recommended action* dan belum diimplementasikan pada sistem aktual. Oleh karena itu, penilaian *residual risk* secara kuantitatif belum dapat dilakukan karena belum tersedia data empiris pasca-mitigasi yang memadai. Evaluasi *residual risk* dapat menjadi bagian dari penelitian lanjutan untuk menilai efektivitas strategi mitigasi dalam menurunkan tingkat risiko operasional VCCS.

Tindakan mitigasi yang direkomendasikan pada penelitian ini masih bersifat konseptual dan belum divalidasi melalui implementasi eksperimental. Oleh karena itu, efektivitas mitigasi terhadap penurunan risiko belum dapat diukur secara kuantitatif. Pada penelitian lanjutan, keberhasilan mitigasi dapat dievaluasi menggunakan indikator kinerja seperti penurunan *response delay*, peningkatan *connection success rate*, penurunan jumlah *failure event*, atau penurunan nilai RPN setelah tindakan perbaikan diterapkan.

Secara keseluruhan, hasil *FMEA* menunjukkan bahwa prioritas risiko operasional VCCS selama pengujian didominasi oleh aspek performa sistem yang ditunjukkan oleh *response system delay* lebih dari 2 detik, diikuti oleh kegagalan koneksi antara aplikasi VCCS dan ESP8266. Temuan ini memperkuat hasil analisis distribusi *failure event* yang menunjukkan dominasi F3 dan F1 dibandingkan *failure mode* lainnya. Oleh karena itu, upaya pengelolaan risiko pada VCCS sebaiknya difokuskan pada peningkatan respons sistem dan stabilitas koneksi komunikasi sebagai dua sumber risiko utama yang teridentifikasi selama pengujian.

3.4. Implikasi Risiko terhadap Operasional ATC Radar Simulator

Hasil analisis FMEA menunjukkan bahwa risiko operasional utama pada VCCS selama pengujian berasal dari *response system delay* lebih dari 2 detik dan kegagalan koneksi antara aplikasi VCCS dan perangkat ESP8266. Kedua *failure mode* tersebut memiliki nilai RPN tertinggi dibandingkan *failure mode* lainnya sehingga menjadi prioritas utama dalam pengelolaan risiko operasional sistem.

Dalam lingkungan ATC Radar Simulator, fungsi VCCS tidak hanya berperan sebagai sarana komunikasi suara, tetapi juga menjadi bagian penting dalam mendukung proses simulasi komunikasi antara pengatur lalu lintas udara dan pengguna ruang udara. Oleh karena itu, keterlambatan respons sistem berpotensi mempengaruhi kelancaran proses simulasi, khususnya ketika operator melakukan pemilihan kanal komunikasi, pengiriman perintah, maupun proses monitoring kondisi perangkat. Meskipun gangguan yang terjadi pada penelitian ini masih berada dalam lingkungan simulator, karakteristik kegagalan yang muncul dapat memberikan gambaran mengenai pentingnya performa komunikasi yang stabil pada sistem komunikasi penerbangan.

Selain itu, kegagalan koneksi antara aplikasi VCCS dan ESP8266 menunjukkan bahwa aspek komunikasi data memiliki peran yang signifikan dalam menjaga keberlangsungan fungsi monitoring dan pengendalian sistem [10]. Ketika koneksi tidak dapat dibangun dengan baik, proses pertukaran data antara aplikasi dan perangkat menjadi terganggu sehingga fungsi kendali tidak dapat berjalan

sebagaimana direncanakan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keandalan konektivitas merupakan salah satu faktor yang menentukan efektivitas operasional sistem komunikasi berbasis IoT.

Temuan penelitian ini juga menunjukkan bahwa risiko operasional pada VCCS tidak hanya berasal dari kegagalan yang bersifat kritis seperti *system unavailable* atau *application crash*, tetapi juga dapat berasal dari gangguan yang terjadi secara berulang dengan tingkat dampak sedang. Dalam konteks FMEA, kondisi tersebut tercermin pada *failure mode* F3 yang memiliki nilai RPN tertinggi meskipun nilai *Severity*-nya tidak sebesar F4 maupun F5. Dengan demikian, upaya pengelolaan risiko tidak hanya perlu difokuskan pada kegagalan yang memiliki dampak besar, tetapi juga pada kegagalan yang memiliki kecenderungan muncul lebih sering selama operasional sistem.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa performa komunikasi dan stabilitas konektivitas merupakan faktor utama yang mempengaruhi risiko operasional VCCS pada ATC Radar Simulator. Oleh karena itu, peningkatan kualitas komunikasi data, optimasi waktu respons sistem, serta pemantauan kondisi operasional perangkat secara berkelanjutan menjadi aspek yang perlu diperhatikan dalam upaya meningkatkan keandalan operasional sistem.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menerapkan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan risiko operasional pada *Voice Communication Control Switching System* (VCCS) yang digunakan pada ATC Radar Simulator. Hasil analisis menunjukkan bahwa *failure mode* dengan prioritas risiko tertinggi adalah F3 (*response system delay* lebih dari 2 detik) dengan nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebesar 45, diikuti oleh F1 (koneksi gagal antara aplikasi VCCS dan ESP8266) dengan nilai RPN sebesar 28. Temuan ini menunjukkan bahwa sumber risiko operasional utama pada VCCS selama pengujian berasal dari aspek performa sistem, khususnya respons transmisi dan stabilitas koneksi komunikasi.

Hasil penelitian ini memberikan implikasi bahwa strategi pengelolaan risiko pada VCCS sebaiknya difokuskan terlebih dahulu pada optimasi respons sistem untuk menurunkan *response delay*, diikuti oleh peningkatan stabilitas koneksi melalui mekanisme *auto-reconnect* atau optimasi komunikasi data antara aplikasi dan perangkat kendali. Mitigasi terhadap *failure mode* dengan frekuensi rendah seperti F4 dan F5 dapat dilakukan pada tahap berikutnya sebagai bagian dari peningkatan keandalan sistem secara menyeluruh.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menyajikan pemetaan awal risiko operasional VCCS berbasis IoT pada ATC Radar Simulator menggunakan pendekatan FMEA berdasarkan data aktual dari 700 siklus pengujian. Pendekatan ini menyediakan kerangka yang sistematis untuk mengidentifikasi *failure mode*, menentukan prioritas risiko, serta memperkaya penerapan FMEA pada kajian keandalan sistem komunikasi simulator penerbangan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, pengujian hanya dilakukan pada 700 siklus operasi dalam lingkungan ATC Radar Simulator, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan seluruh kondisi operasional yang lebih kompleks. Kedua, penelitian ini masih terbatas pada tahap identifikasi dan prioritas risiko menggunakan FMEA, sehingga tindakan mitigasi yang diusulkan belum diimplementasikan pada sistem aktual. Oleh karena itu, evaluasi *residual risk* belum dapat dilakukan.

Penelitian selanjutnya perlu memvalidasi efektivitas tindakan mitigasi pada sistem VCCS melalui implementasi eksperimental menggunakan indikator keberhasilan berupa penurunan *response delay*, peningkatan *connection success rate*, penurunan jumlah *failure event*, serta penurunan nilai RPN pasca-perbaikan. Selain itu, penelitian lanjutan dapat mengembangkan pendekatan *predictive maintenance* berbasis data operasional untuk meningkatkan keandalan VCCS secara berkelanjutan, serta menguji penerapan metode ini pada lingkungan operasional selain ATC Radar Simulator guna mengevaluasi tingkat generalisasi hasil penelitian.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktur Politeknik Penerbangan Medan yang telah memberikan kesempatan dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian pada peralatan *Voice Communication Control Switching System* (VCCS) ATC Radar Simulator. Selain itu, penulis menyampaikan apresiasi kepada Kepala Unit Laboratorium Politeknik Penerbangan Medan yang telah memfasilitasi pelaksanaan kegiatan penelitian sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Deklarasi

Kontribusi Penulis

Ayub Wimatra berkontribusi pada konseptualisasi, metodologi, investigasi, visualisasi, dan supervisi. **Yuyun Suprapto** berkontribusi pada analisis formal, penelaahan naskah dan penulisan. **Muhammad Caesar Akbar** dan **Darmeli Nasution** berkontribusi pada investigasi, validasi, dan kurasi data. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir artikel.

Pernyataan Pendanaan

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

Konflik Kepentingan

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

Penggunaan Kecerdasan Artifisial atau Teknologi Berbantuan Kecerdasan Artifisial

Penulis menggunakan OpenAI ChatGPT untuk membantu penyusunan struktur, penyuntingan bahasa, dan peningkatan kejelasan teks. Seluruh konten telah ditinjau dan disunting oleh penulis, yang bertanggung jawab penuh atas isi publikasi.

Daftar Pustaka

[1] International Civil Aviation Organization, 'ICAO Doc 4444 – Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management (PANS-ATM), 16th ed.', Montreal, Canada, 2016.

[2] International Civil Aviation Organization, 'Doc 9718, Handbook On Radio Frequency Spectrum Requirements For Civil Aviation, Volume II—Frequency Assignment Planning Criteria For Aeronautical Radio Communication And Navigation Systems', 2022.

[3] D. Zeng, S. L. Giles, and B. Phillips, 'Re-envisioning Air/Ground Communications for Aviation', in *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 2019, pp. 1–10. doi: 10.1109/DASC43569.2019.9081750.

[4] H. Whitworth, S. Al-Rubaye, A. Tsourdos, J. Jiggins, N. Silverthorn, and K. Thomas, 'Aircraft to Operations Communication Analysis and Architecture for the Future Aviation Environment', in *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, IEEE, Oct. 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/DASC52595.2021.9594426.

[5] Z. Wang, P. Jiang, Z. Wang, B. Han, and H. Liang, 'Enhancing Air Traffic Control Communication Systems With Integrated Automatic Speech Recognition: Models, Applications And Performance Evaluation', *Sensors*, vol. 24, no. 14, p. 4715, 2024, doi: 10.3390/s24144715.

[6] Hendrawan and N. B. Samawi, 'Voice Switching Control System (VSCS) for Air Traffic Control System for Small Airport', in *2018 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, IEEE, Jul. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICWT.2018.8527797.

[7] N. Nurhidayatulloh and H. Hendrawan, 'Challenge in Future IP-Based Voice Communication System for Air Traffic Control', *Jurnal Pendidikan Multimedia (Edsence)*, vol. 6, no. 1, pp. 53–66, 2024, doi: 10.17509/edsence.v6i1.72266.

[8] D. A. Soeadyfa Fridyatama, S. Suparji, and M. S. Sumbawati, 'Developing Air Traffic Control Simulator for Laboratory', *TEM Journal*, pp. 1462–1474, Aug. 2023, doi: 10.18421/TEM123-26.

[9] H.-H. Yang, Y.-H. Chang, and Y.-H. Chou, 'Subjective Measures Of Communication Errors Between Pilots And Air Traffic Controllers', *J. Air Transp. Manag.*, vol. 112, p. 102461, 2023, doi: 10.1016/j.jairtraman.2023.102461.

[10] A. Octavianie and A. A. Putra, 'Telephone Damage Analysis on Voice Control Unit (VCU) At Perum LPPNPI Manado Branch Office', *Airman: Jurnal Teknik dan Keselamatan Transportasi*, vol. 4, no. 1, pp. 47–51, 2021, doi: 10.46509/ajtk.v4i1.180.

[11] M. Strohmeier, I. Martinovic, and V. Lenders, 'Securing The Air–Ground Link in Aviation', in *The Security of Critical Infrastructures: Risk, Resilience and Defense*, vol. 288, Springer, 2020, pp. 131–154. doi: 10.1007/978-3-030-41826-7_9.

[12] O. Solomentsev, M. Zaliskyi, O. Holubnychyi, I. Ostroumov, O. Sushchenko, and Y. Bezkorovainyi, 'Efficiency Analysis Of Current Repair Procedures For Aviation Radio Equipment', in *International Workshop on Advances in Civil Aviation Systems Development*, 2024, pp. 281–295. doi: 10.1007/978-3-031-60196-5_21.

[13] O. Solomentsev, M. Zaliskyi, O. Zuiev, O. C. Okoro, O. Shcherbyna, and B. Chumachenko, 'A Procedure for Failures Diagnostics of Aviation Radio Equipment', in *2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, IEEE, Sep. 2023, pp. 100–103. doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275337.

[14] R. Liao, X. Li, and Y. Zhao, 'Mission Reliability-Driven Risk-Based Predictive Maintenance Approach of Multistate Manufacturing System', *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 236, p. 109273, 2023, doi: 10.1016/j.ress.2023.109273.

[15] A. Chakhrit, N. E. H. Benharkat, I. H. M. Guetarni, A. Guedri, and M. Chennoufi, 'A Literature Review Of Risk Assessment Approaches In Failure Mode And Effects Analysis', *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 42, no. 9, pp. 2415–2454, Sep. 2025, doi: 10.1108/IJQRM-01-2025-0042.
[16] T. Wibowo, N. P. Sari, and H. R. Kusumantoro, 'Analisis Risiko Kegagalan Menggunakan Metode FMEA pada Mesin Cetak Digital UV di PT XYZ', *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Teknik*, vol. 4, no. 2, pp. 173–184, Jun. 2025, doi: 10.55606/jurritek.v4i2.5524.
[17] G. Shi, X. Zhang, J. Zeng, and H. Liao, 'A Predictive Maintenance Framework Based on Real-Time Credibility Evaluation of Remaining Useful Life Prediction Results', *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 264, p. 111342, 2025, doi: 10.1016/j.ress.2025.111342.
[18] International Civil Aviation Organization, 'Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications: Vol. III. Communication Systems: Part II. Voice Communication Systems', Montreal, Canada, 2007.
[19] International Civil Aviation Organization, 'Safety Management Manual (SMM), Doc 9859, AN/474, 4th ed.', Montreal, Canada, 2018.
[20] H. Liao, X. Yin, X. Wu, and R. Bausys, 'An Enhanced Failure Mode And Effect Analysis Method Based On Preference Disaggregation In Risk Analysis Of Intelligent Wearable Medical Devices', *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 147, p. 110384, May 2025, doi: 10.1016/j.engappai.2025.110384.