

Analisis Faktor Sistemik Penyebab *Loss of Control In-Flight* Pada Kecelakaan Pesawat Udara di Indonesia Studi Kasus : Data Publish KNKT

Rifki Firnando^{1,*}, Ayu Martina², Muhammad Hadi Widanto³

^{1, 2, 3}Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Dirgantara dan Industri, Universitas Dirgantara
Marsekal Suryadarma, Jakarta

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 4 September 2025
Direvisi: 5 Oktober 2025
Diterima: 30 Desember 2025

Kata kunci:

Loss of Control In-Flight (LOC-I)
Swiss Cheese Model
SHELL Model
Crew Resource Management (CRM)
KNKT.

Keywords:

Loss of Control In-Flight (LOC-I)
Swiss Cheese Model
SHELL Model
Crew Resource Management (CRM)
KNKT.

Penulis Korespondensi:

Rifki Firnando
Email:
rifkifirnando22@gmail.com

ABSTRAK

Faktor sistemik merupakan defisiensi yang melekat pada desain, kebijakan, prosedur, atau budaya organisasi dan *Loss of Control In-Flight (LOC-I)* merupakan salah satu penyebab utama kecelakaan pesawat udara di Indonesia, yang memerlukan analisis mendalam terhadap faktor sistemik di baliknya. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor sistemik yang berkontribusi terhadap LOC-I dengan menggunakan dua model analisis, yaitu *Swiss Cheese Model* dan *SHELL Model*. Data diambil dari laporan investigasi kecelakaan yang dipublikasikan oleh Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) periode 2010–2023. Metode penelitian yang digunakan adalah kualitatif deskriptif dengan pendekatan studi kasus, di mana faktor-faktor seperti human error, desain sistem, prosedur operasi, dan lingkungan dianalisis secara holistik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa interaksi kegagalan pada berbagai lapisan pertahanan (*latent failures* dan *active failures*) dalam *Swiss Cheese Model* serta ketidaksesuaian dalam komponen *Software*, *Hardware*, *Environment*, *Liveware* (*SHELL*) menjadi pemicu utama LOC-I. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini memberikan rekomendasi mitigasi berbasis sistem untuk regulator (Kemenhub, DGCA) berupa peningkatan Regulasi pelatihan *Upset Prevention and Recovery Training* dan penguatan *Safety Oversight* berbasis risiko, operator (maskapai penerbangan) berupa peningkatan *Crew Resource Management (CRM)* dan Peningkatan efektivitas pelatihan simulator berbasis data, dan stakeholder aviasi lainnya, termasuk peningkatan pelatihan human factors, optimasi safety management system (SMS), dan penguatan regulasi operasional. Implikasi penelitian ini diharapkan dapat mendukung upaya pencegahan kecelakaan serupa di masa depan.

Systemic factors are inherent deficiencies in design, policies, procedures, or organizational culture, and Loss of Control In-Flight (LOC-I) is a primary cause of aircraft accidents in Indonesia, which requires an in-depth analysis of the systemic factors behind it. This research aims to identify the systemic factors that contribute to LOC-I by using two analysis models: the Swiss Cheese Model and the SHELL Model. Data were taken from accident investigation reports published by the National Transportation Safety Committee (KNKT) for the period 2010–2023. The research method used is descriptive qualitative with a case study approach, wherein factors such as human error, system design, operating procedures, and the environment are analyzed holistically. The research findings indicate that the interaction of failures across various defense layers (latent failures and active failures) in the Swiss Cheese Model, as well as incompatibilities within the Software, Hardware, Environment, and Liveware (SHELL) components, are the primary triggers for LOC-I. Based on these findings, this research provides system-based mitigation recommendations for regulators (Ministry of Transportation, DGCA) in the form of enhancing Upset Prevention and Recovery Training regulations and strengthening risk-based Safety Oversight; for operators (airlines) in the form of improving Crew Resource Management (CRM) and increasing the effectiveness of data-driven simulator training; and for other aviation stakeholders, including enhancing human factors training, optimizing the Safety Management System (SMS), and strengthening operational regulations. The implications of this research are expected to support efforts to prevent similar accidents in the future.

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Faktor sistemik dalam konteks keselamatan penerbangan dan investigasi kecelakaan merujuk pada defisiensi, kelemahan, atau kegagalan yang melekat dan terstruktur dalam desain, kebijakan, prosedur, dan budaya organisasi dari sebuah sistem keselamatan penerbangan yang luas. Faktor-faktor ini bersifat laten (terpendam) dan bukan berasal dari kelalaian atau kekurangan individu operator (pilot), melainkan dari sistem yang seharusnya dirancang untuk mencegah, mendeteksi, atau memitigasi kesalahan tersebut. Konsep ini merupakan inti dari Modern *Safety Management System* (SMS) yang menggeser paradigma dari *blame culture* (menyalahkan individu) menuju *just culture* (belajar dari kesalahan sistem). Keselamatan penerbangan merupakan aspek dalam industri transportasi udara global. Namun, ancaman *Loss of Control In-Flight* (LOC-I) terus menjadi tantangan utama yang menyumbang proporsi signifikan kecelakaan penerbangan fatal Menurut International Civil Aviation Organization[1].

LOC-I bertanggung jawab atas 35-40% dari seluruh kecelakaan pesawat bermuatan korban jiwa dalam dua dekade terakhir. Fenomena ini tidak hanya terjadi di tingkat global, tetapi juga menjadi perhatian serius di Indonesia. Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT), menunjukkan bahwa dalam periode 2010-2023, terdapat tujuh kecelakaan pesawat komersial di Indonesia yang memiliki indikasi kuat terkait LOC-I, dengan dua kasus paling menonjol yaitu Lion Air JT 610 (2018) dan Sriwijaya Air SJ 182 (2021). Kecelakaan-kecelakaan ini tidak hanya menimbulkan kerugian material yang besar tetapi juga merenggut ratusan nyawa, sekaligus mengindikasikan adanya masalah sistemik dalam pengelolaan keselamatan penerbangan nasional[2].

Analisis mendalam terhadap faktor penyebab LOC-I mengungkap kompleksitas permasalahan ini. Penelitian [3] dalam buku terbarunya *Beyond Aviation Human Factors* menunjukkan bahwa LOC-I jarang disebabkan oleh faktor tunggal, melainkan hasil dari rantai kegagalan yang melibatkan berbagai aspek. Di Indonesia, studi oleh [4] yang dipublikasikan dalam Indonesian Journal of Aviation Safety mengidentifikasi beberapa pola berulang dalam kasus LOC-I, termasuk ketidakpatuhan terhadap prosedur operasi standar, kurangnya pemahaman tentang karakteristik pesawat modern, serta kelemahan dalam sistem pelaporan insiden. Temuan ini diperkuat oleh laporan tahunan [5] yang menyoroti adanya kesenjangan antara regulasi yang ada dengan implementasi di lapangan, khususnya terkait dengan pelatihan awak pesawat dan pemeliharaan armada.

Pendekatan teoritis dalam menganalisis kecelakaan penerbangan telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir. *Swiss Cheese Model* yang diperkenalkan oleh Reason, 1990 dan kemudian disempurnakan dalam karyanya tahun 2013, menawarkan perspektif sistemik dengan memandang kecelakaan sebagai hasil dari kegagalan bertingkat dalam berbagai lapisan pertahanan. Sementara itu, SHELL Model [6] memberikan kerangka kerja untuk menganalisis interaksi antara komponen manusia (*Liveware*) dengan elemen-elemen lain dalam sistem penerbangan. Kedua model ini telah terbukti efektif dalam berbagai studi kecelakaan internasional, namun aplikasinya dalam konteks Indonesia masih sangat terbatas. Penelitian awal oleh *Aviation Safety Network*, menunjukkan bahwa faktor budaya organisasi dan kondisi geografis Indonesia yang unik menambah kompleksitas analisis LOC-I di wilayah ini [7].

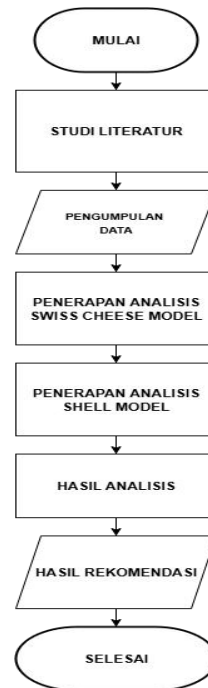
Berdasarkan identifikasi gap pengetahuan tersebut, penelitian ini dirancang untuk memberikan kontribusi dalam tiga aspek utama. Pertama, dari perspektif akademik, studi ini akan mengisi kekosongan literatur mengenai analisis sistemik LOC-I di Indonesia dengan pendekatan teori terkini. Kedua, dari sisi metodologis, penelitian ini mengembangkan kerangka analisis terpadu yang menggabungkan *Swiss Cheese Model* dan SHELL Model untuk memahami interaksi faktor penyebab secara lebih komprehensif. Ketiga, dari aspek praktis, temuan penelitian diharapkan dapat menjadi dasar bagi penyusunan rekomendasi kebijakan yang lebih tepat sasaran bagi regulator, operator, dan stakeholder terkait.

Relevansi penelitian ini semakin penting mengingat pertumbuhan industri penerbangan Indonesia yang pesat. Data Asosiasi Pengusaha Penerbangan Indonesia [8] memproyeksikan pertumbuhan penumpang udara domestik sebesar 8-10% per tahun hingga 2030. Pertumbuhan ini harus diimbangi dengan peningkatan sistem keselamatan yang memadai untuk mencegah terulangnya kecelakaan serupa di masa depan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memiliki nilai akademis tetapi juga implikasi praktis yang signifikan bagi pengembangan industri penerbangan nasional yang lebih aman dan berkelanjutan.

II. METODE PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Jenis penelitian ini adalah Penelitian Deskriptif Kualitatif dan data bersumber dari data *publish* KNKT dengan menggunakan metode *Swiss Cheese Model* dan *SHELL Model*. Tahapan pelaksanaan penelitian seperti pada gambar 1. Diagram Alir (*flowchart*) langkah-langkah penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir Langkah-Langkah Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara sistematis sesuai dengan tahapan pada diagram alir penelitian yang telah disusun. Proses penelitian diawali dengan studi literatur yang bertujuan untuk memahami konsep dasar, teori yang relevan, serta hasil penelitian terdahulu terkait fenomena *Loss of Control In-Flight* (LOC-I). Tahap ini juga diarahkan untuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian (*research gap*) yang menjadi dasar urgensi kajian. Literatur yang ditelaah mencakup artikel ilmiah, laporan investigasi kecelakaan, serta dokumen kebijakan dan regulasi penerbangan yang relevan.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain deskriptif-analitis karena karakteristik data yang bersifat eksploratif dan berorientasi pada pemahaman mendalam terhadap suatu fenomena. Pendekatan yang digunakan meliputi tiga strategi utama yang saling melengkapi. Pertama, studi kasus dilakukan untuk mengkaji secara mendalam laporan kecelakaan spesifik LOC-I di Indonesia sehingga diperoleh pemahaman kontekstual terhadap faktor penyebab dan dinamika kejadian. Kedua, analisis isi (*content analysis*) diterapkan terhadap dokumen resmi yang dipublikasikan guna mengekstraksi makna, pola, serta kategori faktor penyebab yang muncul secara sistematis. Ketiga, penelitian kepustakaan dilakukan secara komprehensif untuk memperkuat landasan teoritis dan memperkaya interpretasi hasil analisis. Kombinasi ketiga pendekatan ini memungkinkan terbentuknya pemahaman yang holistik terhadap fenomena LOC-I.

Pengumpulan data dilakukan melalui dua sumber utama, yaitu data primer dan data pendukung. Data primer diperoleh dari laporan akhir investigasi kecelakaan yang diterbitkan oleh Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT). Data ini menjadi sumber utama dalam proses identifikasi faktor-faktor penyebab kejadian. Sementara itu, data pendukung dikumpulkan dari literatur akademik, regulasi penerbangan, serta dokumen teknis lainnya yang relevan untuk memperkuat dan memvalidasi hasil analisis data primer.

Data yang telah terkumpul kemudian dianalisis menggunakan dua model analisis keselamatan penerbangan. Pertama, *Swiss Cheese Model* digunakan untuk mengidentifikasi kegagalan sistemik dengan memetakan lapisan pertahanan (*defences*) dan kelemahan (*latent failures* maupun *active*

failures) yang sejajar sehingga memungkinkan terjadinya kecelakaan. Model ini membantu mengidentifikasi kontribusi faktor organisasi, prosedural, teknis, dan manusia dalam suatu rantai kejadian. Kedua, SHELL Model diterapkan untuk menganalisis interaksi antar komponen sistem penerbangan, yaitu Software, Hardware, Environment, dan Liveware (manusia), termasuk interaksi antar manusia (Liveware–Liveware). Analisis ini difokuskan pada aspek faktor manusia dan ergonomi yang berperan dalam kejadian LOC-I.

Hasil analisis dari kedua model tersebut kemudian diintegrasikan untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai pola penyebab, hubungan antar faktor, serta titik kelemahan sistem keselamatan. Berdasarkan temuan tersebut, dirumuskan kesimpulan penelitian serta rekomendasi yang bersifat preventif dan sistemik guna meningkatkan keselamatan penerbangan, khususnya dalam mitigasi risiko LOC-I[9]. Dengan selesainya tahapan tersebut, keseluruhan proses penelitian dinyatakan selesai secara sistematis dan terstruktur.

2. Gambaran Umum Kasus

Penelitian ini menggunakan dua studi kasus kecelakaan penerbangan yang berkaitan dengan fenomena Loss of Control In-Flight (LOC-I), yaitu kecelakaan Sriwijaya Air penerbangan SJY182 (PK-CLC) dan Lion Air penerbangan LNI610 (PK-LQP). Kedua kasus dipilih karena memiliki karakteristik kegagalan sistem dan faktor manusia yang relevan untuk dianalisis menggunakan pendekatan keselamatan sistemik[10].

Kasus pertama adalah kecelakaan Sriwijaya Air SJY182 dengan registrasi pesawat PK-CLC, jenis Boeing 737-500, yang terjadi pada 9 Januari 2021 di perairan Distrik Kepulauan Seribu, DKI Jakarta. Penerbangan ini merupakan penerbangan penumpang berjadwal domestik dari Bandar Udara Internasional Soekarno-Hatta (WIII), Jakarta, menuju Bandar Udara Supadio (WIOO), Pontianak. Berdasarkan laporan investigasi resmi, kejadian LOC-I dipicu oleh terjadinya asimetri dorongan (thrust asymmetry) saat fase pendakian. Thrust lever kiri bergerak mundur sehingga daya dorong berkurang, sementara thrust lever kanan tetap pada posisinya akibat hambatan mekanis yang menyebabkan sistem autothrottle (A/T) tidak mampu menggerakkannya secara sinkron. Kondisi ini menimbulkan deviasi arah pesawat ke kiri, berlawanan dengan perintah autopilot yang seharusnya mengarahkan pesawat ke kanan. Anomali tersebut tidak segera dikenali oleh awak pesawat hingga kondisi berkembang menjadi upset condition. Respons kemudi yang kurang tepat semakin memperbesar kemiringan (bank angle) pesawat, sehingga upaya pemulihan tidak berhasil dan pesawat akhirnya mengalami benturan dengan permukaan laut.

Sumber data utama dalam analisis kasus ini adalah laporan akhir investigasi Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT). Laporan tersebut didukung oleh data Digital Flight Data Recorder (DFDR) yang merekam sekitar 1.790 parameter penerbangan selama kurang lebih 69 jam, serta Cockpit Voice Recorder (CVR) yang merekam komunikasi kokpit selama 2 jam 4 menit. Selain itu, analisis juga menggunakan data komunikasi dan radar dari Air Traffic Controller (ATC), serta Aircraft Maintenance Log (AML) yang menunjukkan riwayat 65 laporan gangguan terkait sistem autothrottle sejak tahun 2013. Data tersebut memberikan gambaran komprehensif mengenai faktor teknis, operasional, dan pemeliharaan yang berkontribusi terhadap kejadian.

Kasus kedua adalah kecelakaan Lion Air LNI610 dengan registrasi PK-LQP, jenis Boeing 737-8 (MAX), yang terjadi pada 29 Oktober 2018 di perairan Tanjung Karawang, Jawa Barat. Penerbangan ini merupakan penerbangan domestik berjadwal dari Jakarta (WIII) menuju Pangkal Pinang (WIPK). Investigasi menunjukkan bahwa penyebab utama LOC-I berkaitan dengan kesalahan kalibrasi sensor Angle of Attack (AOA) yang baru dipasang sehari sebelum kejadian, dengan deviasi sebesar 21 derajat. Data AOA yang tidak akurat tersebut memicu aktivasi sistem Maneuvering Characteristics Augmentation System (MCAS) secara berulang, yang secara otomatis memberikan perintah trim hidung turun (aircraft nose down) tanpa perintah pilot. Awak pesawat berupaya mengoreksi kondisi dengan memberikan trim hidung naik (aircraft nose up) secara manual, namun tidak memutus sistem stabilizer trim sesuai prosedur Runaway Stabilizer. Aktivasi MCAS yang persisten, disertai berbagai peringatan kokpit dan komunikasi dengan ATC, meningkatkan beban kerja pilot secara signifikan, sehingga kemampuan pengelolaan situasi menurun dan berujung pada hilangnya kendali pesawat.

Analisis kasus Lion Air juga mengacu pada laporan akhir KNKT yang didukung oleh data DFDR yang merekam 69 jam penerbangan dari 19 penerbangan, termasuk penerbangan sebelumnya yang mengalami indikasi gangguan serupa. Data CVR dengan kualitas rekaman yang baik selama 2 jam

4 menit, rekaman komunikasi dan radar ATC, serta Aircraft Flight and Maintenance Log (AFML) digunakan untuk menelusuri riwayat keluhan dan tindakan perawatan. Selain itu, sensor AOA yang dilepas dari pesawat diperiksa oleh National Transportation Safety Board (NTSB) dan Collins Aerospace, serta dilakukan simulasi pada engineering simulator Boeing untuk merekonstruksi aktivasi MCAS dan respons pilot dalam berbagai skenario operasional.

Pemilihan kedua kasus ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola kesamaan dan perbedaan faktor penyebab LOC-I dari perspektif kegagalan sistem, interaksi manusia–mesin, serta kelemahan pertahanan organisasi. Meskipun hasil analisis bersifat kontekstual terhadap kedua kejadian tersebut, temuan yang diperoleh memiliki potensi generalisasi terbatas pada kasus-kasus dengan karakteristik sistem dan tipe pesawat yang serupa, khususnya dalam konteks manajemen risiko keselamatan penerbangan dan penguatan lapisan pertahanan sistemik.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Hasil

3.1.1 Analisis Swiss Cheese Model

Penelitian ini menganalisis faktor-faktor sistemik yang menyebabkan kecelakaan Sriwijaya Air PK-CLC dan Lion Air PK-LQP dengan menggunakan kerangka Swiss Cheese Model (SCM). Tujuan analisis adalah untuk mengidentifikasi bagaimana lubang-lubang (holes) pada setiap lapisan pertahanan mulai dari level organisasi hingga kegagalan aktif tersusun secara sejajar dan memungkinkan terjadinya Loss of Control In-Flight (LOC-I). Analisis ini akan menjadi fondasi untuk memahami manifestasi kegagalan tersebut dalam interaksi operasional

Tabel 1. Analisis Swiss Cheese PK-CLC

Penyebab Kecelakaan	Swiss Cheese Model	Rekomendasi
➤ Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan (SMS) yang Tidak Efektif ➤ Budaya Keselamatan yang masih rendah	Organizational Level 	➤ Meningkatkan Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan (SMS) secara Menyeluruh ➤ Manajemen puncak harus secara proaktif memimpin dan mendanai implementasi SMS yang efektif, memastikan bahwa keselamatan menjadi nilai inti yang terukur dan terintegrasi dalam semua keputusan bisnis.
➤ Manajemen Pemeliharaan yang Tidak Tuntas ➤ Komunikasi Antar-Departemen yang Lemah	Management Level 	➤ Menerapkan sistem pelaporan digital yang terintegrasi antara kru penerbangan dan tim pemeliharaan untuk menjamin alur informasi yang lengkap dan akurat. Prosedur pengawasan untuk pekerjaan kritis harus diperketat dengan checklist verifikasi berlapis.
➤ Lingkungan Kokpit yang Membingungkan dan Beban Kerja Berlebih ➤ Kurangnya Pengetahuan dan Kesadaran Situasional	Pre-Conditions Level 	➤ Mendesain ulang pelatihan Crew Resource Management (CRM) untuk secara spesifik melatih kru dalam mengelola beban kerja kognitif di bawah kondisi multiple-alert dan membangun strategi diagnosis masalah saat menghadapi anomali yang tidak sesuai ekspektasi.
➤ Kesalahan Prosedural (Kru Penerbang JT-610) ➤ Kelalaian Prosedural (Kru Penerbang LNI043)	Unsafe Actions Level 	➤ Mengembangkan pelatihan berbasis kompetensi (Competency-Based Training) yang memastikan pilot tidak hanya hafal prosedur, tetapi juga memahami logika di baliknya serta mampu menerapkannya secara adaptif dalam situasi yang membingungkan.
➤ Kegagalan Pertahanan Desain & Sertifikasi ➤ Kegagalan Pertahanan Prosedural & Pelatihan ➤ Kegagalan Pertahanan Peringatan (Warning System) ➤ Kegagalan Pertahanan Perawatan	Defences Level 	➤ Operator harus melakukan validasi mandiri terhadap semua sistem kritis baru pada armada mereka. Regulator harus memastikan bahwa semua informasi teknis yang relevan dengan keselamatan wajib dimasukkan ke dalam manual dan program pelatihan sebelum tipe pesawat baru diizinkan beroperasi.

Tabel 2. Analisis Swiss Cheese PK-LQP

Penyebab Kecelakaan	Swiss Cheese Model	Rekomendasi
Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan (SMS) yang Tidak Memadai yaitu : ➤ Efektivitas Program Analisis Data Penerbangan (FDAP) ➤ Kekurangan Program Pelaporan Bahaya ➤ Pengawasan Hazard Identification Risk Analysis (HIRA)	Organizational Level 	➤ Meningkatkan Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan (SMS) secara Menyeluruh ➤ Meningkatkan Efektivitas Program Analisis Data Penerbangan (FDAP) ➤ Menyeimbangkan dan Menekankan Program Pelaporan Bahaya ➤ Memperkuat Pengawasan Hazard Identification Risk Analysis (HIRA) dan Manajemen Perubahan
➤ Pengawasan yang Tidak Memadai terhadap Pemecahan Masalah Pemeliharaan dan Cacat Berulang ➤ Kegagalan dalam Menegakkan Kepatuhan Prosedural dalam Pemeliharaan ➤ Kekurangan dalam Manajemen Program Pelatihan Pilot (UPRT)	Management Level 	➤ Memperkuat Pengawasan Pemeliharaan dan Resolusi Cacat Berulang ➤ Meningkatkan Manajemen Program Pelatihan Pilot
➤ Cacat Mekanis Laten pada Sistem Autothrottle ➤ Input Sinyal Sudut Spoiler yang Kurang Tepat ke CTSM ➤ Faktor Kognitif dan Perilaku Pilot ➤ Pengetahuan/Keterampilan Pilot yang Tidak Memadai (UPRT) ➤ Praktik Personel Pemeliharaan	Pre-Conditions Level 	➤ Mengatasi Cacat Mekanis Laten dan Masalah Sinyal Sensor ➤ Mengurangi Kerentanan Faktor Kognitif dan Perilaku Pilot
➤ Pilot Flying (PF) - Pemantauan yang Tidak Memadai dan Kesalahan Penilaian ➤ Pilot Monitoring (PM) - Pemantauan dan Bantuan yang Tidak Memadai ➤ Awak Penerbangan - Kegagalan Melaporkan Anomali Sebelumnya ➤ Personel Pemeliharaan - Pemecahan Masalah yang Dangkal dan Ketidakpatuhan Prosedural	Unsafe Actions Level 	➤ Meningkatkan Pemantauan dan Pengambilan Keputusan Pilot ➤ Meningkatkan Pelaporan Pilot dan Kepatuhan Prosedural Pemeliharaan
➤ Cruise Thrust Split Monitor (CTSM) - Keterlambatan Aktivasi ➤ Prosedur Pemeliharaan - Ketidakmampuan Mengidentifikasi Akar Masalah ➤ Sistem Pelaporan Keselamatan - Kurangnya Pelaporan Pilot ➤ Program Flight Data Analysis (FDAP) - Keterbatasan dan Ketidakmampuan Analisis ➤ Pelatihan Upset Prevention and Recovery Training (UPRT) - Ketidacukupan dan Modifikasi Prosedural ➤ Pengawasan Manajemen Pemeliharaan (Maintenance Control Center - MCC) - Kurangnya Kesadaran akan Cacat Berulang	Defences Level 	➤ Meningkatkan Keandalan dan Efektivitas Pertahanan Otomatis ➤ Memperkuat Pertahanan Manusia dan Prosedural

Perlu digarisbawahi bahwa visualisasi "lubang" pada diagram Swiss Cheese Model dalam tabel 1 & 2 digunakan sebagai alat bantu ilustratif. "Lubang" tersebut melambangkan adanya celah atau kerentanan secara umum pada setiap level pertahanan, dan bukan merupakan pemetaan langsung dari setiap faktor penyebab yang teridentifikasi. Rincian spesifik mengenai faktor-faktor penyebab diuraikan dalam kolom "Penyebab Kecelakaan", sedangkan langkah-langkah perbaikan yang diusulkan dapat ditemukan pada kolom "Rekomendasi".

Berdasarkan pada hasil tabel 1 & 2 diatas terlihat serangkaian kegagalan yang sejajar di berbagai lapisan pertahanan, seperti lubang-lubang pada keju Swiss yang akhirnya membentuk jalur yang tidak terhalang menuju bahaya.

1. Latent Conditions PK- CLC (Kondisi Laten):

a. Masalah Manajemen Pemeliharaan:

- 1) Proses perbaikan korektif untuk masalah A/T yang berulang tidak mampu mengidentifikasi adanya friksi atau hambatan pada sistem mekanis tuas pendorong.

- 2) Tindakan perbaikan yang dominan (48% dari total) hanya berupa pembersihan konektor elektrik, dan investigasi dihentikan setelah BITE test menunjukkan "no faults", tanpa menelusuri lebih dalam sesuai panduan AMM.
- 3) Pemantauan kerusakan berulang oleh Maintenance Control Center (MCC) tidak berjalan efektif, sehingga tidak meningkatkan kesadaran teknisi tentang masalah A/T yang kronis.
- b. Regulasi & Pelatihan yang Tidak Memadai:
 - 1) Tidak adanya panduan standar nasional untuk Upset Prevention and Recovery Training (UPRT) berkontribusi pada program pelatihan yang tidak diimplementasikan secara memadai.
 - 2) Regulasi CASR Part 121 sudah mewajibkan UPRT sejak 2017, namun tidak merinci kebutuhan pelatihan dan belum mencakup aspek pencegahan (prevention).
- c. Kelemahan pada Sistem Manajemen Keselamatan (SMS):
 - 1) Program Analisis Data Penerbangan (FDAP) tidak efektif, dengan rata-rata data yang dianalisis hanya 28.1%, sehingga mengurangi kemampuan untuk memonitor keselamatan operasi.
 - 2) Sriwijaya Air tidak dapat menganalisis data QAR dari PK-CLC karena tidak memiliki data frame yang benar, akibatnya insiden kemiringan berlebih pada 15 Maret 2020 tidak terdeteksi.
 - 3) Program pelaporan bahaya (hazard reporting) tidak berjalan merata di seluruh level pegawai, yang mungkin menyebabkan banyak bahaya tidak teridentifikasi dan dimitigasi.
2. Active Failures (Kegagalan Aktif):
 - a. Technical Faults (Kegagalan Teknis):
 - 1) Thrust lever kanan macet akibat friksi, sehingga tidak bergerak mundur sesuai perintah A/T, yang memicu asimetri dorongan.
 - 2) Sistem Cruise Thrust Split Monitor (CTSM), yang seharusnya mematikan A/T saat terjadi asimetri, mengalami keterlambatan aktivasi. Hal ini diduga karena kesalahan nilai sinyal dari posisi spoiler.
 - b. Human Error (Kesalahan Manusia):
 - 1) Pilot Monitoring & Recognition: Pilot gagal memonitor dan mengenali adanya asimetri dorongan dan deviasi jalur penerbangan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh automation complacency (terlalu percaya pada otomasi) dan confirmation bias (keyakinan bahwa pesawat berbelok sesuai perintah).
 - 2) Upset Recovery: Saat pesawat miring ke kiri, pilot memberikan input kemudi yang salah (ke kiri, bukan ke kanan untuk mengoreksi). Ini menunjukkan kurangnya pemantauan pada EADI (indikator sikap pesawat) sebagai referensi utama.
 - 3) Prosedur Komunikasi: PM (Pilot Monitoring) melakukan tugas tambahan yang dimodifikasi oleh maskapai (memanggil "upset brown" dan "May Day") yang justru menghambatnya dalam mengkomunikasikan status penting pesawat (sikap, kecepatan, ketinggian) kepada PF (Pilot Flying).
3. Latent Conditions PK-LQP (Kondisi Laten):
 - a. Desain dan Sertifikasi Pesawat:
 - 1) Desain MCAS yang hanya bergantung pada satu sensor AOA membuatnya rentan terhadap input yang salah dari sensor tunggal tersebut.
 - 2) Asumsi yang salah dibuat selama proses sertifikasi mengenai respons pilot terhadap malfungsi. Dianggap pilot dapat merespons dengan benar dan cepat, padahal situasinya sangat membingungkan.
 - 3) Fitur peringatan "AOA DISAGREE" tidak diaktifkan pada pesawat ini,

- sehingga pilot dan teknisi tidak mendapatkan informasi krusial mengenai adanya perbedaan data AOA yang bisa menjadi petunjuk utama masalah.
- b. Prosedur dan Pelatihan:
 - 1) Informasi mengenai sistem MCAS tidak disertakan dalam manual penerbangan (FCOM) dan pelatihan pilot. Akibatnya, pilot tidak menyadari adanya sistem tersebut dan bagaimana cara kerjanya.
 - 2) Prosedur Non-Normal Checklist (NNC) untuk Runaway Stabilizer seharusnya dapat mengatasi masalah, namun pilot tidak mengidentifikasi situasi tersebut dengan benar.
 - c. Manajemen Pemeliharaan & Organisasi:
 - 1) Sensor AOA pengganti telah salah dikalibrasi saat perbaikan sebelumnya oleh pihak ketiga (Xtra Aerospace), namun tidak terdeteksi.
 - 2) Tes instalasi AOA sensor di Denpasar tidak dapat dipastikan apakah dilakukan dengan benar, sehingga kesalahan kalibrasi tidak terdeteksi sebelum pesawat terbang kembali.
 - 3) Laporan dari kru penerbangan sebelumnya (LNI043) tidak lengkap. Mereka tidak melaporkan aktivasi stick shaker dan penggunaan saklar STAB TRIM CUT OUT, sehingga informasi vital ini tidak tersedia bagi teknisi dan kru penerbangan berikutnya.
 - d. Sistem Manajemen Keselamatan (SMS) & Budaya Lapar:
 - 1) Penerbangan LNI043 dari Denpasar ke Jakarta yang mengalami berbagai masalah seharusnya diklasifikasikan sebagai serious incident dan dilaporkan ke KNKT, namun ini tidak dilakukan. Manajemen menganggapnya sebagai masalah harian biasa.
 - 2) Pelatihan SMS di maskapai dianggap kurang memadai, terutama dalam hal identifikasi bahaya, yang mungkin menjadi penyebab laporan yang tidak lengkap dari pilot.
4. Active Failures (Kegagalan Aktif):
- a. Technical Faults (Kegagalan Teknis):
 - 1) Sensor AOA kiri memberikan data yang salah (bias 21°) secara konsisten ke Flight Control Computer (FCC).
 - 2) MCAS aktif secara berulang-ulang berdasarkan input AOA yang salah, menyebabkan trim hidung turun tanpa perintah pilot.
 - b. Human Error (Kesalahan Manusia):
 - 1) Kru Penerbangan LNI043 (sebelumnya): Setelah berhasil mengatasi masalah dengan mematikan STAB TRIM, Pilot In-Command (PIC) tidak mendokumentasikannya secara lengkap di AFML. Keputusan mereka untuk melanjutkan penerbangan ke Jakarta meskipun mengalami masalah instrumen yang signifikan juga bertentangan dengan prosedur perusahaan.
 - 2) Kru Penerbangan LNI610 (kecelakaan):
 - Diagnosis Situasi: Pilot tidak berhasil mengidentifikasi kondisi sebagai runaway stabilizer dan tidak menjalankan prosedur yang tepat (yaitu menggunakan saklar STAB TRIM CUTOFF).
 - Manajemen Beban Kerja & CRM: Tim pilot kewalahan oleh serangkaian peringatan, aktivasi MCAS, dan komunikasi ATC. Koordinasi antar kru tidak efektif; mereka sibuk dengan tugas masing-masing tanpa komunikasi yang jelas, sehingga tidak memiliki pemahaman situasi yang sama.
 - Penanganan Pesawat: FO (yang memegang kendali di fase akhir) tidak memberikan input trim yang cukup untuk melawan MCAS, kemungkinan karena tidak menyadari beratnya perlawanan yang telah dilakukan oleh Kapten sebelumnya.

3.1.2 Analisis Metode SHELL Model

Tabel 4. Analisis Metode SHELL Model

SHELL Model	Software (S) Prosedur/Manual	Hardware (H) Pesawat	Environment (E) Lingkungan	Liveware (L) Organisasi
Liveware (L) Pilot	L - S (Pilot - Prosedur/Manual)	L - H (Pilot - Pesawat)	L - E (Pilot - Lingkungan)	L - L (Pilot - Organisasi)
PK-CLC	a. Kurangnya <u>memadainya</u> pelatihan UPRT (<i>Upset Prevention and Recovery Training</i>) untuk Pilot. b. Perubahan QRH <i>upset recovery</i> (termasuk "upset brown" & "May Day") berdampak kontraproduktif terhadap CRM	a. Kegagalan Interaksi Utama antara Pilot dengan Sistem Autothrottle dan Indikator Penerbanga. b. Pilot gagal menjalankan prosedur pada saat pesawat dalam kondisi <i>Upset</i> .	a. Pilot meminta untuk menghindari cuaca, tapi data BMKG menunjukkan tidak ada awan berbahaya. Permintaan ini justru memicu perubahan autopilot yang menyebabkan masalah A/T.	a. Gagalnya komunikasi antar PF (<i>Pilot Flying</i>) dengan PM (<i>Pilot Monitoring</i>). b. Komunikasi dengan ATC (<i>Air Traffic Controller</i>) untuk berhenti di ketinggian 11.000 ft. Perubahan Mode terbang (ke V/S).
PK-LQP	a. Didalam Manual Pesawat tidak terdapat Informasi tentang MCAS terutama dalam manual QRH. b. Terdapat kegagalan dalam mengimplementasikan prosedur <i>Runaway Stabilizer</i> akibat tekanan situasional, bersamaan dengan ketidakmampuan menemukan Non-Normal Checklist yang tepat dalam QRH	a. Pilot vs. MCAS: Interaksi dengan sistem tak dikenal memicu reaksi berantai (stick shaker, peringatan, kontrol berat). b. Terbentuk siklus umpan balik negatif dimana koreksi trim manual pilot justru memicu respon berulang dari sistem MCAS.	a. Kondisi operasional pasca-takeoff menciptakan lingkungan kerja yang sangat menuntut, ditandai dengan intensitas komunikasi ATC yang tinggi dan berbagai alam kokpit, yang secara kumulatif menghasilkan beban kognitif yang signifikan	a. Internal (Antar Pilot): Gagalnya Koordinasi antara <i>Captain</i> dengan <i>First Officer</i> dan hilangnya <i>Situational Awareness</i> . b. Eksternal (Pilot - Engineer): Pilot tidak menginformasikan terkait indikasi kegagalan sistem pesawat. c. Eksternal (Pilot - ATC): Pilot tidak mendeklarasikan "PAN PAN" atau "MAYDAY" secara tegas, sehingga ATC tidak memberikan prioritas atau mengurangi frekuensi komunikasi.

Berdasarkan pada hasil tabel 4 diatas terlihat ketidakcocokan (mismatch) pada antarmuka (interface) antar komponen Liveware-Hardware (L-H), Liveware-Software (L-S), Liveware-Environment (L-E), atau Liveware-Liveware (L-L) pada Studi kasus PK-CLC dan PK-LQP.

3.1.3 Mengintegrasikan Model Swiss Cheese dan SHELL

Berdasarkan analisis mendalam terhadap kasus kecelakaan Sriwijaya Air SJ182 (PK-CLC) dan Lion Air JT610 (PK-LQP), penelitian ini menyimpulkan bahwa *Loss of Control In-Flight (LOC-I)* merupakan produk akhir dari interaksi kompleks kegagalan sistemik, yang dapat dipetakan dan dipahami secara komprehensif melalui integrasi Swiss Cheese Model (SCM) dan SHELL Model.

1. Lapisan Organisasi & Regulasi (*Organizational Level*) (Swiss Cheese Model) → *Mismatch Liveware-Software* (SHELL): Kelemahan pada lapisan ini, seperti tidak adanya panduan nasional UPRT yang memadai dan proses sertifikasi sistem pesawat (MCAS) yang cacat, secara langsung menyebabkan ketidaksesuaian antara pilot (Liveware) dengan prosedur dan manual (Software).
2. Lapisan Manajemen (*Management Level*) (Swiss Cheese Model) → *Mismatch Liveware-Hardware* (SHELL): Kegagalan manajemen maskapai, yang tercermin dari SMS yang

- lemah, budaya pelaporan yang tidak jujur, dan proses pemeliharaan yang reaktif, menciptakan ketidaksesuaian antara pilot (Liveware) dengan mesin pesawat (Hardware).
3. Lapisan Prasyarat (*Pre-Conditions*) (Swiss Cheese Model) → *Mismatch Liveware-Liveware* dan *Liveware-Environment* (SHELL): Kondisi seperti beban kerja tinggi, tekanan waktu, dan kelelahan yang dihasilkan dari lubang di lapisan manajemen dan organisasi langsung memperparah ketidaksesuaian antar manusia (*Liveware-Liveware*) dengan melemahkan komunikasi dan koordinasi dalam kokpit (CRM).

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa insiden Loss of Control In-Flight (LOC-I) pada kedua kasus bukanlah peristiwa tunggal yang berdiri sendiri, melainkan manifestasi dari kegagalan sistemik yang melibatkan interaksi kompleks antara faktor organisasi, teknis, dan manusia. Analisis menggunakan Swiss Cheese Model mengidentifikasi adanya latent conditions berupa kelemahan dalam regulasi pelatihan Upset Prevention and Recovery Training (UPRT), proses sertifikasi pesawat, serta implementasi Safety Management System (SMS) di tingkat operator. Kondisi laten tersebut berinteraksi dengan active failures yang termanifestasi dalam bentuk kesalahan input kemudi, kegagalan pemantauan parameter penerbangan, serta ketidakmampuan menjalankan prosedur runaway stabilizer secara tepat. Interaksi antara latent conditions dan active failures ini menciptakan hole alignment pada berbagai lapisan pertahanan, sehingga membuka jalur terjadinya LOC-I.

Lebih lanjut, analisis dengan SHELL Model mengungkap adanya mismatch kritis pada antarmuka sistem, meliputi Liveware-Software (kurangnya pemahaman prosedur akibat pelatihan yang tidak memadai dan informasi sistem yang tidak lengkap), Liveware-Hardware (kegagalan interaksi dengan sistem autothrottle dan MCAS), Liveware-Environment (beban kerja kognitif tinggi akibat multiple alerts dan komunikasi ATC), serta Liveware-Liveware (kelemahan koordinasi dan komunikasi dalam kokpit). Integrasi kedua model menunjukkan bahwa latent conditions dalam Swiss Cheese Model secara sistematis menciptakan kondisi terjadinya mismatch pada antarmuka SHELL, yang pada akhirnya memicu active failures. Berdasarkan sintesis tersebut, rekomendasi mitigasi diarahkan kepada regulator melalui penguatan regulasi UPRT dan safety oversight berbasis risiko, serta kepada operator melalui revitalisasi CRM dan pelatihan simulator berbasis data FDAP. Dengan demikian, pencegahan LOC-I menuntut pendekatan terintegrasi yang secara simultan memperkuat setiap lapisan pertahanan sistem dan setiap antarmuka interaksi manusia-mesin dalam sistem penerbangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Civil Aviation Organization. (2023). *Loss of control in-flight (LOC-I) awareness*. <https://www.icao.int/safety/loci>.
- [2] Komite Nasional Keselamatan Transportasi. (2021). Laporan akhir investigasi kecelakaan Lion Air JT-610 (No. KNKT.18.10.35.04).
- [3] Wiegmann, D. A., & Shappell, S. A. (2017). *Beyond aviation human factors*. Ashgate.
- [4] Suryanto, A., & Darmawan, B. (2022). Analisis faktor sistemik dalam kecelakaan LOC-I di Indonesia. *Jurnal Teknologi Dirgantara*, 21(1), 45–60.
- [5] Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2023). Statistik keselamatan penerbangan Indonesia 2018–2022.
- [6] Edwards, E. (1972). *Man and machine: Systems for safety*. In *Proceedings of British Airways European Flight Safety Conference*.
- [7] Boeing. (2021). *Statistical summary of commercial jet airplane accidents*. <https://www.boeing.com/news/airplanes>.
- [8] Komite Nasional Keselamatan Transportasi. (2022). Laporan investigasi kecelakaan Sriwijaya Air SJ-182 (No. KNKT.21.01.09.04).
- [9] International Civil Aviation Organization. (2020). *Manual on prevention of loss of control In-flight (Doc 10011)*.
- [10] ICAO Common Taxonomy Team. (2011). *Aviation occurrence categories: Definitions and usage notes (Ed. 2.1)*. International Civil Aviation Organization.