



Analisis Kegagalan *Brake Servo Valve Hydraulic System Blue* Pada *Main Landing Gear* Pesawat Airbus A330 dengan Metode FMEA dan FTA di PT. XYZ

Bhisma Bimantara

Politeknik Penerbangan Indonesia Curug

Lilies Esthi Riyanti

Politeknik Penerbangan Indonesia Curug

Dody Herdianto

Politeknik Penerbangan Indonesia Curug

Alamat: Kabupaten Tangerang, Banten 15820

Korespondensi penulis: bhisma.bimantaraa@gmail.com

Abstract. Aircraft maintenance is an essential aspect of aviation aimed at ensuring airworthiness and keeping components in optimal condition to minimize accidents. The landing gear system supports the aircraft during ground operations, takeoff, and landing, with the Alternate Brake Servo Valve serving as a vital component that regulates hydraulic pressure in the brake system. Data from 2020 to 2024 show that the failure P/N C20374000-2 on Airbus A330 aircraft at PT XYZ has resulted in 57 unscheduled removals between 2020–2024. This study aims to analyze the factors causing these failures, identify the root causes, and provide improvement recommendations. The methods used are Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) to identify failure modes and calculate the Risk Priority Number (RPN), and Fault Tree Analysis (FTA) to determine root causes. The analysis shows that Leak From Connection is the dominant failure mode with the highest RPN value (210). The FTA results indicate that the main causes include the absence of specific maintenance procedures, uneven standard practices training, lack of reinspection by Inspectors, non-compliance with manuals, and inaccurate tools used. Based on these findings, several corrective actions are proposed, including developing specific inspection procedures, providing comprehensive standard practices training, implementing a double-check system, emphasizing adherence to the Aircraft Maintenance Manual (AMM), and conducting periodic tool calibration.

Keywords: Alternate Brake Servo Valve, Failure, Failure Mode and Effect Analysis, Fault Tree Analysis.

Abstrak. Perawatan pesawat udara merupakan aspek penting dalam penerbangan untuk memastikan pesawat laikudara dan komponen tetap optimal guna meminimalisir kecelakaan. Sistem *landing gear* berfungsi menopang pesawat saat di darat, lepas landas, dan mendarat, dengan *Alternate Brake Servo Valve* sebagai komponen vital yang mengatur tekanan *hydraulic* pada sistem rem. Kegagalan komponen *Alternate Brake Servo Valve* P/N C20374000-2 pada pesawat Airbus A330 di PT XYZ menyebabkan 57 *unscheduled removal* selama 2020–2024. Penelitian ini bertujuan menganalisis faktor

penyebab kegagalan, mengidentifikasi akar masalah, dan memberikan usulan perbaikan. Metode yang digunakan adalah *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi mode kegagalan dan menghitung *Risk Priority Number* (RPN), serta *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk menentukan akar penyebab kegagalan. Hasil analisis menunjukkan bahwa *Leak From Connection* merupakan kegagalan dominan dengan nilai RPN tertinggi (210). Analisis FTA mengungkap penyebab utama berupa ketiadaan prosedur perawatan spesifik, pelatihan *standard practices* yang tak merata, tidak adanya pengecekan ulang oleh *Inspector*, ketidakpatuhan teknisi terhadap *manual*, dan ketidaktepatan *tools* yang digunakan. Berdasarkan temuan ini, diusulkan langkah perbaikan seperti pembuatan prosedur inspeksi spesifik, pelatihan menyeluruh, penerapan sistem *double check*, penekanan kepatuhan terhadap *Aircraft Maintenance Manual* (AMM), serta kalibrasi *tools* secara berkala.

Kata kunci: *Alternate Brake Servo Valve, Failure Mode and Effect Analysis, Fault Tree Analysis, Kegagalan.*

LATAR BELAKANG

Angkutan yang beroperasi di bidang penerbangan salah satunya adalah pesawat terbang. Setiap pesawat terbang yang beroperasi wajib laikudara. Kelaikudaraan berarti terpenuhinya syarat desain dan tipe pesawat udara sesuai standar ketika dioperasikan (Undang-Undang 1 2009 Penerbangan, 2009). Dalam konteks penerbangan, perawatan diartikan sebagai kegiatan memastikan komponen dan peralatan pesawat terbang sesuai standar kelaikudaraan (*airworthy*) (Driyono, 2019). Pada dasarnya program perawatan terbagi menjadi dua kategori, yaitu *preventive maintenance* dan *corrective maintenance* (Rosyidin, 2017). Landing gear atau roda pendaratan merupakan komponen penting pesawat yang berfungsi menopang pesawat saat *take off*, *landing*, dan *taxi* (Malendes dkk., 2016). Pada sistem pengereman *landing gear*, salah satu komponen yang sering mengalami kerusakan adalah *Alternate Brake Servo Valve*, yaitu *valve* yang berfungsi mengatur pelepasan/penyaluran tekanan pengereman berdasarkan perintah kendali tekanan dari *Brake and Steering Control Unit* (BSCU) (Laksono, 2017). Pada pesawat Airbus A330, pengoperasian landing gear dan sistem pengereman didukung oleh sistem hidrolik, termasuk *Green Hydraulic System* dan *Blue Hydraulic System*, sehingga kondisi fluida dan komponen hidrolik sangat berpengaruh terhadap performa sistem (Dwiaji & Sura, 2021). Kebocoran atau penurunan jumlah fluida dapat menyebabkan tekanan hidrolik tidak optimal dan berpotensi memicu kegagalan fungsi pada komponen.

Tabel 1. Report Component Removal

No	Tahun	Unscheduled Removal (Brake Servo Valve)
1.	2020	9
2.	2021	12
3.	2022	15
4.	2023	7
5.	2024	14
Total		57

Sumber: Data *Unit Base Maintenance* PT XYZ.

Berdasarkan Tabel 1 data *component removal* milik PT XYZ terdapat 57 *unscheduled removal* pada komponen *Alternate Brake Servo Valve* P/N C20374000-2 dari tahun 2020 sampai dengan 2024. Tingginya *unscheduled removal* menunjukkan adanya permasalahan reliabilitas komponen yang berdampak langsung terhadap kesiapan armada (*dispatch reliability*), peningkatan pekerjaan perawatan tidak terencana, serta potensi keterlambatan penerbangan akibat proses *troubleshooting* dan penggantian komponen. Selain berdampak pada operasional, kegagalan komponen pada sistem pengereman juga memiliki implikasi keselamatan karena pengereman merupakan sistem kritis saat pesawat melakukan *landing roll* dan *rejected take off* (RTO). Berdasarkan prinsip pengendalian kelaikudaraan dan ketentuan *Minimum Equipment List* (MEL), gangguan pada sistem pengereman dapat menyebabkan pembatasan operasi, kewajiban tindakan perbaikan dalam batas waktu tertentu, atau bahkan kondisi *aircraft on ground* (AOG) apabila persyaratan sistem tidak terpenuhi. Oleh karena itu, analisis kegagalan *Alternate Brake Servo Valve* menjadi penting untuk mengidentifikasi mode kegagalan dominan dan akar penyebabnya sehingga dapat ditentukan tindakan pencegahan yang tepat guna menurunkan kejadian *unscheduled removal* dan menjaga keselamatan serta keandalan operasi pesawat.

Dalam penelitian (Adwa dkk., 2023) yang berjudul “Analisis Kegagalan Komponen *Overhead Crane* dengan *Metode Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)” hasil dari penelitian tersebut mengidentifikasi hubungan antar komponen utama melalui *Functional Block Diagram* (FBD), mencakup 23 komponen beserta isinya, serta penyebab potensial kegagalannya. Hasil pengisian lembar kerja FMEA menunjukkan 13 komponen kritis berdasarkan *Risk Priority Number* (RPN). Komponen dengan RPN tertinggi adalah *main*

power supply/MCB (RPN 209) dengan *failure mode* seperti matinya crane, gesekan berlebih pada *current collector*, dan kerusakan *joint clip power conductor*. Sementara itu *pendant cable* memiliki RPN terendah (98). Nilai RPN rata-rata komponen ini adalah 92, sehingga komponen dengan RPN lebih dari 92 dikategorikan kritis. Penelitian serupa yang dilakukan (Prakoso dkk., 2021) dengan judul “Penanganan Dan Analisa Kegagalan Pada *Bleed Air Leak Detection System* Pesawat Airbus A330-300 Di Hanggar 3 PT. XYZ” mengidentifikasi kerusakan pada elemen sensor di zone 71. Komponen ini telah beroperasi selama 24 tahun 8 bulan, hampir menyentuh batas umur maksimal dari pabrikan yaitu 25 tahun. Berdasarkan analisis menggunakan metode *fault tree analysis* didapatkan beberapa akar penyebab kegagalan yaitu *electrostatic*, *short circuit*, *lost continuity*, *connector fault*, *control logic fault*, *thermistor disconnected*, degradasi prestasi, dislokasi komponen, dan *corrosion*.

Meskipun penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) efektif dalam mengidentifikasi komponen kritis serta akar penyebab kegagalan pada berbagai sistem industri dan pesawat udara, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada sistem non-pengereman atau komponen dengan karakteristik kegagalan yang berbeda. Penelitian Adwa dkk. (2023) lebih menitikberatkan pada sistem mekanik industri dengan keterkaitan antar komponen melalui *Functional Block Diagram*, sedangkan penelitian Prakoso dkk. (2021) berfokus pada sistem deteksi kebocoran *bleed air* yang berkaitan dengan sensor dan kelistrikan. Hingga saat ini, kajian yang secara spesifik menganalisis kegagalan komponen hidrolik kritis pada sistem pengereman landing gear pesawat Airbus A330, khususnya *Alternate Brake Servo Valve*, dengan pendekatan integratif FMEA untuk pemeringkatan risiko dan FTA untuk penentuan akar penyebab kegagalan masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini hadir untuk melengkapi celah penelitian tersebut dengan menganalisis kegagalan *Alternate Brake Servo Valve* berbasis data *unscheduled removal* aktual, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi peningkatan reliabilitas, keselamatan, dan efektivitas perawatan pada lingkungan *Maintenance, Repair, and Overhaul* (MRO).

KAJIAN TEORITIS

Airbus A330 Series

Airbus A330 *series* memiliki kemampuan unik untuk melayani semua segmen rute mulai dari perjalanan jarak dekat hingga jarak jauh dengan jarak tempuh hingga 6.350nm, dengan penumpang yang dapat menikmati kabin yang nyaman dan tenang selama berada di udara. Airbus 330 *series* merupakan pesawat komersial *wide body* bermesin ganda (*twin jet*). Pesawat ini memiliki panjang 62,83 m dengan tinggi mencapai 16,91 m. Pesawat ini menggunakan dua *engine General Electric CF6-80E*, *Pratt & Whitney PW4000* atau *Rolls-Royce Trent 700*, semuanya diberi nilai ETOPS-180. Akan tetapi, untuk pesawat Airbus A330 *series* yang dimiliki PT.Garuda Indonesia mayoritas menggunakan jenis mesin *Rolls-Royce Trent 700*. Pesawat ini dikembangkan dari Airbus A300, pesawat berbadan lebar pertama milik Airbus. Airbus menginginkan A330 bisa bersaing dalam pasar ETOPS (*Extended range Twin engine Operational Performance Standards*), khususnya dengan boeing 767.



Sumber: Airbus (2024).

Gambar 1. Dimension A330-200/300

Blue Hydraulic System

Blue hydraulic system pada pesawat Airbus A330 dilengkapi oleh *reservoir* yang menyuplai fluida ke *engine driven pump* (EDP) dan *electric pump*. Pump akan memberikan tekanan sebesar 50 psi untuk mencegah *pump cavitation*, reservoir mempertahankan tekanan setidaknya selama 12 hours. Reservoir dilengkapi dengan beberapa sensor yaitu: *Air pressure switches*, *low level switch* yang memberikan peringatan ketika mencapai 5 liter, sistem *capacitive* untuk monitoring level, serta

temperature transmitter yang mengirim data ke *Hydraulic System Monitoring Unit* (HSMU). *Fire Shut Off Valve* (FSOV) terdiri dari *ball valve* dan *electric motor* dengan *limit switches*, terletak di luar *engine fire zone*. *Two stage Engine Driven Pump* (EDP) dikontrol *solenoid valve* dengan *integral pulsation damper* dan *non bypassing case drain filter* (*clogging indicator* 87 psi), sementara *electric pump* dikelola HSMU dengan monitoring *phase unbalance* via *Current Unbalance Detection Unit* (CUDU) dan *overheat conditions*. Sistem dilengkapi dengan *ground self sealing connectors*, *LP return filter* (*bypassing type*, *clogging indicator* 73 psi), serta *power accumulator* untuk meredam *pulsations/surges* dengan konfigurasi *vertical* (*Gas port* dan *Fluid port*) terhubung ke nitrogen *charging ground connector*. *Hp manifold* menggunakan *non bypassing filter* (87 psi), *pressure relief valve*, dan *leak measurement solenoid valve* untuk isolasi saat pesawat *on ground*. Monitoring tekanan melalui *pressure transmitter* dan *switches* ke *Electronic Centralized Aircraft Monitor* (ECAM) serta *flight control computers*, dengan *sampling valve* untuk pemeriksaan *contamination* (Airbus, 2024).

Landing Gear

Landing gear mendukung pesawat selama pendaratan dan saat berada di darat. *Landing gear* harus memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban pendaratan saat mendarat dengan muatan penuh. Selain kekuatan, tujuan rancangan utama yaitu agar *landing gear* menjadi seringan mungkin. Untuk mewujudkan hal demikian, *landing gear* dibuat dari berbagai macam bahan termasuk baja, aluminium, dan magnesium. Kebanyakan *landing gear* memiliki kemampuan untuk meredam atau menerima kejutan dan mendistribusikannya agar struktur tidak mengalami kerusakan (FAA, 2023).

Brake System

Pesawat Airbus A330 Series memiliki delapan *wheel* pada *main landing gear*. Disetiap *wheel* memiliki *brake system* yang terbuat dari *multi disk carbon* dan dioperasikan oleh dua set piston yang berbeda (Airbus, 2024). Piston ini digerakan oleh dua sistem *hydraulic*, yaitu sistem *hydraulic green* dan *blue*. Komponen utama dari *brake system* yaitu: *Brake unit assembly*, *Brake pedal transmitter*, *Brake and Steering Control Unit* (BSCU), *Automatic selector valve*, *Normal brake selector valve*, *Servo valve*, *Return accumulators*, dan *green manifold assembly*.

Alternate Brake Servo Valve

Servo valve adalah *electrohydraulic valve* yang menggabungkan rangkaian *hydraulic* dengan rangkaian *electrical* yang terhubung. *Valve* ini memiliki tiga posisi pengoperasi utama. *Valve* ini dikontrol melalui *electrical* untuk menjaga tekanan pada *brake system* supaya berada pada nilai yang diperlukan atau melepaskan tekanan. Rangkaian *hydraulic* terdapat bagian badan dengan *control bore* dan *distribution bore*. Bagian badan menghubungkan kedua lubang ini dan menghasilkan *supply port A*, *service port B* dan *return port C*. *Control bore* terdiri dari dua *nozzle* yang sama, *nozzle* ditekan secara stabil di dalam lubang dan masing-masing terhubung ke ujung *distribution bore*. *Distribution bore* memiliki *slide valve*. Ini adalah mesin untuk menghubungkan dua port dan dapat bergerak di dalam lubang. Rangkaian *electrical* memiliki bagian dengan konektor listrik. Bagian rangkaian termasuk bagian atas dan bagian bawah tiang. Dua magnet permanen menjaga bagian tiang tetap stabil dan terpisah. Dua kumparan dipasang di antara tiang, kumparan tersebut terhubung ke konektor listrik (Airbus, 2024).

METODE PENELITIAN

Metode penelitian pada dasarnya adalah cara ilmiah untuk mengumpulkan data dengan tujuan dan kegunaan tertentu. Ada empat poin penting yang harus dipahami yaitu, metode ilmiah, data, tujuan, dan manfaat. Metode ilmiah dalam suatu penelitian mengacu pada kegiatan yang berlandaskan pada prinsip-prinsip keilmuan, yaitu bersifat logis, berbasis fakta, dan sistematis. Data yang didapatkan dari penelitian wajib mempunyai kriteria tertentu yaitu valid. Setiap penelitian memiliki tujuan dan manfaat tersendiri. Secara umum tujuan penelitian dibagi menjadi tiga, yaitu penemuan, pembuktian, dan pengembangan (Sugiyono, 2013). Dan secara garis besar penelitian dibedakan menjadi dua, yaitu penelitian kuantitatif dan penelitian kualitatif (Haya, 2019).

Dalam penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif. Alur penulisannya adalah menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi mode kegagalan yang mungkin terjadi dan mengurutkan potensi kegagalan berdasarkan *Risk Priority Number* (RPN). Setelah itu, melakukan wawancara dengan beberapa orang teknisi/engineer yang memiliki *type rating* Airbus A330 series untuk menganalisis akar

penyebab kegagalan dengan metode *Fault Tree Analysis* (FTA). Selanjutnya, dari hasil pengolahan data tersebut menggunakan metode 5W+1H untuk memberikan usulan perbaikan agar dapat mengurangi tingkat kegagalan dan *unscheduled removal* pada komponen.

Penelitian ini difokuskan pada komponen *Alternate Brake Servo Valve* P/N C20374000-2 pada pesawat Airbus A330 series di PT XYZ yang mengalami *unscheduled removal* sebanyak 57 kali selama periode 2020–2024. Tahapan pelaksanaan penelitian mencakup penentuan objek, studi literatur, pengumpulan data, serta pengolahan dan analisis hasil. Pengumpulan data dilakukan dengan teknik *triangulasi* untuk memastikan keabsahan informasi melalui berbagai sumber dan waktu yang berbeda. Data bersifat kualitatif yang diperoleh dari wawancara semiterstruktur dan tidak terstruktur, studi dokumen, serta observasi langsung di lapangan. Setelah data terkumpul, dilakukan proses analisis untuk menemukan pola dan makna dari hasil temuan. Melalui tahapan tersebut diperoleh pemahaman menyeluruh terhadap penyebab kegagalan komponen serta dasar perumusan langkah-langkah perbaikan yang bersifat aplikatif dan berorientasi pada peningkatan keandalan sistem.

FGD dilaksanakan secara terstruktur dengan durasi sekitar 60–90 menit, dipandu oleh peneliti menggunakan panduan diskusi yang disusun berdasarkan hasil analisis FMEA dan FTA. Topik diskusi difokuskan pada klarifikasi akar penyebab kegagalan, evaluasi praktik perawatan yang berjalan, serta identifikasi tindakan korektif yang realistis dan dapat diterapkan di lingkungan hangar. Hasil diskusi dicatat dan dirangkum untuk memastikan kesesuaian antara temuan analisis dan kondisi operasional aktual di lapangan. Selanjutnya, hasil FGD dianalisis menggunakan metode 5W+1H (*What, Why, How, Who, When, dan Where*) secara operasional untuk merumuskan usulan perbaikan yang sistematis. Unsur *What, Why, dan How* digunakan untuk mengidentifikasi permasalahan utama, alasan terjadinya kegagalan, serta langkah perbaikan yang diusulkan, yang kemudian disajikan dalam Tabel 5. Sementara itu, unsur *Who, When, dan Where* digunakan untuk menetapkan pihak yang bertanggung jawab, waktu pelaksanaan, dan lokasi implementasi perbaikan, yang disajikan dalam Tabel 6. Pendekatan ini memastikan bahwa usulan perbaikan tidak hanya bersifat konseptual, tetapi juga aplikatif dan dapat diintegrasikan ke dalam sistem perawatan pesawat di PT XYZ.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data yang telah didapatkan dari unit *base maintenance* PT XYZ terdapat 57 *unscheduled removal* pada komponen *Alternate Brake Servo Valve* P/N C20374000-2 dari tahun 2020 sampai dengan 2024. Pada Tabel 2, diperoleh kegagalan akibat *Connector Corrosion* sebanyak 7 kali, *Connector Burn* sebanyak 10 kali, *Leak From Connection* sebanyak 27 kali, dan *Leak From Body* sebanyak 13 kali. Kemudian, metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) digunakan untuk menilai tiga parameter, yaitu tingkat Keparahan (*Severity*), Kemungkinan terjadinya (*Occurrence*), dan Kemungkinan kegagalan deteksi (*Detection*) dari setiap jenis kerusakan yang ada pada Tabel 2. Penilaian parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) pada penelitian ini menggunakan skala 1–10, dimana nilai 1 menunjukkan tingkat dampak/kemungkinan terendah dan nilai 10 menunjukkan tingkat dampak/kemungkinan tertinggi, sehingga nilai RPN dihitung dari perkalian $S \times O \times D$.

Tabel 2. Jenis Kerusakan

No	Bentuk Kerusakan	Jumlah Kejadian
1	<i>Connector Corrosion</i>	7
2	<i>Connector Burn</i>	10
3	<i>Leak From Connection</i>	27
4	<i>Leak From Body</i>	13

Sumber: Data *Unit Base Maintenance* PT XYZ.

FMEA Kegagalan *Alternate Brake Servo Valve*

Sebelum menggunakan metode FMEA, dibentuk tim FMEA yang terdiri dari para ahli dari bidang disiplin ilmu dan fungsi. Tim yang dibentuk harus memiliki pemahaman yang mendalam tentang proses yang akan dianalisis (Alijoyo dkk., 2020). Menurut buku (The Basic Of FMEA, 2008.) jumlah ideal untuk membentuk tim FMEA adalah empat sampai enam orang dan dalam penelitian ini terdapat 4 teknisi PT XYZ yang memiliki *type rating* pesawat Airbus A330 untuk nantinya di wawancara tentang FMEA yang dilakukan. Setelah skala penilaian hasil wawancara didapatkan dari para teknisi pemegang *type rating* pesawat Airbus A330 *series* yang menjadi narasumber. Selanjutnya nilai rata-rata dari setiap parameter yang telah dinilai oleh responden akan dihitung.

Berdasarkan perhitungan nilai rata-rata pada setiap parameter, hasil ditampilkan dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Perhitungan RPN (Risk Priority Number)

No	Komponen	Bentuk Kerusakan	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN (S×O×D)
1	Alternate Brake Servo Valve	Connector Corrosion	5	2	4	40
2		Connector Burn	6	2	4	48
3		Leak From Connection	6	5	7	210
4		Leak From Body	5	3	6	90

Sumber: Data Penelitian Penulis.

Pada Tabel 3 diatas, ditampilkan nilai rata-rata dari setiap indikator kerusakan yang dihitung berdasarkan parameter *severity*, *occurrence*, dan *detection*. Berdasarkan data yang telah dianalisis, permasalahan dialami untuk menemukan yang paling dominan, yaitu “*Leak From Connection*” dengan nilai RPN sebesar 210. Dan sebaliknya permasalahan yang paling minoritas adalah *Connector Corrosion* dengan nilai RPN sebesar 40 Setelah menemukan nilai RPN tertinggi yang termasuk dalam kategori risiko tinggi, analisis akar permasalahan selanjutnya dilakukan dengan menggunakan metode Fault Tree Analysis (FTA) untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab utama terjadinya kegagalan *Leak From Connection* secara sistematis. Berdasarkan rangkuman hasil wawancara dengan teknisi pemegang *type rating* Airbus A330 series, nilai *Severity* (S) = 6 diberikan karena kebocoran pada connection berpotensi menyebabkan gangguan fungsi sistem dan memerlukan tindakan perbaikan segera agar tidak berdampak pada keandalan komponen. Nilai *Occurrence* (O) = 5 diberikan karena jenis kerusakan ini merupakan kegagalan yang paling sering terjadi berdasarkan data *unscheduled removal* (27 kejadian) sehingga peluang terjadinya tergolong sedang hingga tinggi.

Sementara itu, nilai *Detection* (D) = 7 diberikan karena kebocoran pada *connection* cenderung sulit terdeteksi pada tahap awal apabila tidak dilakukan inspeksi spesifik dan *double check* secara menyeluruh, sehingga peluang kegagalan terdeteksi sebelum terjadi *unscheduled removal* relatif rendah. Mengacu pada praktik umum penerapan FMEA di

industri, nilai RPN dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa tingkat risiko, dimana RPN < 100 tergolong risiko rendah, RPN 100–200 tergolong risiko sedang, dan RPN > 200 tergolong risiko tinggi yang memerlukan tindakan korektif segera. Dengan nilai RPN sebesar 210, kegagalan *Leak From Connection* termasuk dalam kategori risiko tinggi, sehingga perlu diprioritaskan untuk dilakukan analisis akar penyebab dan perbaikan guna menurunkan potensi terjadinya *unscheduled removal*.

FTA Kegagalan *Alternate Brake Servo Valve*

Tabel 4. Tranggulasi Teknik

No	Observasi	Dokumen	Wawancara	Sintesis
1	Komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> tidak memiliki jadwal inspeksi.	<i>Maintenance Program</i> Tidak tersedia.	<i>Aircraft Maintenance Engineer</i> menyatakan bahwa benar tidak adanya inspeksi berkala untuk komponen tersebut, hal ini terjadi karena tidak ada MP yang menyatakan prosedur perawatan untuk komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> .	Tidak ada <i>Maintenance Program</i> untuk komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> .
2	Terjadi kesalahan pemasangan pada komponen	Dokumen AMM menyatakan ketika memasang komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> wajib dilumasi terlebih dahulu dengan <i>Phosphate Ester Hydraulic Fluid General Power</i> .	<i>Aircraft Maintenance Engineer</i> menyatakan bahwa kesalahan pemasangan dapat terjadi karena personel baru kurang memahami pekerjaan yang dilakukan ketika melakukan perawatan komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> , <i>Lack of knowledge</i> ini disebabkan karena personel baru belum sepenuhnya mendapatkan <i>training standard practices</i> .	Teknisi belum seluruhnya mendapatkan <i>training standard practices</i> .
3	<i>Inspector</i> tidak melakukan <i>double check</i> dan	Di dalam Dokumen MDR ada	<i>Aircraft Maintenance Engineer</i> menyatakan bahwa kesalahan	<i>Inspector over confidence</i> terhadap hasil kerja teknisi.

No	Observasi	Dokumen	Wawancara	Sintesis
	langsung stamp di MDR	dua stamp, Mekanik dan <i>Inspector</i> .	pemasangan dapat juga terjadi karena <i>Inspector</i> tidak melakukan <i>double check</i> setelah teknisi bekerja, hal ini termasuk <i>over confidence</i> terhadap hasil kerja teknisi.	
4	<i>Main Landing Gear Door</i> tidak dilepas ketika melakukan <i>maintenance</i> .	Dokumen AMM menyatakan <i>Main Landing Gear Door</i> wajib dilepas ketika melakukan <i>maintenance</i> komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> .	<i>Aircraft Maintenance Engineer</i> menyatakan bahwa ketika <i>Alternate Brake Servo Valve</i> ingin dilepas seharusnya <i>main landing gear doors</i> dilepas terlebih dahulu, namun sering kali teknisi tidak mengikuti langkah-langkah kerja di AMM. Hal tersebut termasuk <i>complacency</i> terhadap AMM yang ada.	Teknisi <i>complacency</i> terhadap manual yang ada.
5	Suara klik pada <i>torque wrench</i> tidak terdengar ketika sudah mencapai nilai yang ditentukan.	Dokumen AMM menyatakan bahwa nilai torsi wajib <i>30.97 sampai dengan 39.82 lbf.in</i> .	<i>Aircraft Maintenance Engineer</i> menyatakan bahwa ketika personel mengencangkan <i>bolt</i> menggunakan <i>torque wrench</i> terkadang nilai torsi yang dihasilkan tidak sesuai dengan aktualnya. Hal tersebut terjadi karena <i>torque wrench</i> tidak dikalibrasi dengan benar dan perlu dilakukannya PMI.	<i>Torque wrench</i> tidak dikalibrasi dengan benar dan perlu dilakukannya PMI.

Sumber: Data Penelitian Penulis.

Dari Tabel 4, hasil pengumpulan data menggunakan Triangulasi teknik akan dibuat sebuah digraam FTA. Diagram *fault tree analysis* dibangun berdasarkan *top event* tertentu, yang mempresentasikan sebuah *failure mode* spesifik dalam sistem, sehingga mencakup *event* yang berpengaruh langsung terhadap *top event*. Selain itu, *event* tidak bersifat menyeluruh, sehingga yang dianalisis hanya *event* yang paling berpengaruh

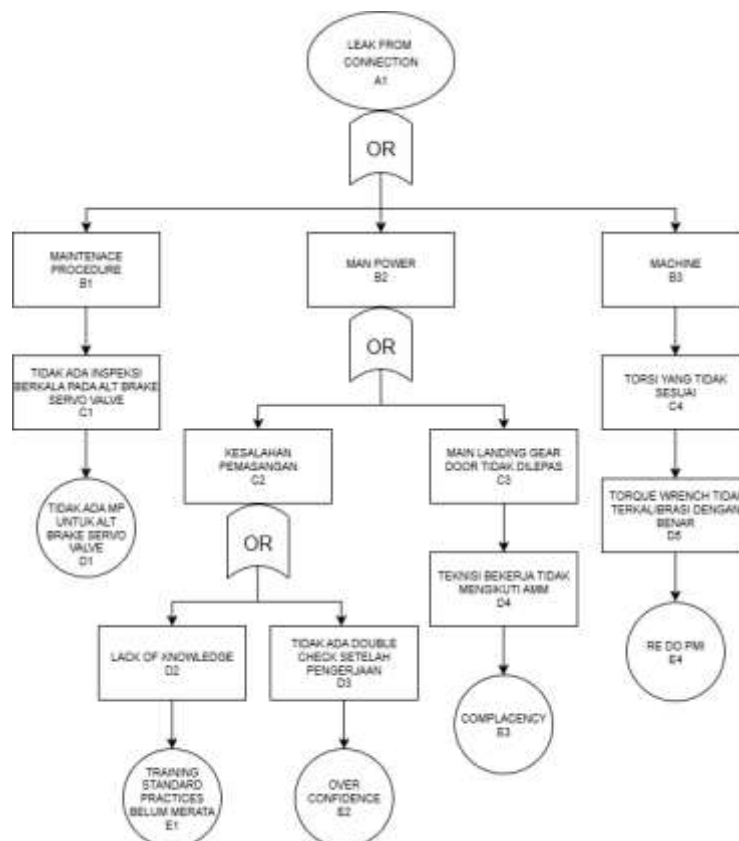
(Vesely, 1981). Menurut buku yang ditulis (Stamatelatos dkk., 2002) *event* yang terjadi dapat berupa *hardware*, *human errors*, *software*, atau *event* lain yang dapat mengakibatkan *top event* terjadi. Berdasarkan hasil wawancara, terdapat tiga faktor yang menjadi akar penyebab kerusakan *Leak From Connection*, yaitu *Maintenance Procedure*, *Man Power*, dan *Machine*.

Dari segi *Maintenance Procedure* yang dilakukan, personel tidak melakukan inspeksi berkala yang spesifik ketika merawat komponen *Alternate Brake Servo Valve*. Hal ini dikarenakan tidak adanya *Maintenance Program* untuk komponen tersebut. Jika dalam kegiatan *maintenance* tidak ada MP maka area atau komponen tersebut tidak diinspeksi oleh personel sehingga semakin lama akan mengalami penurunan keandalan, hal tersebut dapat menyebabkan *leak* pada *connection*. Pada faktor *Man Power* terdapat dua akar penyebab kegagalan yaitu, kesalahan pemasangan dan *main landing gear doors* tidak dilepas terlebih dahulu ketika *maintenance*. Dalam Gambar 2, notasi OR *gate* digunakan dalam faktor *Man Power* karena suatu risiko dapat muncul ketika setidaknya satu atau lebih faktor pendukungnya terjadi. Kesalahan pemasangan dapat terjadi karena personel baru kurang memahami pekerjaan yang dilakukan ketika melakukan perawatan komponen *Alternate Brake Servo Valve*, seperti pemasangan *connection* dalam keadaan miring yang dapat menyebabkan *connection* tidak terpasang dengan baik sehingga dalam beberapa waktu kedepan akan terjadi *leak*. *Lack of knowledge* ini disebabkan karena personel baru belum sepenuhnya mendapatkan *training standard practices*. Tidak adanya *Maintenance Program* (MP) yang spesifik menyebabkan tidak adanya standar inspeksi dan interval pemeriksaan yang wajib dilakukan pada area *connection*, sehingga potensi kelonggaran pemasangan, degradasi seal/O-ring, maupun indikasi awal kebocoran tidak teridentifikasi sejak dini dan pada akhirnya berkembang menjadi *Leak From Connection*.

Kesalahan pemasangan juga diakibatkan karena ketika personel bekerja sering lupa untuk melaksanakan *torque* dan hanya *hand tightened*. Seharusnya setelah dikerjakan, *inspector* melakukan *double check* disetiap *connection* tetapi pada aktualnya *inspector* tidak melakukan *double check* dan langsung stamp di MDR, hal ini termasuk *over confidence* terhadap hasil kerja personel. Pada faktor kesalahan pemasangan notasi OR *gate* juga digunakan karena risiko dapat muncul ketika setidaknya satu atau lebih faktor terpenuhi, namun kemungkinan terjadinya risiko dapat meningkat ketika lebih dari satu

faktor pendukung terjadi. Faktor *man power* yang kedua yaitu, ketika *Alternate Brake Servo Valve* ingin dilepas seharusnya *main landing gear doors* dilepas terlebih dahulu, namun sering kali personel tidak mengikuti langkah-langkah kerja di AMM. Hal tersebut dikarenakan personel ingin bekerja lebih efisien namun hal ini termasuk *complacency* terhadap AMM yang ada, sehingga dapat mengakibatkan pemasangan tidak tepat dan mengakibatkan kebocoran.

Pada faktor *Machine tools* yang digunakan adalah *torque wrench*, ketika personel mengencangkan *bolt* menggunakan *torque wrench* terkadang nilai torsi yang dihasilkan tidak sesuai dengan aktualnya. Hal tersebut terjadi karena *torque wrench* tidak dikalibrasi dengan benar. Jika hal tersebut dibiarkan terus menerus maka dapat mengakibatkan kerusakan komponen seperti kebocoran pada *connection*. Dari uraian hasil wawancara di atas, hubungan sebab-akibat dari masing-masing faktor penyebab kegagalan dapat divisualisasikan ke dalam diagram Fault Tree Analysis (FTA) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Sumber: Data Penelitian Penulis

Gambar 2. Diagram *Fault Tree Analysis*

Dari hasil analisis menggunakan metode *Fault Tree Analysis*, akar penyebab dari *Leak From Connection* pada komponen *Alternate Brake Servo Valve* berasal dari lima faktor, yaitu tidak ada *Maintenance Program* untuk komponen *Alternate Brake Servo Valve*, *Training Standard Practices* belum merata kepada seluruh teknisi, *Over confidence* terhadap hasil kerja teknisi, *Complacency* terhadap manual yang ada, dan *Tools* yang perlu dikalibrasi ulang. Pada Gambar 2, simbol gerbang logika (OR gate) dan setiap event ditampilkan secara jelas untuk memudahkan pembaca memahami hubungan sebab-akibat terhadap top event “Leak From Connection”. Gambar 2 yang menampilkan Diagram Fault Tree Analysis merupakan bagian penting dalam menjelaskan hubungan logis antara akar penyebab dan *top event* “Leak From Connection”. Oleh karena itu, penulis memastikan bahwa seluruh gambar dan tabel yang dirujuk dalam pembahasan disajikan secara lengkap dan konsisten dengan penomoran serta judul yang sesuai agar mendukung kejelasan analisis.

Usulan Perbaikan

Setelah analisis menggunakan metode FTA dan menemukan akar penyebab kegagalannya, penulis akan melakukan *Focus Group Discussion* bersama teknisi yang memiliki *rating* pesawat Airbus A330 *series* dengan kualifikasi,, untuk merumuskan usulan perbaikan terhadap akar penyebab kegagalan komponen *Alternate Brake Servo Valve* dengan menggunakan metode 5W+1H.

1. *Maintenance Procedure*

Dalam *Maintenance Procedure* atau prosedur perawatan untuk komponen *Alternate Brake Servo Valve* ini tidak ada inspeksi yang spesifik untuk menginspeksi komponen tersebut, yang mengakibatkan jika terjadi kebocoran pada komponen *Alternate Brake Servo Valve* ini tidak dapat dideteksi. Pada permasalahan ini, usulan perbaikan yang dapat dilakukan adalah dari *team engineering* membuat dan mengeluarkan prosedur inspeksi yang spesifik terkait perawatan komponen *Alternate Brake Servo Valve*, agar perawatan yang dilakukan lebih detail dan mengurangi *unscheduled removal* yang terjadi.

2. Man Power

Pada pengaruh *man power* disebabkan oleh 3 faktor, yang pertama *training standard practices* belum merata, yang kedua *over confidence*, dan yang ketiga *complacency*. Permasalahan yang pertama terjadi karena teknisi belum memahami betul cara memasang *Alternate Brake Servo Valve*, yang mengakibatkan komponen tersebut *dent*, maka dari itu perlu adanya pelatihan *standard practices* kepada teknisi baru secara merata, sehingga para teknisi memiliki kemampuan yang sesuai *standard* untuk melakukan pemasangan *Alternate Brake Servo Valve*. Untuk permasalahan yang kedua diakibatkan karena *over confidence inspector*, ketika teknisi selesai memasang *Alternate Brake Servo Valve inspector* tidak memeriksa ulang hasil kerja para teknisi, hal tersebut tentu saja tidak sesuai *standard* kerja.

Maka dari itu usulan perbaikan yang harus dilakukan dalam masalah ini adalah setiap para teknisi selesai memasang komponen *Alternate Brake Servo Valve, inspector* wajib menerapkan *double check* terhadap hasil kerja para teknisi yang dapat mengurangi kesalahan-kesalahan pemasangan pada komponen. Permasalahan yang ketiga disebabkan karena teknisi *complacency* terhadap manual yang ada, ketika ingin melepas *Alternate Brake Servo Valve* seharusnya *main landing gear door* dilepas terlebih dahulu, tetapi teknisi sering tidak melepas *main landing gear door* terlebih dahulu karena menganggap pekerjaan tersebut sudah sering dilakukan sehingga teknisi tidak mengikuti langkah-langkah pada *aircraft maintenance manual* secara keseluruhan. Maka dari itu teknisi *wajib membaca aircraft maintenance manual* 15 menit sebelum melakukan pekerjaan dan menerapkannya ketika melakukan pekerjaan tersebut.

3. Machine

Pada faktor *machine* diakibatkan karena ketika teknisi mengencangkan *bolt* menggunakan *torque wrench* nilai torsi yang dihasilkan tidak akurat, ketidakakuratan yang dimaksud adalah *due date calibration torque wrench* masih lama namun pada aktualnya ketika digunakan nilai torsi nya tidak sesuai *value set*, yang mengakibatkan kekencangan *bolt* tidak sesuai dengan aturan pada *aircraft maintenance manual*. Hal ini terjadi karena *torque wrench* tidak terkalibrasi dengan benar, maka personel *tools store* wajib mengkalibrasi *torque wrench* sesuai jadwal dan ketika sebelum digunakan *dicheck* terlebih dahulu sehingga nilai aktual torsi nya sesuai dengan *value set* pada *torque wrench*.

Tabel 5 dan Tabel 6 dibawah ini menjabarkan usulan perbaikan yang telah dirumuskan berdasarkan hasil *Focus Group Discussion* bersama teknisi PT. XYZ.

Tabel 5. Usulan Perbaikan berdasarkan *What, Why* dan *How*

No	Indicator	What	Why	How
1	<i>Maintenance Procedure</i>	Tidak ada <i>Maintenance Program</i> untuk komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> .	Karena pihak Airbus tidak mengeluarkan <i>Maintenance Program</i> untuk komponen tersebut.	<i>Team engineering</i> membuat dan mengeluarkan prosedur inspeksi yang spesifik terkait perawatan komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> .
2	<i>Man Power</i>	<i>Training Standard Practices</i> belum merata kepada seluruh teknisi.	<i>Training</i> baru dilaksanakan pada tahun 2022 karena EASA menemukan adanya temuan (<i>finding</i>), mengingat pada tahun sebelumnya tidak ada <i>training</i> yang dilakukan.	Menyelenggarakan pelatihan <i>standard practices</i> dengan <i>course outline</i> meliputi - <i>How to use A/C Standard Manual and Procedures</i> - <i>A/C safety practices</i> - <i>How to use Torque meter</i> - <i>Install and removal lock wire</i> - <i>Repair Aircraft tubing/ piping</i> - <i>Install and Removal connector plug</i>
		<i>Over confidence</i> terhadap hasil kerja teknisi.	<i>Inspector</i> merasa teknisi sudah sering melakukan pekerjaan tersebut yang mengakibatkan <i>Inspector</i> menyerahkan tanggung jawab sepenuhnya kepada teknisi.	Menerapkan sistem <i>double check</i> oleh <i>Inspector</i> terhadap hasil kerja para teknisi setelah teknisi melakukan perawatan komponen.
		<i>Complacency</i> terhadap manual yang ada.	Karena teknisi menganggap pekerjaan tersebut sudah sering dilakukan sehingga teknisi tidak mengikuti langkah-langkah pada <i>aircraft maintenance manual</i> secara keseluruhan.	Mewajibkan teknisi untuk melakukan <i>pre-task brief</i> dengan merujuk pada AMM dan mendokumentasikannya pada <i>job card</i> sebelum memulai pekerjaan.
3	<i>Machine</i>	<i>Tools</i> yang perlu dikalibrasi ulang.	Nilai aktual torsi nya tidak sesuai dengan <i>value set</i> pada <i>torque</i>	Personel <i>tools store</i> wajib mengkalibrasi <i>torque wrench</i> sesuai jadwal dan ketika sebelum digunakan dicheck

No	Indicator	What	Why	How
			wrench.	terlebih dahulu sehingga nilai aktual torsi nya sesuai dengan <i>value set</i> pada <i>torque wrench</i> .

Sumber: Data Penelitian Penulis.

Tabel 6. Usulan Perbaikan berdasarkan *Who*, *When* dan *Where*

No	Indicator	Who	When	Where
1	<i>Maintenance Procedure</i>	<i>Team Engineering</i>	Sebelum melakukan perawatan komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> .	<i>Hangar 3</i>
2	<i>Man Power</i>	<i>Manager</i>	Ketika baru bergabung menjadi pegawai PT. XYZ.	<i>Hangar 3</i>
		<i>Inspector</i>	Setiap melakukan perawatan komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> .	
		<i>Manager</i>	15 menit sebelum melakukan perawatan komponen <i>Alternate Brake Servo Valve</i> .	<i>Hangar 3</i>
3	<i>Machine</i>	<i>Personel Tools Store</i>	Ketika sudah mendekati <i>due date</i> dan sebelum menggunakannya.	<i>Tools Store</i>

Sumber: Data Penelitian Penulis.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis dan perhitungan nilai rata-rata parameter *severity*, *occurrence*, dan *detection* hasil wawancara dengan empat teknisi yang memiliki *type rating* pesawat Airbus A330 series di PT XYZ, diperoleh kesimpulan bahwa kegagalan *Leak From Connection* memiliki nilai RPN tertinggi yaitu 210 yang menjadi penyebab utama kegagalan komponen *Alternate Brake Servo Valve*. Hasil analisis metode Fault Tree Analysis (FTA) menunjukkan bahwa penyebab *Leak From Connection* berasal dari lima faktor utama, yaitu tidak adanya *Maintenance Program* untuk komponen *Alternate Brake Servo Valve*, pelatihan *Standard Practices* belum merata kepada seluruh teknisi, *inspector overconfidence* terhadap hasil kerja teknisi, teknisi *complacency* terhadap *manual* yang ada, dan *tools* yang perlu dikalibrasi ulang. Melalui kegagalan ini perbaikan dilakukan dengan pembuatan prosedur inspeksi spesifik oleh tim *engineering* agar

perawatan lebih terarah dan mengurangi *unscheduled removal*, pelatihan *standard practices* secara merata bagi teknisi baru, penerapan sistem *double check* oleh *inspector* setelah pemasangan komponen, kewajiban teknisi membaca *Aircraft Maintenance Manual* (AMM) sebelum bekerja, serta kalibrasi dan pengecekan rutin *torque wrench* oleh personel *tools store* agar nilai torsi nya sesuai *value set* yang ditentukan.

Dari hasil analisis penelitian ini, saran diberikan untuk PT XYZ agar membuat prosedur perawatan yang lebih spesifik terkait komponen *Alternate Brake Servo Valve* serta memberikan pelatihan *Standard Practices* secara merata kepada seluruh personel yang terlibat dalam perawatan pesawat. Setiap personel wajib membaca, memahami, dan menerapkan *Maintenance Manual* yang berlaku, karena pengabaian terhadap manual dapat menyebabkan kesalahan pemasangan atau kerusakan komponen. Setelah pengerjaan, *Inspector* harus melakukan *double check* untuk memastikan tidak terjadi kesalahan, dan seluruh *material* serta *tools* yang digunakan dalam perawatan wajib sesuai dengan standar yang berlaku di perusahaan. Selain itu, disarankan agar perusahaan menetapkan *Key Performance Indicator* (KPI) untuk memantau efektivitas implementasi usulan perbaikan, seperti penurunan nilai RPN di evaluasi FMEA secara periodik dan pengurangan frekuensi *unscheduled removal* di komponen *Alternate Brake Servo Valve*. Untuk penelitian selanjutnya (*future research*), disarankan dilakukan pengujian terhadap efektivitas implementasi rekomendasi yang diusulkan, misalnya dengan membandingkan nilai RPN dan jumlah *unscheduled removal* sebelum dan sesudah penerapan perbaikan, serta memperluas objek penelitian pada komponen lain yang memiliki karakteristik kegagalan serupa.

DAFTAR REFERENSI

- Adwa, V., Husna, M., Utari, D. A., & Rachmat, N. (2023). Analisis kegagalan komponen overhead crane dengan metode *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*. *Proceedings of the 7th Conference on Design and Manufacture Engineering and Its Application*, 7(1).
- Airbus. (2024). *A330 Hydraulic Power ATA 29*.
- Alijoyo, A., Wijaya, Q. B., & Jacob, I. (2020). *Failure mode effect analysis: Analisis modus kegagalan dan dampak risk evaluation risk analysis: Consequences probability level of risk*. CRMS, 19.

- Driyono, B. (2019). Pengaruh kemampuan dan motivasi terhadap prestasi kerja pegawai pada unit perawatan pesawat udara dalam mendukung praktik latihan terbang di STPI Curug. *AIRMAN: Jurnal Teknik dan Keselamatan Transportasi*, 2(2), 159–169.
- Dwiaji, Y. C., & Sura, A. (2021). Analisis kebocoran sistem hidrolik pada landing gear pesawat Airbus A330 series menggunakan metode PDCA. *Injection: Indonesian Journal of Vocational Mechanical Engineering*, 1(2), 65–74.
- FAA. (2023). *Aviation Maintenance Technician Handbook – Airframe*. General: Amazon Digital Services LLC.
- Haya, A. V. (2019). Klasifikasi jenis data penelitian. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 2.
- Laksono, M. D. (2017). *Analisis perawatan sistem pengereman normal pesawat Airbus A330 di PT Garuda Maintenance Facility AeroAsia* [Skripsi, Universitas Negeri Jakarta].
- Malendes, N., Tangkuman, S., & Arungpadang, T. (2016). Analisis kekuatan poros landing gear pesawat N-219. *Jurnal Poros Teknik Mesin Unsrat*, 5(2).
- Prakoso, A., Kurniawan, R., & Mauluddin, F. (2021). Penanganan dan analisa kegagalan pada bleed air leak detection system pesawat Airbus A330-300 di Hanggar 3 PT GMF AeroAsia. *Jurnal Teknologi dan Riset Terapan (JATRA)*, 3(2), 73–78.
- Rosyidin, A. (2017). Perbaikan dan dampak korosi pada pesawat udara boeing 737. *Motor Bakar: Jurnal Teknik Mesin*, 1(1).
- Stamatelatos, M. (2002). *Fault tree handbook with aerospace applications*. Washington DC: NASA.
- Sugiyono, D. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Penerbit Alfabeta.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2009 tentang Penerbangan. (2009).
- Vesely, W. (1981). *Fault tree handbook*. Washington: Nuclear Regulatory Commission.