



Pengaruh Oil 2197, 2380, dan MJO II terhadap Deteriorasi O-ring Oil Cooler APU GTCP331

Muhammad Daffa¹ Bhima Shakti Arrafat² Bela Firmantoyo³

Program Studi D-IV Teknik Pesawat Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug,
Tangerang, Banten, Indonesia^{1,2,3}

Email: daffmcbook@gmail.com¹ bhima.shakti@ppicurug.ac.id²
bela.firmantoyo@ppicurug.ac.id³

Abstrak

Kebocoran *oil cooler* Auxiliary Power Unit (APU) GTCP331 pada armada Airbus A330 yang dirawat PT GMF AeroAsia Tbk tercatat 41 kejadian sepanjang 2022–2025 dengan tren meningkat dari 5 menjadi 15 kejadian per tahun, sementara penanganannya masih bersifat korektif tanpa analisis akar penyebab. Pemeriksaan teknis menunjukkan sumber kebocoran berada pada deteriorasi O-ring P/N AS43013-118 berbahan *Fluorocarbon* (FKM) 76 IRHD, sedangkan armada tersebut dirawat menggunakan tiga oli turbin berspesifikasi sama, yaitu MIL-PRF-23699. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh Oil 2197, Oil 2380, dan Mobil Jet Oil II (MJO II) terhadap deteriorasi O-ring tersebut serta menentukan oli yang berdampak paling signifikan. Metode yang digunakan adalah kualitatif deskriptif dengan pendekatan eksperimental melalui *immersion test* mengacu ASTM D471; metode ini dipilih karena memungkinkan pengamatan perubahan material secara non-destruktif dan berulang pada spesimen yang sama. Tiga spesimen *brand new* direndam terpisah selama 24 minggu dengan pengamatan visual serta pengukuran diameter penampang dan berat setiap dua minggu. Hasil penelitian menunjukkan ketiga oli menimbulkan *discoloration*, *surface roughening*, dan kehilangan massa dengan urutan pengaruh Oil 2197 > Oil 2380 > MJO II. Oil 2197 mencatat penurunan terbesar, yaitu diameter -1,794% dan berat -6,024%, dengan *onset* paling awal dan urutan tersebut dikuatkan hasil uji *particulate contamination* media perendaman. Disimpulkan bahwa kesamaan spesifikasi militer tidak menjamin kesetaraan kompatibilitas terhadap material *seal*, sehingga diusulkan penetapan *task* preventif pemeriksaan O-ring setiap dua tahun mengikuti C-Check. Penelitian lanjutan disarankan menambah jumlah spesimen serta menguji pada kondisi temperatur dan tekanan operasional.

Kata Kunci: APU GTCP331, Deteriorasi O-Ring, *Immersion Test*, Oli Turbin



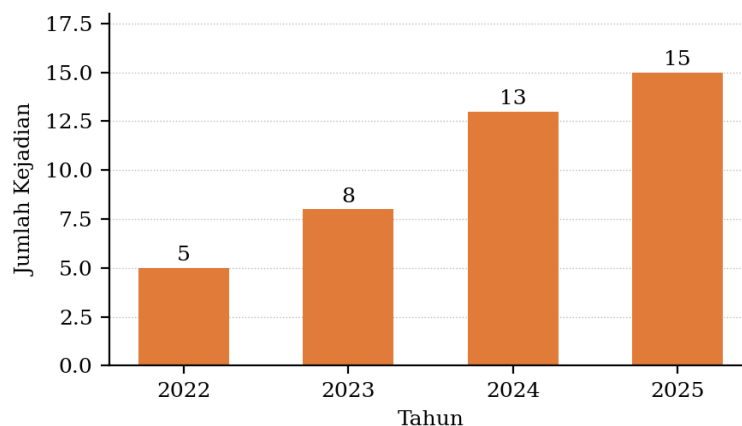
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Keselamatan penerbangan menuntut setiap komponen pesawat memenuhi persyaratan *airworthiness* sepanjang masa operasinya, dan pemenuhan tersebut dijamin melalui kegiatan pemeliharaan terencana yang diatur otoritas penerbangan (Nugraha, 2016; Mora, 2012). Di Indonesia, pemeliharaan pesawat udara diatur melalui Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2009 tentang Penerbangan serta *Civil Aviation Safety Regulation* (CASR) Part 43 dan Part 145, yang pelaksanaannya membutuhkan tenaga perawatan bersertifikat dan kompeten (Sakti & Fahrurrozi, 2015; Driyono, 2019). PT Garuda Maintenance Facility AeroAsia Tbk (GMF AeroAsia) merupakan organisasi pemeliharaan bersertifikat EASA Part 145 dan FAA *Repair Station* yang menangani perawatan armada Airbus A330. Pada pesawat tersebut terpasang *Auxiliary Power Unit* (APU) tipe GTCP331, yaitu turbin gas kecil di kompartemen ekor yang menyediakan daya listrik dan udara bertekanan secara mandiri, dan untuk menjaga performa komponen berputar di dalamnya APU dilengkapi sistem pelumasan tersendiri yang mencakup *oil cooler* sebagai penukar panas. Kegagalan pada sistem pelumasan APU telah menjadi perhatian beberapa penelitian terdahulu. Perkasa dan Rahmawati (2023) melalui metode *Failure Mode and Effect Analysis* menempatkan *oil leak* sebagai salah satu moda kegagalan paling kritis pada sistem pelumasan APU dengan nilai *Risk Priority Number* 256, hanya berada

di bawah *oil clog*. Hibban dan Rebet (2021) menemukan bahwa kegagalan APU *generator* Airbus A330 bersumber dari kebocoran oli akibat kerusakan O-ring *seal* pada *quill shaft*, sementara Pambekti dkk. (2025) menunjukkan bahwa analisis kerusakan komponen pesawat berbasis data kejadian lapangan efektif untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan berulang. Ketiga penelitian tersebut menempatkan komponen perapat elastomer sebagai titik lemah yang berulang, tetapi belum satu pun menelusuri peran fluida yang berkontak dengan komponen tersebut.

Dari sisi material, sejumlah penelitian menunjukkan bahwa interaksi antara elastomer dan pelumas bersifat spesifik terhadap komposisi fluida. Müller dkk. (2022) membuktikan bahwa kompatibilitas elastomer sangat bergantung pada jenis fluida yang berkontak dengannya, dan Bulut dkk. (2020) memperlihatkan bahwa aditif turunan *imidazole* pada pelumas sintesis memicu *dehydrofluorination* pada FKM sehingga kandungan fluorin turun dari 34% menjadi 28% disertai penurunan elongasi hingga 60–80%. Garcia-Tuero dkk. (2022) menegaskan bahwa fluida yang berbeda menghasilkan variasi perubahan volume, kekerasan, dan kekuatan tarik pada FKM, bahkan dengan arah perubahan yang berlawanan. Zhu dkk. (2025) menunjukkan bahwa paparan oli dan temperatur tinggi secara bersamaan mempercepat penurunan sifat *sealing* elastomer, sedangkan Wimada dkk. (2023) memperoleh pola serupa pada elastomer NBR yang terpapar bahan bakar campuran. Temuan-temuan tersebut konsisten menunjukkan bahwa komposisi fluida, bukan kelas spesifikasinya, yang menentukan respons elastomer.



Gambar 1. Tren Kejadian Kebocoran Oil Cooler APU GTCP331 Armada Airbus A330 Periode 2022–2025

Berdasarkan rekapitulasi *Data Base Maintenance* PT GMF AeroAsia Tbk, kebocoran oli pada *oil cooler* APU GTCP331 armada Airbus A330 tercatat 41 kejadian sepanjang 2022–2025 dengan tren meningkat dari 5 kejadian pada 2022 menjadi 15 kejadian pada 2025 (Gambar 1). Penanganan yang berlangsung selama ini masih bersifat korektif, yaitu mengganti komponen yang rusak tanpa analisis akar penyebab. Pemeriksaan teknis mengidentifikasi sumber kebocoran berasal dari sambungan antara *Oil Temperature Regulator* dan *Cooler Air-Oil*, dengan O-ring P/N AS43013-118 sebagai komponen perapat yang mengalami kerusakan. Berdasarkan *Certificate of Analysis* dari manufaktur, O-ring tersebut diproduksi PRECIX menggunakan *compound F-13791* berbahan *Fluorocarbon* (FKM) dengan kekerasan 76 IRHD dan densitas 1,82. Kesenjangan penelitian terletak pada titik temu kedua kelompok kajian tersebut. Penelitian kegagalan APU berhenti pada identifikasi komponen yang rusak tanpa menelusuri fluida penyebabnya, sedangkan penelitian kompatibilitas elastomer dilakukan pada fluida industri umum dan belum menyentuh oli turbin penerbangan berspesifikasi MIL-PRF-23699. Padahal dalam operasional pemeliharaan APU di PT GMF AeroAsia digunakan tiga jenis oli sekaligus, yaitu Oil 2197 (MIL-PRF-23699 HTS), Oil 2380 (MIL-PRF-23699 STD), dan Mobil Jet

Oil II atau MJO II (MIL-PRF-23699 STD), yang memenuhi spesifikasi militer sama namun berbeda *base stock* dan paket aditifnya. Hingga saat ini belum terdapat kajian eksperimental yang membandingkan ketiga oli tersebut terhadap satu *part number* O-ring yang sama. Kebaruan penelitian ini adalah perbandingan langsung ketiga oli yang berlaku pada satu armada terhadap O-ring P/N AS43013-118 menggunakan data dan spesimen dari organisasi perawatan yang menangani armada tersebut. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh ketiga jenis oli terhadap deteriorasi O-ring P/N AS43013-118, mengidentifikasi perubahan sifat fisik dan dimensinya setelah pengujian perendaman, serta menentukan jenis oli yang memberikan dampak deteriorasi paling signifikan sebagai dasar usulan perbaikan program perawatan.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan relevansi
1	Perkasa & Rahmawati (2023)	Analisis Kegagalan Lubrication System APU Pesawat	Mengidentifikasi dan memeringkat moda kegagalan sistem pelumasan APU	FMEA dan Risk Priority Number	Teridentifikasi 22 kegagalan; oil clog RPN 288 dan oil leak RPN 256 tergolong kritis tinggi	Menegaskan kebocoran oli sebagai moda kegagalan kritis, namun berhenti pada peringkat risiko tanpa menelusuri penyebab material
2	Hibban & Rebet (2021)	Analisis Penyebab Kebocoran Oli pada Generator APU GTCP331-350 Pesawat Airbus A330-200/300	Menentukan penyebab dan cara perbaikan kebocoran oli generator APU	Studi literatur dan observasi dengan diagram fishbone	Penyebab utama adalah kerusakan O-ring seal pada quill shaft akibat masa pakai	Menempatkan O-ring sebagai komponen kritis pada APU GTCP331, tetapi faktor penyebab dibatasi pada usia pakai
3	Müller dkk. (2022)	Research on the Material Compatibility of Elastomer Sealing O-Rings	Menguji kompatibilitas material O-ring terhadap berbagai fluida	Immersion test dan pengujian sifat mekanik	Perubahan sifat elastomer berbeda signifikan bergantung jenis fluida perendam	Menjadi dasar metodologis perendaman komparatif, namun fluida uji bukan oli turbin penerbangan
4	Bulut dkk. (2020)	Lubricant Compatibility of FKM Seals in Synthetic Oils	Menganalisis kompatibilitas seal FKM pada oli sintetis dan memprediksi umur seal	Uji kompatibilitas terakselerasi dan analisis kimia	Aditif turunan imidazole memicu dehydrofluorination; fluorin turun 34% ke 28% dan elongasi turun 60–80%	Menjelaskan mekanisme kimia deteriorasi FKM yang dipakai untuk menafsirkan hasil penelitian ini
5	Zhu dkk. (2025)	A Study on the Aging Mechanism and Anti-Aging Properties of Nitrile Butadiene Rubber	Mengungkap mekanisme penuaan elastomer akibat paparan oli dan panas	Karakterisasi eksperimental dan simulasi molekuler	Paparan oli dan temperatur tinggi secara simultan mempercepat penurunan sifat sealing	Memberi rujukan mekanisme penuaan terkini, tetapi pada material NBR, bukan FKM

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kualitatif deskriptif dengan pendekatan eksperimental. Penelitian kualitatif deskriptif digunakan untuk menggambarkan dan menganalisis perubahan yang terjadi pada objek penelitian secara sistematis berdasarkan pengamatan langsung (Sugiyono, 2016). Pendekatan eksperimental diterapkan melalui perlakuan perendaman spesimen dalam tiga jenis oli yang berbeda dengan prosedur mengacu pada ASTM D471 tentang *Standard Test Method for Rubber Property—Effect of Liquids* (ASTM International, 2016). Metode ini dipilih karena memungkinkan pengamatan perubahan material secara non-destruktif dan berulang pada spesimen yang sama sepanjang periode penelitian, sehingga perbandingan antarmedia perendaman dilakukan pada objek yang identik. Pendekatan sejenis telah digunakan Müller dkk. (2022), Bulut dkk. (2020), Garcia-Tuero dkk. (2022), serta Wimada dkk. (2023) untuk mengevaluasi interaksi antara pelumas dan elastomer.

Penelitian dilaksanakan di PT GMF AeroAsia Tbk pada Februari sampai Juli 2026. Objek penelitian adalah O-ring P/N AS43013-118 dalam kondisi baru (*brand new*) yang diperoleh dari *material stock* perusahaan. Penggunaan spesimen baru dimaksudkan agar seluruh perubahan yang teramati merupakan hasil langsung paparan oli uji dan bukan akumulasi pemakaian sebelumnya. Spesimen disiapkan dalam tiga kelompok, masing-masing satu spesimen untuk setiap jenis oli, sehingga ketiganya dibandingkan secara paralel pada kondisi awal yang setara, yaitu diameter penampang 2,62 mm dan berat 0,83 gram. Penyesuaian terhadap standar dilakukan menyesuaikan kondisi di lokasi penelitian, yaitu perendaman dilaksanakan pada suhu ruang dan bukan pada suhu terkendali sebagaimana disyaratkan ASTM D471, dengan durasi diperpanjang menjadi 24 minggu agar mendekati rentang waktu pemakaian komponen di lapangan. Peralatan utama yang digunakan terdiri atas *vernier caliper* digital beresolusi 0,01 mm untuk pengukuran diameter penampang, timbangan digital berskala 0,01 sampai 500 gram untuk penimbangan spesimen, serta wadah kaca tertutup berlabel sebagai tempat perendaman. Kedua alat ukur berasal dari inventaris PT GMF AeroAsia Tbk dan berada di bawah program kalibrasi berkala perusahaan sehingga keterulangan pembacaannya terjamin. Karakteristik ketiga media perendaman yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Oli Pelumas Turbin yang Digunakan sebagai Media Perendaman

Karakteristik	Oil 2197	Oil 2380	MJO II
Viskositas kinematik 40 °C (mm ² /s)	26,98	24,20	27,60
Viskositas kinematik 100 °C (mm ² /s)	5,28	4,97	5,10
Flash point (°C)	262	265	270
Pour point (°C)	-57	-57	-59
Densitas relatif (kg/L)	0,9968	0,9749	1,003
Spesifikasi MIL-PRF-23699	HTS	STD	STD

Sumber: Technical Data Sheet Eastman Turbo Oil 2197 dan 2380 serta Product Data Sheet Mobil Jet Oil II

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui tiga cara. Pertama, studi pustaka dengan menelaah referensi yang berkaitan dengan sistem pelumasan APU GTCP331, *oil cooler assembly*, O-ring P/N AS43013-118, dan mekanisme deteriorasi material elastomer. Kedua, dokumentasi dengan menelaah dokumen teknis dan operasional, meliputi *Aircraft Maintenance Manual* Airbus A330, *Component Maintenance Manual* APU Honeywell, *Illustrated Part Catalogue*, *Technical Data Sheet* dan *Product Data Sheet* masing-masing oli, *Certificate of Analysis* O-ring, serta *Data Base Maintenance* kejadian kebocoran *oil cooler* periode 2022–2025. Ketiga, observasi eksperimental berkala terhadap spesimen selama masa perendaman. Prosedur perendaman dilaksanakan sebagai berikut. Setiap spesimen direndam sepenuhnya dalam wadah tertutup berlabel yang berisi satu jenis oli dan disimpan pada tempat yang terhindar dari paparan langsung sinar matahari maupun sumber panas lain. Pengamatan dilakukan setiap dua minggu sejak Minggu ke-0 hingga Minggu ke-24. Pada setiap interval, spesimen diangkat, dibersihkan dari sisa oli, lalu didokumentasikan menggunakan kamera dengan posisi, sudut, dan pencahayaan yang konsisten. Pengukuran diameter penampang dilakukan pada tiga titik berbeda di sekeliling *ring* yang kemudian dirata-ratakan, sedangkan penimbangan dilakukan satu kali pada setiap interval setelah spesimen dikeringkan.

Data hasil pengamatan dianalisis secara deskriptif komparatif. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi awal dan kondisi akhir masing-masing spesimen, kemudian membandingkan ketiga spesimen satu sama lain. Untuk parameter dimensi dan berat, dihitung selisih dan persentase perubahan terhadap kondisi awal, serta diidentifikasi *onset*, yaitu periode ketika penurunan pertama kali teramati. Hasil ketiga parameter, yaitu pengamatan visual, pengukuran dimensi, dan pengukuran berat, ditriangulasi untuk menilai konsistensi urutan tingkat deteriorasi antarmedia perendaman. Sebagai data pendukung, sampel ketiga

media perendaman diuji di laboratorium PT GMF AeroAsia Tbk pada akhir periode penelitian melalui *job number* ODE.230100041 untuk mengetahui kondisi akhir media setelah berkontak dengan spesimen selama 24 minggu.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

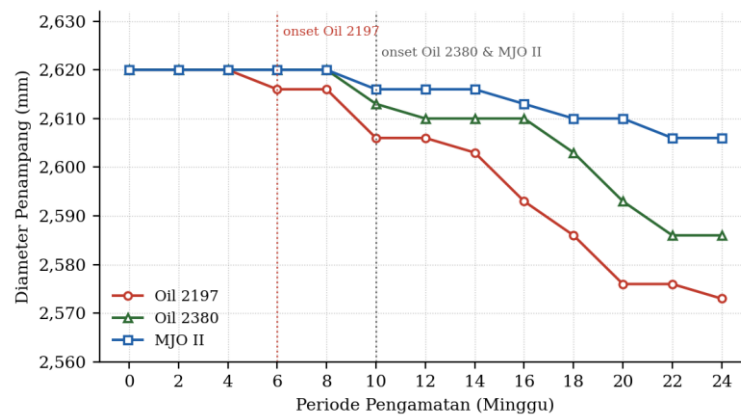
Pada Minggu ke-0 hingga Minggu ke-4, seluruh spesimen berada pada kondisi awal tanpa indikasi deteriorasi. Permukaan O-ring mempertahankan kilap (*surface gloss*) dan tidak ditemukan perubahan warna maupun tekstur. Indikasi awal deteriorasi teramati pada Minggu ke-6 berupa *localized surface degradation* pada spesimen Oil 2197 dan *initial surface deterioration* berupa titik halus pada spesimen Oil 2380, sedangkan spesimen MJO II belum menunjukkan perubahan visual. Pada Minggu ke-8 hingga Minggu ke-18, deteriorasi berkembang bertahap pada seluruh spesimen, ditandai munculnya *discoloration*, hilangnya kilap permukaan, dan meluasnya area *surface roughening*. Pada Minggu ke-20 hingga Minggu ke-24, seluruh spesimen menunjukkan partikel material pada dasar wadah perendaman, dengan jumlah terbanyak pada Oil 2197, diikuti Oil 2380, dan paling sedikit pada MJO II. Hasil pengukuran dimensi dan berat spesimen selama 24 minggu disajikan pada Tabel 2, sedangkan pola perubahannya digambarkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Tabel 2. Rekapitulasi Perubahan Diameter Penampang dan Berat O-ring Selama 24 Minggu

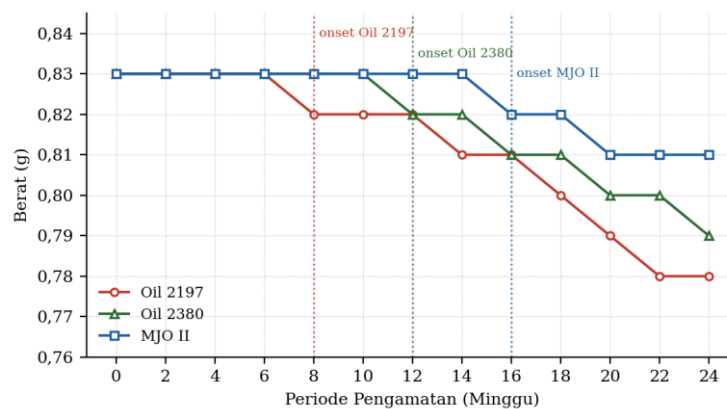
Parameter	Oil 2197	Oil 2380	MJO II
Diameter awal (mm)	2,620	2,620	2,620
Diameter akhir (mm)	2,573	2,586	2,606
Selisih diameter (mm)	-0,047	-0,034	-0,014
Perubahan diameter (%)	-1,794	-1,298	-0,534
Onset penurunan dimensi (minggu)	6	10	10
Berat awal (g)	0,83	0,83	0,83
Berat akhir (g)	0,78	0,79	0,81
Selisih berat (g)	-0,05	-0,04	-0,02
Perubahan berat (%)	-6,024	-4,819	-2,410
Onset penurunan berat (minggu)	8	12	16

Sumber: Data primer, 2026

Tabel 2 menunjukkan penurunan diameter penampang terbesar terjadi pada spesimen Oil 2197 sebesar -0,047 mm atau -1,794%, diikuti Oil 2380 sebesar -0,034 mm atau -1,298%, sedangkan MJO II mengalami penurunan paling kecil yaitu -0,014 mm atau -0,534%. Pola yang sama berlaku pada parameter berat, dengan penurunan Oil 2197 sebesar -0,05 gram atau -6,024%, Oil 2380 sebesar -0,04 gram atau -4,819%, dan MJO II sebesar -0,02 gram atau -2,410%. Penurunan dimensi pertama kali teramati pada Minggu ke-6 untuk Oil 2197, sedangkan Oil 2380 dan MJO II pada Minggu ke-10. Pada parameter berat, penurunan pertama teramati pada Minggu ke-8 untuk Oil 2197, Minggu ke-12 untuk Oil 2380, dan Minggu ke-16 untuk MJO II.



Gambar 2. Perubahan Diameter Penampang O-ring Selama 24 Minggu Perendaman



Gambar 3. Perubahan Berat O-ring Selama 24 Minggu Perendaman

Gambar 2 dan Gambar 3 memperlihatkan bahwa kurva Oil 2197 menurun paling curam dan terus menurun hingga akhir periode pengujian tanpa mendatar. Kurva MJO II paling landai dan mendatar pada periode akhir, sedangkan kurva Oil 2380 berada di antara keduanya. Urutan yang sama muncul pada seluruh titik pengamatan.

Tabel 3. Hasil Pengujian Laboratorium Media Perendaman pada Akhir Periode Pengujian

Parameter	Oil 2197	Oil 2380	MJO II	Batas
Kinematic viscosity 37,8 °C (cSt)	11,50	11,23	9,95	6,00–12,50
Total Acid Number (mg KOH/g)	0,88	0,78	0,38	maks 1,00
Density 15 °C (kg/m ³)	1043,1	1056,3	1009,3	970–1066
Water content (%)	0,68	0,78	0,34	maks 0,8
Particulate contamination (count/100 ml)	4.320	2.894	910	maks 720

Sumber: Laboratorium PT GMF AeroAsia Tbk, job number ODE.230100041, 2026

Hasil pengujian laboratorium terhadap ketiga media perendaman pada akhir periode penelitian disajikan pada Tabel 3. Seluruh media masih berada dalam batas yang diizinkan untuk parameter *kinematic viscosity*, *Total Acid Number*, *density*, dan *water content*. Perbedaan terbesar terdapat pada parameter *particulate contamination*, yaitu 4.320 count/100 ml pada Oil 2197, 2.894 count/100 ml pada Oil 2380, dan 910 count/100 ml pada MJO II, dengan batas maksimum 720 count/100 ml. Nilai *Total Acid Number* mengikuti urutan yang sama, yaitu 0,88 mg KOH/g pada Oil 2197, 0,78 mg KOH/g pada Oil 2380, dan 0,38 mg KOH/g pada MJO II.

Pembahasan

Data pada Tabel 2 dan Tabel 3 memperlihatkan satu urutan yang konsisten pada seluruh parameter yang diamati, yaitu Oil 2197 > Oil 2380 > MJO II. Konsistensi ini muncul tidak hanya

pada besaran akhir perubahan, tetapi juga pada *onset*, yaitu urutan waktu munculnya penurunan pertama, dan pada jumlah partikel yang terdeteksi dalam media perendaman. Kesesuaian antara tiga sumber data yang berbeda tersebut menunjukkan bahwa perbedaan deteriorasi antarspesimen bukan berasal dari galat pengukuran, melainkan dari perbedaan karakteristik media perendaman.

Keterkaitan antara hasil yang diperoleh dan konsep dasar deteriorasi elastomer dapat dijelaskan melalui dua mekanisme yang saling melengkapi. Mekanisme pertama adalah pemutusan rantai FKM melalui *dehydrofluorination* oleh aditif bersifat basa, sebagaimana dibuktikan Bulut dkk. (2020) yang mencatat penurunan kandungan fluorin dari 34% menjadi 28% disertai turunnya elongasi hingga 60–80%. Mekanisme kedua adalah penarikan *plasticizer* dari matriks elastomer oleh *base stock* dan paket aditif oli, yang oleh Garcia-Tuero dkk. (2022) ditunjukkan dapat menghasilkan arah perubahan yang berbeda-beda bergantung komposisi fluida. Kedua mekanisme tersebut menghasilkan gejala berupa penyusutan dimensi dan kehilangan massa, bukan pengembangan (*swelling*), dan gejala itulah yang teramati pada penelitian ini. Kenaikan *Total Acid Number* yang sejalan dengan tingkat deteriorasi memperkuat dugaan keterlibatan reaksi kimia pada permukaan spesimen, sementara tingginya *particulate contamination* pada media yang sama menunjukkan bahwa material yang lepas terakumulasi di dalam oli.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Müller dkk. (2022) bahwa respons elastomer ditentukan oleh komposisi fluida yang berkontak dengannya, dan menguatkan pola yang diperoleh Wimada dkk. (2023) pada elastomer NBR bahwa perbedaan komposisi fluida menghasilkan tingkat perubahan material yang berbeda meskipun jenis elastomernya sama. Terhadap Zhu dkk. (2025) terdapat perbedaan kondisi pengujian yang perlu dicatat: penelitian tersebut memperoleh percepatan deteriorasi melalui kombinasi paparan oli dan temperatur tinggi, sedangkan penelitian ini menemukan deteriorasi yang terukur telah terjadi pada suhu ruang tanpa beban termal. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur mempercepat proses, tetapi bukan merupakan syarat mutlak terjadinya deteriorasi. Terhadap Perkasa dan Rahmawati (2023) serta Hibban dan Rebet (2021), penelitian ini melengkapi temuan keduanya: apabila kedua penelitian tersebut berhenti pada identifikasi O-ring sebagai komponen yang gagal dan usia pakai sebagai penyebabnya, penelitian ini menunjukkan bahwa jenis fluida yang berkontak turut menentukan laju kegagalan komponen yang sama.

Temuan yang bersifat baru dari penelitian ini adalah bahwa tiga oli yang sama-sama memenuhi spesifikasi MIL-PRF-23699 ternyata menghasilkan tingkat deteriorasi yang berbeda secara konsisten pada satu *part number* O-ring yang sama. Dengan kata lain, pemenuhan spesifikasi militer belum menjamin kesetaraan kompatibilitas terhadap material *seal*. Hal ini diperkuat oleh fakta bahwa Oil 2197, yang mencatat deteriorasi tertinggi, tidak mencantumkan data *rubber swell* pada *Technical Data Sheet* resminya sehingga kompatibilitasnya terhadap FKM tidak terkonfirmasi dari dokumen produsen, sedangkan kedua oli lainnya mencantumkan data tersebut.

Secara praktis, temuan ini memiliki dua implikasi. Pertama, karena penurunan dimensi dan berat berlangsung progresif tanpa tanda stabilisasi hingga Minggu ke-24, sementara belum terdapat interval preventif definitif untuk kegiatan *oil cooler send to shop for cleaning* pada *Maintenance Programme* armada, diusulkan penetapan *task* perawatan preventif berupa pemeriksaan atau penggantian O-ring P/N AS43013-118 setiap dua tahun mengikuti periode C-Check. Usulan ini selaras dengan prinsip *reliability programme* sebagaimana diatur dalam AMC M.A.302 (EASA, 2020), yang memungkinkan penambahan *task* ke dalam program perawatan yang telah berjalan tanpa membentuk siklus perawatan terpisah. Kedua, mengingat oli yang saat ini digunakan pada armada tersebut adalah Oil 2197, yaitu jenis yang justru

menunjukkan deteriorasi tertinggi, disarankan dilakukan evaluasi teknis atas kemungkinan penggantianannya dengan MJO II. Evaluasi tersebut tetap harus mengacu pada *approved oil list* dalam *Aircraft Maintenance Manual* dan/atau *Component Maintenance Manual* yang diterbitkan manufaktur guna menjamin kesesuaian sertifikasi dan keselamatan operasional.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa ketiga spesimen O-ring P/N AS43013-118 mengalami perubahan sifat fisik dan dimensi setelah perendaman selama 24 minggu. Secara visual, perubahan tersebut berupa *discoloration* dari kondisi *glossy* menjadi *dulling* hingga *matte*, peningkatan kekasaran permukaan, serta kehilangan material yang ditandai munculnya partikel pada dasar wadah sejak Minggu ke-20. Secara kuantitatif, diameter penampang menurun dari 2,62 mm dan berat menurun dari 0,83 gram pada seluruh spesimen, dengan penurunan yang berlangsung progresif dan belum menunjukkan tanda stabilisasi hingga akhir periode. Perbedaan jenis oli menghasilkan tingkat deteriorasi yang berbeda dengan urutan Oil 2197 > Oil 2380 > MJO II, dan urutan tersebut konsisten pada pengamatan visual, pengukuran dimensi, pengukuran berat, perbedaan *onset*, maupun hasil uji laboratorium media perendaman. Dengan demikian Oil 2197 merupakan jenis oli yang memberikan pengaruh deteriorasi paling tinggi terhadap O-ring P/N AS43013-118 dan berpotensi menjadi salah satu faktor yang berkontribusi terhadap kebocoran *oil cooler* APU GTCP331. Temuan baru yang dihasilkan penelitian ini adalah bahwa kesamaan spesifikasi MIL-PRF-23699 tidak menjamin kesetaraan kompatibilitas terhadap material *seal*, sehingga kompatibilitas material perlu dijadikan kriteria tersendiri dalam pemilihan oli untuk sistem pelumasan APU, terpisah dari pemenuhan spesifikasi. Atas dasar tersebut diusulkan penambahan *task* perawatan preventif berupa pemeriksaan atau penggantian O-ring P/N AS43013-118 setiap dua tahun mengikuti periode C-Check, serta evaluasi teknis atas kemungkinan penggantian jenis oli yang digunakan pada armada dengan tetap mengacu pada *approved oil list* dari manufaktur.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan. Jumlah spesimen terbatas pada satu buah untuk setiap media perendaman sehingga hasilnya belum dapat diuji secara statistik, kondisi pengujian berlangsung statis pada suhu ruang sehingga belum merepresentasikan beban termal dan tekanan operasional yang sebenarnya, dan parameter yang diamati terbatas pada kondisi visual, dimensi, dan berat. Penelitian selanjutnya disarankan memperpanjang durasi pengujian, menambah jumlah spesimen untuk setiap media, menambahkan variasi temperatur dan siklus tekanan, serta melengkapi pengamatan dengan uji kekerasan IRHD, uji tarik dan *compression set*, dan analisis FTIR untuk mengonfirmasi mekanisme deteriorasi yang terjadi. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Politeknik Penerbangan Indonesia Curug atas bimbingan akademik dan fasilitas yang diberikan selama penelitian, serta kepada PT Garuda Maintenance Facility AeroAsia Tbk atas izin akses terhadap data perawatan, spesimen uji, alat ukur terkalibrasi, dan fasilitas laboratorium yang memungkinkan penelitian ini terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. (2016). *ASTM D471-16: Standard test method for rubber property—Effect of liquids*. ASTM International.
- Bulut, D., Krups, T., Poll, G., & Giese, U. (2020). Lubricant compatibility of FKM seals in synthetic oils. *Industrial Lubrication and Tribology*, 72(5), 557–565. <https://doi.org/10.1108/ILT-02-2019-0065>
- Driyono. (2019). Pengaruh kemampuan dan motivasi terhadap prestasi kerja pegawai pada unit perawatan pesawat udara dalam mendukung praktik latihan terbang di STPI Curug. *Jurnal Teknik dan Keselamatan Transportasi*, 2(1).



- EASA. (2020). *AMC M.A.302 Aircraft maintenance programme*. European Union Aviation Safety Agency.
- Garcia-Tuero, A., Ramajo, B., & Valbuena, G. D. (2022). Automatic transmission fluids in electrified transmissions: Compatibility with elastomers. *Lubricants*, 10(9), 1–16.
- Hibban, I., & Rebet, I. (2021). *Analisis penyebab kebocoran oli pada generator APU GTCP331-350 di pesawat Airbus A330-200/300 milik PT X (Studi kasus di PT ABC)* [Tugas akhir, Politeknik Negeri Jakarta].
- Mora. (2012). Literature review on aircraft maintenance program. *Warta Ardhia: Jurnal Penelitian Perhubungan Udara*, 38(4).
- Müller, M., Šleger, V., Čedík, J., & Pexa, M. (2022). Research on the material compatibility of elastomer sealing O-rings. *Polymers*, 14(16), 3323. <https://doi.org/10.3390/polym14163323>
- Nugraha, R. A. (2016). Improving aviation safety in Indonesia: How many more accidents? *Hasanuddin Law Review*, 2(3), 328–343. <https://doi.org/10.20956/halrev.v2i3.321>
- Pambekti, A., Misi Okia, Y., Kurniawan, R., Al Huda, L., Evan, B., Kamal Fajri, A., & Tri Efendi, E. (2025). Analisis kerusakan retract actuator nose landing gear pada pesawat Boeing 737-800 Next Generation. *BULLET: Jurnal Multidisiplin Ilmu*, 3(6), 855–860.
- Perkasa, S., & Rahmawati, F. K. (2023). Analisis kegagalan lubrication system Auxiliary Power Unit (APU) pesawat. *Vortex*, 4(2), 128–131. <https://doi.org/10.28989/vortex.v4i2.1693>
- Sakti, & Fahrurrozi. (2015). Aeronautical engineering diploma curriculum program for basic aircraft maintenance to answer the demand of aircraft maintenance technician in Indonesia. *Jurnal Teknologi*, 77(28).
- Sugiyono. (2016). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Wimada, A. R., Sholihah, M. D., Karuana, F., & Arisanti, A. G. (2023). Pengaruh bahan bakar campuran biodiesel berbahan dasar minyak sawit terhadap elastomer NBR. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 6(1). <https://doi.org/10.30596/rmme.v6i1.12594>
- Zhu, M., Huang, H., Li, H., Huang, G., Lan, J., Fu, J., Fan, J., Liu, Y., Ke, Z., Guo, X., Zhou, H., & Li, Y. (2025). A study on the aging mechanism and anti-aging properties of nitrile butadiene rubber: Experimental characterization and molecular simulation. *Polymers*, 17(11), 1446. <https://doi.org/10.3390/polym17111446>