

Pengaruh Pencucian Kompresor terhadap putaran Poros Pada Mesin Turbofan

¹Abubakar As'siddiq, ²Mukhammad Yusuf Hakim, ³Reza Fadilah Romadloni
^{1,2,3}Politeknik Kirana/Aircraft Maintenance Engineering Department, Balaraja
e-mail: abubakar@politeknikkirana.ac.id

Receive: 28-12-2025

Accepted: 14-02-2026

Abstract

This study quantifies the influence of on-wing compressor washing on turbofan engine performance retention and deterioration rate, with the objective of identifying an optimal wash interval that maximizes fuel efficiency and supports life-limited hardware management. An analytical, data-driven method was applied using Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS) snapshots to track post-wash performance trends over successive block cycles. Changes in cruise fuel-flow characteristics and exhaust gas temperature margin (TGT/EGT margin) were used as primary indicators of efficiency recovery and subsequent degradation. Results show a measurable post-wash performance recovery, including an average improvement in cruise delta fuel flow and a corresponding increase in temperature margin of approximately 0.6 °C, consistent with reduced compressor fouling losses. Trend analysis of margin deterioration normalized per 100 cycles indicates a steeper inefficiency growth rate during the first ~200 cycles after washing, followed by a slower degradation rate thereafter. Based on the observed two-slope deterioration behavior, the findings support scheduling compressor washes at approximately 200–250 cycles to capture the highest marginal efficiency benefit while contributing to sustained operability and longer on-wing time.

Keywords: Compressor Wash, Fouling, Gas Turbine, Performance Optimization, Turbofan

PENDAHULUAN

Dalam dunia penerbangan modern, mesin turbofan telah menjadi sumber tenaga utama pada pesawat komersial maupun militer karena menawarkan kombinasi unggul antara gaya dorong, efisiensi bahan bakar, dan keandalan operasi. Turbofan termasuk dalam keluarga mesin turbin gas, yang secara fundamental terdiri dari kompresor, ruang bakar, dan turbin. Kompresor menghisap udara masuk, menaikkan tekanannya, lalu memasoknya ke ruang bakar untuk dicampur dengan bahan bakar dan dibakar. Gas hasil pembakaran yang bertemperatur dan bertekanan tinggi kemudian mengembang melewati turbin, menghasilkan kerja untuk memutar poros yang menggerakkan kompresor. Pada konfigurasi turbofan, sebagian besar udara yang masuk tidak melalui inti mesin (core), melainkan dialirkan sebagai aliran bypass di sekitar core. Aliran bypass ini dipercepat oleh fan di bagian depan sehingga memberikan kontribusi signifikan terhadap gaya dorong total, sekaligus meningkatkan efisiensi propulsif dibanding mesin jet murni.

Penggunaan turbofan pada pesawat didorong oleh beberapa keunggulan teknis dibanding mesin piston atau turbojet, terutama rasio daya terhadap massa (power-to-weight ratio) yang tinggi dan efisiensi termal yang baik. Efisiensi termal menggambarkan kemampuan mesin mengonversi energi panas hasil pembakaran menjadi kerja mekanik secara efektif. Pada turbin gas, proporsi energi yang dapat dimanfaatkan sebagai kerja relatif tinggi, sehingga konsumsi bahan bakar spesifik dapat ditekan dan emisi berkurang pada kondisi operasi yang setara.

Selama operasi, seluruh komponen turbin gas yaitu kompresor, ruang bakar, dan turbin mengalami degradasi akibat keausan, siklus termal, serta pengaruh lingkungan. Penurunan performa ini berdampak langsung pada meningkatnya konsumsi bahan bakar, biaya operasi, dan emisi, serta dapat memicu kebutuhan pemeliharaan yang lebih intensif. Tingkat degradasi antar mesin bervariasi dan sangat dipengaruhi oleh jenis/konsentrasi kontaminan yang terhisap serta efektivitas program compressor washing yang diterapkan.^{[1][2][3]}

Pemeliharaan mesin pesawat merupakan proses yang kompleks dan berbasis pemantauan kondisi (condition-based maintenance), yang menuntut evaluasi berkala terhadap parameter kesehatan mesin. Parameter penting yang umum dipantau meliputi Turbine Gas Temperature (TGT), fuel flow, getaran, konsumsi oli, serta putaran rotor (N)^{[4][5]}. Perubahan tren yang mengindikasikan penurunan performa atau bertambahnya margin risiko sering menjadi dasar penentuan tindakan perbaikan, termasuk keputusan engine removal untuk dilakukan perbaikan di fasilitas perawatan pesawat udara (shop visit)^{[13][15]}.

Ketahanan mesin dan on-wing life mesin dipengaruhi oleh kombinasi faktor seperti tingkat daya yang dikeluarkan, profil operasi (misalnya frekuensi penerbangan, praktik take-off derate, dan kondisi lingkungan), serta usia mesin^{[10][11][12]}. Secara khusus, bagian kompresor rentan mengalami penurunan efisiensi karena gesekan aerodinamis, erosi ringan, dan terutama fouling akibat akumulasi kontaminan dari udara masuk seperti debu, partikel garam, uap minyak, dan polutan lain yang mengubah karakteristik aliran udara, menurunkan rasio tekanan efektif, dan meningkatkan kebutuhan energi untuk kompresi^{[3][5][6][7][8]}.

Compressor washing adalah prosedur pembersihan kompresor mesin turbofan untuk menghilangkan deposit dan kontaminan yang menempel pada sudu dan flow path. Dengan volume aliran udara yang besar, kompresor cenderung mengalami fouling selama operasi normal, terlebih pada rute dengan lingkungan berdebu, lembap, atau dekat wilayah pantai. Pembersihan kompresor diharapkan dapat mengembalikan sebagian performa (performance recovery), meningkatkan margin temperatur (misalnya TGT margin), meningkatkan margin putaran rotor (r), memperbaiki efisiensi kompresor, serta menurunkan konsumsi bahan bakar^{[17][18][19][20]}.

Pada mesin yang dianalisis dalam penelitian ini, compressor washing merupakan prosedur rutin yang saat ini dijadwalkan setiap 500 siklus untuk menjaga performa, sebagaimana tercermin pada perbaikan parameter kunci seperti margin temperatur, kecepatan poros, dan fuel flow. Praktik ini juga bertujuan menekan biaya bahan bakar dengan memperlambat laju penurunan efisiensi kompresor akibat fouling selama operasi pesawat. Dengan demikian, program compressor washing berperan penting dalam mempertahankan efisiensi operasi serta meningkatkan keandalan dan umur layanan mesin turbofan^{[21][22][23]}.

Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh compressor washing terhadap putaran rotor serta karakteristik peningkatan putaran rotor sepanjang siklus penerbangan. Melalui analisis tren pasca-wash, penelitian ini bertujuan menentukan waktu pelaksanaan compressor washing yang paling optimal untuk meminimalkan putaran rotor, sekaligus mengoptimalkan kinerja mesin dan efisiensi biaya operasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan analitis dengan memanfaatkan data Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS) yang diekstraksi dari mesin Trent 700 yang beroperasi, melalui antarmuka web Rolls Royce di fasilitas Maintenance, Repair and Overhaul (MRO). Metodologi penelitian mencakup tahapan pengolahan data yang sistematis, meliputi penyaringan dan pengelompokan data per siklus operasi, penyusunan serta perbandingan representasi grafis untuk menggambarkan tren putaran poros pada berbagai rentang siklus, serta evaluasi perubahan performa sebelum dan sesudah tindakan compressor wash.

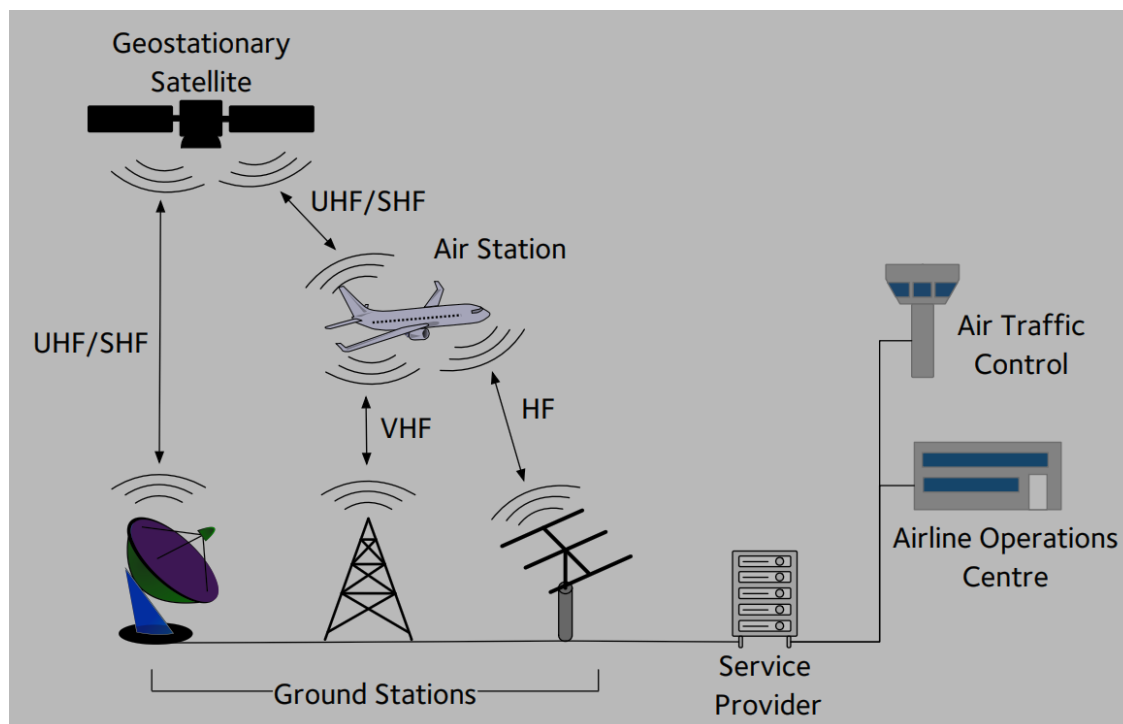
Selain analisis visual, laju degradasi dihitung sebagai nilai rata-rata penurunan kinerja terhadap waktu/siklus menggunakan Microsoft Excel untuk mengidentifikasi pola degradasi dan perubahan kemiringan tren (trend slope) pada setiap segmen pengamatan. Dengan membandingkan karakteristik degradasi pada masing-masing data set, analisis ini bertujuan mengkuantifikasi pengaruh prosedur compressor wash terhadap parameter yang ditinjau dan menginterpretasikan mekanisme pemulihan performa serta laju penurunan berikutnya. Secara keseluruhan, studi ini memberikan pemahaman yang lebih kuat mengenai keterkaitan antara performa mesin, karakteristik degradasi, dan efektivitas praktik compressor wash, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan strategi pemeliharaan dan optimasi performa mesin turboprop secara operasional.

ACARS

Sistem Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS) merupakan tautan komunikasi data yang andal dan aman antara pesawat dan stasiun darat. Melalui ACARS, pesawat dapat mengirimkan laporan operasi secara otomatis, menyampaikan permintaan dukungan pemeliharaan, menerima pesan operasional, serta memperoleh informasi meteorologi terkini yang relevan untuk perencanaan dan pelaksanaan penerbangan. Pemanfaatan ACARS memungkinkan operator dan personel ground memantau kinerja pesawat berbasis data, mengumpulkan parameter penting untuk kebutuhan maintenance dan troubleshooting, serta mempercepat koordinasi antara pesawat dan pusat kendali operasi (operational control center).

Keunggulan utama ACARS adalah kemampuan transmisi pesan teks dan paket data secara otomatis dan terstandarisasi, sehingga mengurangi ketergantungan pada komunikasi suara yang bersifat manual dan rentan terhadap variasi interpretasi. Otomatisasi ini berkontribusi pada penurunan potensi kesalahan manusia, peningkatan ketepatan waktu penyampaian informasi, serta efisiensi operasional—terutama dalam konteks pemantauan kondisi mesin (engine condition monitoring) dan pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis tren.

Secara keseluruhan, ACARS merupakan infrastruktur komunikasi yang esensial dalam operasi penerbangan modern karena memperlancar pertukaran informasi pesawat–darat, mendukung intervensi pemeliharaan yang lebih cepat dan tepat, serta memperkuat keselamatan penerbangan melalui ketersediaan data operasional yang konsisten dan dapat ditelusuri.



Gambar 1. ACARS

EHM

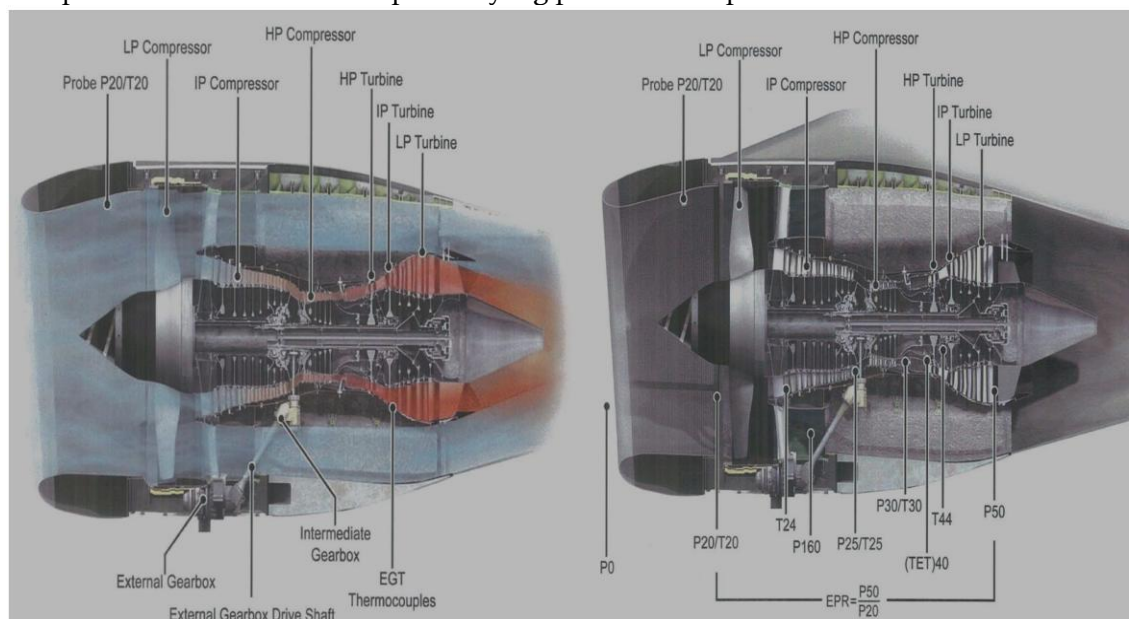
Engine Health Monitoring (EHM) merupakan sistem pemantauan kondisi yang dikembangkan Rolls Royce untuk mengawasi kesehatan dan kinerja mesin pesawat secara berkelanjutan. EHM berfungsi sebagai alat proaktif dengan merekam parameter-parameter operasi penting dan mendeteksi indikasi awal ketidaknormalan (fault atau anomaly) sehingga tindakan pemeliharaan dapat direncanakan lebih dini—sebelum degradasi kecil berkembang menjadi kondisi yang berdampak signifikan terhadap keselamatan, keandalan, maupun biaya operasi.

Dalam implementasinya, EHM memanfaatkan jaringan sensor dan instrumen pemantauan yang terpasang pada mesin untuk mengumpulkan data operasional dan metrik performa. Data ini kemudian ditransmisikan dari pesawat ke darat melalui ACARS menuju pusat pemantauan Rolls Royce, tempat perangkat lunak analitik digunakan untuk melakukan pemrosesan lanjutan, trend monitoring, serta evaluasi terhadap batas dan pola operasi.

Perangkat lunak EHM menganalisis data yang terkumpul untuk mengidentifikasi pola yang tidak lazim atau deviasi performa dari kondisi acuan. Dengan membandingkan data aktual terhadap model referensi dan baseline historis, sistem dapat menghasilkan peringatan dini terkait potensi permasalahan, seperti keausan komponen yang tidak normal, fluktuasi temperatur yang menyimpang, peningkatan vibrasi, maupun penurunan efisiensi bahan bakar. Informasi diagnostik dan prognostik yang dihasilkan EHM mendukung penentuan strategi pemeliharaan yang paling tepat (misalnya inspeksi terarah, penjadwalan pembersihan kompresor, atau tindakan korektif lainnya), sehingga membantu mempertahankan dispatch reliability dan memperpanjang on-wing life.

Salah satu parameter termal yang krusial dalam EHM adalah Turbine Gas Temperature (TGT), yang digunakan sebagai indikator beban termal mesin dan margin operasional. Pengukuran TGT dilakukan menggunakan sensor termokopel yang ditempatkan pada lokasi representatif di jalur gas panas, yaitu di area masuk turbin tekanan

rendah (Low-Pressure Turbine inlet). Termokopel menghasilkan tegangan listrik yang sebanding dengan temperatur lokal, sehingga memungkinkan akuisisi data temperatur secara real-time. Pada konfigurasi yang dijelaskan, sistem menggunakan 11 rakitan termokopel elemen ganda (twin-element thermocouple assemblies) yang didistribusikan merata di sekeliling mesin pada Low-Pressure 1 turbine nozzle guide vanes (LP1 NGV). Distribusi melingkar ini meningkatkan representativitas pengukuran (mengurangi bias akibat temperature non-uniformity) dan mendukung penilaian kesehatan mesin yang lebih komprehensif melalui data temperatur yang presisi dan dapat ditelusuri.



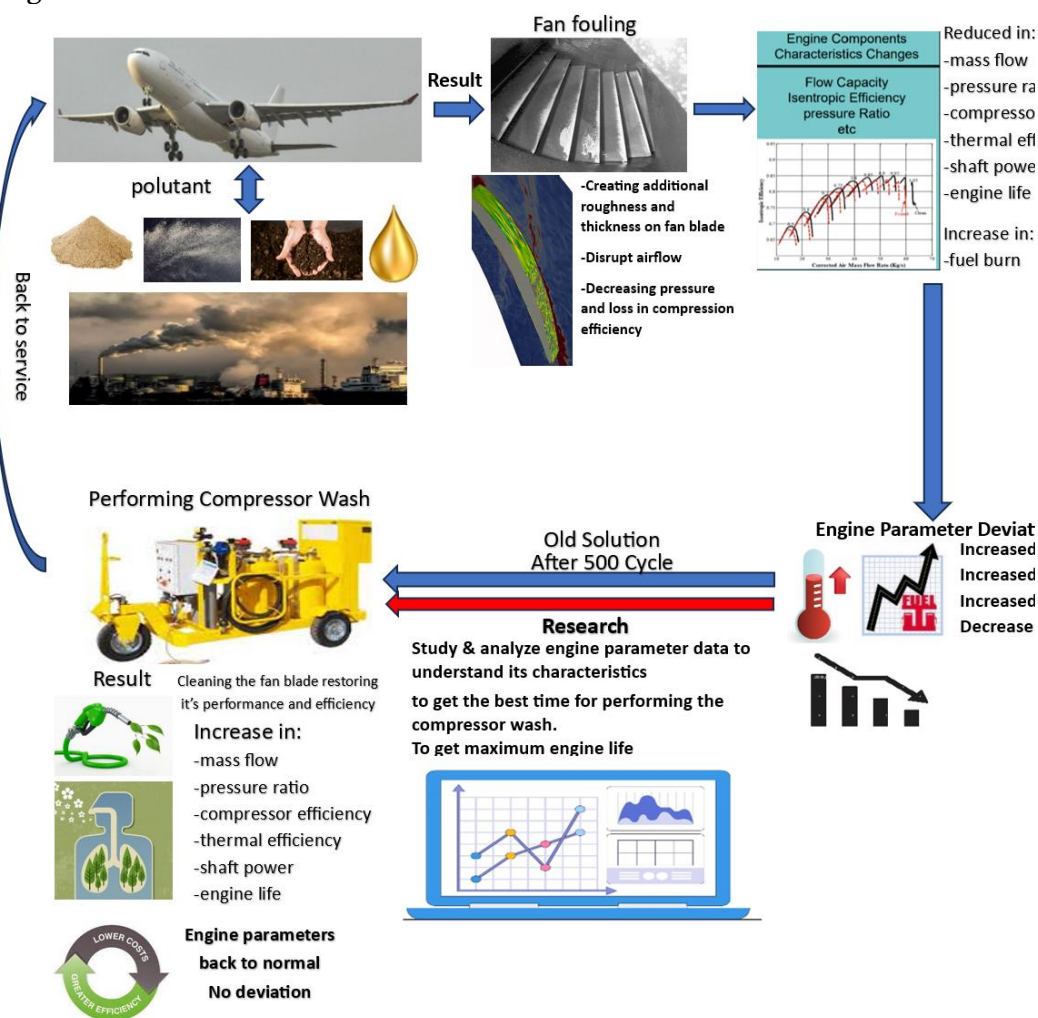
Gambar 2 Lokasi EGT or TGT Thermocouple dan beberapa sensor lain

N2 (atau high-pressure rotor speed) adalah parameter yang merepresentasikan kecepatan putar poros high-pressure spool pada mesin turbofan. Spool ini umumnya menghubungkan High-Pressure Compressor (HPC) dengan High-Pressure Turbine (HPT) melalui satu poros konsentris. Nilai N2 biasanya dinyatakan sebagai persentase terhadap kecepatan putar maksimum rancangannya (mis. %N2), sehingga memudahkan perbandingan antar kondisi operasi dan pemantauan tren jangka panjang.

Secara operasional, N2 merupakan indikator kunci “seberapa keras” core mesin bekerja untuk memenuhi kebutuhan daya dan thrust pada kondisi tertentu. Pada saat start, peningkatan N2 digunakan sebagai acuan keberhasilan akselerasi core dan kestabilan pembakaran. Pada fase takeoff, climb, dan cruise, N2 berhubungan erat dengan laju aliran massa dan rasio tekanan kompresor inti; ketika efisiensi komponen menurun (misalnya akibat fouling/keausan pada kompresor atau penurunan efisiensi turbin), mesin sering memerlukan N2 yang lebih tinggi untuk menghasilkan thrust yang sama, atau sebaliknya menghasilkan performa yang lebih rendah pada N2 yang sama.

Dalam konteks Engine Health Monitoring (EHM), pemantauan tren N2 membantu mendeteksi degradasi performa core dan ketidaknormalan kontrol mesin. Deviasi N2 yang persisten terhadap baseline pada kondisi referensi (misalnya cruise pada ketinggian/ISA tertentu atau kondisi yang sudah dikoreksi) dapat mengindikasikan perubahan karakteristik aerodinamis kompresor, penurunan margin stall, kebocoran internal, masalah aktuator variable stator vanes, atau perubahan respons sistem kontrol bahan bakar.

Diagram Method



Gambar 3. kerangka konsep

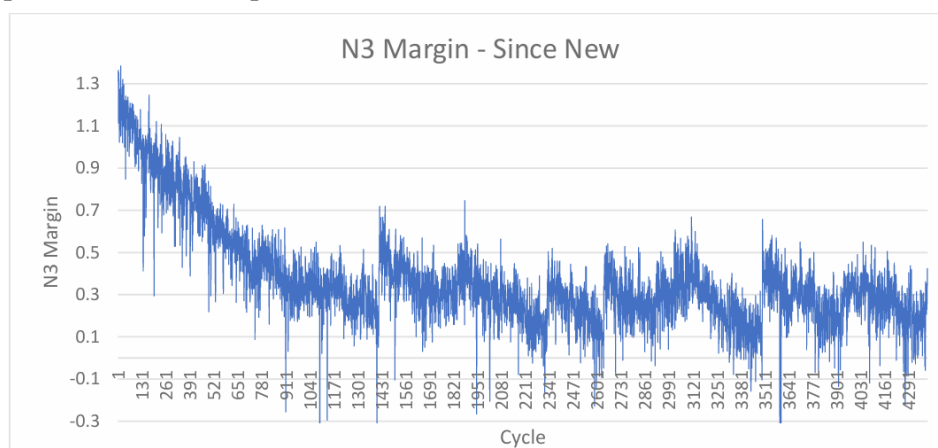
Data yang diperoleh dari ACARS dianalisis dan diolah menggunakan Microsoft Excel untuk menghasilkan visualisasi (grafik), analisis tren, serta perhitungan kuantitatif yang mendukung interpretasi kinerja dan putaran mesin secara lebih komprehensif. Pada tahap awal, data dipilah berdasarkan waktu perlakuan compressor washing sehingga terbentuk kelompok data sebelum dan sesudah wash (atau beberapa segmen pasca-wash). Setiap kelompok kemudian diplot dalam bentuk grafik dan dipasangkan dengan garis tren (trendline) untuk menggambarkan arah perubahan parameter terhadap siklus operasi.

Untuk menghitung rata-rata margin putaran poros N2 (N2 margin), data pasca-compressor wash diekstraksi per blok 100 siklus (misalnya 0–100, 101–200, dan seterusnya) dan dibandingkan antarblok guna mengevaluasi laju degradasi putaran. Selanjutnya, untuk mengestimasi perubahan margin pada siklus ke-100 dan kelipatannya, nilai margin yang diprediksi oleh garis tren pada akhir suatu blok siklus dikurangkan dari nilai pada blok siklus berikutnya. Pendekatan berbasis blok ini memungkinkan kuantifikasi perbedaan kemiringan tren (slope) antar periode, sehingga memudahkan identifikasi pola degradasi,

deteksi anomali data, serta penarikan kesimpulan yang dapat ditindaklanjuti terkait efektivitas compressor wash dan potensi optimasi efisiensi operasional.

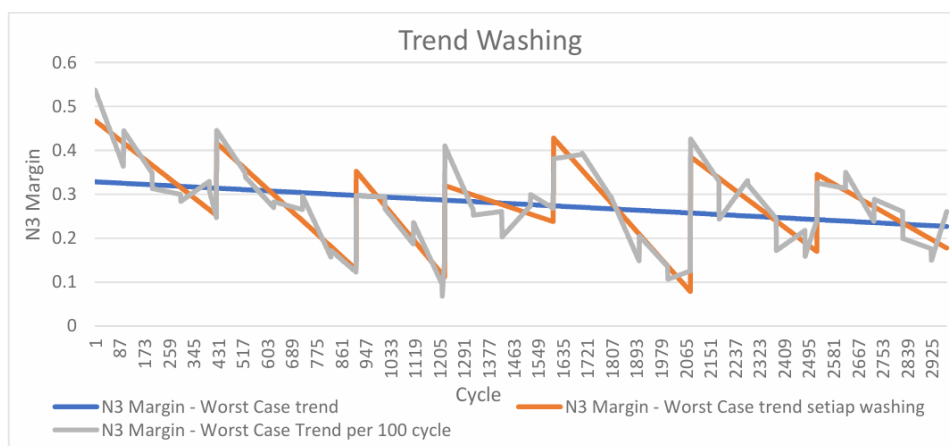
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada putaran High Speed Turbine (N3), terjadi penurunan signifikan dalam margin operasional saat mesin berfungsi. Penurunan ini bersifat kritis, di mana pada beberapa kesempatan mesin mendekati, bahkan melampaui, batas maksimum margin yang ditetapkan, yaitu 0%. Akibatnya, mesin tersebut memerlukan proses compressor wash, meskipun sebelum mencapai 500 siklus.



Gambar 4. N3 Margin sejak baru

N3 sangat rentan terhadap kontaminan yang dapat mengendap di dalam mesin, karena merupakan tahap kompresi akhir yang menanggung semua inefisiensi yang terjadi pada fase kompresi sebelumnya. Oleh karena itu, penurunan efisiensi pada kompresor di bagian N2 berdampak langsung pada kinerja fase kompresi akhir.



Gambar 5. Trend compressor washing pada setiap 100 cycle

Dari grafik yang diperoleh, tampak bahwa penurunan tajam margin terjadi dalam 200 siklus pertama setelah pelaksanaan compressor wash. Setelah periode tersebut, laju penurunan margin menunjukkan kecenderungan untuk melandai.

CW	After CW	Last Cycle	Recovery
1	0.46734597	0.25218411	
2	0.416569935	0.12921562	0.164385824
3	0.352181523	0.111543096	0.222965903
4	0.319722272	0.237684213	0.208179176
5	0.381037497	0.078670729	0.143353284
6	0.425853057	0.170012882	0.347182328
7	0.345371944		0.175359062

Tabel 1. Trend recovery Margin N3 setelah compressor wash

Data di atas menunjukkan bahwa high speed shaft adalah poros yang berputar pada mesin turbin gas. Bagian ini merupakan fase terakhir dari proses kompresi dan fase pertama dalam operasional turbin, sehingga memiliki dampak paling signifikan pada penurunan performa mesin.

Ketika terjadi penurunan performa atau efisiensi pada kompresor, poros ini akan berputar lebih cepat untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan oleh mesin serta energi yang harus diekstraksi oleh turbin. Pada kondisi kebutuhan daya maksimal, poros ini beroperasi pada margin 0,6 dari batas maksimum yang ditetapkan. Dengan demikian, jika efisiensi menurun, margin dapat turun mendekati 0, yang berarti mesin beroperasi pada putaran maksimal yang diizinkan oleh manufaktur.

Sebagian besar pelaksanaan compressor wash dilakukan karena margin dari high speed shaft mendekati, bahkan menyentuh, angka di bawah 0. Awalnya, manufaktur menetapkan batas bawah margin pada 0,4. Namun, seiring waktu, ditemukan bahwa mesin masih dapat berfungsi secara normal pada margin 0,4 dan di bawahnya. Selain itu, perlakuan compressor wash tidak selalu berhasil mengembalikan margin di atas 0,4. Akibatnya, batas bawah ini dihapus dari sistem peringatan.

Compressor wash memiliki pengaruh langsung terhadap putaran high speed shaft (HSS). Setelah proses compressor wash diterapkan, terjadi perbaikan signifikan dalam margin operasional, yang berarti putaran HSS dapat berkurang untuk memenuhi kebutuhan daya mesin. Penurunan putaran ini juga mengurangi stres pada mesin, yang berdampak positif pada umur mesin. Selain itu, data aliran bahan bakar menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi mesin terjadi seiring dengan operasi pada putaran HSS yang lebih rendah. Dengan demikian, penerapan compressor wash tidak hanya memperbaiki performa mesin, tetapi juga berkontribusi pada efisiensi operasional dan pemeliharaan jangka panjang.

Margin aliran bahan bakar yang rendah umumnya menunjukkan penggunaan bahan bakar yang berkurang, yang menandakan operasi mesin yang lebih efisien dan suhu yang lebih rendah. Selain itu, selama setiap proses pencucian mesin, terjadi peningkatan margin aliran bahan bakar, yang mengindikasikan bahwa prosedur pencucian efektif dalam meningkatkan margin ini. Namun, margin yang tidak kembali ke posisi semula hanya dapat diperbaiki melalui prosedur overhauling mesin yang menyeluruh.

SIMPULAN DAN SARAN

Proses pencucian kompresor secara langsung mempengaruhi perubahan dalam performa dan efisiensi mesin. Pengurangan beban kerja dan efisiensi mesin dapat memperpanjang umur mesin serta mengurangi biaya pemeliharaan yang terkait dengan beban kerja yang tinggi. Waktu optimal untuk melakukan pencucian kompresor adalah sekitar 200, di mana margin putaran poros mulai meningkat tajam dan kemudian berada dalam fase datar, yang menunjukkan bahwa kompresor mulai terakumulasi kotoran.

Fase datar dari peningkatan ini juga mengindikasikan bahwa akumulasi kontaminan baru menjadi lebih sulit terjadi karena adanya penumpukan dari penggunaan sebelumnya. Dapat disimpulkan bahwa mesin yang bersih lebih rentan terhadap akumulasi kontaminan secara cepat pada awal operasinya setelah proses pencucian kompresor. Selain itu, proses pencucian kompresor dapat meningkatkan margin putaran shaft di sekitar 0,2%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rainer Kurz, Cyrus Meher-Homji, Klaus Brun. GAS TURBINE DEGRADATION. 43rd Turbomachinery & 30th Pump Users Symposia. September 23-25, 2014
- [2] Cyrus B. Meher-Homji, Mustapha A. Chaker, Hatim M. Motiwala. Gas Turbine Performance Deterioration. 30th Turbomachinery Symposium
- [3] Homji, Bromley, & Stalder. GAS TURBINE PERFORMANCE DETERIORATION AND COMPRESSOR WASHING. Middle East Turbomachinery Symposium 2013.
- [4] Hanumanthan H, Stitt A, Laskaridis P, et al. Severity estimation and effect of operational parameters for civil aircraft jet engines. Proc IMechE, Part G: J Aerospace Engineering 2012; 226: 1544–1561.
- [5] Ackert, S. (2011). Engine maintenance concepts for financiers - elements of turbofan shop maintenance costs (Tech. Rep.). Retrieved from http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/engine_mx_concepts_for_financiers__v2.pdf
- [6] Kurz R, Musgrove G, Brun K. Experimental evaluation of compressor blade fouling. ASME Turbo Expo 2016, Seoul.
- [7] Ackert, S. (2015). Keeping score: Analysis of an engine's shop visit rate (Tech. Rep.). Retrieved from http://www.aircraftmonitor.com/uploads/1/5/9/9/15993320/keeping_score_analysis_of_an_engine's_svr__v1.pdf
- [8] Igie U, Pilidis P, Fouflias D, et al. Industrial gas turbine performance: Compressor fouling and on-line washing. J Turbomach 2014; 136: 101001-101001.
- [9] (Ackert, 2011; Aircraft Commerce, 2007, 2006).
- [10] Giesecke D, Igie U, Pilidis P, et al. Performance and techno-economic investigation of on-wing compressor wash for a short-range aero engine. In: ASME turbo expo 2012, Copenhagen, 11 June 2012, pp.235–244.
- [11] Syverud E, Brekke O and Bakken LE. Axial compressor deterioration caused by saltwater ingestion. J Turbomach 2007; 129: 119–126.
- [12] Tarabrin AP, Bodrov AI, Schurovsky VA, et al. Influence of axial compressor fouling on gas turbine unit performance based on different schemes and with different initial

- parameters. In: ASME international gas turbine and aeroengine congress, Stockholm, Sweden, 1998, ASME paper no. 98-GT-416.
- [13] AviationPros. ASIG signs exclusive engine wash deal from GE aviation. AviationPros.com. http://www.aviationpros.com/press_release/10709699/asig-signs-exclusive-engine-wash-deal (accessed 20 April 2024).
- [14] Walsh PP and Fletcher P. Gas turbine performance. Malden, MA: Blackwell Science, 2004.
- [15] Hanumanthan H, Stitt A, Laskaridis P, et al. Severity estimation and effect of operational parameters for civil aircraft jet engines. Proc IMechE, Part G: J Aerospace Engineering 2012; 226: 1544–1561.
- [16] Millsaps KT, Baker J and Patterson JS. Detection and localization of fouling in a gas turbine compressor from aerothermodynamic measurements. In: Conference: ASME turbo expo 2004: power for land, sea, and air, 2004, pp.1867–1876.
- [17] Syverud E and Bakken LE. Online water wash tests of GE J85-13. J Turbomach 2007; 129: 136–142.
- [18] Dan Chen, Jianzhong Sun. Fuel and emission reduction assessment for civil aircraft engine fleet on-wing washing. Transportation Research Part D: Transport and Environment Volume 65, December 2018, Pages 324-331
- [19] C. B. Meher-Homji, M. Chaka and A. E. Brouley, “The Fouling of Axial Flow Compressor-Causes, Effects, Susceptibility and Sensitivity,” Proceedings of ASME Turbo Expo Orlando, Florida, 8-12 June 2009, pp. 1-20.
- [20] I. S. Diakunchak, “Performance Degradation in Industrial Gas Turbines,” ASME Paper 91-GT-228, 1991.
- [21] R. Kurz and K. Brun, “Degradation in Gas Turbine Systems,” ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 123, No. 1, 2001 pp. 70-77. doi:10.1115/1.1340629
- [22] E. Schneider, Dermircioglu, S. Fraanco and D. Therkom, “Analysis of Compressor Online Washing to Optimize Gas Turbine Power Plant Performance,” Proceedings of ASME Turbo Expo 2009, Orlando, 8-12 June 2009, pp. 1-9.
- [23] R. J. Boyle, “Prediction of Surface Roughness and Incidence Effects on Turbine Performance,” Journal of Turbomachinery, Vol. 116, No. 4, 1994, pp. 512-519. doi:10.1115/1.2929468