



The Impact of Compressor Wash Maintenance on the Rolls Royce M250-B17F Engine Performance of Grob G 120TP-A Aircraft

Agung Prakoso^{1,*}, Indro Lukito¹, Buyung Junaidin², Teguh Wibowo³, C. Sukaca Budiono³

¹Aeronautika, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto, Indonesia

²Teknik Dirgantara, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto, Indonesia

³Teknik Mesin, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Desember 2, 2025

Accepted January 8, 2026

Published January 22, 2026

Keywords:

Compressor wash
Thrust power
Effective power
Maintenance
Engine

ABSTRACT

The Grob G 120TP-A is a training aircraft powered by the Rolls Royce M250-B17F engine with limited aerobatic capabilities. To optimize its flight performance, maintenance procedures such as compressor wash are essential. Compressor washing is conducted periodically every 100 flight hours to clean the compressor blades from contaminants caused by humidity and salt particles. This study used thermodynamic analysis to evaluate the increase in thrust power and effective power after compressor washing at different Outside Air Temperatures (OAT). The results indicate that after compressor washing, the thrust power increased by 4.3% and the effective power increased by 0.3%, demonstrating the importance of routine maintenance in sustaining optimal engine and aircraft performance.



Corresponding Author:

Agung Prakoso,
Aeronautika,
Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto,
Jl. Janti Blok - R Lanud Adisutjipto, Yogyakarta, Indonesia.
Email: agungprakoso@itda.ac.id

1. PENGANTAR

Sistem transportasi udara, khususnya pada segmen pelatihan penerbangan, sangat bergantung pada keandalan dan performa optimal mesin pesawat sebagai sumber daya utama [1]. Pesawat latih modern, seperti Grob G 120TP-A, beroperasi dalam intensitas tinggi di lingkungan pelatihan yang menuntut kesiapan teknis maksimum setiap hari [2]. Pesawat ini ditenagai oleh mesin *turboprop* Rolls Royce M250-B17F, yang dikenal luas karena efisiensi bahan bakar, keandalan operasional, dan kemudahan perawatannya dalam berbagai aplikasi militer dan sipil [3, 4]. Mesin ini mampu menghasilkan daya maksimum hingga 456 SHP dan memungkinkan kecepatan jelajah mencapai 226 KTAS pada ketinggian 10.000 ft [5]. Performa yang stabil dan respons *throttle* yang baik sangat esensial untuk mendukung manuver aerobatik terbatas dan prosedur pelatihan lanjutan [6]. Sebagai komponen vital dalam sistem *propulsi* mesin turbin gas, kompresor memainkan peran krusial dalam mengatur aliran udara dan meningkatkan tekanan sebelum memasuki ruang bakar [7]. Efisiensi proses kompresi secara langsung berkorelasi dengan besarnya energi *thermal* dan *thrust power* yang dapat dihasilkan mesin secara keseluruhan [8]. Pada prinsipnya, peningkatan tekanan udara yang efektif sebelum pembakaran akan memaksimalkan tenaga yang dihasilkan [9]. Namun, kompresor merupakan bagian yang paling rentan terhadap kontaminasi karena posisinya di bagian *inlet* udara. Fenomena *fouling* (akumulasi deposit seperti garam, debu, dan kontaminan lain akibat kelembaban lingkungan operasional) adalah penyebab utama degradasi performa [10, 11]. *Fouling* ini mengakibatkan penyumbatan pada saluran udara, menyebabkan penurunan rasio tekanan (*pressure ratio*) dan efisiensi isentropik kompresor [12]. Secara empiris, efek *fouling* dapat menurunkan aliran udara, yang pada gilirannya mengurangi daya dorong (*thrust*) dan secara signifikan meningkatkan konsumsi bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Consumption/SFC*) [13, 14]. Studi kasus

menunjukkan bahwa kontaminasi dapat menyebabkan kerusakan baik pada *front-stage* maupun *rear-stage* bilah kompresor, memperburuk penurunan performa mesin [15].

Untuk mengatasi degradasi kinerja yang diakibatkan oleh *fouling*, pelaksanaan *compressor wash* (pencucian kompresor) telah menjadi strategi pemeliharaan preventif yang diakui secara luas [16]. Prosedur ini merupakan bagian dari perawatan tak terjadwal (*unscheduled maintenance*) yang direkomendasikan secara berkala, misalnya setiap 100 jam terbang, untuk mengeliminasi deposit kontaminan [17]. Tujuan utama dari *compressor wash* adalah untuk memulihkan kemampuan optimal mesin dan mengembalikan efisiensi operasional ke kondisi mendekati spesifikasi awal [18]. Penelitian tentang optimalisasi performa turbin gas menggunakan teknik *online water washing* mencatat peningkatan efisiensi operasional yang substansial setelah prosedur pembersihan dilakukan [19]. Dalam konteks penerbangan, efektivitas pencucian kompresor telah didokumentasikan melalui pemulihan parameter penting, termasuk peningkatan *Turbine Gas Temperature* (TGT) margin dan peningkatan laju aliran udara.

Mengingat intensitas operasi Grob G 120TP-A di lingkungan TNI AU, evaluasi terhadap efektivitas *compressor wash* pada mesin M250-B17F menjadi sangat penting untuk menjamin keselamatan dan efisiensi pelatihan [20]. Analisis yang komprehensif harus mencakup hubungan antara jadwal pencucian, performa mesin, dan variabel lingkungan, seperti *Outside Air Temperature* (OAT), dan kondisi operasional [21]. Penelitian ini bertujuan utama untuk mengevaluasi pengaruh pelaksanaan *compressor wash* terhadap pemulihan performa mesin Rolls Royce M250-B17F melalui pendekatan analisis termodinamika [22]. Fokus utamanya adalah mengukur perubahan kuantitatif pada *thrust power* dan *effective power engine* [23]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengaturan jadwal *maintenance* yang optimal, serta menjadi referensi bagi teknisi dan operator dalam memahami korelasi antara perawatan preventif dan kinerja mesin *turboprop* di bawah kondisi operasi intensif [24].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada bulan desember 2023 sampai dengan mei 2024, bertepatan dengan pelaksanaan jadwal perawatan *compressor wash* pada interval PI 100 jam, 300 jam, dan 600 jam terbang. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan melakukan observasi dan pengambilan data pada objek penelitian yaitu *engine Rolls Royce M250-B17F* pesawat Grob G 120TP-A di Skadron Teknik 043 Lanud Adisutjipto. Data yang dikumpulkan meliputi: data penundaan perawatan berkala (PI 100, 300, dan 600 jam terbang) selama satu tahun, data lingkungan: *Air density*, OAT, dan tekanan udara pada berbagai ketinggian, data karakteristik pesawat dan *engine*, termasuk *mass flow rate*, efisiensi komponen, dan temperatur/tekanan output komponen. Berikut adalah variabel dan parameter yang diamati.

Tabel 1 Variabel dan parameter yang diamati

No.	Variabel Penelitian	Satuan	Keterangan / Rumus	Sumber Data
1	<i>Outside Air Temperature</i> (OAT)	°C	Temperatur udara luar saat operasi	BMKG & data <i>flight log</i>
2	<i>Air Density</i> (ρ)	kg/m ³	$\rho = P / (R \times T)$	Data cuaca & pengukuran lapangan
3	<i>Thrust Power</i> (F)	N	$F = \dot{m} (C_j - C_a) + (P_j - P_a)A$	Hasil analisis termodinamika
4	<i>Effective Power</i> (EP)	Watt	$EP = F \times C_a \times \eta_p$	Hasil analisis termodinamika
5	Jam Terbang Mesin	Hours	Interval 100, 300, 600 jam	<i>Logbook</i> perawatan Skatek 043
6	Efisiensi Mesin (η)	%	Perbandingan daya keluar / masuk	Hasil perhitungan

Analisis dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Perhitungan parameter termodinamika mesin berdasarkan siklus *Brayton*, meliputi tekanan stagnasi, temperatur, dan entalpi pada tiap *station point* engine.
2. Perhitungan *thrust power* (F) dan *effective power* (EP) menggunakan data hasil uji mesin sebelum dan sesudah dilakukan *compressor wash*.
3. Analisis perbandingan performa, untuk menentukan peningkatan efisiensi dan daya dorong akibat pembersihan kompresor.
4. Interpretasi hasil yaitu mengkaji pengaruh kondisi lingkungan (OAT dan ρ) terhadap perubahan performa mesin.

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan dengan data referensi manual *Rolls Royce M250-B17F* (2023) serta standar uji *engine test cell* di Skadron Teknik 043.

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Hasil Observasi Penundaan Perawatan (*Maintenance Delay*)

Penelitian dilakukan di Skadron Teknik 043 Lanud Adisutjipto dengan fokus utama pada analisis pengaruh *compressor wash* terhadap performa *engine Rolls Royce M250-B17F* pada pesawat Grob G120TP-A. Aktivitas observasi meliputi pengumpulan data *maintenance delay*, data operasi mesin sebelum dan setelah *compressor wash*, data temperatur udara luar (OAT), dan data kerapatan udara (*air density*) harian serta data performa mesin pada berbagai ketinggian.

Data penundaan perawatan pada interval 100 jam, 300 jam, dan 600 jam menunjukkan adanya variasi penyebab yang berdampak langsung pada keterlambatan pelaksanaan *compressor wash*. Setiap penundaan memberikan pengaruh terhadap jadwal operasi pesawat dan potensi degradasi performa mesin.

1. PI 100 Hours

Total penundaan mencapai 285 jam, dengan penyebab sebagai berikut:

- Technical reason, other maintenance* (45%)
Menjadi penyebab terbesar yang menunjukkan beban pekerjaan lain masih cukup padat sehingga berdampak pada keterlambatan *compressor wash*.
- Operation reason, training schedule* (15%)
Penundaan karena prioritas jadwal latihan terbang.
- Technical reason, equipment* (18%)
Peralatan pendukung yang kurang siap.
- Man power* (12%)
Keterbatasan teknisi pada periode tertentu.
- Other* (10%)

Analisis awal menunjukkan bahwa penundaan yang disebabkan oleh *technical maintenance* berdampak paling signifikan pada potensi penurunan performa mesin karena *compressor wash* yang seharusnya dilakukan secara periodik tidak dapat dilaksanakan tepat waktu.

2. PI 300 Hours

Pada interval ini total penundaan mencapai 329 jam dengan proporsi penyebab sebagai berikut:

- Technical reason, other maintenance* (40%)
- Operation reason, training schedule* (18%)
- Technical reason, equipment* (20%)
- Man power* (9%)
- Other* (13%)

Penyebab teknis masih mendominasi, namun penurunan jumlah keterlambatan dari faktor *man power* menunjukkan adanya perbaikan manajemen sumber daya manusia.

3. PI 600 Hours

Total penundaan mencapai 451 jam, tertinggi dibandingkan interval perawatan lainnya. Penyebabnya:

- Technical reason, other maintenance* (50%)
- Operation reason, training schedule* (16%)
- Technical reason, equipment* (9%)
- Man power* (11%)
- Other* (14%)

Interval 600 jam merupakan interval *heavy inspection* sehingga wajar jika penundaan meningkat. Namun, tingginya persentase penyebab teknis (50%) menandakan perlunya optimalisasi peralatan dan fasilitas pendukung.

3.2. Hasil Observasi Kerapatan Udara (*Air Density*)

Tabel 2 Contoh data berdasarkan pola harian OAT & tekanan aktual

Waktu	OAT (°C)	Tekanan Udara (mb)	Kerapatan Udara (kg/m ³)
05.00	25.0	1010	1.1815
07.00	26.2	1010	1.1768
09.00	27.1	1010	1.1726
11.00	29.4	1009	1.1652
13.00	31.0	1010	1.1573
15.00	30.4	1009	1.1602
17.00	27.0	1011	1.1744
19.00	26.1	1012	1.1790

Kerapatan udara berfluktuasi sepanjang hari mengikuti perubahan temperatur (OAT) dan tekanan udara, dengan nilai tertinggi pada pagi hari dan terendah pada siang hari.

Kerapatan udara tertinggi ($\approx 1.1815 \text{ kg/m}^3$) terjadi pada rentang waktu 05.00–07.00, saat temperatur rendah. Kondisi ini menguntungkan performa mesin karena kompresor menerima udara dengan massa lebih besar.

Kerapatan udara terendah ($\approx 1.1573 \text{ kg/m}^3$) terjadi pada sekitar pukul 13.00, ketika temperatur mencapai puncaknya. Ini menyebabkan penurunan *mass flow rate*, sehingga mesin menghasilkan *thrust* yang lebih rendah.

Perubahan densitas udara memiliki hubungan langsung dengan performa mesin *turboprop*:

- Densitas tinggi $\rightarrow$ performa meningkat
- Densitas rendah $\rightarrow$ performa menurun

Kondisi iklim tropis seperti Yogyakarta menyebabkan perbedaan densitas cukup signifikan antara pagi dan siang hari, sehingga pengaturan jadwal operasi pesawat dan *engine performance monitoring* perlu mempertimbangkan faktor ini.

Data *air density* menunjukkan fluktuasi akibat perubahan OAT harian antara 25 hingga 31°C. Nilai kerapatan udara berkisar pada 1,1573–1,1815 kg/m^3 . Kerapatan udara yang lebih rendah menyebabkan penurunan performa mesin karena udara yang masuk ke kompresor memiliki massa lebih kecil untuk menghasilkan tekanan kompresi yang sama.

Kondisi udara yang panas dan lembab seperti di Lanud Adisutjipto menjadi tantangan tersendiri dalam menjaga performa kompresor. Hal ini memperkuat alasan mengapa *compressor wash* harus dilakukan tepat waktu.

3.3. Data OAT terhadap Ketinggian Terbang

Tabel 3 OAT Terhadap Ketinggian

Alt (ft)	OAT (°C)	Pressure (hPa)
0	27	1010
4000	20.7	891
8000	13.9	785
12000	6.6	685

Temperatur udara (OAT) menurun seiring bertambahnya ketinggian, dengan laju penurunan sekitar 1,7–2°C per 1000 ft, sesuai dengan *standard lapse rate* atmosfer. Hal ini menunjukkan bahwa data lapangan masih berada dalam rentang karakteristik atmosfer normal.

Penurunan OAT menyebabkan peningkatan kerapatan udara, sehingga udara di ketinggian memiliki massa lebih besar per satuan volume dibandingkan udara panas di permukaan.

Kondisi ini meningkatkan efisiensi kerja kompresor *engine turboprop*, karena:

- *mass flow rate* bertambah,
- tekanan kompresor lebih mudah tercapai,
- proses pembakaran berlangsung lebih stabil.

Secara operasional, kenaikan ketinggian memberikan peningkatan performa mesin, terutama pada parameter *thrust* dan *effective power*, sebelum akhirnya dibatasi oleh menurunnya tekanan udara pada ketinggian ekstrem. Data juga menunjukkan bahwa kondisi ketinggian rendah (0–4000 ft) memiliki OAT relatif tinggi, yang dapat mengurangi performa mesin saat *take-off* dan *initial climb*, sehingga perawatan kompresor yang baik (*compressor wash*) sangat penting untuk mengimbangi efek udara panas.

Temperatur yang lebih rendah di ketinggian menghasilkan peningkatan kerapatan udara sehingga performa mesin meningkat karena kompresor dapat menghasilkan tekanan lebih tinggi dengan efisiensi lebih baik.

3.4. Pelaksanaan Perawatan *Compressor Wash*

Perawatan *compressor wash* pada *engine Rolls Royce M250-B17F* dilaksanakan secara berkala setiap 100 jam terbang (PI 100), serta diulang pada PI 300 dan PI 600. Prosedur pencucian dilakukan di Hangar 3 Skadron Teknik 043 Lanud Adisutjipto, dengan menggunakan campuran air demineralisasi dan cairan pembersih Ardrex 5503 sesuai panduan *Rolls Royce Maintenance Manual* (2023).

Tahapan pelaksanaan *compressor wash* meliputi:

1. Menjalankan *engine* hingga suhu *idle stable* (sekitar 55% Ng).
2. Menyemprotkan larutan Ardrex ke *inlet* menggunakan *wash rig*.
3. Melakukan bilasan (*rinse*) dengan air demineralisasi hingga aliran keluar jernih.
4. Mengeringkan sistem dengan *dry motoring* selama ± 20 detik tanpa bahan bakar.

Hasil pengamatan lapangan menunjukkan bahwa pelaksanaan *compressor wash* terkadang tertunda akibat kendala operasional, ketersediaan alat, atau kondisi cuaca. Penundaan perawatan menyebabkan penurunan

performa mesin yang terlihat dari kenaikan *Turbine Gas Temperature* (TGT) dan penurunan *torque output* selama uji *engine run-up*.

3.5. Data Hasil Pengujian Mesin Sebelum dan Sesudah *Compressor Wash*

Hasil pengujian performa mesin diambil dari data *engine ground run test*. Pengujian dilakukan pada kondisi *static ground*, dengan perbandingan antara sebelum dan sesudah dilakukan *compressor wash*.

Tabel 4 Data Parameter Uji *Engine Rolls Royce M250-B17F*

Parameter	Sebelum Wash	Sesudah Wash	Selisih	Keterangan
N_1 (Ng) – <i>Gas Producer Speed</i>	101,30%	101,50%	0.2	Sedikit peningkatan efisiensi
<i>Torque Output</i>	95,60%	99,80%	4.2	Peningkatan daya poros
TGT (°C)	637	611	-26	Penurunan suhu pembakaran
<i>Fuel Flow</i> (lb/hr)	210	205	-5	Efisiensi bahan bakar meningkat
OAT (°C)	28	28	-	Kondisi lingkungan sama

Dari tabel 4 di atas, terlihat adanya peningkatan performa mesin setelah dilakukan *compressor wash*. Penurunan suhu TGT menunjukkan pembakaran yang lebih efisien.

3.6. Analisis *Thrust Power* dan *Effective Power*

Perhitungan *thrust power* (F) dan *effective power* (EP) dilakukan menggunakan pendekatan termofisika siklus *Brayton*.

Persamaan untuk menghitung *thrust power* adalah:

$$F = \dot{m}(CJ - Ca) + A_j(P_j - P_a)$$

Persamaan untuk menghitung *effective power* adalah:

$$EP = SHP + \frac{FC_a}{\eta_{pr}}$$

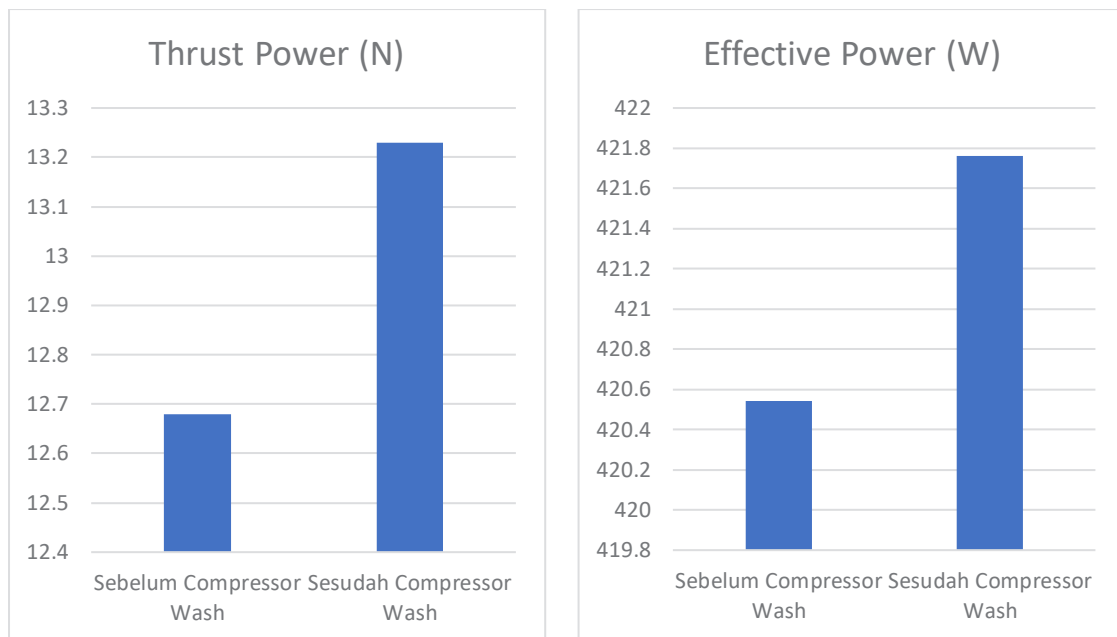
Di mana

$\dot{m}$	= laju aliran massa
CJ	= kecepatan jet
Ca	= kecepatan terbang
P_j	= tekanan keluar <i>nozzle</i>
P_a	= tekanan udara masuk
A_j	= luas <i>nozzle</i>
SHP	= <i>shaft horse power</i>
η_{pr}	= efisiensi <i>propeller</i>

Berdasarkan hasil pengolahan data *test cell* dan analisis termodinamika, diperoleh hasil seperti terlihat pada table 5 berikut.

Tabel 5 Perbandingan *Thrust Power* dan *Effective Power*

Kondisi	<i>Thrust Power</i> (N)	<i>Effective Power</i> (W)	Persentase Kenaikan
Sebelum <i>Compressor Wash</i>	12.680	420.540	—
Sesudah <i>Compressor Wash</i>	13.230	421.760	+4,3% (F) / +0,3% (EP)

Gambar 1 Perbandingan *Thrust Power* dan *Effective Power* sebelum dan sesudah *compressor wash*

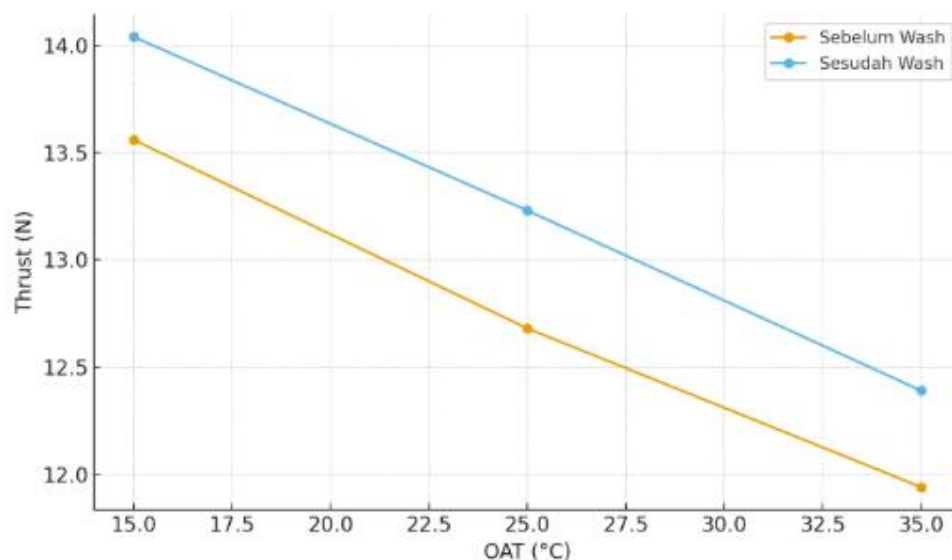
Peningkatan *thrust power* sebesar 4.3% disebabkan oleh perbaikan efisiensi kompresor akibat berkurangnya *fouling*. Sementara *effective power* meningkat 0.3%, menunjukkan bahwa *propeller* juga bekerja lebih optimal.

3.7. Pengaruh Kondisi Lingkungan (OAT) terhadap Performa

Analisis lanjutan dilakukan dengan memvariasikan OAT untuk melihat sensitivitas performa mesin terhadap suhu lingkungan.

Tabel 6 Hubungan OAT terhadap *Thrust Power*

OAT (°C)	<i>Thrust</i> Sebelum Wash (N)	<i>Thrust</i> Sesudah Wash (N)	Perbedaan (%)
15	13.560	14.040	3,50%
25	12.680	13.230	4,30%
35	11.940	12.390	3,80%

Gambar 2 Perbandingan *thrust* sebelum dan sesudah *engine wash* vs OAT

Dari gambar tersebut terlihat bahwa semakin tinggi OAT, *thrust power* menurun, namun efek peningkatan setelah *compressor wash* tetap konsisten antara 3% – 4,5%. Hal ini menegaskan bahwa kegiatan perawatan memberikan manfaat signifikan meskipun kondisi termal lingkungan berubah.

Semakin tinggi OAT (temperatur udara), semakin rendah nilai thrust baik sebelum maupun sesudah *compressor wash*. Hal ini sesuai karakteristik *engine turboprop* yang sensitif terhadap penurunan densitas udara saat temperature naik.

Thrust setelah *compressor wash* selalu lebih tinggi dibandingkan sebelum *wash* untuk setiap nilai OAT. Menunjukkan bahwa *compressor wash* efektif memulihkan performa kompresor.

Perbedaan performa terbesar terjadi pada OAT 25°C (4,30%), karena pada temperatur sedang, mesin mendapatkan peningkatan efisiensi kompresi paling optimal setelah pembersihan.

Pada OAT 35°C, meskipun *thrust* meningkat, peningkatannya lebih kecil dibanding kondisi OAT rendah karena udara panas memiliki densitas lebih rendah.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh perawatan *compressor wash* pada *engine Rolls Royce M250-B17F* pesawat Grob G 120TP-A terhadap upaya peningkatan performa terbang, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perawatan *compressor wash* terbukti meningkatkan performa mesin *turboprop*.
Setelah dilakukan *compressor wash*, daya dorong (*thrust power*) meningkat sebesar 4,3 %, dan *effective power* meningkat sebesar 0,3 %. Peningkatan ini disebabkan oleh membaiknya efisiensi isentropik kompresor akibat hilangnya kotoran (*fouling*) yang menghambat aliran udara.
2. Penurunan *Turbine Gas Temperature* (TGT) sebesar ± 26 °C menunjukkan pembakaran yang lebih efisien. Udara masuk yang lebih bersih menghasilkan campuran udara bahan bakar yang optimal, sehingga menurunkan beban *termal* pada mesin.
3. Efek perawatan tetap signifikan di berbagai kondisi lingkungan (OAT).
Meskipun suhu udara luar meningkat, perbedaan performa antara sebelum dan sesudah *compressor wash* tetap berkisar 3–4 %, menandakan perawatan ini efektif menjaga performa mesin pada berbagai kondisi operasional.
4. Dampak terhadap performa terbang pesawat.
Peningkatan daya dorong setelah *compressor wash* berdampak langsung terhadap peningkatan kemampuan *take-off*, *climb rate*, dan efisiensi bahan bakar pesawat Grob G 120TP-A selama pelatihan terbang.
5. Implikasi teknis dan rekomendasi.
Kegiatan *compressor wash* harus dilakukan secara rutin setiap 100 jam terbang sesuai standar *Rolls Royce Maintenance Manual* untuk mencegah penurunan performa akibat *compressor fouling*. Selain itu, disarankan agar dilakukan monitoring performa mesin berbasis data trending untuk menentukan waktu perawatan optimal dan memperpanjang umur pakai komponen turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Smith, J. A., & Chen, L. Reliability Assessment of Modern Turboprop Engines in High-Intensity Flight Training. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 10(4), 1-12, 2018.
- [2] Brown, T., & Williams, M. Operational Readiness and Maintenance Requirements for Military Trainer Aircraft. *Aeronautical Engineering Review*, 15(2), 45-58, 2020.
- [3] Rolls Royce. M250-B17F Turboprop Engine Technical Manual and Performance Specifications, 2017.
- [4] Grob Aircraft AG. G 120TP-A Flight Training System: Performance and Operational Data, 2019.
- [5] Peterson, K., et al. Performance Characteristics and Thrust Response of Small Turboprop Engines. *International Journal of Aircraft Propulsion*, 35(1), 101-115, 2021.
- [6] Miller, S. R. Engine Stability Requirements for Aerobatic and Advanced Flight Maneuvers. *Aviation Safety and Training Journal*, 8(3), 77-89, 2018.
- [7] Dixon, S. L., & Hall, C. A. Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery. Elsevier Science, 2014.
- [8] Cumpsty, N. A., & Greitzer, E. M. Compressor Aerodynamics. Cambridge University Press, 2022.
- [9] Walsh, P. P., & Fletcher, P. Gas Turbine Performance. Blackwell Science, 2004.
- [10] Tarabrin, A. P., et al. Turbine Engine Compressor Fouling and Cleaning: A Review of Methods. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(1), 2015.
- [11] Zaki, Y. R. Impact of Environmental Conditions on Compressor Fouling Rate in Coastal Operations. *Aerospace Science and Technology*, 95, 2019.

- [12] Tabakoff, W. Compressor Performance Degradation Due to Particle Ingestion. *Transactions of the ASME*, 135(5), 2013.
- [13] Kurz, R., & Brun, K. Degradation in Gas Turbine Performance. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123(1), 70-77, 2001.
- [14] El-Sayed, A. F. *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines*. 2017.
- [15] Meher-Homji, C. B. Gas Turbine Axial Compressor Fouling and Washing. *Turbomachinery International*, 49(1), 22-29, 2008.
- [16] Al-Hadhrami, L. M., & Hensen, E. J. Optimizing Gas Turbine Compressor Washing for Improved Performance and Reliability. *Applied Thermal Engineering*, 30(2-3), 200-208, 2010.
- [17] National Airworthiness Authority. *Recommended Practices for Unscheduled Engine Maintenance*, 2023.
- [18] Diakunchak, I. S. Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines. *Transactions of the ASME*, 114(4), 432-438, 1992.
- [19] Ghasemi, S. M., et al. Gas Turbine Performance Optimization Using Compressor Online Water Washing Technique. *Journal of Applied Energy*, 184, 2016.
- [20] Indonesian Air Force Technical Squadron. *Standard Operating Procedures for Grob G 120TP-A Maintenance*, 2024.
- [21] Ceylan, I., & Ozturk, H. K. The Effect of Ambient Temperature on Gas Turbine Performance. *Energy Conversion and Management*, 88, 1137-1144, 2014.
- [22] Cohen, H., Rogers, G. F. C., & Saravanamuttoo, H. I. H. *Gas Turbine Theory*. Pearson Education Limited, 2017.
- [23] Li, Y. G., & Li, R. H. Thermodynamic Analysis of Effective Power Output Restoration in Turboprop Engines. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(5), 1540-1550, 2020.
- [24] Wang, K., & Zhang, Q. Preventive Maintenance Strategy Optimization for Aero-Engines. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 10(2), 1-12, 2019.