

Analisis Pengaruh Rotor Clearance pada High Pressure Compressor dan High Pressure Turbine Terhadap Exhaust Gas Temperature Margin pada Mesin CFM56-3C1

Fikri Aulia Izzatur Rahim¹

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana Jakarta
Jl. Meruya Selatan No. 1, Kembangan, Jakarta Barat 11650, Indonesia

E-mail: fikriaultur29.fa@gmail.com

Abstrak-- Mesin pesawat berperan untuk memberikan gaya dorong untuk pesawat dan harus selalu diperiksa performanya dengan memperhatikan parameter-parameter mesin dan melakukan pemeliharaan untuk menjaga kondisi pesawat laik terbang. Parameter yang paling penting dari engine adalah Exhaust Gas Temperature Margin (EGTM) yang merupakan selisih antara batas maksimum suhu pada mesin dengan suhu aktual yang terbaca pada saat take-off. Faktor yang mempengaruhi EGT Margin salah satunya adalah clearance atau jarak antara rotor pada high pressure compressor dengan compressor case dan jarak rotor pada high pressure turbine dengan turbine shroud yang dapat menyebabkan penurunan nilai EGT Margin atau disebut EGT Effect. Penurunan EGT Margin yang dipengaruhi rotor clearance dapat dihitung dari pengukuran aktual clearance dikurangi dengan ukuran clearance minimum yang telah ditetapkan pabrik dan dikalikan dengan nilai EGT Effect per mils/microinch dari setiap stage. Dari perhitungan didapatkan nilai penurunan EGT Margin pada HPT sebesar 7,4332 °C dan penurunan nilai EGT Margin pada HPC adalah 7.792785 °C dengan total penurunan nilai EGT Margin akibat clearance pada HPC dan HPT adalah 15,225985 °C atau berkontribusi sebesar 58,1% terhadap penurunan nilai EGT Margin sejak perbaikan mesin yang terakhir.

Kata kunci: Rotor Clearance, Exhaust Gas Temperature Margin, CFM56-3C1

Abstract-- Aircraft engines provide thrust for the aircraft and the engine shall always be checked for performance by paying attention to engine parameters and performe maintenance to maintain the condition of the aircraft. The most important parameter of the engine is exhaust gas temperature margin (EGTM) which is the difference between the maximum temperature limit on the engine (redline) and the actual temperature read at the time of take-off. One of the factors that affect EGT Margin is the clearance or distance between the rotor on the high-pressure compressor with the compressor case which can cause a decrease in the value of EGT Margin or called the EGT Effect. The margin affected by rotor clearance can be calculated from the actual clearance measurement minus the minimum clearance size that the factory has set and multiplied by the EGT Effect value per mils/microinch of each stage. From these calculations, we can identify the correlation of how much clearance effect has on the EGT Margin deterioration. From the calculation, the decrease in EGT Margin value on HPT is 7.4332 °C and the decrease in EGT Margin value on HPC is 7.792785 °C with a total decrease in EGT Margin value due to clearance on HPC and HPT is 15.225985 °C or contributes 58.1 % of the decrease in the value of EGT Margin since the last engine repair.

Keywords: Rotor Clearance, Exhaust Gas Temperature Margin, CFM56-3C1

1. PENDAHULUAN

Salah satu jenis pesawat komersil yang digunakan saat ini adalah pesawat boeing 737-500 yang menggunakan mesin CFM56-3C1. Engine harus selalu diperiksa performanya di bengkel pesawat atau *Maintenance, Repair and Overhaul* (MRO) dengan memperhatikan parameter-parameter engine. Parameter yang paling penting dari engine adalah Exhaust Gas Temperature Margin (EGTM) yang merupakan selisih antara batas maksimum suhu pada engine dengan suhu

aktual yang terbaca pada saat *take-off* [3]. Performa engine dikatakan bagus apabila EGTM memiliki nilai positif yang memiliki arti suhu berada di bawah *redline* atau batas maksimum. Nilai EGT Margin yang melebihi batas dapat merusak struktur engine dan membahayakan pesawat pada saat beroperasi. Nilai EGT Margin dapat mengindikasikan umur dari engine. Tingkat penurunan EGTM perlu untuk dimonitor dengan parameter umur mesin yang dapat diketahui dari *Time Since Last Shop Visit* (TSLSV) dan *Cycle Since Last Shop Visit*

(CSLSV) yang merupakan umur mesin sejak melakukan perbaikan terakhir.

Pada mesin CFM56-3C1 dengan *serial number* 856745 dilakukan tes untuk mengetahui kondisi performa *engine* yang hasilnya menunjukkan bahwa *engine* memiliki nilai EGT *Margin* sebesar $-10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan perlu dilakukan perbaikan performa EGT *margin* dengan melaksanakan perbaikan pada tingkat *performance workscope* yaitu perbaikan pada *Core Module* yang terdiri dari perbaikan *High Pressure Compressor* (HPC) dan *High Pressure Turbine* (HPT).

Faktor yang mempengaruhi EGT *Margin* pada *Core Module* adalah *clearance* atau jarak antara *rotor* pada HPC dengan *Compressor case* dan jarak *rotor clearance* pada HPT dengan *HPT Shroud* [1]. *Clearance* yang tidak optimal akan menyebabkan penurunan nilai EGT *Margin*. Maka dari itu, pengaruh *clearance rotor* pada *High Pressure Compressor* dan *clearance* pada *High Pressure Turbine* terhadap EGT *Margin* perlu untuk dilakukan dianalisis.

2. METODOLOGI

Metode penelitian yang digunakan adalah metode analisis perhitungan. Terdapat 5 tahapan untuk proses penyelesaian yaitu :

- Studi literatur,
- Pengambilan data penurunan nilai EGTM mesin *serial number* 856745,
- Pengambilan data *rotor clearance* HPC dan HPT,
- Analisis dan perhitungan EGT *Effect*,
- Pembahasan dan kesimpulan.

2.1 Pengambilan Data Penurunan Nilai EGT

Nilai *Exhaust Gas Temperature* (EGT) dimonitor atau diketahui nilainya dengan cara melakukan pengujian pada *Test Cell* yang dilakukan dengan cara mengoperasikan *engine* hingga kecepatan maksimal. Pengujian dilakukan pada kecepatan maksimal untuk mengetahui nilai EGT maksimal yang terjadi pada saat *take-off* atau lepas landas yang merupakan fase tertinggi atau kecepatan tertinggi dari pengoperasian *engine* dikarenakan pada fase *take-off* membutuhkan 100% daya.

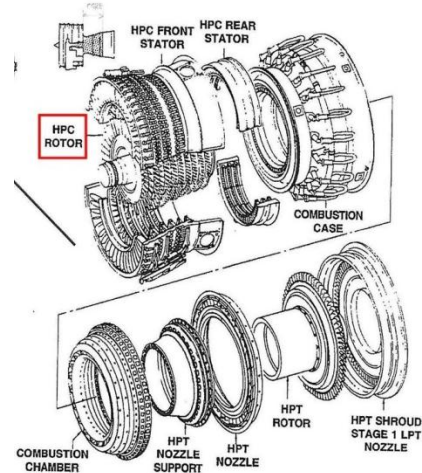
Data umur mesin EGT dilakukan analisa berapa lama jam terbang dengan parameter *TSLSV* (*Time Since Last Shop Visit*) dan *cycle* mesin dengan parameter *CSLSV* (*Cycle Since Last Shop Visit*) yang telah dicapai sejak perbaikan atau *maintenance* terakhir dan sejak

memiliki nilai EGT positif hingga nilai EGT mendekati nol atau dibawah nol yang bernilai negatif.

2.2 Pengukuran Clearance

Pengambilan data dapat dilakukan dengan tahapan berikut :

- Pembongkaran *core major module*. Pada tahap ini, *core major module* dilepas dari *engine* dan dilakukan proses pembongkaran *core major module* menjadi 8 *submodule* yaitu yaitu HPC *rotor*, HPC *forward case*, HPC *rear case*, *combustion chamber*, HPT *rotor*, HPT *shroud*, dan LPT *stage 1 nozzle*.



Gambar 1. Pembongkaran 8 Bagian HPC

- Pengukuran *compressor case* di CMM yang merupakan mesin yang dapat mengukur geometri dari objek dengan menggunakan sensor *probe* yang bergerak dan mengukur permukaan objek. HPC *forward case* diletakkan pada meja CMM untuk dilakukan pengukuran diameter di 24 titik pada setiap *stage*. Pengukuran *compressor case* dilakukan dengan cara mengukur diameter dalam untuk mencari nilai maksimal dan minimal dari diameter atau *radius flowpath*.
- Pengukuran panjang HPC dan HPT *rotor blade*. HPC dan HPT *rotor blade* diletakkan pada mesin *High Speed Grinding* untuk dilakukan pengukuran panjang HPC dan HPT *rotor blade* untuk mencari nilai aktual minimum dan maksimal dari panjang *rotor blade* yang akan digunakan untuk mendapatkan nilai *clearance* antara HPC *rotor* dan HPC *case* menggunakan sensor laser.
- Pengukuran diameter HPT *Shroud* dilakukan pada mesin CMM. Setelah data dimensi dari HPT *Shroud* didapatkan, maka dapat dilakukan perhitungan *clearance* HPT *rotor*

terhadap HPT *Shroud* atau disebut dimensi J05.

2.3 Perhitungan Data EGT Effect HPC

Untuk mencari EGT *Effect* dapat dihitung dengan rumus [1] :

$$EGT\ Effect\ HPC\ (^{\circ}C) = \frac{actual\ clearance - min\ clearance}{1000} \times (EGT\ Effect \times 1000) \tag{1}$$

Persamaan diatas merupakan rumus untuk mengetahui EGT *Effect* secara teoritis, dimana:

- Actual *clearance* adalah *clearance* yang didapat secara nyata setelah perhitungan nyata antara diameter stator dan rotor.
- 1000 penyesuaian satuan dari mils/microinch ke inch.
- EGT *Effect* °C adalah suhu yang berpengaruh dari setiap *stage clearance* yang telah ditentukan oleh manufaktur.

Tabel 1. EGT *Effect* HPC

HPC STAGE	EGT EFFECT (°C/Mils)
1	0.1323
2	0.0738
3	0.0828
4	0.1062
5	0.1008
6	0.1008
7	0.108
8	0.1179
9	0.1026
Throttling Impact	0.432

- Minimum *clearance* adalah angka atau nilai yang digunakan untuk penentuan target *clearance* dan telah ditentukan dalam *Engine Shop Manual* [18].

Tabel 2. Minimum *Clearance* HPC

HPC STAGE	Minimum Clearance Steel (in)
-----------	------------------------------

1	0.047
2	0.054
3	0.032
4	0.039
5	0.022
6	0.029
7	0.028
8	0.028
9	0.027

Throttling impact adalah penurunan EGT *margin* akibat perubahan aliran udara yang terjadi pada rotor *stage* 6 sampai *stage* 9 HPC akibat perubahan bentuk bilah *compressor* dari *variable blade* (*stage* 1-3) ke *fixed blade* *stage* 4-9 [19].

$$Throttling\ impact = (HPC\ stage\ 6\ to\ 9\ throttling\ impact \times 1000) \times \Delta\ average\ throttling\ impact \tag{2}$$

2.4 Perhitungan Data EGT Effect HPT

Perubahan atau selisih *clearance* HPT rotor dan HPT *Shroud* per 1 mils (0.001 in) dapat mengalami penurunan 1 °C. EGT *Effect* pada HPT dapat dihitung dengan persamaan [19] :

$$= \frac{(Recommended\ J05\ clearance - aktual\ J05)}{0.001\ in} \tag{3}$$

Dimana :

- *Recommended J05 clearance* yang ditetapkan oleh manufaktur (Gambar 2.10)
- Nilai aktual J05 adalah nilai *clearance* antara HPT rotor terhadap HPT *Shroud* hasil pengukuran.

Tabel 3. Rekomendasi *Clearance* HPT (J05)

Model	Recommended J05 Clearance
CFM56-3B1	0.080 in
CFM56-3B2	0.082 in
CFM56-3C1	0.082 in

2.5 Perhitungan Laju Keausan

Perhitungan laju keausan dihitung dengan rumus berikut :

$$\text{Laju keausan HPC/HPT} = \frac{\text{Average delta clearance HPC/HPT}}{\text{Fligh Hours}}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Mesin memiliki *Time Since Last Shop Visit* (TSLSV) atau waktu yang dihabiskan mesin saat digunakan terbang sejak perbaikan terakhir sebesar 2.143 *Flight Hour* dan telah menghabiskan *Cycle Since Last Shop Visit* (CSLSV) atau jumlah *cycle* terbang yang telah dicapai oleh mesin sejak perbaikan terakhir yaitu sebesar 1.986 *Flight Cycle*. Satu *cycle* terbang terhitung pada saat satu kali pesawat *take-off* dan *landing*.

Tingkat Penurunan EGTm terhadap TSLSV = $\frac{2.143 FH}{26.2 C} = 81,79 FH/^\circ C$

Tingkat Penurunan EGTm terhadap CSLSV = $\frac{1.986 FC}{26.2 C} = 75.8 FC/^\circ C$

Berdasarkan perhitungan, tingkat penurunan nilai EGT *Margin* adalah $1^\circ C/81,79 \text{ Flight Hours}$ dan $1^\circ C/75.8 \text{ Flight Cycle}$.

3.1 Perhitungan EGT Effect HPC

Actual clearance diketahui melalui pengurangan *clearance* antara radius *high pressure compressor rotor* dengan diameter stator radius atau *flow path* berdasarkan hasil pengukuran yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengukuran *Rotor* dan *Stator*

Stage	Aktual Stator		Aktual Rotor	
	Radius (inch)		Radius (Inch)	
	Min	Max	Min	Max
1	11.902	11.913	11.846	11.859
2	11.168	11.181	11.129	11.131
3	10.662	10.672	10.639	10.645
4	10.283	10.291	10.245	10.257
5	10.01	10.014	9.976	9.987
6	9.7446	9.74892	9.706	9.711
7	9.6228	9.62739	9.581	9.586

8	9.5467	9.54905	9.504	9.507
9	9.5189	9.5218	9.479	9.485

Pada Tabel 3, terdapat angka minimum yang merupakan terendah dari pengukuran, angka maksimum merupakan angka tertinggi dari pengukuran, selanjutnya mencari *average* yang merupakan nilai rata-rata dari hasil pengukuran nilai terendah dan tertinggi. Setelah mendapatkan nilai rata-rata, dilakukan perhitungan aktual *clearance* dapat diketahui melalui pengurangan antara nilai rata-rata *radius HPC rotor* dengan nilai rata-rata *radius HPC flowpath*.

Tabel 5. Aktual *Clearance* HPC

Stage	Aktual Clearance (inch)		
	Minimum	Maksimum	Rata-rata
1	0.056	0.054	0.055
2	0.039	0.05	0.0445
3	0.023	0.027	0.025
4	0.038	0.034	0.036
5	0.034	0.027	0.0305
6	0.03868	0.03792	0.0383
7	0.04185	0.04139	0.04162
8	0.04271	0.04205	0.04238
9	0.03991	0.0368	0.038355

Selanjutnya, lakukan perhitungan untuk mencari EGT *Effect* dari *stage* 1 sampai *stage* 9 menggunakan Persamaan (1).

Tabel 6. Perhitungan EGT *Effect* HPC

Stage	Delta Clearance (inch)	EGT Effect (mils)	EGT Loss (°C)
1	0.008	0.1323	1.0584
2	-0.0095	0.0738	In Range
3	-0.007	0.0828	In Range
4	-0.003	0.1062	In Range
5	0.0085	0.1008	0.8568
6	0.0093	0.1008	0.93744
7	0.01362	0.108	1.47096
8	0.01438	0.1179	1.695402
9	0.011355	0.1026	1.165023
		Total	6.125625

Selanjutnya menghitung EGT *Effect* dari

Throtting Impact menggunakan persamaan (2).

$$Throtting\ impact = (0.0038592 \times 1000) \times 0.432 = 1.66716\ ^\circ C$$

Total EGT *Effect* pada HPC adalah 7.79279 °C

3.2 Perhitungan EGT *Effect* HPT

Nilai EGT *Effect* dari HPC dapat dihitung menggunakan Persamaan (3), nilai rekomendasi J05 yang digunakan untuk tipe mesin CFM56-3C1 adalah 0,082. Nilai J05 aktual adalah nilai dimensi HPT *rotor* dan HPT *Shroud* hasil pengukuran, dapat dilihat pada Tabel 7.

Deskripsi	Nilai
Radius HPT <i>Shroud</i> Minimum	14,401025
Radius HPT <i>Shroud</i> Maksimum	14,408865
Average <i>Radius</i> HPT <i>Shroud</i>	14,404945
Radius <i>Minimum</i> HPT <i>Rotor</i>	14,311142
Radius Maksimum HPT <i>Rotor</i>	14,319882
Average <i>Radius</i> HPT <i>Rotor</i>	14,3155118

Nilai J05 aktual dapat dihitung dari pengurangan ukuran rata-rata radius HPT *Shroud* dengan rata-rata nilai HPT *rotor*, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$= Average\ Radius\ HPT\ Rotor - Average\ Radius\ HPT\ Shroud = 14,404945 - 14,3155118 = 0,0894332\ inch$$

Menghitung nilai EGT *Effect* untuk HPT dengan Persamaan (3) sebagai berikut :

$$EGT\ Effect\ HPT\ (^{\circ}C) = \frac{(0.082 - 0,0894332)}{0.001\ in} = -7,4332\ ^{\circ}C$$

3.3 EGT *Effect*

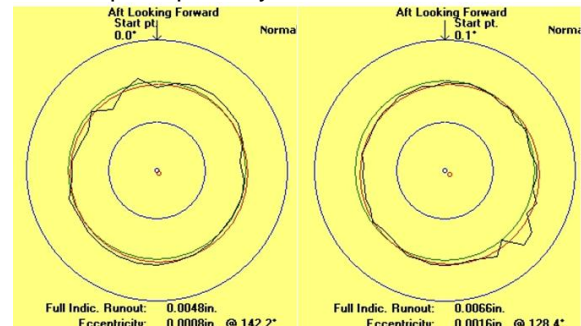
Menurut perhitungan EGT *Effect* pada HPC dan HPT, total penurunan nilai EGT *Margin* akibat *clearance* pada HPC dan HPT adalah 15,225985 °C atau berkontribusi sebesar 58,1% terhadap penurunan nilai EGT *Margin* sejak perbaikan mesin yang terakhir. Pada mesin CFM56-3C1 dengan *serial number* 856745 yang memiliki

EGTM sebesar -10.9 C telah mengalami penurunan nilai EGT *Margin* sebesar 26.2 °C sejak perbaikan terakhir yang memiliki EGTM 15.3 °C.

$$\begin{aligned} & \text{Total penurunan nilai EGT Margin,} \\ & = EGT\ Effect\ HPT + EGT\ Effect\ HPC \\ & = 7,4332 + 7.792785 \\ & = 15,225985\ ^{\circ}C \end{aligned}$$

Faktor utama dari naiknya *clearance* pada HPC dan HPT disebabkan oleh :

- Menurunnya kemampuan *hardware* seperti *airfoil erosion* yang dapat terjadi karena *blade* atau *rotor* mengalami korosi akibat terkena *temperature* tinggi secara berkelanjutan.
- Putaran mesin yang tidak stabil menyebabkan bilah bergesekan dengan *case*. Putaran mesin yang tidak stabil dapat diakibatkan oleh putaran awal mesin yang tidak konstan. Selain itu, dapat disebabkan oleh vibrasi atau getaran mesin akibat terjadi *unbalance* pada *rotor*.
- Pemasangan *rotor* tidak tepat saat proses pemasangan. Perlu dilakukan pengukuran keporosan untuk memastikan pemasangan *rotor* tepat ditengah sehingga *rotor* dapat berputar pada porosnya.



Gambar 2. Pengukuran *Eccentricity* *Rotor*

Dapat dilihat pada Gambar 2, bahwa hasil pengukuran keporosan terjadi pergeseran sumbu putar pada HPC sebesar 0,0008 in dari titik pusat dan pergeseran sumbu putar pada HPT sebesar 0.0016 inch. HPC dan HPT dihubungkan dengan *bolt* dan berputar pada poros yang sama. Dapat dilihat pada Tabel 5, hasil pengukuran *clearance* pada HPC menunjukkan kenaikan *clearance* dari stage 4 sampai stage 9 dan *clearance* pada HPT menunjukkan *clearance* yang lebih besar dari *clearance* HPC.

3.4 Laju Keausan dan Perbaikan Clearance

Clearance pada HPC dan HPT dapat diperbaiki dengan cara memperbaiki panjang ujung *airfoil* dengan las *Gas-Shielded Tungsten Arc Welding* untuk material *Titanium Alloy*. Terdapat limitasi penambahan panjang pada setiap *stage* sebagai berikut :

- Stage 1 HPC = 0 – 0.192 inch
- Stage 2 dan 3 HPC = 0 – 0.19 inch
- Stage 4-9 HPC = 0 – 0.175 inch

Tabel 8 Penambahan Panjang Blade

Stage	Limitasi Penambahan Panjang (inch)	Penambahan Panjang (Inch)
1	0 – 0.192	0.008
5	0 – 0.175	0.0085
6	0 – 0.175	0.0093
7	0 – 0.175	0.01362
8	0 – 0.175	0.01438
9	0 – 0.175	0.011355

Laju keausan HPC rotor pada setiap *stage* perlu dihitung untuk mencari tingkat keausan *blade* berdasarkan umur mesin atau jam terbang mesin dengan perhitungan sebagai berikut :

- Laju keausan HPC Rotor

$$= \frac{\text{Average delta clearance HPC}}{\text{Fligh Hours}}$$

$$= \frac{0.009406111}{2.143} = 0.0000043892 \text{ inch/hour}$$
- Laju keausan HPT Rotor

$$= \frac{\text{Average delta clearance HPT}}{\text{Fligh Hours}}$$

$$= \frac{0.0074332}{2.143} = 0.00000347 \text{ inch/hour}$$

Untuk menjaga *clearance rotor* pada HPC dan HPT dapat dilakukan dengan *boroscope inspection* setiap 1000 jam terbang sesuai rekomendasi CFMI.

3.5 Hubungan Efisiensi HPC Dan Rotor Clearance

Untuk mendapatkan hubungan antara rotor *clearance* dan efisiensi *compressor*, dilakukan perhitungan efisiensi *compressor* berdasarkan parameter hasil test yang didapat dari sensor mesin pada *test cell* sebagai berikut :

Tabel 9 Parameter Tes Mesin

Parameter mesin	Nilai
Y	1.4
T ₂ (TT25)	25 °C
T ₃ (TS3)	180.82 °C
P ₂ (PT25)	0.464 psig
P ₃ (PS3)	320 psig

- Efisiensi *compressor* [2]

$$\eta = \frac{T_2}{T_3 - T_2} \left[\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$\eta = \frac{25}{180.82 - 25} \left[\left(\frac{320 \text{ psig}}{0.464 \text{ psig}} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right]$$

$$\eta = 0.8798$$

Penurunan efisiensi dipengaruhi oleh kenaikan *temperature* pada *outlet compressor* akibat EGT *Effect* atau EGT *loss rotor clearance*. Parameter T₂ tidak mempengaruhi performa *compressor* karena parameter T₂ hanya dipengaruhi oleh *temperature inlet* dari udara atmosfer. Untuk mencari seberapa besar pengaruh *rotor clearance* pada *outlet compressor* T₃, perlu dihitung nilai T₃ teoritis dengan mengasumsikan efisiensi *compressor* adalah 100% dengan perhitungan sebagai berikut :

$$T_3 \text{ teoritis} = T_2 \left[1 + \frac{\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta} \right]$$

$$T_3 = 25 \left[1 + \frac{\left(\frac{320 \text{ psig}}{0.464 \text{ psig}} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1}{1} \right]$$

$$T_3 \text{ teoritis} = 162.1 \text{ °C}$$

Hasil perhitungan T₃ teoritis adalah 162.1°C yang menunjukkan perbedaan T₃ aktual hasil pengetesan dan T₃ teoritis sebesar 18.72 °C. Pada T₃ aktual menunjukkan *temperature* yang lebih tinggi yang dipengaruhi EGT *effect rotor clearance* dan mempengaruhi efisiensi dari

compressor. Selisih T_3 aktual hasil pengetesan dan T_3 teoritis sebesar 18.72 °C dapat dipengaruhi oleh kenaikan *temperature* pada *compressor* akibat *rotor clearance* sebesar 15,225985 °C, dan selisih 3,49 °C dapat dipengaruhi dari faktor lainnya.

Dari perhitungan efisiensi *compressor*, menunjukkan EGT *effect rotor clearance* mempengaruhi efisiensi dari *compressor* pada T_3 atau *temperature outlet compressor*. Parameter T_3 merupakan penjumlahan antara T_3 teoritis dan kenaikan temperatur akibat EGT *effect rotor clearance* yang dapat dihubungkan dengan rumus berikut :

$$\eta = \frac{T_2}{(T_3 \text{ teoritis} + \text{Total EGT effect}) - T_2} \times \left[\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$\eta = \frac{T_2}{\left(T_2 \left[1 + \frac{\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{1} \right] + (\text{Total EGT effect}) \right) - T_2} \times \left[\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

4. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan dan analisis yang telah dilakukan, telah didapatkan kesimpulan dari penelitian ini adalah :

1. Nilai EGT *Effect* dari *clearance high pressure compressor rotor* adalah 7.792785 °C. Nilai EGT *Effect* dari *clearance high pressure turbine* adalah 7,4332 °C. Total penurunan nilai EGT *Margin* akibat *clearance* pada HPC dan HPT adalah 15,225985 °C atau berkontribusi sebesar 58,1% terhadap penurunan nilai EGT *Margin*.
2. Terdapat hubungan antara *clearance* HPC dan *clearance* HPT yaitu semakin besar *clearance* pada HPC maka *clearance* pada HPT akan semakin besar akibat ketidaksesuaian *eccentricity* dari *rotor* HPC dan HPT.
3. Nilai EGT *Margin* pada mesin CFM56-3C1 *serial number* 856745 telah mengalami penurunan 26,3 °C sejak perbaikan mesin yang terakhir dengan tingkat penurunan EGT *Margin* adalah 1°C/81,79 *Flight Hours* dan 1°C/75.8 *Flight Cycle*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Darga, W. S. (2021, August 2). Analisis Pengaruh *High pressure Compressor Rotor Clearance*. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*. Dipetik April 12, 2022
- [2]. David Aubuchon, J. C. (2016). *CFM56-3 Turbofan Mesin*. Seneca College.
- [3]. Mainil, A. K. (2011). Analisa Kinerja Mesin Turbofan Cfm56-3. Universitas Bengkulu. Dipetik April 12, 2022.
- [4]. Muhammad Takdir, M. J. (2013). Analisis Pengaruh *Compressor Wash* Terhadap EGT. STT Adisutjipto Yogyakarta.
- [5]. Pramono, A. (2010). Analisis *Fatigue Life Cycle* Pada *High Pressure Turbine Nozzle* Terhadap *Exhaust Gas Temperature* Mesin CFM56-3. *Transmisi*, 6(1), 539-548.
- [6]. Hadi, S., Bakar, A., & Virdhawati, D. M. Evaluasi Validitas Rumus Performa Kompresor Mesin CFM56-3C PT. G Berdasarkan Data *Test Cell*. *Jurnal Industri Elektro dan Penerbangan*, 5(3).
- [7]. Peng, H. B., Dan, M., & Qu, H. C. (2011). *Research of Aero-Mesin Life Prediction Based on Take-Off EGTM*. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 99, pp. 286-292). Trans Tech Publications Ltd.
- [8]. Pandu Darmadi, S. (2010, Oktober 15). Pengembangan Metode Optimasi Interval Perawatan Mesin CFM56-3.
- [9]. Darmansah, D. (2022, Februari). Analisis Pengaruh HPC *Clearance*, HPT *Clearance*, Dan HPT *Nozzle Throat Area*.
- [10]. Nur, F. M. (2017, September 27). Analisis Degradasi EGT Margin, Mesin CFM56-3, Boeing 737-300, Boeing 737-400, Boeing 737-500.
- [11]. H. Balaghi Enalou. (2018). *Performance Improvement Of The CFM56-3 Aircraft Engine By Electric Power Transfer*.
- [12]. A., A. S. (t.thn). Pengujian Vibrasi Pada *Test Cell* Turbofan Engine Type Cfm 56-7b. Politeknik Negeri Semarang.
- [13]. Anggoro, P. Y. (2016). Studi Perhitungan Efektivitas *Derate Thrust Engine* CFM56-5B Pada Pesawat Airbus A320-200.
- [14]. Effiom, S. O. (2018). *Off-wing fleet maintenance study of a CFM56-3B turbofan engine: the propulsive engine of Boeing 737-300 civil aircraft*. Vol. 13 No. 1 (2018) .

- [15]. Pereira, B. C. (2015). *Numerical analysis of Flow around a fan blade of a CFM56-3*. Engenharia Aeronautica.
- [16]. Yafid Effendi, J. (2020). Analisis Aliran Udara *Fan Blade* Pada Mesin CFM56-7B Boeing 737-800NG Dengan *Computational Fluid Dynamic (Cfd)*. Vol 4, No 1 (2020) .
- [17]. Ridaura, J. A. R. (2014). *Correlation analysis between HPC blade chord and compressor efficiency for the CFM56-3*. Tecnico Lisboa.
- [18]. CFMI. (2021, December). *Engine Shop Manual CFM56-3*. Mycfmportal.com. Dipetik April 12, 2022.
- [19]. CFMI. (2018). *Workscope Planning Guide*.
- [20]. CFMI. (1993). *CFM56-3 Basic Mesin Training Manual*. Cincinnati, Ohio: CFMI. Dipetik April 12, 2022.
- [21]. Rolls-Royce. (1996). *The Jet Engine*. Derby: Rolls-Royce. Dipetik April 12, 2022