

## ANALISIS AIR MODE PADA EXHAUST GAS TEMPERATURE MARGIN TERHADAP HIGH PRESSURE COMPRESSOR CLEARANCE CONTROL MESIN TURBOFAN CFM 56-3C PESAWAT BOEING 737 CLASSIC DENGAN METODE FMEA

Ahmad Fauzi

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana Jakarta

E-mail: Ahmadfauzilq@gmail.com

**Abstrak--** Mesin pesawat merupakan bagian dimana sistem mesin turbin gas akan bekerja untuk mendapatkan gaya dorong pesawat. Agar tidak terjadi kegagalan mesin pada saat take-off perlu diperhatikan salah satu parameter kualitas mesin yakni Exhaust Gas Temperature (EGT). High EGT dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada part mesin pesawat serta mengancam keselamatan penerbangan. EGT sangat dipengaruhi oleh Exhaust gas temperature margin (EGTM) dalam menentukan kelaikan mesin tersebut untuk dapat beroperasi. Selain itu uji kelaikan mesin pesawat merupakan salah satu faktor penting dalam menentukan nilai EGTM. Peneliti menganalisa suatu mesin yang baru selesai dilakukan perbaikan overhaul, dengan keadaan semua part diganti baru tetapi pada saat uji kelaikan mengalami kenaikan nilai EGTM -29,6 dan turunnya tekanan pada saat kompresi sebesar 290 psig. Dalam penelitian ini FMEA dilakukan untuk melihat hipotesis yang mungkin terjadi pada saat terjadinya kegagalan sehingga didapatkan kerusakan pada High pressure turbine clearance control air tubing (HPTCC air tubing), Pneumatic system, High pressure compressor rear stator case (HPC rear stator case), High pressure compressor front stator case (HPC front stator case), dan High pressure compressor rotor blade (HPC rotor blade). Peneliti menganalisa air mode untuk mengetahui penyebab terjadinya kenaikan EGTM. Pada air mode, perhitungan ini memiliki 3 mode yaitu tested mode, nominal mode standard day dan nominal mode hot day, ketiga mode ini akan diperhitungkan, hasil kalkulasi dari air mode akan mengetahui nilai EGTM yang diperbolehkan. Komputer LX 2000 digunakan untuk memperoleh data perhitungan airmode. Hasil penelitian ini memberikan instruksi uji penerimaan dan kelaikan mesin dengan proses perhitungan air mode untuk mengetahui nilai EGTM terhadap standarisasi original equipment manufacturer (OEM) serta mengetahui penyebab kerusakan part pada mesin turbofan berdasarkan hasil FMEA akibat tingginya EGT yang dihitung dengan airmode.

**Kata kunci:** exhaust gas temperature margin, air mode, high pressure compressor clearance control

**Abstract--** The aircraft engine is the part where the gas turbine engine system will work to get the thrust of the aircraft. In order to avoid engine failure during take-off, it is necessary to pay attention to one of the engine quality parameters, namely the Exhaust Gas Temperature (EGT). High EGT can cause damage to aircraft engine parts and threaten flight safety. EGT depend on the Exhaust gas temperature margin (EGT) to determine the worthiness of the engine to operate. In addition, the aircraft engine worthiness test is an important factor in determining the EGTM value. Researchers analyzed a machine that had just finished overhauling repairs, with all parts replaced with new ones but during the worthiness test the EGTM value increased -29.6 and the pressure decreased during compression by 290 psig. In this study, FMEA was carried out to see hypotheses that might occur at the time of failure so that damage was obtained on High pressure turbine clearance control air tubing (HPTCC air tubing), Pneumatic system, High pressure compressor rear stator case (HPC rear stator case), High pressure compressor front stator case (HPC front stator case), and High pressure compressor rotor blade (HPC rotor blade). Researchers analyzed the air mode to determine the cause of the increase in EGTM. In air mode, this calculation has 3 modes, namely tested mode, nominal standard day mode and nominal hot day mode, these three modes will be taken into account, the

calculation results from air mode will know the allowed EGTM value. The LX 2000 take off test computer was used to obtain airmode calculation data. The results of this study provide instructions for acceptance and engine worthiness test with the air mode calculation process to determine the EGTM value against the original equipment manufacturer (OEM) standard and determine the cause of part damage to the turbofan engine based on the FMEA results due to the high EGT calculated by airmode.

**Keywords:** exhaust gas temperature margin, air mode, high pressure compressor clearance control

## 1. PENDAHULUAN

Exhaust gas temperature margin (EGTM) merupakan salah satu faktor yang menentukan performa mesin. Hasil EGTM merupakan hasil dari selisih EGT *redline* (908 °C) dikurangi suhu EGT *actual*. Performa mesin yang bagus adalah ketika memiliki nilai margin yang besar, selama pengoperasian mesin, EGTM bisa berkurang sampai 0 (nol). Begitu banyak faktor yang dapat mempengaruhi penurunan nilai EGTM, yaitu: menurunnya kemampuan (*distress*) *hardware* seperti *airfoil erosion*, kebocoran *seal*, dan peningkatan jarak antara ujung *blade* dan *shroud* (Darga et al, 2021).

EGTM dihitung berdasarkan perhitungan dari mode *air mode*. Pada *air mode*, perhitungan ini memiliki 3 mode yaitu *tested mode*, *nominal mode standard day* dan *nominal mode hot day*, ketiga mode ini akan diperhitungkan, hasil kalkulasi dari *air mode* akan mengetahui nilai EGTM yang diperbolehkan. Lalu peneliti menganalisa suatu mesin yang baru selesai dilakukan perbaikan *overhaul*, dengan keadaan semua part diganti baru tetapi pada saat pengetesan mengalami penurunan pressure 290 psig dan suhu EGT yang melebihi limit 937,6 °C sehingga nilai EGTM minus -29,6. Dalam penelitian ini FMEA dilakukan untuk melihat hipotesis yang mungkin terjadi pada saat terjadinya kegagalan. Kerusakan yang terjadi akibat *Scratch* pada *high pressure compressor front stator case* serta *erosion*, *crack & bending* pada *high pressure compressor rotor blade* yang berpengaruh kepada *high pressure compressor clearance control* merupakan hipotesis yang di dapatkan berdasarkan FMEA. Dengan demikian penelitian ini difokuskan mencari akar penyebab masalah dengan FMEA dengan menghitung *air mode* untuk mendapatkan besar suhu kontribusi terhadap nilai EGTM pada kondisi *take-off* sesuai standarisasi *original equipment manufacturer* (OEM) untuk lolos pengetesan.

### 1.1 Exhaust gas temperature

Prasetia (2020) mengatakan bahwa EGT adalah panas udara gas buang yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar pada *combustion chamber*. Pada kendaraan bermotor disebut sebagai panas knalpot mobil/motor. Nilai EGT pada mesin pesawat dapat dilihat pada cockpit pesawat dan nilai EGT diukur dengan sensor yaitu menggunakan termokopel. Termokopel merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengukur temperatur/suhu [3].

### 1.2 Exhaust gas temperature margin

Exhaust Gas Temperature Margin (EGTM) adalah selisih antara batas maksimum suhu pada engine (*redline*) dengan suhu aktual yang terbaca pada saat *take-off*. Performa engine dikatakan bagus apabila EGTM memiliki angka lebih dari nol atau memiliki selisih yang besar. Mesin baru biasanya memiliki nilai positif (+) tapi Seiring dengan beroperasinya engine, EGTM akan mengecil mendekati nol. Maka dari itu perawatan harus dilakukan agar EGTM tidak mendapatkan nilai minus (-) [4].

### 1.3 Air mode

Air mode merupakan sebuah sistem pendinginan pada saat uji kelaikan mesin yang berpengaruh kepada hasil EGTM. Perhitungan air mode akan menghasilkan mode-mode yang dapat menentukan lolos atau tidaknya sebuah mesin turbofan pada saat pengetesan dengan menghitung EGTM, air mode memiliki tiga mode, diantaranya ada *tested mode*, *nominal mode standard day* dan *nominal mode hot day*, ketiga mode ini memiliki parameter perhitungan yang berbeda-beda yang hasil akhirnya berupa nilai EGTM [5].

### 1.4 High pressure compressor clearance control

*High pressure compressor clearance control* merupakan jarak antara *HPC rotor blade* dengan *flowpath*. Clearance pada HPCCC ini berpengaruh pada tekanan yang terjadi di kompresor. Tekanan High pressure

compressor (HPC) memiliki nilai maksimum: 420 psig (pengukur 2895 kPa) dan minimum 300 psig (2068 kPa) merupakan tekanan normal yang diharapkan pada *maximum takeoff power* tekanan yang lebih rendah atau tinggi harus inspeksi lebih lanjut [6].

### 1.5 Jenis kerusakan pada mesin pesawat

#### a) Scratch

Goresan pada permukaan logam yang mengalami tegangan tinggi menyebabkan konsentrasi tegangan pada titik kerusakan dan dapat menyebabkan kegagalan pada bagian tersebut. bentuknya sedikit sobek atau pecah pada permukaan logam yang diakibatkan karena kontak sesaat dengan bahan asing [7].

#### b) Dent

Lekukan pada permukaan logam yang diakibatkan oleh objek yang terkena gaya. Permukaan di sekitar lekukan biasanya sedikit berlubang [7].

#### c) Erosi

Hilangnya permukaan logam oleh aksi mekanis benda asing yang akan membentuk seperti pasir atau pasir halus. Area yang terkikis akan kasar dan menipis [8]

#### d) Crack

Adalah respons fisik dalam material atau peralatan terhadap paparan berlebihan terhadap kondisi yang merusak. crack biasanya disebabkan oleh tegangan, dan dapat dengan mudah diperparah karena faktor lain seperti korosi, fatik atau tekanan tinggi [9]

#### e) Bending

Bending adalah suatu kerusakan yang diakibatkan oleh kombinasi dari kompresi dan ketegangan di sisi tikungan dan diregangkan di bagian luar tikungan. Akibatnya benda kerja mengalami pembengkokan [7].

### 1.6 Jenis kerusakan pada mesin pesawat

FMEA merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengidentifikasi dan menganalisa suatu kegagalan dan akibatnya untuk menghindari kegagalan tersebut (Hanif, 2015).

Menurut Yumaida (2011) FMEA adalah suatu metode evaluasi kemungkinan terjadinya sebuah kegagalan dari sebuah sistem, desain, proses atau service untuk dibuat langkah penanganannya. Pada penelitian ini penulis menggunakan metode FMEA untuk mencari suatu kegagalan dan akibat karena kenaikan EGTM yang dihitung dengan *air mode*.

## 2. METODOLOGI

### 1. Inspeksi

Penelitian dimulai dengan melakukan inspeksi pada mesin yang baru saja datang untuk diperbaiki, mesin CFM 56-3C tersebut oleh tim inspeksi akan dicari kerusakan apa saja yang sudah terjadi selama mesin tersebut beroperasi. Tujuannya untuk mengetahui kerusakan sebelum dilakukan proses *maintenance*.

### 2. Maintenance

Setelah dilakukannya inspeksi penelitian dilanjutkan dengan proses *maintenance* pada mesin CFM 56-3 proses *maintenance* yang dilakukan pada penelitian ini yaitu *overhaul* yang mengacu pada pemeriksaan mesin dan perbaikan atau perubahan yang dilakukan sebagai respons terhadap kondisi suatu sistem.

Overhaul merupakan satu-satunya proses yang dapat mengembalikan mesin ke kondisi yang baik. Karena overhaul melibatkan rekondisi, pemasangan kembali, pembangunan kembali, atau penggantian total suatu system system untuk mendapatkan performa mesin seperti baru.

### 3. Pengujian Takeoff

Peneliti melakukan studi kasus dengan melakukan pengujian mesin, langkah langkah yang dilakukan untuk mendapatkan data penunjang sebagai berikut :

- Preparation

Proses ini dilakukan dengan memasang mesin turbofan CFM 56-3C ke engine hardware kemudian dipasangkan juga alat keperluan testing lainnya seperti, adapter, bellmouth, cowl door.

- Functional test

Setelah dipasang pada engine hardware, selanjutnya melakukan functional test yaitu merupakan pengecekan sebelum melakukan operasional tes tujuannya untuk memastikan

mesin tersebut berfungsi dengan baik, tidak ada kebocoran, vibrasi, dan part yang tidak terpasang dengan sempurna pada mesin.

- Acceptance test

Setelah kondisi mesin sudah bagus dilanjutkan dengan operasional test atau Acceptance test, tahapannya akselerasi nanti di hold max cont 8 menit naik ke take off di hold 5 menit data diambil sebanyak banyaknya pada saat kondisi take off, setelah itu nanti akan dipilih data paling jelek untuk kemungkinan terburuknya. Pada penelitian ini difokuskan pengujian pada kondisi take off untuk mendapatkan hasil yang dicari. pengujian *takeoff* Merupakan kondisi ketika power lever berada pada posisi maksimum dan engine akan menghasilkan gaya dorong maksimum. Kondisi kerja ini terjadi ketika pesawat melakukan lepas landas. Engine hanya diperbolehkan berada pada kondisi ini selama kurang lebih 5 menit, pengujian *takeoff* menghitung beberapa parameter *air mode* seperti *core speed*, *fan speed*, *thrust* dan *exhaust gas temperature* untuk mendapat nilai EGTM, setelah itu hasil dari pengujian ini akan diambil sebagai data.

#### 4. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Setelah dilakukan pengujian dan didapatkan nilai EGTM negative, peneliti mencari akar penyebab masalah menggunakan metode FMEA, tujuannya agar peneliti mudah untuk mengidentifikasi dan memahami potensi kegagalan dan penyebab serta efek kegagalan pada sistem atau part dari mesin *turbofan* CFM 56-3C tersebut. Identifikasi masalah pada FMEA harus memuat akar penyebab yang jelas. Di dalamnya memuat asal-muasal masalah terjadi. Peneliti akan mencari sumber-sumber kerusakan dari FMEA untuk mendapatkan bahan identifikasi, dalam hal ini disimpulkan bahwa masalah yang terjadi ketika mesin baru selesai dilakukan perbaikan, dengan keadaan seluruh *part* diganti yang baru, saat melakukan pengujian kelaikan mesin di *test cell*, mesin mendapatkan hasil EGTM -29,6. Sebelum dilakukannya pembongkaran teknisi mengecek area-area yang berpengaruh terhadap kenaikan EGTM berdasarkan hasil dari metode FMEA. Kemudian didapatkan hasil berupa turunnya tekanan sebesar 290 psig, pressure pada kompresor

menggunakan prinsip dari efek venturi dimana pressure pada kompresor akan naik terus nilainya dikarenakan bentuk rotor dan stator pada compressor itu divergen dan kecepatan akan konstan karena rotor itu menambah kecepatan sedangkan stator itu mengurangi kecepatan sehingga membuat kecepatan naik turun yang akhirnya menjadi konstan.

Penelitian dilakukan untuk membuat suatu perhitungan EGTM dengan *air mode* yang hasil awalnya nanti dapat diidentifikasi untuk menyimpulkan kerusakan part yang baru dilakukan *maintenance*.

Peneliti menggunakan FMEA untuk mencari akar permasalahan yang terjadi akibat nilai EGTM yang tinggi, peneliti menemukan hipotesis penyebab terjadinya kenaikan nilai EGTM yang disebabkan karena beberapa komponen mengalami kebocoran (*leak*), keretakan (*crack*), goresan (*scratch*), erosi (*erosion*), bengkok (*bending*) diantaranya :

- a) *High pressure turbine clearance control air tubing* (HPTCC)
- b) *Pneumatic system*
- c) *High pressure compressor rear stator case* (HPC rear stator case)
- d) *High pressure compressor front stator case* (HPC front stator case)
- e) *High pressure compressor rotor blade* (HPC rotor blade)

#### 5. Studi Literatur

Jenis penelitian yang digunakan pada makalah ini adalah studi literatur. Metode studi literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat, serta mengelolah bahan penelitian. Pada penelitian ini penulis akan mencari berbagai sumber untuk mendapatkan data penunjang untuk mengembangkan aspek teoritis maupun aspek manfaat praktis. Buku dan jurnal diperlukan untuk memperkuat teori dan pembahasan mengenai exhaust gas temperature margin. Manual dari manufaktur atau engine shop manual diperlukan untuk mengetahui standar kelaikan exhaust gas temperature margin pada mesin turbofan CFM 56-3C.

#### 6. Hasil dan Pembahasan

Setelah dilakukan pengujian *takeoff* pada *testcell*, didapatkan data mengenai besarnya nilai *exhaust gas temperatur margin*. Dilakukan pencatatan mengenai hasil yang didapatkan setelah melakukan pengujian *takeoff* pada mesin CFM 56-3C. pencatatan dilakukan untuk mendapatkan data-data yang diperlukan untuk melihat proses selanjutnya, apakah lolos uji kelaikan mesin atau perlu dilakukan analisa terhadap kenaikan EGTM dari batas limit.

7. Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian dan didapatkan hasil dan pembahasan, kesimpulan mengenai kerusakan yang dianalis dengan FMEA kemudian dihitung dengan *air mode* untuk mendapatkan nilai EGTM tersebut kemudian ditulis dan menjadi laporan tugas akhir.

2.1 Alat dan Bahan

1. *Bellmouth*

*Bellmouth* digunakan untuk mengarahkan udara ke saluran masuk mesin turbin gas. Selain itu *Bellmouth* digunakan untuk membuat udara *streamline* pada saat masuk kedalam mesin.



Gambar 2.1 Bellmouth

2. *Fan Cowling*

*Fan Cowling* memberikan permukaan yang halus secara aerodinamis pada mesin, tempat pemasangan komponen dan aksesori, tempat melindungi komponen dan aksesori. Tempat pendingin komponen dan aksesori karena udara masuk dari *air intake cowl (bellmouth)* kedalam *fan cowling*.



Gambar 2.2 Fan Cowling

3. *Crane*

*Crane* adalah mesin yang digunakan untuk mengangkat dan memindahkan mesin *turbofan* CFM 56-3C menuju test area.



Gambar 2.3 Crane

4. *Engine Adapter*

*Engine adapter* adalah sebuah perangkat yang berfungsi sebagai tempat melekatkan mesin pada saat di test. *Engine adapter* dibuat seolah mesin tersebut sedang dioperasikan pada pesawat. Pada saat mesin dipasang di *engine adapter* mesin tersebut akan disuplai bahan bakar dan cairan hidrolik agar bisa dilakukan uji kelaikan.



Gambar 2.4 Engine Adapter

5. LX 2000

LX 2000 merupakan komputer untuk mengolah data yang dihasilkan oleh mesin *turbofan* pada saat dilakukan uji kelaikan, komputer ini memberikan informasi output angka-angka, peneliti mendapatkan angka N1(*Fan speed*), N2 (*Core speed*), *thrust* dan *exhaust gas temperature* sebagai data untuk menghitung *airmode*.



Gambar 2.5 LX 2000

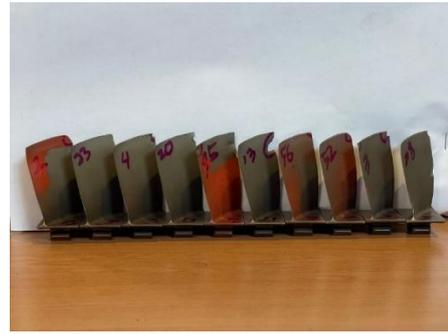
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan inspeksi lebih lanjut dengan FMEA peneliti menemukan bahwa penyebab terjadinya *high egt* pada HPC *front stator case* dengan material *steel* dan HPC *rotor blade*.

Kerusakan yang terjadi karena *scratch* pada bagian *flowpath* di HPC *front stator case* serta *erosion, crack* dan *bending* pada HPC *rotor blade* kerusakan ini berpengaruh pada clearance antara HPC *rotor blade* dan *flowpath* yang membuat menjadi tekanan menjadi rendah.



Gambar 3.1 Flowpath Scratch pada HPC Front Stator Case



Gambar 3.2 HPC Rotor Blade erosion, crack & bending

Clearance yang diakibatkan oleh *scratch* pada bagian *flowpath* di HPC *front stator case* serta *erosion, crack* dan *bending* pada HPC *rotor blade* membuat tekanan turun. Tabel 4.9 memperlihatkan clearance antara HPC rotor blade dengan *flowpath* HPC *front stator case* material *steel*. Terlihat bahwa terjadi penurunan nilai EGTM yang diakibatkan oleh clearance yang terjadi karena *scratch* pada bagian *flowpath* di HPC *front stator case* serta *erosion, crack* dan *bending* pada HPC *rotor blade* sehingga menyebabkan turunnya nilai EGTM.

Tabel 3.1 Clearance HPC Front Stator Case & HPC Rotor Blade Stage 1-9 Uji 1

Clearance	HPC Rotor Radius	Target Min HPC Stator Case Flowpath Radius	Actual HPC Stator Case Flowpath Radius	Actual Stator Radial Clearance	Target Radial Clearances	Difference Between Actual and WPG Target Clearances	EGT Margin Loss [°C]	
Stage 1	11,8487	11,9077	11,9053	0,0566	0,0590	0,0000	0,0000	
Stage 2	11,1231	11,1701	11,1726	0,0495	0,0470	0,0025	0,1848	
Stage 3	10,6417	10,6627	10,6651	0,0234	0,0210	0,0024	0,2008	
Stage 4	9,9886	10,0206	10,2860	0,2974	0,0320	0,2654	28,1847	
Stage 5	9,9877	10,0137	10,0116	0,0239	0,0260	0,0000	0,0000	
Stage 6	9,7153	9,7443	9,7466	0,0313	0,0290	0,0023	0,2343	
Stage 7	9,5943	9,6223	9,6248	0,0305	0,0280	0,0025	0,2672	
Stage 8	9,5179	9,5459	9,5484	0,0305	0,0280	0,0025	0,2943	
Stage 9	9,4921	9,5191	9,5214	0,0293	0,0270	0,0023	0,2389	
Total								29,6050

Langkah selanjutnya adalah melakukan *maintenance* pada HPC *front stator case* berupa dan HPC *rotor blade* dengan melakukan perbaikan dengan mengikis permukaan *flowpath* dan tip rotor blade menjadi halus dan rata serta melakukan pergantian pada beberapa HPC *rotor blade*.

Hasil dari perbaikan dan pergantian part tersebut didapatkan dan dirangkum pada tabel 4.10, hasil perbaikan berupa mengikis permukaan *flowpath* dan tip rotor blade menjadi halus dan rata serta melakukan

pergantian pada beberapa HPC rotor blade membuat EGTM menjadi 0 artinya keadaan dari Clearance HPC Front Stator Case & HPC Rotor Blade sudah sesuai dengan buku manual.

**Tabel 3.2** Clearance HPC Front Stator Case & HPC Rotor Blade Stage 1-9 Uji 2

Clearance	HPC Rotor Radius	Target Min HPC Stator Case Flowpath Radius	Actual HPC Stator Case Flowpath Radius	Actual Stator Radial Clearance	Target Radial Clearances	Difference Between Actual and Target Clearances	EGT Margin Loss [°C]
Stage 1	11,8487	11,9077	11,9053	0,0566	0,0590	0,0000	0,0000
Stage 2	11,1300	11,1770	11,1726	0,0426	0,0470	0,0000	0,0000
Stage 3	10,6521	10,6731	10,6651	0,0130	0,0210	0,0000	0,0000
Stage 4	10,2561	10,2881	10,2860	0,0299	0,0320	0,0000	0,0000
Stage 5	9,9973	10,0233	10,0190	0,0217	0,0260	0,0000	0,0000
Stage 6	9,7147	9,7437	9,7435	0,0288	0,0290	0,0000	0,0000
Stage 7	9,6112	9,6392	9,6241	0,0129	0,0280	0,0000	0,0000
Stage 8	9,5242	9,5522	9,5519	0,0277	0,0280	0,0000	0,0000
Stage 9	9,5012	9,5282	9,5275	0,0263	0,0270	0,0000	0,0000
Total							0,0000

**Tabel 3.3** Hasil Pengujian 1 & 2

Pengujian 1			Pengujian 2		
Fan speed (N1)			Fan speed (N1)		
Deskripsi	Nilai	Satuan	Deskripsi	Nilai	Satuan
N1 Meas	5068	rpm	N1 Obs	5088	rpm
N1K	4944	rpm	N1K	4947	rpm
N1R Standard day	4930	rpm	N1R Standard day	4927	rpm
Core speed (N2)			Core speed (N2)		
Deskripsi	Nilai	Satuan	Deskripsi	Nilai	Satuan
N2 Meas	14729	rpm	N2 Obs	14682	rpm
N2K	14358	rpm	N2K	14254	rpm
N2K1	14377	rpm	N2K1	14267	rpm
N2K2	14380	rpm	N2K2	14269	rpm
N2K3	14393	rpm	N2K3	14285	rpm
N2R	14358	rpm	N2R	14254	rpm
Exhaust Gas Temperature (EGT)			Exhaust Gas Temperature (EGT)		
Deskripsi	Nilai	Satuan	Deskripsi	Nilai	Satuan
EGT Meas	926.69	°C	EGT	866.17	°C
EGTK	878	°C	EGTK	814.3	°C
EGTK1	874	°C	EGTK1	817	°C
EGTK2	881	°C	EGTK2	823	°C
EGTK3	883	°C	EGTK3	826	°C
EGTHD	938	°C	EGTHD	867	°C
Exhaust Gas Temperature Margin (EGTM)			Exhaust Gas Temperature Margin (EGTM)		
Deskripsi	Nilai	Satuan	Deskripsi	Nilai	Satuan
EGTM	-29.6	Negatif	EGTM	+41	Positif

**4. KESIMPULAN**

1. Hasil pengujian ke-1 mendapatkan penurunan pressure sebesar 290 psig dan tingginya suhu EGT sebesar 937,6°C yang membuat nilai EGTM -29,6 peneliti menganalisa kegagalan menggunakan

metode FMEA, sehingga didapatkan hipotesis kegagalan diantaranya:

- a) pneumatic system
  - b) HPTCC Air Tubing
  - c) High Pressure Compressor Rear Stator Case
  - d) High Pressure Compressor front stator case
  - e) High Pressure Compressor rotor blade.
2. Setelah dilakukan maintenance dan penggantian part, pada pengujian ke-2 didapatkan nilai EGTM sebesar +41 yang berarti mesin turbofan CFM56-3C tersebut lolos. Hasil Analisa menggunakan metodologi FMEA membuktikan bahwa penyebab kegagalan pada pengujian ke-1 diakibatkan karena scratch pada bagian flowpath di HPC front stator case serta erosion, crack dan bending pada HPC rotor blade yang membuat jarak clearance antara HPC rotor blade dengan HPC front case melebar sehingga menyebabkan turunnya tekanan sebesar 290 psig.
  3. Tekanan pada pengujian 1 sebesar 290 psig tidak memenuhi syarat minimum dalam pengujian takeoff. Efek dari turunnya tekanan adalah membuat ruang bakar bekerja lebih dan suhu EGT menjadi lebih panas karena fuel mengalir dengan banyak untuk putaran HPT (N2) hal itu membuat nilai EGTM -29,6, untuk mencapai tekanan minimum dalam take off dibutuhkan tekanan sebesar 300 psig, dimana setelah dilakukan analisa menggunakan metode FMEA lalu dilakukan perbaikan pada HPC front stator case & HPC front stator case , pengujian ke-2 mendapatkan tekanan sebesar 320 psig yang membuat EGTM +41.

**DAFTAR PUSTAKA**

[1] W. S. Darga, E. K. Alimin, and E. Yuniarti, "Analisis Pengaruh High Pressure Compressor Rotor Clearance Terhadap Exhaust Gas Temperature Margin pada CFM56-7," *J. Teknol. Kedirgant.*, vol. 6, no. 2, pp. 50–55, 2021, doi: 10.35894/jtk.v6i2.35.

[2] H. H. Prasetya, "PEMBUATAN PROTOTYPE ALAT OVERHEAT WARNING EXHAUST GAS TEMPERATURE ( EGT )," 2020, [Online].

Available:

<https://jurnal.unnur.ac.id/index.php/indept/article/view/219>

- [3] H. Santoso and Ruslim, "Pembuatan Termokopel Berbahan Nikel (Ni) dan Tembaga (Cu) Sebagai Sensor Temperatur," *Indones. J. Fundam. Sci.*, vol. 5, no. 1, p. 59, 2019, doi: 10.26858/ijfs.v5i1.9376.
- [4] J. Kurzke, *Propulsion and Power Subsystems*, no. September. 2018.
- [5] CFMI, "ENGINE TEST MANUAL," pp. 1301–1361, 2015.
- [6] CFMI, "Engine Shop Manual Engine Assembly Testing 003 - Engine Acceptance Test," pp. 1301–1394, 2019.
- [7] FAA, "Aircraft Metal Structural Repair," *Aviat. Maint. Tech. Handbook—Airframe Vol. 1*, 2012.
- [8] J. Alqallaf, N. Ali, J. A. Teixeira, and A. Addali, "Solid particle erosion behaviour and protective coatings for gas turbine compressor blades-A review," *Processes*, vol. 8, no. 8, 2020, doi: 10.3390/PR8080984.
- [9] M. Park, Y. H. Hwang, Y. S. Choi, and T. G. Kim, "Analysis of a J69-T-25 engine turbine blade fracture," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 9, no. 5, pp. 593–601, 2002, doi: 10.1016/S1350-6307(02)00003-1.
- [10] R. et al Hanif, "Perbaikan Kualitas Produk Keraton Luxury di PT.X dengan Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA)," *J. Online Inst. Teknol. Nas. Juli*, vol. 03, no. 03, pp. 137–147, 2015.
- [11] Yumaida, "Analisis Risiko Kegagalan Pemeliharaan pada Pabrik Pengolahan Pupuk NPK Granular (Studi Kasus: PT. Pupuk Kujang Cikampek)," *Skripsi*, p. 79, 2011.