

DOI <http://dx.doi.org/10.36722/sst.v9i2.2517>

Reliability Control Program Turbo Compressor 2222254-1 Nitrogen Generation System Pesawat Boeing 777-300ER di PT GMF AeroAsia Tbk

Cipto Riswanto^{1*}, Edi Sofyan¹, Ferry Setiawan¹, Edy Noerachman², Ibnu Nazarullah²

¹Teknik Dirgantara, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan,
Jl. Parangtritis Km. 4.5, Yogyakarta 55187.

²Engineering Services, PT GMF AeroAsia Tbk, Bandara Soekarno Hatta International,
Tangerang 15125.

Penulis untuk Korespondensi/E-mail: cipto.riswanto@gmail.com

Abstract – The pilot report case of Garuda Indonesia's Boeing 777-300ER aircraft that occurred in 2018-2019 was mostly a case of Nitrogen Generation System (NGS) failure. The objective of this research is to identify the dominant factors causing failures in the NGS, evaluate the reliability and failure rates of its components, so as to obtain the estimated time the component may will fail, effective scheduled maintenance, maintenance method design, and the estimated primary cost of the maintenance program and reliability control program for its components within one year. The research methodology using Quantitative analysis's Distribution Test - Life Data Analysis method combined with the Anderson Darling index of fit parameter of Least Square Curve Fitting approach and Qualitative analysis involves identifying potential root causes and the effects of failures, as well as determining maintenance actions using Failure Mode and Effect Analysis and Fault Tree Analysis. Based on the analysis results obtained, the dominant factor causing failures in the NGS for the period is the variation failure of Turbo Compressor. This component has a reliability of 28.73%, and the mean time to failure (MTTF) is 10,477.62 flight hours. As a result, the optimum interm action preventive maintenance interval (pre-modification) of Turbo Compressor NGS is 250 flight hours with a reliability of 90%, requiring preventive maintenance to be performed 35 times per year. The recommended maintenance action is a scheduled restoration task aimed at upgrading and modifying the Turbo Compressor. The estimated cost of scheduled maintenance for the Turbo Compressor NGS is Rp 2,632,913,890.35, and unscheduled maintenance costs Rp 5,354,508,684.42.

Abstrak – Kasus Pilot Report Pesawat Boeing 777-300ER Garuda Indonesia yang terjadi pada tahun 2018-2019 sebagian besar adalah kasus kegagalan Nitrogen Generation System (NGS). Tujuan penelitian ini mengidentifikasi komponen faktor dominan penyebab kegagalan NGS, mengevaluasi keandalan dan tingkat kegagalan komponen tersebut, sehingga diperoleh waktu perkiraan komponen akan mengalami kegagalan, *effective scheduled maintenance*, rancangan metode perawatan dan besar perkiraan biaya *primer maintenance program* dan *reliability control program* dalam kurun waktu satu tahun. Metodologi penelitian menggunakan Analisis Kuantitatif Metode Uji Distribusi - Life Data Analysis dikombinasikan dengan pendekatan least square curve fitting parameter index of fit Anderson Darling dan analisis kualitatif yang mengidentifikasi potensi penyebab dasar dan efek kegagalan serta penentuan tindakan perawatan menggunakan Failure Mode and Effect Analysis dan Fault Tree Analysis. Dari hasil analisis diperoleh faktor dominan penyebab kegagalan NGS pada periode tersebut disebabkan oleh variation failure Turbo Compressor dengan reliability 2873% dan rata-rata selang waktu terjadinya kerusakan (MTTF) sebesar 10,477.62 FH. Diperoleh Waktu Optimum Interm Action Preventive Maintenance (pre-modification) Turbo Compressor NGS setiap 250 FH dengan reliability 90%, sehingga perlu dilakukan preventive maintenance sebanyak 35 kali dalam setahun. Tindakan perawatan yang dapat direkomendasikan adalah scheduled restoration task yang mengarah pada upgrade modifikasi Turbo

Compressor dengan besar perkiraan biaya scheduled maintenance Turbo Compressor NGS sebesar Rp 2,632,913,890.35 dan unscheduled maintenance sebesar Rp 5,354,508,684.42.

Keywords – Reliability, Failure, Maintenance, Turbo Compressor, Nitrogen Generation System.

PENDAHULUAN

Maskapai merupakan salah satu perusahaan atau organisasi pelaku utama (*stakeholder*) dalam industri aviasi yang menyediakan jasa pelayanan pengangkutan penumpang maupun kargo/barang. Keselamatan penumpang dan barang menjadi fokus utama maskapai dan tolak ukur kesuksesan dalam bisnis ini. Oleh karena itu, setiap komponen dan sistem pada pesawat terbang harus bekerja secara optimal tanpa adanya kegagalan selama operasional pesawat, sehingga keandalan setiap komponen dan sistem pesawat terbang sangat diperhatikan untuk menjaga kondisi pesawat udara agar tetap *safety* dan *airworthy* [1].

Boeing memperkenalkan sebuah sistem baru yang diaplikasikan ke pesawat terbang sipil khususnya pesawat *wide-body* seperti Boeing 777-300ER (*Extended Range*) yang disebut dengan sistem NGS (*Nitrogen Generation System*). Mengacu pada B777-300 *Aircraft Maintenance Manual* (AMM) *Safety Data Sheet* ATA 47 *Module, Nitrogen Generation System* (NGS) merupakan sistem yang dirancang untuk mengurangi kandungan oksigen campuran udara di *center tank* hingga mencapai tingkat yang tidak akan mendukung pembakaran. NGS berfungsi untuk mengontrol tekanan udara ke dalam sistem, mengubah ozon di udara menjadi oksigen, menurunkan suhu udara, menghilangkan kontaminasi dari udara, dan menghilangkan oksigen dari udara. Selain itu NGS juga mensuplai udara yang diperkaya nitrogen ke *center tank*, serta melakukan pemeriksaan kinerja sistem [2].

Perbaikan sistem ini terus dilakukan oleh Boeing berdasarkan temuan atau *report* dari hasil *maintenance* setiap maskapai pemegang pesawat Boeing termasuk Garuda Indonesia Airline. Untuk menangani seluruh aktivitas perawatan armada, Garuda Indonesia membentuk anak perusahaan dengan nama PT Garuda Maintenance Facility (GMF) AeroAsia Tbk. Menurut Annual Report (*Integrated Report*) Tahun 2020, PT GMF AeroAsia Tbk dikenal sebagai perusahaan MRO (*Maintenance, Repair, and Overhaul*) terbesar di Indonesia dengan berbagai pengakuan internasional seperti Direktorat Kelaikudaraan dan Pengoperasian Pesawat Udara (DKPPU), *Federal Aviation and*

Administration (FAA), dan *European Aviation Safety Agency* (EASA) [3].

Berdasarkan laporan pilot (*Pilot Reports*) *Reliability Issue Driver* Boeing 777-300ER Garuda Indonesia pada Januari 2018 hingga Desember 2019, yang diperoleh dari PT GMF AeroAsia Tbk, terdapat sebanyak 51 kali *pilot reports* dengan *alert level* pada 2018 dan 2019 masing-masing sebesar 2.27 (RED-1 dengan *Trend UP*) dan 2.74 yang tersebar pada sepuluh registrasi pesawat diantaranya, PK-GIA, GIC, GID, GIE, GIF, GIG, GIH, GII, GIJ, dan GIK, sebagian besar disebabkan karena adanya masalah pada *Nitrogen Generation System*. Dengan demikian, sangat dibutuhkan analisis keandalan (*Reliability*) terhadap *Nitrogen Generation System*.

METODE

Penelitian ini menggunakan dua analisis atau pendekatan yaitu analisis kuantitatif yang bersifat statistika/matematika dan analisis kualitatif yang bersifat studi kasus, tindakan dan evaluasi.

Analisis Kuantitatif

Perhitungan secara kuantitatif meliputi penentuan sifat/jenis distribusi terhadap data *Time to Failure* (TTF) tersebut dengan menggunakan bantuan *software* Microsoft Excel (untuk *life data analysis*) dan Minitab Statistical Software seri 21.4.1.

Analisis Kuantitatif - Life Data Analysis

Penentuan sifat/jenis dengan pendekatan *life data analysis* (LDA) pada microsoft excel menghasilkan nilai D (*max of abs difference*). Semakin kecil nilai D (jarak perbedaan distribusi dengan data), maka distribusi tersebut yang paling cocok. Distribusi yang digunakan adalah Distribusi Normal dan Distribusi Weibull 3 (tiga) parameter.

Analisis Kuantitatif - Uji Distribusi Minitab 21

Data TTF akan diuji kecocokannya dengan pendekatan/metode kombinasi *least square curve fitting* dan *maximum likelihood* pada Minitab 21. Data TTF komponen faktor dominan akan digambarkan ke dalam grafik *probability plot* dengan tujuan untuk mengetahui pola sebaran frekuensi data TTF ke dalam grafik regresi linier

sehingga dari setiap distribusi akan diperoleh nilai *index of fit* [1]. *Index of fit* yang paling tinggi akan memberikan keterangan distribusi mana yang sesuai dengan data TTF komponen tersebut [4]. Namun, penilaian *index of fit* pada *software* Minitab 21 ini akan berdasarkan nilai indeks Anderson-Darling. Semakin kecil nilai parameter *index of fit* Anderson-Darling suatu distribusi dari data TTF, maka distribusi tersebut adalah yang paling sesuai [5]. Distribusi yang digunakan adalah distribusi weibull 3 (tiga) parameter, eksponensial 2 (dua) parameter, normal dan lognormal.

Distribusi yang paling cocok dengan data akan dipilih untuk dilakukan evaluasi fungsi kepadatan peluang (*probability density function*) yang menggambarkan bentuk distribusi data TTF, keandalan (*reliability*, $R(t)$), laju kegagalan (*failure rate*, $\lambda(t)$) dan rata-rata selang waktu (interval waktu) terjadinya kerusakan pada sebuah komponen (*mean time to failure*, MTTF (t)) [1]. Sehingga dari hasil evaluasi MTTF diperoleh waktu perkiraan Nitrogen Generation System akan mengalami kegagalan (*failure*). Setelah itu, dilakukan perhitungan interval waktu perawatan pencegahan (*preventive maintenance*) dengan bantuan *software* MATLAB R2023a.

Analisis Kualitatif

Analisis ini dilakukan untuk memperdalam hasil statistik dari analisis kuantitatif. Analisis ini mengidentifikasi potensi penyebab dan efek kegagalan komponen dengan mendeskripsikan/menjabarkan fungsi komponen dari Nitrogen Generation System pesawat Boeing 777-300ER. Kemudian, ditentukan jenis perawatan pada *scheduled maintenance* dengan metode RCM (*Reliability Centered Maintenance*) yang dibuat dalam bentuk *worksheet* berisi *failure mode*, *proposed task* dan subjek pelaku perawatan. Selain itu, dapat diidentifikasi rancangan/desain *maintenance* sesuai klasifikasi *maintenance level* yang berlaku di operator.

Analisis kualitatif mengacu pada beberapa dokumen manual diantaranya *Troubleshooting Manual* (TSM) dan *Component Maintenance Manual* (CMM) untuk melihat panduan perawatan dan perbaikan sistem atau komponen tertentu dari manufaktur sehingga ditemukan potensi penyebab kegagalan serta cara mengatasinya, serta data *report* dari operator berupa *Shop Visit Report* (SVR), *Strip Report*, dan *Safety Difficult Report* (SDR) yang berisi histori perawatan komponen yang berguna untuk memetakan *item* pada sistem yang mengalami kegagalan.

Analisis secara mendalam belum bisa dilakukan karena dokumen manual TSM dan CMM, serta *component maintenance historical data* SVR dan SR belum tersedia untuk Turbo Compressor 2222254-1 Nitrogen Generation System. PT GMF AeroAsia Tbk belum mempunyai *capability* untuk melakukan *repair* Turbo Compressor NGS. Namun, informasi serupa dapat ditemukan pada dokumen B777-300ER Aircraft Maintenance Manual (AMM); *Safety Data Sheet* (SDS) dan *Fault Isolation Manual* (FIM) Chapter 47 Inert Gas System, dan *Reason of Removal* pada *Component Removal Report*.

Analisis Kualitatif – FMEA

Analisis menggunakan pemodelan dengan Generic FMEA (*failure mode and effect analysis*) dalam bentuk *worksheet*. Dari hasil pemodelan FMEA tersebut, dapat diketahui *critical component* berdasarkan mode kegagalan dengan RPN yang paling tinggi.

Analisis Kualitatif – FTA

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui penyebab dasar kegagalan yang bisa terjadi pada komponen faktor dominan penyebab kegagalan Nitrogen Generation System.

Pembuatan diagram *Fault Tree Analysis* (FTA) disusun berdasarkan penyebab terjadinya *failure mode* pada FMEA. Model FTA yang didesain memberikan informasi tambahan kepada *engineer* di *workshop* untuk mengidentifikasi komponen terkecil yang berpengaruh terhadap kegagalan induk komponen (sebagai *Top Event*) dan sistem. Metode yang digunakan pada analisis FTA ini adalah *Mocus Algorithm* (*Method Obtain Cut Set*), yaitu mengidentifikasi penyebab kejadian bermula dari *Top Event* menuju *Bottom* atau *Basic Event* (dari atas ke bawah) [6].

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT Garuda Maintenance Facility (GMF) AeroAsia Tbk, yang dilaksanakan terhitung mulai 26 April 2022 sampai dengan 10 Juli 2023 di unit TER-1 (*Reliability and Engineering Services*), Departemen *Engineering Services* yang berlokasi di Hangar 3 Rom 231.

Desain dan Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan secara sistematis meliputi pengambilan data, melakukan pengolahan data *pilot report* menggunakan metode Pareto dan proses *Data Analysis System*, Melakukan perhitungan *Life Data Analysis* dan uji distribusi terhadap komponen yang dipilih menggunakan

Distribusi Normal dan Weibull menggunakan Microsoft Excel, melakukan uji distribusi dan analisis lanjutan pada Minitab 21 menggunakan Distribusi Weibull, Normal, Lognormal dan Exponential, menentukan *Total Productive Maintenance* (TPM) dengan mengevaluasi interval waktu optimum *preventive maintenance* menggunakan MATLAB R2023a, melakukan analisis FMEA dan FTA sehingga dapat ditentukan tindakan perencanaan perawatan dan rancangan metode perawatan yang tepat untuk setiap *failure mode* sesuai RCM dan *Reliability Control Program* (RCP), Menghitung besar perkiraan biaya primer *Maintenance Program* (MP) dan *overhaul* yang dievaluasi dalam kurun waktu setahun dan membuat kesimpulan.

Pengumpulan Data

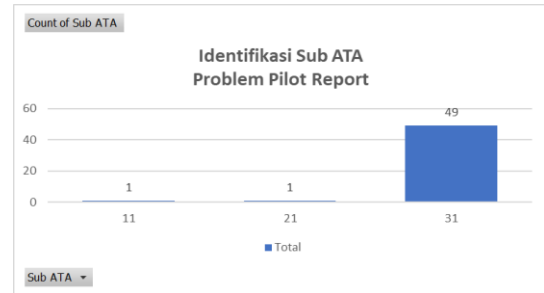
Pilot report dikombinasikan dengan *compliance data* antara lain *Delay*, *Hold Item List* (HIL), *Component Removal* dan *Maintenance Standard* untuk memperdalam evaluasi dan meningkatkan keakuratan data. Sepanjang tahun 2018 – 2019 tidak ditemukan *delay* yang disebabkan oleh NGS, namun didominasi oleh *pilot report* sebanyak 51 kasus, yang menyebabkan *Unscheduled Component Removal* pada komponen tertentu berdasarkan data HIL.

Verifikasi dan Cleansing Data

Verifikasi dan *Cleansing* data dilakukan untuk mengidentifikasi kesalahan-kesalahan dalam mengklasifikasikan permasalahan dan *rectification* (tindakan awal perawatan). Langkah-langkah yang dilakukan diantaranya identifikasi nomor *Maintenance Messages* (MMSG) pada *rectification*, kemudian memvalidasi nomor tersebut dengan empat digit kode pada *Fault Isolation Manual* (FIM). Empat digit yang teridentifikasi pada FIM merepresentasikan dua digit pertama adalah nomor ATA, sedangkan dua digit terakhir adalah nomor Sub ATA. Informasi Sub ATA berguna untuk menyederhanakan masalah serta mengetahui faktor dominan penyebab kegagalan Nitrogen Generation System pesawat B777-300ER.

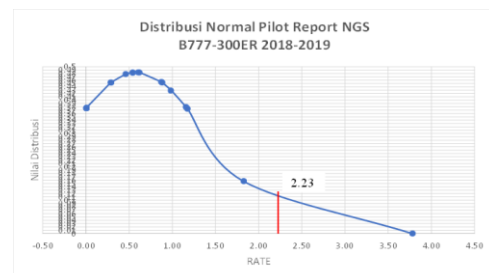
Pengolahan Data – Pilot Report

Golongan Sub ATA yang ditemukan pada *pilot report* NGS B777-300ER pada periode 2018-2019 terdapat tiga Sub ATA, yaitu Sub ATA 47-11 tentang *Air Separation Unit* (ASU) sebanyak 1 kasus, Sub ATA 47-21 tentang *Nitrogen Enriched Air Distribution System* (NEADS) sebanyak 1 kasus, dan Sub ATA 47-31 tentang NGS *Control System* sebanyak 49 kasus.



Gambar 1. Grafik Pareto faktor dominan penyebab kegagalan NGS B777-300ER

Analisis keandalan sistem menggunakan standar acuan RATE atau jumlah kejadian kali 1000 per jam terbang [7]. Nilai acuan RATE *pilot report* Nitrogen Generation System B777-300ER di PT GMF AeroAsia Tbk pada tahun 2018 dan 2019 masing-masing adalah 2.27/*flight hours* dan 2.74/*flight hours*. Mengetahui Nilai RATE dan Distribusi data *pilot report* tersebut diperlukan data *total flight hours* (FH) dan jumlah kejadian setiap bulannya, sehingga data bisa diolah dan menghasilkan grafik distribusi data untuk menentukan batas maksimum yang diperbolehkan. Jika melebihi batas nilai yang diharapkan karena intensitas kasus yang terjadi pada setiap bulannya selama periode tertentu, maka kasus akan dikategorikan sebagai *New Alert Level* (RED). Dengan nilai *Average RATE* 0.58, Standar Deviasi 0.825324 dan pengurutan nilai RATE dari yang terkecil ke terbesar, maka dihasilkan grafik RATE distribusi normal *pilot report* (pirep) pada akhir periode 2019 dengan nilai 2.23 (RED-1 dan *Trend UP*) sebagai *New Alert Level*.



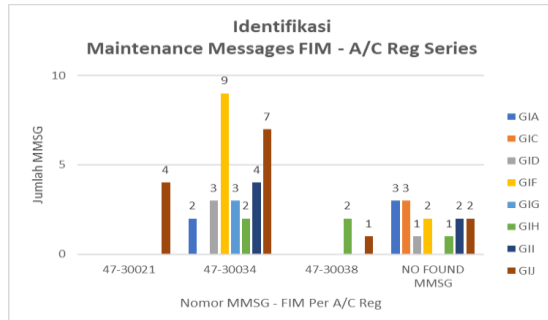
Gambar 2. Grafik RATE dan Dist. Normal pirep NGS

Pengolahan Data – HIL

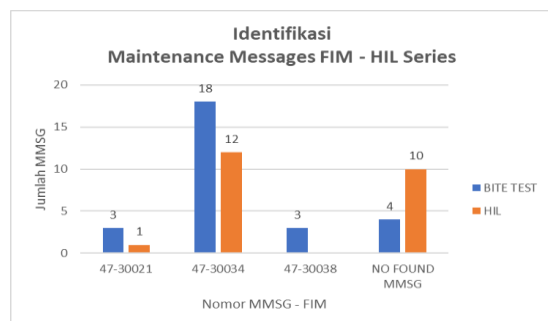
Jika hasil tes menunjukkan masih ada masalah (*Open*) yang perlu ditindaklanjuti, artinya *problem* belum selesai dan akan dikategorikan sebagai HIL. NGS *Controller* dites melalui tahap NGS *Indication*, yaitu *Built-In Test Equipment* (BITE TEST) sebagai tahap awal penyelesaian.

Data HIL NGS B777-300 menunjukkan bahwa banyak *problem* yang terjadi pada komponen Turbo Compressor NGS, sehingga harus dilakukan

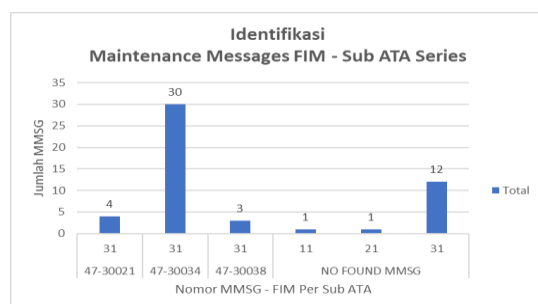
penggantian komponen. Alasan penggantian Turbo Compressor pada Sub ATA 47-31 (NGS Controller) mengacu pada *Maintenance Message FIM* yang dideskripsikan dalam *Rectification Pilot Report*. *Maintenance Message FIM* yang dikeluarkan oleh *Manufacturer* Boeing tersebut bisa diidentifikasi akar permasalahan berdasarkan *Task* Sub ATA yang merepresentasikan hubungan NGS Controller dengan komponen terkait lainnya pada sistem NGS. Berikut adalah *Maintenance Message* NGS B777-300ER yang teridentifikasi pada *Pilot Report*.



Gambar 3. Grafik *Maintenance Message FIM – A/C Reg*



Gambar 4. Grafik *Maintenance Message FIM – Sub ATA*



Gambar 5. Modus Data MMSG FIM – HIL Series

Dalam menganalisis akar permasalahan NGS, *Engineering* melihat dari satu MMSG yang paling berpengaruh yaitu MMSG 47-30034 dengan kasus sebanyak 30 kali (Gambar 3 dan 4) dan banyak dikategorikan sebagai HIL. Seperti yang dijelaskan pada gambar 5, akar permasalahan dapat dilihat pada tabel deskripsi berikut yang tertuang dalam FIM [8].

Tabel 1. Deskripsi *Maintenance Message* 47-30034

MMSG	MSG. TEXT	FIM TASK
47-30034	Turbo Compressor flow is out of range. The Turbo Compressor Flow Loss message shows when the NGS is ON, and the NGS Controller detects low pressure at the Turbo Compressor Outlet.	47-31 Task 821 (NGS BITE Message Turbo Compressor Flow Loss)

Jadi *Maintenance Message* 47-30034 FIM beserta deskripsi pada tabel 1 di atas menjelaskan hubungan antara NGS Controller dengan komponen yang menjadi akar permasalahan dan faktor dominan penyebab kegagalan NGS B777-300ER yaitu Turbo Compressor, sekaligus menjawab informasi data HIL yang banyak memuat tindakan penggantian Turbo Compressor. Berdasarkan AMM SDS ATA 47 Module (2015: 47-30-00 Page 2), NGS Controller melakukan beberapa fungsi, salah satunya adalah memerintahkan Turbo Compressor Shutoff Valve untuk membuka atau menutup [2].

Turbo Compressor terletak di *Thermal Control Unit* pada *Forward Wing to Body Fairing Panel*. Setelah dilakukan pemisahan nitrogen dari oksigen oleh *Air Separation Unit*, Turbo Compressor berperan penting dalam menghasilkan tekanan tinggi pada nitrogen yang diperlukan untuk memompa/mengompresi *bleed air* untuk menyuplai nitrogen yang kaya (*Nitrogen Enriched Air*) dan memastikan agar dapat diinjeksikan ke dalam tangki bahan bakar, terutama ke *Center Fuel Tank* [2].

Pengolahan Data – Component Removal

Komponen yang dikategorikan sebagai HIL, selanjutnya akan dilepas dari pesawat dan dikirim ke *workshop* untuk dilakukan inspeksi dan perbaikan dalam jangka waktu tertentu. Jumlah *Component Removal* yang tervalidasi menurut *Component Removal Report* Turbo Compressor 2222254-1 NGS B777-300ER periode 2018–2019 adalah 18 *Unscheduled Component Removal*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kuantitatif - Life Data Analysis (LDA)

Data yang dianalisis merupakan data *historical removal* berupa *Mean Time Between Unscheduled Removal* (MTBUR) atau *Time Since Installed* (TSI)/*Cycle Since Installed* (CSI) sebagai data *time to failure* (TTF) Turbo Compressor dari tahun 2018 hingga 2019, seperti yang tertuang dalam *component removal report*.

Jika dibandingkan antara keduanya, data MTBUR cenderung mudah dicari, *airline/operator* hanya membutuhkan data *Flight Hours* dan *Component Removals*. Namun umur rata-rata penggantian komponen yang dihasilkan masih secara total dan acak. Sedangkan data TTF secara perhitungan dan pengumpulan data lebih kompleks, artinya *airline/operator* harus punya pencatatan kapan komponen dilakukan *removal* atau turun dari pesawat dan kapan dipasang kembali ke pesawat. Namun keuntungannya data yang dihasilkan lebih akurat/mendekati riil. Dengan demikian, analisis akan dilanjutkan dengan *Life Data Analysis* menggunakan data *Time to Failure* berupa TSI.

Life Data Analysis – Uji Distribusi Normal

Uji Distribusi Normal terhadap data 18 (delapan belas) komponen Turbo Compressor menggunakan parameter μ (nilai tengah) dan σ (standar deviasi). Adapun fungsi-fungsi dalam distribusi normal adalah sebagai berikut [9].

Fungsi *probability*

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right); -\infty < t < \infty \dots \quad (1)$$

Fungsi kumulatif kerusakan

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \dots \quad (2)$$

Fungsi Keandalan

$$R(tp) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \dots \quad (3)$$

Mean Time to Failure (MTTF)

$$MTTF = \mu \dots \quad (4)$$

Dimana:

μ = rata-rata

σ = standar deviasi

Φ = nilai z yang diperoleh dari tabel distr. Normal

Berikut Standar Deviasi *Mean Time to Failure* (MTTF) dari hasil perhitungan distribusi normal.

Tabel 2. Hasil Perhitungan MTTF Distribusi Normal

	RRY	RRX
Slope	0.000164841	0.000239525
Intercept	-0.600022567	-0.871870412
Std. Dev	6066.438493	4174.932363
MTTF	3640	3640
for Confidence Interval	Lower Bound of mean	Upper Bound of mean
	2021.252563	5258.747437

Nilai *intercept* dan standar deviasi tersebut digunakan untuk menghitung nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) sehingga didapatkan nilai *Rank Regression on Y* (RRY) sebesar 3640 FH dan Nilai *Rank Regression on X* (RRX) sebesar 3640 FH [10]. Berikut adalah parameter jarak perbedaan antara standar distribusi normal dengan distribusi normal dari data-data yang berlaku atau disebut D (*max of abs difference*).

Tabel 3. Max of Abs Difference Distribusi Normal

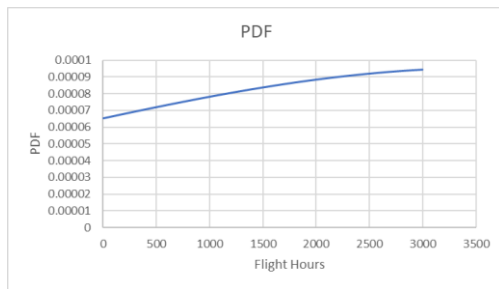
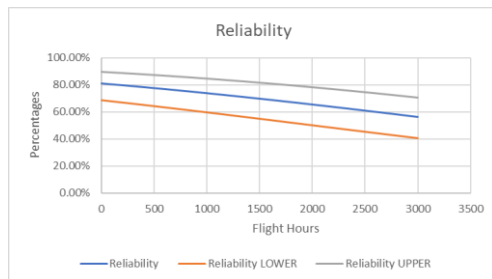
	Dcrit	Null Hypothesis?
D	24.22%	TRUE
Avrg. of D	11.95%	
Stddev of D	0.07743983	
AVPLOT	11.9531973	
Corelation Coeff	0.97670251	

Dari parameter yang diperoleh (RRX), maka menghasilkan *summary* sebagai berikut.

Tabel 4. Summary Parameter Distribusi Normal

FH	Remark	Reliab. Lower	Reliab.	Reliab. Upper
700	Current Interval	62.42%	75.93%	86.26%
3640	MTTF	34.91%	50.00%	65.09%

Selanjutnya dari hasil tersebut, nilai RRX diplot ke dalam sebuah grafik hubungan antara *flight hour* dan semua parameter yang dihasilkan. Berdasarkan grafik hubungan *flight hour* dengan PDF, *Reliability* dan *Failure Rate* tersebut menghasilkan nilai PDF sebesar 0.0000955566 H, yang mengindikasikan bahwa probabilitas kegagalan komponen Turbo Compressor termasuk dalam zona/fase *later life* atau *mature life*, dimana kegagalan meningkat setelah tahap operasi dan seiring bertambahnya usia dan penggunaan komponen pesawat. Selain itu, dengan nilai *reliability* sebesar 50.00%, mengindikasikan bahwa keandalan Turbo Compressor tersebut sangat rendah. Sementara nilai *failure rate* sebesar 0.000191113 H, mengindikasikan bahwa komponen Turbo Compressor dengan P/N yang sama dan S/N yang berbeda terpasang pada pesawat B777-300ER, masih berada pada fase *wear out life* dimana tingkat kegagalan masih akan terus meningkat seiring bertambahnya waktu hingga titik puncak (*peak*) sebesar 0.000523102 H sebagai batas antara *potential failure* dengan *functional failure*, sehingga *preventive maintenance* perlu diaplikasikan untuk Turbo Compressor, dimana *maximum critical life time*-nya sebesar 3640 FH [10].

Gambar 6. Grafik *Probability Density Function (PDF)* Distribusi Normal Turbo CompressorGambar 7. Grafik *Reliability Dist. Normal TC NGS*Gambar 8. Grafik *Failure Rate Dist. Normal TC NGS*

Life Data Analysis – Uji Distribusi Weibull

Uji Distribusi Weibull terhadap data *time to failure* 18 (delapan belas) komponen Turbo Compressor menggunakan analisis 3 (tiga) parameter yaitu Eta (α) sebagai parameter skala dan mengontrol skala atau ukuran distribusi, Beta (β) sebagai parameter bentuk dan mengontrol bentuk distribusi dan Gamma (γ) sebagai parameter letak (*location*) dan menggeser distribusi secara horizontal. Adapun fungsi-fungsi dalam distribusi weibull adalah sebagai berikut [9].

Probability Density Function.

$$F(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \dots\dots (5)$$

β = *shape* parameter, $\beta > 0$

θ = skala parameter untuk *life time* $\theta > 0$

Fungsi keandalan.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \dots\dots (6)$$

Nilai laju kerusakan.

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \dots\dots (7)$$

Mean Time to Failure.

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \dots\dots (8)$$

Nilai parameter keandalan yang didapat dengan menggunakan operasi Logaritma Natural, maka dihasilkan Nilai Eta, Beta dan Gamma. Parameter tersebut dihitung dan menghasilkan *Mean Time to Failure (MTTF)* pada *Rank Regression on X (RRX)* dan *Rank Regression on Y (RRY)* sebagai berikut.

Tabel 5. Hasil Perhitungan MTTF Distribusi Weibull

	RRY	RRX
Slope	0.573967809	0.627825262
Intercept	-5.191458727	-5.590771839
Beta	0.573967809	0.627825262
Eta	8474.868629	7368.582937
Gamma (1/(Beta+1))	1.598215753	1.421931798
MTTF	13544.66855	10477.62239

Dengan mengalikan nilai Eta dan Gamma, maka didapatkan nilai MTTF pada *Rank Regression on Y (RRY)* sebesar 13544.66855 FH dan Nilai *Rank Regression on X (RRX)* sebesar 10477.62239 FH.

Jika dilihat berdasarkan jarak maksimal perbedaan standar distribusi dengan distribusi data atau D (*max of abs difference*) atau juga biasa disebut sebagai MAE (*Mean Absolute Error*), distribusi weibull memiliki nilai D lebih kecil yaitu 21.15% dari pada distribusi normal yaitu 24.22%. Berikut hasil dari perhitungan parameter D.

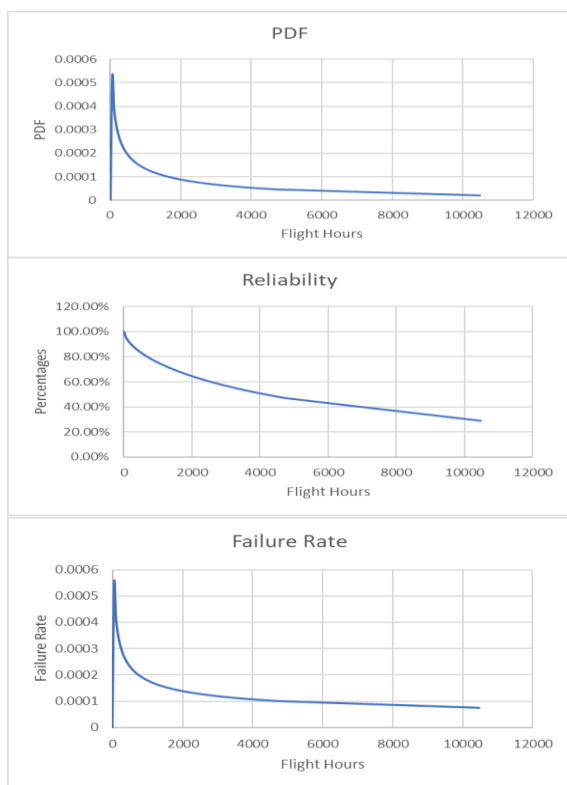
Tabel 6. *Max of Abs Difference* Distribusi Weibull

		Dcrit	Null Hypothesis?
D	21.15%	0.3206	TRUE
Avrg. of D	4.41%		
Stddev of D	0.048856827		
AVPLOT	4.408734438		
Corelation Coeff	0.957218208		

Berdasarkan *life data analysis* MS Excel, pendekatan Distribusi Weibull secara keseluruhan memberikan indikasi bahwa distribusi tersebut cocok dengan data dan baik untuk mewakili data. Sebaliknya, nilai MAE 24.22% distribusi normal kurang cocok dengan data dan model tersebut perlu dievaluasi kembali.

Tabel 7. *Summary* Parameter Distribusi Weibull

MTTF	PDF	CDF (Unrel)	Relia b.	Fail. Rate
10477.6 2	2.1471E-05	0.712729	28.73 %	7.47407 E-05



Gambar 9. Grafik PDF, Reliab., dan Fail. Rate Dist. Weibull

Berdasarkan plot data pada Gambar 9 nilai RRX ke dalam grafik hubungan *flight hour* dengan PDF, *Reliability*, dan *Failure Rate* tersebut menghasilkan nilai PDF sebesar 0.000021471 H, yang mengindikasikan bahwa komponen Turbo Compressor saat ini termasuk dalam zona/fase *early life*, dimana kegagalan berkurang atau lebih rendah selama tahap awal operasi pesawat. Selain itu, dengan nilai *reliability* sebesar 28.73% atau 0.2873 H, artinya bahwa keandalan tersebut sangat rendah. Sementara nilai *failure rate* sebesar 0.0000747407, mengindikasikan bahwa beberapa komponen Turbo Compressor dengan P/N yang sama dan S/N yang berbeda terpasang pada pesawat B777-300ER, bahkan secara *worldwide* tingkat kegagalan selama rata-rata periode tersebut adalah tinggi [10].

Berbeda dengan Distribusi Normal yang mempunyai grafik PDF dan *failure rate* yang naik dan akan turun pada FH tertentu, kecuali pada grafik *reliability* (selalu turun), grafik 3 (tiga) parameter utama Distribusi Weibull mempunyai kecenderungan turun. Hal tersebut disebabkan karena nilai fungsi distribusi kumulatif atau *Cumulative Distribution Function* (CDF) dan nilai parameter bentuk (β) yang dihasilkan kurang dari 1, sehingga distribusi weibull cenderung memiliki ekor panjang di sebelah kiri.

Analisis Kuantitatif - Uji Distribusi Minitab 21

Data TTF setiap komponen beda S/N Turbo Compressor digambarkan ke dalam grafik *probability plot* dengan tujuan untuk menyesuaikan pola sebaran frekuensi data TTF ke dalam grafik regresi linier sehingga dari setiap distribusi akan diperoleh nilai *index of fit*.

Berikut adalah *output* dari data TTF yang diinput pada *software* Minitab 21 menggunakan parameter *Reliability/Survival* serta metode estimasi *Least Squares Curve Fitting* (*Failure time* (X) on *rank*(Y)) untuk menentukan nilai Anderson Darling dan Metode *Maximum Likelihood* untuk mengetahui *standard error* dan *Confidence Level* (CI) setiap parameter distribusi. CI yang digunakan adalah 95.0% Normal.

Tabel 8. *Godness of Fit*

Distribution	Anderson-Darling (adj)	Correlation Coefficient
Normal	2.601	0.830
3-Parameter Weibull	0.903	0.983
2-Parameter Exponential	1.611	*
Lognormal	1.029	0.977

Penilaian *index of fit* pada *software* Minitab 21 ini berdasarkan nilai indeks Anderson-Darling. Semakin kecil nilai parameter *index of fit* Anderson-Darling suatu distribusi dari data TTF, maka semakin besar nilai *Correlation Coefficient* yang dihasilkan [9], sehingga distribusi tersebut adalah yang paling cocok dan mewakili data. Pada tabel 8 terlihat bahwa nilai Anderson-Darling yang paling kecil adalah distribusi Weibull 3-parameter, yaitu sebesar 0.903 dan memiliki nilai *Correlation Coefficient* paling besar yaitu 0.983. Artinya uji distribusi yang diolah menggunakan Microsoft Excel dengan nilai MAE atau D yang diperoleh lebih kecil dari distribusi normal, sesuai dengan output yang didapatkan pada *Software* Minitab 21, bahwa Distribusi Weibull 3-parameter adalah distribusi yang cocok dan dapat mewakili data dengan baik. Dengan demikian uji distribusi pada Minitab 21 selanjutnya akan berfokus pada Distribusi Weibull. Nilai MTTF yang dihasilkan oleh pengolahan data menggunakan *Reliability/Survival* Minitab 21 pada setiap distribusi adalah Tabel 9.

Tabel 9. *Mean Time to Failure* Empat distribusi

Distribution	Mean	Standard Error	95% Normal CI	
			Lower	Upper
Normal	3640.00	1086.96	1509.59	5770.4
3-Parameter Weibull	3619.67	1039.21	2062.00	6354.0

Distribution	Mean	Standard Error	95% Normal CI	
			Lower	Upper
2-Parameter Exponential	3640.00	881.22	1912.84	5367.2
Lognormal	4552.38	2160.73	1795.67	11541.2

Dapat dilihat pada Tabel 9, bahwa MTTF distribusi normal yang dihasilkan dari pengolahan data menggunakan parameter *Reliability/Survival* Minitab 21 adalah 3640 FH, sama dengan nilai MTTF distribusi normal pada Excel. Artinya bahwa meskipun berbeda parameter, data aktual yang diolah mempunyai kesamaan alur/proses, pengolahan yang dilakukan penulis sudah sesuai dan baik pada Excel maupun Minitab 21. Namun, jika dilihat dari segi kompleksitas, pengolahan pada MS Excel lebih akurat dan sesuai kondisi di lapangan.

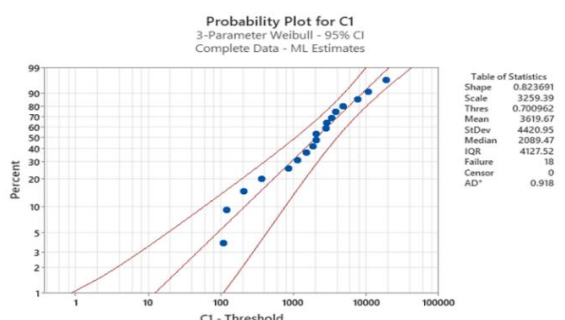
Faktor variasi data aktual TSI yang terdiri dari *failure* dan *survive* sangat berpengaruh terhadap formula dan hasil *life data analysis* terutama MTTF, yang berlaku di PT GMF AeroAsia Tbk. Data aktual yang diolah pada penelitian ini hanya data *failure*, sesuai instruksi dari *engineer*. Sedangkan data *Survive* itu mempengaruhi jarak antar titik data pada grafik *parameter plotting* menjadi semakin jauh, artinya ada komponen yang masih terpasang di pesawat sampai saat ini, sehingga MTTF menjadi lebih kecil. Sehingga MTTF yang digunakan untuk analisis selanjutnya adalah MTTF distribusi weibull hasil pengolahan *life data analysis* di MS Excel yaitu 10477.62 FH.

Distribusi Weibull 3-Parameters pada Minitab

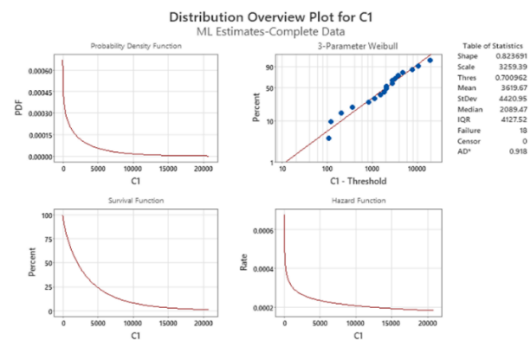
Berikut adalah hasil pengolahan *Reliability/ Survival* menggunakan metode *Maximum Likelihood (ML)*.

Tabel 10. Weibull Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Standard Error	95.0% Normal CI	
			Lower	Upper
Shape	0.823691	0.148783	0.578112	1.17359
Scale	3259.39	984.966	1802.64	5893.37
Threshold	0.700962	0	0.700962	0.700962



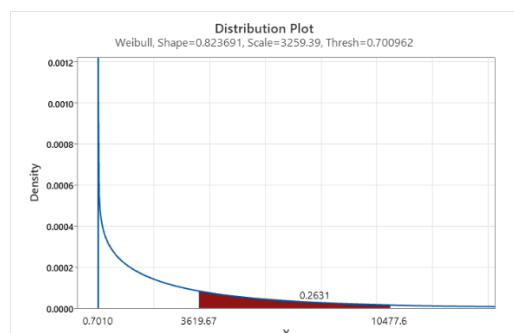
Gambar 10. Weibull 3-parameters Distribution probability plot



Gambar 11. Weibull 3-parameters Distribution Overview Plot

Untuk mengetahui kalkulasi/persentase *failure* dari MTTF Minitab 3619.67 FH hingga sebelum interval MTTF Excel 10477.62 FH, Minitab dapat melakukan perhitungan *warranty* (persentase kegagalan untuk dilakukan perbaikan dan penggantian *item* sebelum interval MTTF) menggunakan *Probability Distribution Plot*.

Berdasarkan Gambar 12, dapat diinterpretasi bahwa 26.31% kegagalan akan terjadi diantara interval 3619.67 FH dan 10477.6 FH, sehingga 26.31% dari komponen Turbo Compressor beberapa pesawat B777-300ER akan *survive* selama 6857.93 FH.



Gambar 12. Grafik *warranty* menggunakan Minitab

Evaluasi Preventive Maintenance

Sebagai perusahaan manufaktur pesawat terbang B777-300ER, Boeing menentukan besar keandalan komponen/sistem pesawat terbang minimal 90%. Maka berdasarkan hasil perhitungan Distribusi Weibull, interval waktu *preventive maintenance* pada *reliability* 90% adalah sebesar 200 FH.

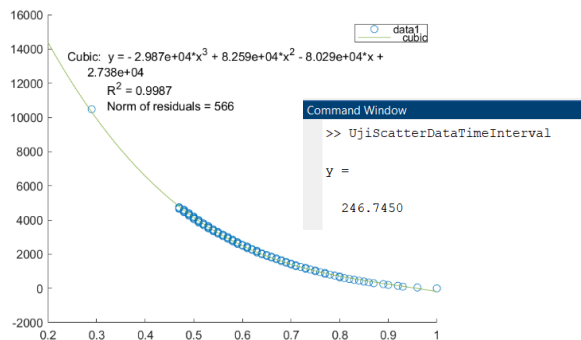
Mendapatkan waktu yang optimum untuk dilakukannya *preventive maintenance*, penulis melanjutkan skema *preventive maintenance* menggunakan software MATLAB dengan variabel *Time* dan *Reliability* (*workspace name*: Data_Reliability) yang didapatkan dari hasil pengujian Distribusi Weibull pada Excel.

Pemodelan MATLAB menggunakan persamaan pada *Scatter Plotting* (Time terhadap Reliability). Dengan *tools Basic Fitting*, dapat ditentukan *types of fit* yang cocok dengan sebaran data yang ada. *Types of fit* yang cocok mempunyai nilai standar error (R^2) yang paling dekat dengan Nilai 1. Selanjutnya akan muncul Persamaan (*Equation*) pada *section Fit Result*. Persamaan itulah yang akan digunakan untuk substitusi nilai x (*reliability*) sehingga dihasilkan waktu interval yang optimal sesuai target keandalan yang diinginkan.

R^2 yang paling mendekati nilai 1 adalah *Type of Fit Cubic*, yaitu 0.9987 dengan persamaan dan koefisien pada *script* sebagai berikut.

```
p1 = -29870.5; p2 = 82593.9; p3 = -80291.9; p4 = 27384.1;
scatter(Data_Reliability(:,1),Data_Reliability(:,2));
x=0.90; y = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4.....(9)
```

Setelah *Running*, dihasilkan grafik dan nilai pada *command window* sebagai waktu interval yang optimum untuk dilakukan *preventive maintenance*.



Gambar 13. Grafik Cubic Fit Results Time terhadap Reliability dan Hasil Substitusi nilai x ke persamaan

Berdasarkan Gambar 13, waktu interval untuk dilakukan *preventive maintenance* pada saat keandalan 90% adalah pada saat 246.7450 FH dibulatkan menjadi 250 FH agar beririsan dengan kelipatan interval pada Tabel Parameter Weibull.

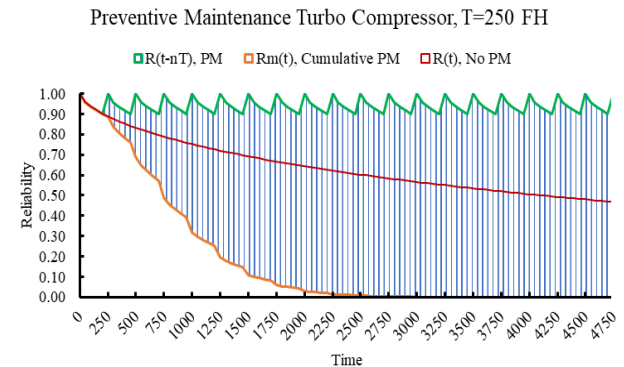
Dengan $R(t)$ sebagai keandalan tanpa *preventive maintenance*, T sebagai interval dari waktu *preventive maintenance* dan $R_m(t)$ adalah keandalan dari sistem dengan *preventive maintenance*, maka dapat dituliskan dengan persamaan (10), (11), dan (12) [1].

$$R_m(t) = R(t), \text{ untuk } 0 \leq t \leq T \dots (10)$$

$$R_m(t) = R(T) \cdot R(t - nT), \text{ untuk } T \leq t \leq 2T \dots (11)$$

$$R_m(t) = R(T)^n \cdot R(t - nT), \text{ untuk } nT \leq t(n+1) \dots (12)$$

Dimana $R(T)$ adalah probabilitas ketahanan hingga *preventive maintenance* yang pertama dan $R(t-nT)$ adalah probabilitas ketahanan selama jangka waktu $t-nT$ yang telah ditentukan sebelumnya dari kondisi awal. Maka dihasilkan grafik *preventive maintenance TC 2222254-1 NGS* dengan target keandalan 90% dan $T=250$ FH pada Gambar 14.



Gambar 14. Grafik *Preventive Maintenance Turbo Compressor 2222254-1 NGS* dengan $T=250$ FH

Berdasarkan Gambar 14, terlihat bahwa pada saat $t=4750$ FH telah dilakukan sebanyak 19 kali *preventive maintenance*. Jika diperhatikan, Grafik *Reliability* tanpa *preventive maintenance* ($R(t)$, No PM) masih lebih baik dari pada *Reliability Cumulative* ($R_m(t)$) *Preventive Maintenance*. Hal tersebut disebabkan karena waktu interval *preventive maintenance* terlalu kecil, sehingga membuat *probability* keandalan $R(T)^n$ menurun secara signifikan dan membuat nilai *Reliability Cumulative Turbo Compressor* lebih rendah (mencapai *reliability* 0 lebih awal yaitu pada saat 2650 FH) dibandingkan dengan tanpa menerapkan *preventive maintenance*, artinya grafik *Reliability Cumulative* dengan *Preventive Maintenance* ($R_m(t)$) berada jauh dibawah dari grafik *Reliability* tanpa *preventive maintenance* ($R(t)$, No PM). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada kasus ini Turbo Compressor 2222254-1 NGS ini tidak laik atau tidak cocok untuk diberi perlakuan *preventive maintenance*, namun harus dilakukan *repair* atau modifikasi terlebih dahulu.

Analisis Kualitatif

Kasus Turbo Compressor terjadi secara global (*Worldwide*) yang disusul dengan diterbitkannya *Service Letter* (SL) oleh Boeing sebagai Manufaktur Pesawat B777-300ER dan Honeywell Aerospace sebagai *Supplier* dan manufaktur komponen Turbo Compressor. *Service Letter* berisi rekomendasi dari manufaktur untuk melakukan sebuah prosedur perbaikan, penggantian atau modifikasi

part/komponen dalam rangka mengatasi kerusakan baik yang disebabkan oleh manufaktur, maupun pencegahan potensi kegagalan karena sebab lainnya. Dengan demikian, penelitian secara kualitatif mengacu pada B777-300ER AMM SDS dan FIM Chapter 47 *Inert Gas System, Component Removal Report, Component Service Bulletin (CSB)*, dan *Service Letter (SL)*.

Analisis Kualitatif – FMEA

Berdasarkan tabel 11 Generic FMEA, dihasilkan bahwa Turbo Compressor NGS mengalami *top 4* (empat) *potential failure mode* dan 7 (tujuh) *potential failure effect* dengan nilai *Risk Priority Number (RPN)* ≥ 100 atau memiliki tingkat risiko tinggi secara berurutan terjadi pada 5 (lima) mode kegagalan. Sementara nilai *RPN* < 100 terjadi pada 2 (dua) mode kegagalan.

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) – Critical Component (CC)

Untuk mengerucutkan permasalahan, ditentukan komponen yang mempunyai kontribusi terbesar terhadap kegagalan (*Critical Component*) yang dapat melumpuhkan fungsi Turbo Compressor dan *Nitrogen Generation System*. Berdasarkan nilai *RPN* yang dihasilkan dengan mengalikan faktor *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*, dapat dihitung nilai *Critical Component (CC)* FMEA.

$$CC = \frac{\sum RPN}{N} = \frac{1853}{7} = 265..... \quad (13)$$

Maka *Critical Component* Turbo Compressor adalah *part* yang terlibat dalam *potential failure mode* yang memiliki nilai *RPN* lebih besar dari 265 yaitu MODE 1 dan MODE 2.

Tabel 11. *Generic FMEA Worksheet* Turbo Compressor 222254-1 Nitrogen Generation System B777-300ER

Description and Function	Potential Failure Mode	Potential Failure Effects	Severity	Potential Causes	Occurrence	Current Controls	Detection	RPN
Turbo Compressor terletak di <i>thermal control unit</i> pada <i>Forward Wing to Body Fairing Panel</i> . Setelah dilakukan pemisahan nitrogen dari oksigen oleh <i>Air Separation Unit</i> ,	Defect	Perubahan suhu secara tiba-tiba (MODE 7)	6	Overheating, kekurangan oil	2	NGS BITE Message Compressor Pressure Sensor - Electrical Test (Ground operation of the Nitrogen Generation System) untuk mengetahui <i>existing fault</i> atau <i>defect</i> .	5	60
		Kebocoran gas berbahaya (MODE 6)	9	Material yang tidak <i>stable</i> (cocok)	2	Inspeksi <i>installed material</i> di pesawat dan <i>incoming material</i> ke <i>Planning Production Control/Workshop</i>	4	72
Turbo Compressor berperan penting dalam menghasilkan tekanan tinggi pada nitrogen yang diperlukan untuk memompa/mengompresi bleed air untuk menyuplai nitrogen yang kaya (Nitrogen <i>Enriched Air</i>) dan memastikan bahwa dapat diinjeksikan ke dalam tangki	Turbine Blade (Fan) sulit untuk berotasi (tidak berputar secara optimal)	Mengurangi efisiensi Compressor (MODE 3)	7	Foreign Object Damage (FOD) berupa kotoran atau endapan pada <i>blade</i>	8	<i>Spin test by hand</i> dan <i>Ground Test</i> menggunakan MAT (BITE Test) NGS System serta <i>Electrical Test</i>	4	224
		Tekanan menjadi tidak stabil (MODE 4)	7	Keausan alami <i>Blade</i>	3	Monitoring suhu dan tekanan secara berkala saat di <i>Ground</i> dengan BITE - System Test (Electrical)	7	147
		Goresan pada <i>blade</i> atau seal dapat menyebabkan kebocoran (MODE 5)	7	Pemakaian berlebihan atau <i>overloading</i> , akumulasi FOD, korosi, serta kegagalan seal	3	<i>Cleaning</i> dan memutus <i>circuit breaker</i> untuk menghindari bahaya listrik dan kerusakan lebih lanjut.	6	126

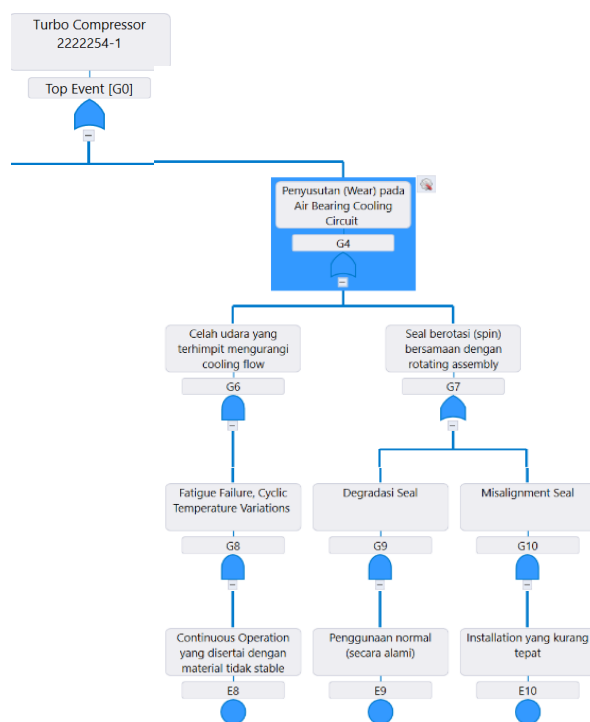
Description and Function	Potential Failure Mode	Potential Failure Effects	Severity	Potential Causes	Occurrence	Current Controls	Detection	RPN
bahan bakar, terutama <i>Center Fuel Tank</i> . Ref: B777-300ER AMM SDS Chapter 47 .	NITROGEN GEN PERF ON (EICAS STATUS): Celah udara yang awalnya dirancang untuk memberikan isolasi atau pemisahan udara, ditemukan dalam kondisi terhimpit atau mengalami penyusutan ukuran pada <i>Air Bearing Cooling Circuit</i> .	Bearings mengunci dan bisa berhenti berputar atau bergerak. (MODE 1) Seal mengeluarkan gas dan menyusut pada labirin <i>shaft seal</i> dan Ketidakseimbangan pada <i>rotating assembly</i> (MODE 2)	10	Celah udara yang terhimpit mengurangi <i>cooling flow</i>	9	Check Turbo Compressor with spin test dan Taken from AOGDesk. BITE Test - Indikasi dan Operational test termasuk system test (non boost mode dan boost mode)	8	720
			9	Seal berotasi (spin) bersamaan dengan rotating assembly	8		7	504

Hasil analisis menyebutkan bahwa penyebab utama dari kasus kegagalan Turbo Compressor adalah kondisi *fatigue failure* dan variasi suhu yang signifikan pada **Air Bearings Cooling circuit** yang disebabkan oleh *continuous operation* atau pemakaian secara alami, sehingga *Air Bearing Cooling Circuit* tidak mampu menjaga suhu agar tetap dingin secara keseluruhan pada Turbo Compressor dengan optimal. Variasi suhu yang signifikan disebabkan karena faktor material yang tidak mampu menahan terjadinya penyusutan ukuran pada *Air Bearing Cooling Circuit*. Penyusutan tersebut berdampak terhadap ketidakseimbangan *Seal* dalam mencegah terjadinya kebocoran aliran udara pada Turbo Compressor. **Seal** berotasi bersamaan dengan *rotating assembly* menyebabkan keluarnya gas dan menyusutnya *seal* pada labirin *shaft seal* yang akan mempercepat kegagalan Turbo Compressor.

Analisis Kualitatif - Fault Tree Analysis (FTA)

Berikut adalah diagram FTA Critical Component Failure Mode (MODE 1 dan MODE 2) Turbo Compressor 2222254-1 NGS. Kejadian [G4] Penyusutan (Wear) pada *Air Bearing Cooling Circuit* disebabkan oleh celah udara yang terhimpit mengurangi *cooling flow*. Celah udara tersebut terjadi karena *Air Bearing Cooling Circuit* mengalami *Fatigue Failure, Cyclic Temperature Variations* (variasi suhu yang signifikan) akibat *Continuous Operation* yang disertai dengan material yang tidak *stable*. Selain itu, penyusutan disebabkan oleh rotasi seal bersamaan dengan *rotating assembly*. Rotasi seal terdeteksi karena seal mengalami degradasi dan *misalignment* akibat

material yang tidak *stable*, sehingga mempengaruhi waktu normal operasional *seal*.



Gambar 15. Diagram FTA Turbo Compressor NGS

Effective Schedule Maintenance Turbo Compressor 2222254-1 NGS

Effective schedule maintenance yang digunakan sesuai dengan pendekatan Metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dengan target keandalan komponen/sistem pesawat terbang yang ditentukan Boeing yaitu minimal 90%.

Tabel 12. *Effective Schedule Maintenance* Metode RCM

Item	MTTF		Reliability	
	RRY	RRX	FH	R(t)
TC 222254-1	13544.67	10477.62	250	0.90
Failure Mode	Proposed Task		Can be Done	
MODE 7	Scheduled on condition task		Sub-contracting	
MODE 6	Scheduled discard task		Sub-contracting	
MODE 3	Scheduled on condition task		Sub-contracting	
MODE 4	Scheduled on condition task		Sub-contracting	
MODE 5	Scheduled discard task		Sub-contracting	
MODE 1	Scheduled restoration task		Sub-contracting	
MODE 2	Scheduled restoration task		Sub-contracting	

Pengerjaan atau tindakan perawatan semua *failure mode* dan *failure effect* yang terjadi pada komponen TC NGS dikirim ke pihak vendor (*Subcontracting*). Hal ini disebabkan karena PT GMF AeroAsia Tbk selaku MRO belum mempunyai *shop capability*/tersertifikasi untuk melakukan *maintenance* pada tahap *repair*, *overhaul* dan *modification* untuk komponen TC NGS, sehingga semua *proposed task* terutama penggantian atau pemulihan komponen dengan konsekuensi penyiapan *spare material* seperti *scheduled restoration task* dan *scheduled discard task* tidak dapat dikerjakan.

Task yang disarankan untuk kegagalan MODE 1 adalah *scheduled restoration task*, yaitu tindakan penggantian komponen sebelum batas usia tanpa memperhatikan kondisinya. Dengan demikian, *preventive maintenance* yang dapat dilakukan berdasarkan *Service Letter* Boeing adalah *upgrade modification* menjadi P/N 222254-2, yakni melakukan *Improvement* terhadap *Air Bearings*, terutama *turbine* dan *compressor seal* yang didesain menggunakan material yang lebih stabil (cocok). *Thrust cover seal* pada *turbine* direkomendasikan menjadi lembaran *single piece aluminium* yang disemprotkan plasma.

Sementara, *task* yang harus dilakukan untuk mencegah kegagalan pada MODE 2 adalah *scheduled restoration task*. Berdasarkan *Service Letter*, secara jelas rekomendasi Boeing dan Honeywell Aerospace adalah modifikasi menjadi P/N 222254-2 sebagai tindakan *preventive maintenance* pertama. Seal berlubang (*vented seal*) pada sisi *compressor* dibuat dari bahan *Fibercomp* dan menambahkan pin anti rotasi ke dalam *Turbo Compressor housing*.

Desain Maintenance Turbo Compressor 222254-1

karena keterbatasan dokumen CMM, desain *maintenance* yang direkomendasikan hanya berdasarkan *AMM Production Planning* (PP) yaitu tindakan *Inspection* dan *Cleaning*.

Tabel 13. Desain Maintenance Turbo Compressor 222254-1

Crit. Lifetime 250 jam	Breakdown Part	Maintenance	
		Inspection	Cleaning
Fail. Mode			
MODE 7	Compressor	Defect Symptoms atau Inspeksi sistem <i>cooling</i> secara berkala dan memadai disamping menggunakan NGS Controller sensor dengan NGS BITE Message Compressor Pressure Sensor menggunakan <i>Electrical Test</i> (<i>Ground operation of the Nitrogen Generation System</i>).	Cleaning menggunakan isopropil
MODE 6	Compressor	Inspeksi dengan membuka konstruksi <i>compressor</i> apakah <i>output pressure</i> berkurang pada <i>ducting</i> . Jika <i>pressure</i> berkurang maka terjadi <i>leak</i>	Cleaning menggunakan isopropil (etanol)
MODE 3	Turbine Blade	<i>Functional Check</i> , yaitu pengecekan dengan alat bantu <i>bench test</i> dengan <i>output Indication Pressure</i> pada Cockpit apakah <i>Coefficient flow</i> maksimum, normal atau rendah.	Cleaning menggunakan isopropil (etanol)
MODE 4	Turbine Blade	<i>Operational Check</i> dengan mengecek <i>pressure compressor</i> dengan limitasi 45 Psi.	Cleaning menggunakan isopropil (etanol)
MODE 5	Turbine Blade dan Seal	<i>Visual Inspection</i> apakah ada kebocoran atau tidak. <i>Seal</i> yang mengalami kebocoran sekecil apapun akan dilakukan penggantian	Cleaning menggunakan isopropil (etanol)
MODE 1	Air Bearings dan Seal	<i>Visual Inspection</i> , <i>Corrosion Inspection</i> , <i>Audible Check</i> terhadap bunyi <i>Air Bearing</i>	Cleaning menggunakan isopropil (etanol) namun dilapisi dengan oil
MODE 2	Seal dan Turbo Compressor housing	<i>Visual Inspection</i> terhadap <i>Air Bearing</i> dan <i>seal</i> apakah terjadi kerobekan yang menyebabkan part tersebut mengeluarkan gas	Cleaning menggunakan isopropil (etanol) namun dilapisi dengan oil

Effective schedule maintenance yang kemudian diperoleh *action recommended* untuk *preventive maintenance* dan rancangan/desain *maintenance* Turbo Compressor 222254-1 NGS di atas merupakan *interm action* yang direkomendasikan sebagai evaluasi *maintenance program* dan *reliability control program* yang dapat dilaksanakan oleh operator.

Besar Perkiraan Biaya Primer Maintenance Turbo Compressor 222254-1

Turbo Compressor diklasifikasikan ke dalam *pooling item*. Secara singkat, MRO mengirimkan Turbo Compressor 222254-1 ke shop vendor yaitu Honeywell Aerospace, kemudian dikirim kembali ke MRO dengan PN yang berbeda (Turbo Compressor 222254-2). Analisis perhitungan besar perkiraan biaya primer program *maintenance* Turbo Compressor yang dilakukan hanya terbatas pada perhitungan biaya primer atau biaya pangkal untuk alokasi pengerjaan *component maintenance* serta penggantian komponen yang mencakup Turbo Compressor Assy.

Biaya Primer Modifikasi Turbo Compressor

Berdasarkan rekomendasi Boeing dan Honeywell Aerospace adalah bahwa tindakan *maintenance* pertama kali yang harus dilakukan adalah *upgrade* modifikasi dari PN 222254-1 menjadi PN 222254-2. Tentunya operator akan meminta ke vendor untuk melakukan modifikasi dengan biaya dibebankan kepada vendor *warranty*. Namun, jika masa *warranty* sudah tidak berlaku, maka operator akan lebih memilih modifikasi dari pada membeli baru dengan negosiasi/*deal* lain, seperti *discount*, *component exchange*, dan lain-lain. Dengan asumsi masa *warranty* sudah tidak berlaku, maka sebelum mengeluarkan biaya untuk pelaksanaan *preventive maintenance* dan lain-lain, operator harus mengeluarkan biaya *unscheduled maintenance* untuk modifikasi Tc terdapat pada Tabel 14.

Tabel 14. Biaya Primer Modifikasi Turbo Compressor NGS

Description	Cost / Item	Total Cost
Pooling Item		
Purchased Retrofit from PN 222254-1 to 222254-2	Rp 345,533,625.00	Rp 345,533,625.00
Conversion		
Total Modification Cost		Rp 345,533,625.00

Berdasarkan *Component Service Buletin* (CSB) 222254-47-0332, biaya modifikasi yang harus dikeluarkan untuk membayar harga material per unit sebesar USD 22,500.00 atau Rp 345,533,625 [11].

Biaya Primer Preventive Maintenance TC NGS

Dengan N (Frekuensi) pertahun, durasi pengerjaan *preventive maintenance* selama 6 jam setiap 1 kali pengerjaan, Biaya Tenaga Kerja/TK *Cost* sebesar USD 41.60/jam atau dalam rupiah sebesar Rp 638,853.28/jam (Kurs 1 USD sama dengan Rp 15,357.05 per tanggal 24 September 2023), maka dihasilkan biaya primer pelaksanaan program *scheduled maintenance* dengan *preventive maintenance* (PM) TC NGS.

Tabel 15. Biaya Primer Preventive Maintenance TC NGS

N/ Yrs	PM (FH)	Duration (Hrs)	TK Cost/Hrs	Total Cost
35	250	6	Rp 638,853.28	Rp 134,312,513.59
Total Preventive Maintenance Cost				Rp 134,312,513.59

Maka didapatkan besar perkiraan biaya primer program *Preventive Maintenance* Turbo Compressor Assy sebesar USD 8,745.98 atau sebesar Rp 134,312,513.59.

Biaya Primer Repair Turbo Compressor NGS

Berdasarkan *Component Service Buletin* (CSB) 222254-47-0332, biaya primer *unscheduled maintenance* untuk *repair* sebesar USD 35,377.29 atau Rp 543,290,811.39 [12].

Tabel 16. Biaya Primer Repair NGS TC Assy 222254-2

Description	Cost / Item (Rp)	Total Cost (Rp)
Honeywell Serv.	543,290,811.39	543,290,811.39
Total Repair Cost		543,290,811.39

Biaya Primer Overhaul TC Assy 222254-2 NGS

Perhitungan biaya primer pelaksanaan *scheduled maintenance* untuk program *overhaul* pada penelitian ini menggunakan parameter waktu MTTF dan utilisasi pesawat yaitu waktu operasi pesawat selama periode 2018 – 2019 dengan rata-rata *flight hours* pesawat Boeing 777-300ER. Nilai Kuantitas item Turbo Compressor didapatkan dari pembagian utilitas pesawat dengan nilai MTTF yaitu sebesar 3.8, dibulatkan menjadi 4 (repetisi), artinya dilakukan *overhaul* untuk Turbo Compressor sebanyak 4 kali dalam kurun waktu satu tahun. Dengan demikian, total perkiraan biaya primer pelaksanaan *scheduled maintenance* untuk program *overhaul* TC NGS adalah sebesar USD 162,700.61 atau Rp 2,498,601,376.77 [11]

Tabel 17. Biaya Primer Program Overhaul TC NGS

Qty /Yrs	MTTF (FH)	Utility (FH)	Cost/Item (Rp)	Total Cost (Rp)
4 reps	10477.6 2	39968	655,009,050. 17	2,498,601,376. 77
Total Overhaul Cost				2,498,601,376. 77

Biaya Primer Component Replacement TC Assy 222254-2 NGS

Jika lebih dari satu kali dilakukan modifikasi namun berpotensi kegagalan muncul kembali, maka tindakan perawatan terakhir yang dapat dilakukan sesuai AMM adalah *component replacement*. Asumsi yang bisa diambil untuk perhitungan biaya *component replacement* bahwa penggantian komponen TC NGS dilakukan maksimal satu kali dalam setahun.

Berdasarkan *Component Service Buletin* (CSB) dengan 222254-47-0332, Honeywell menentukan biaya *component replacement* TC NGS sebesar USD 290,540.90 atau sebesar Rp 4,461,851,128.35.

Tabel 18. Biaya Primer Component Replacement TC NGS

Descript.	Qty	Dur.	Cost/Item (Rp)	Total Cost (Rp)
Pooling Item - Spare	1 ea		4,461,851,128.35	4,461,851,128.35
Manhour for Removal - Installation	1.0 package (MHrs)	6 jam	638,853.28	3,833,119.68
Total Component Replacement Cost				4,465,684,248.03

Maka total perkiraan biaya primer pelaksanaan *unscheduled maintenance* untuk *component replacement* TC NGS adalah sebesar USD 290,790.50 atau Rp 4,465,684,248.03 [11].

Cost – Summary (RCP dan MP TC 222254-1)

Preventive maintenance cost dan *overhaul cost* merupakan total biaya *scheduled maintenance*, sedangkan *unscheduled maintenance*-nya meliputi *modification cost*, *repair cost* dan *component replacement cost*.

Tabel 19. Summary RCP dan Maintenance Program Cost

Scheduled Maintenance cost	\$ 171,446.59	Rp 2,632,913,890.35
Unscheduled Maintenance cost	\$ 348,667.79	Rp 5,354,508,684.42
Optimum Interval	250	FH

Reliability at this point	90%	Normal Case
---------------------------	-----	-------------

KESIMPULAN

Dalam menjalankan fungsi untuk mengurangi kadar oksigen dalam *center fuel tank* hingga mencapai tingkat maksimum 12% dan digantikan dengan nitrogen, Nitrogen Generation System B777-300ER mengalami *failure* sistem tertinggi pada tahun 2018-2019 di beberapa registrasi pesawat. Dari hasil analisis yang diperoleh, faktor dominan penyebab kegagalan tersebut disebabkan oleh *variation failure* Turbo Compressor Part Number 222254-1.

Secara statistik, tingkat kegagalan dan keandalan Turbo Compressor P/N 222254-1 memiliki *reliability* 28.73% dan rata-rata selang waktu terjadinya kerusakan (MTTF) sebesar 10477.62 FH. Sehingga diperoleh waktu optimum *preventive maintenance* (TPM) untuk *interm action* pada interval 250 FH dengan *reliability* 90%.

Secara kualitatif, dihasilkan bahwa penyebab dasar terjadinya *failure mode* RPN tertinggi (*Critical Component*) disebabkan oleh kondisi *fatigue failure* dan variasi suhu yang signifikan pada *Air Bearings Cooling circuit* akibat dari *continuous operation*. Variasi suhu yang signifikan dipicu oleh faktor material yang tidak mampu menahan terjadinya penyusutan ukuran pada *Air Bearing Cooling Circuit*.

Berdasarkan *service letter* yang diterbitkan oleh Boeing dan Honeywell Aerospace mengarah pada rekomendasi untuk *upgrade* atau *improvement* Turbo Compressor 222254-1 menjadi P/N 222254-2 pada *item turbine* dan *compressor seal* yang didesain menggunakan material yang lebih *stable* (cocok). *Thrust cover seal* pada *turbine* direkomendasikan menjadi lembaran *single piece aluminium* yang disemprotkan plasma. Seal berlubang (*vented seal*) pada sisi compressor dibuat dari bahan Fibercomp dan menambahkan pin anti rotasi ke dalam Turbo Compressor housing. Dengan demikian, tindakan perawatan yang tepat adalah *scheduled restoration task* dengan *interm action* yang dapat dilakukan oleh operator adalah memperbaiki *Supply Chain Management* dengan menambah dan/atau mempercepat ketersediaan *spare part* yang sering mengalami *problem*.

Interm action pra-modifikasi maupun *preventive maintenance* post-modifikasi dari *effective*

scheduled maintenance yang dapat dilakukan yaitu pengecekan Turbo Compressor dengan *spin test* serta BITE Test Indikasi dan *Operational Test* termasuk *system test (non boost mode dan boost mode)*. Sedangkan desain *maintenance level* Turbo Compressor berdasarkan referensi AMM adalah *Visual Inspection*, *Corrosion Inspection*, *Audible Check*, dan *Visual Inspection*. Tindakan pada level *Cleaning* dapat dilakukan menggunakan isopropil (etanol) namun dilapisi dengan oil.

Adapun besar perkiraan biaya primer program *maintenance* Turbo Compressor dalam kurun waktu satu tahun terdiri dari *scheduled cost* dan *unscheduled cost*. Total *scheduled cost* sebesar USD 171,446.59 atau Rp 2,632,913,890.35. Sedangkan total *unscheduled cost* sebesar USD 348,667.79 atau Rp 5,354,508,684.42.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian dan penulisan jurnal ini penulis tujuikan kepada PT GMF AeroAsia Tbk yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan *internship* dan memfasilitasi penelitian dalam kurun waktu 1.2 tahun. Penulis sampaikan terima kasih juga kepada Mas Nicky Hartopo, *Senior Aircraft Maintenance Engineer*, sekaligus *Supervisor* Magang di Line Maintenance B777-300ER, Mas Fauzan selaku *Senior Development Engineer* di Avionic and System Engineering (TEA-1), serta kepada seluruh *Engineer TEL (Leased Aircraft Management)* dan *Aircraft Maintenance Technician/Engineer TLH-2 (Hangar Support Line Maintenance)* atas bimbingan, bantuan, dan kerjasamanya.

REFERENSI

- [1] A. Musfarid,; E. Cordova; Noerachman, Evaluasi Keandalan Sistem Mesin Kontrol Bahan Bakar Pada Pesawat Boeing 737 Classic Garuda Indonesia [Skripsi], Surabaya: ITS Teknik Fisika, 2011.
- [2] Boeing, "B777-300ER Aircraft Maintenance Manual (AMM): Safety Data Sheet (SDS) ATA Chapter 47 Inert Gas System,".
- [3] PT Garuda Maintenance Facility Aero Asia Tbk, Mengoptimalkan Momentum untuk Perbaikan Fundamental dan Kestabilan, Jakarta: PT Garuda Maintenance Facility Aero Asia Tbk, 2021.
- [4] C. E. Ebeling, An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, McGraw Hill: Universitas Michigan, 1997.
- [5] N. A. Naya, "Penentuan Jadwal Perawatan Dan Pengadaan Komponen Kritis Pada Mesin Untuk Meminimasi Biaya Produksi," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2011.
- [6] N. Djamal and R. Azizi, "Identifikasi dan Rencana Perbaikan Penyebab Delay Produksi Melting Proses dengan Konsep Fault Tree Analysis (FTA) di PT. XYZ," *Jurnal INTECH Teknik Industri Universitas Serang Raya*, vol. 1, no. 1, pp. 34-45, 2015.
- [7] Garuda Indonesia Airline, Fleet Reliability Report, Report FRR/GA/1219, Tangerang: GMF Reliability and Engineering Services, Tangerang,, 2019.
- [8] Boeing, B777-200/300 Fault Isolation Manual: Chapter 47 Inert Gas System, Amerika Serikat,: ECCN 9E991 Boeing Proprietary, 2022.
- [9] N. Ansoril and .. M. m. Mustajib, "Sistem Perawatan Terpadu," Ruko Jambusari, Yogyakarta, 2013.
- [10] F. Setiawan, D. M. C. Putra and E. Sofyan, "Analisis Reliability Sistem Starter Valve Untuk Merencanakan Aktivitas Maintenance Pada Pesawat Boeing 737 Next Generation Di Pt Gmf Aeroasia," *Teknika STTKD*, vol. 6, no. 2, pp. 92 - 103, 2020.
- [11] Boeing, "Service Letter Nitrogen Generation System (NGS) Turbo Compressor Improvement. Report 747-SL-47-005," Boeing Commercial Airplanes (BCA) Customer Support, Amerika Serikat, 2022., Amerika Serikat, 2022.
- [12] A. Soedira, A. Soedira and K. Roz, "Analisis Reliabilitykomponen Kritis Electric Submersible Axial Flow Pumpberkapasitas 2000 Liter Per Detik Menggunakan Probability Plotdan Root Cause Analysis," *JurnalTeknik Mesin*, vol. 10, no. 2, pp. 151 - 160, 2022.