

Optimasi Waktu Penggantian Komponen *Air Cycle Machine* (ACM) Pesawat Terbang CRJ-1000 Menggunakan Metode *Geometric Process*

Puspita Permatasari, Haryono, dan Diaz Fitra Aksioma
 Jurusan Statistika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
 Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: haryono@statistika.its.ac.id; puspitapermata3@gmail.com

Abstrak— Perbaikan dan penggantian komponen mesin pesawat terbang penting dan harus dilakukan karena setiap komponen memiliki batas usia pakai tertentu. Perbaikan pada komponen yang mengalami kerusakan tidak selamanya efisien. Jika komponen yang rusak telah mengalami beberapa kali perbaikan, maka keandalan dari komponen ini akan semakin menurun dan laju kerusakannya akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya waktu. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan waktu penggantian (*replacement*) komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000 yang optimal di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) AeroAsia dengan metode *Geometric Process* yang menyatakan bahwa setelah komponen diperbaiki maka dianggap memiliki kinerja dan keandalan yang menurun secara linier. Jika komponen ACM telah mengalami beberapa kali kerusakan, maka umur komponen ACM pun (*flight hours*) akan semakin menurun, sehingga semakin sering diperbaiki. Semakin seringnya komponen ACM diperbaiki, maka hal ini tidak efektif lagi karena hari perbaikannya semakin bertambah, sehingga mengganggu kenyamanan penumpang sebab udara di kabin bertambah panas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000 akan diganti setelah terjadi kerusakan yang ke-4 dengan estimasi rata-rata biaya penggantian jangka panjang komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pada pesawat CRJ-1000 per-hari pada kerusakan ke-4, yaitu sebesar US\$ 6961. Pada kerusakan ke-4 ini biaya pernggantian lebih murah dari pada 6 kali biaya perbaikan yang dilakukan, dan umur komponen (*life time*) dari komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pada pesawat CRJ-1000 ini lebih lama jika mengalami penggantian dari pada akumulasi estimasi umur komponen (*life time*) setelah mengalami 6 kali biaya perbaikan.

Kata Kunci— *Air Cycle Machine*, *Optimasi*, *Geometric Process*, *Penggantian*

I. PENDAHULUAN

MODA transportasi udara di Indonesia saat ini berkembang pesat. Seiring dengan meningkatnya jumlah pengguna jasa transportasi udara, maka perusahaan penerbangan di Indonesia dituntut untuk semakin meningkatkan pelayanan serta keamanan. Hal tersebut sesuai dengan Pasal 3 Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2009 mengenai tujuan terselenggaranya penerbangan [1]. Untuk meningkatkan keamanan penerbangan di Indonesia, setiap pesawat udara selama beroperasi pasti memiliki kebijakan dalam perbaikan dan penggantian komponen atau mesin pesawat yang digunakan. Perbaikan dan penggantian ini harus dilakukan karena setiap komponen dalam mesin pesawat terbang mempunyai batas usia pakai tertentu.

PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) merupakan salah satu perusahaan terbesar dan terbaik di Indonesia yang bergerak di bidang *maintenance, repair, and overhaul* (MRO) pesawat terbang. Salah satu hal yang dilakukan oleh PT. GMF Aero Asia adalah dengan memberikan perawatan

serta penggantian terhadap komponen pesawat terbang yang digunakan secara kontinyu.

Komponen *Air Cycle Machine* (ACM) merupakan komponen yang penting dalam pesawat terbang. Fungsi dari komponen ACM ini adalah menghasilkan udara *precooled* menengah untuk memfasilitasi ekstraksi air pada tekanan tinggi, serta penukar panas udara. Jika terjadi penurunan kemampuan fungsi komponen ini, maka menyebabkan pengurangan dalam kecepatan dan akan berpengaruh pada hilangnya efisiensi. Suhu akan meningkat dan aliran udara dalam pesawat terbang akan berkurang, sehingga jika komponen ini mengalami kerusakan maka akan mengganggu kenyamanan penumpang. Oleh karena itu perlu dilakukan perawatan dan perbaikan ringan terhadap komponen ACM.

Perbaikan pada komponen yang mengalami kerusakan tidak selamanya efisien. Jika komponen ACM yang rusak telah mengalami beberapa kali perbaikan, maka keandalan dari komponen ini akan semakin menurun dan laju kerusakannya akan semakin meningkat seiring bertambahnya waktu. Oleh karena itu, perbaikan yang dilakukan tidak lagi ekonomis dan perusahaan akan mengeluarkan biaya lebih besar dalam memperbaiki komponen yang mengalami kerusakan, sehingga komponen yang rusak akan dibuang dan diganti dengan yang baru / *replacement* [2].

Penelitian sebelumnya mengenai kebijakan penggantian (*replacement*) yang dilakukan oleh Krisnadi, Soemadi, Mustafa tahun 2014 [3] telah memberikan hasil bahwa penggantian komponen roda pada lokomotif kereta api DE CC 201 seri 99 yang optimal adalah 54 hari dan penggantian radiator optimal adalah 23 hari. Penelitian yang telah dilakukan tersebut memiliki asumsi yang sederhana yaitu mesin rusak akan beroperasi seperti baru kembali setelah dilakukan perbaikan atau dianggap sebagai *as good as new*. Dalam praktiknya, jika komponen semakin sering digunakan, maka laju kerusakan komponen tersebut semakin meningkat seiring bertambahnya waktu serta komponen yang rusak dan telah diperbaiki akan memiliki kinerja dan keandalan yang menurun dari pada komponen yang baru. Selain itu, penelitian sebelumnya mengenai kebijakan penggantian (*replacement*) yang dilakukan oleh Leung & Fong pada tahun 2000 [4] menggunakan pendekatan *geometric processes* untuk menyelesaikan masalah penggantian *gearbox* pada bus dan mendapatkan waktu penggantian optimal dengan meminimalkan biaya rata-rata jangka panjang per hari yang ditentukan untuk setiap jenis *gearbox*.

Penentuan waktu penggantian komponen di GMF AeroAsia saat ini menggunakan bantuan *software* ReliaSoft dan menggunakan asumsi jika komponen telah diperbaiki maka akan beroperasi seperti komponen baru (*as good as new*). Pada penelitian ini akan dilakukan penentuan optimasi waktu penggantian komponen ACM pesawat terbang di PT.

Garuda Maintenance Facility (GMF) AeroAsia dengan metode *Geometric Process* dimana jika setelah komponen diperbaiki maka dianggap memiliki kinerja dan keandalan yang menurun secara linier [4]. Kebijakan waktu penggantian (*replacement*) komponen ACM yang optimal ditentukan berdasarkan biaya minimum. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru dalam penentuan waktu optimal kebijakan penggantian komponen ACM di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) AeroAsia menggunakan pendekatan model yang lebih sesuai.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Geometric Process (GP)*

Dalam masalah pemeliharaan, banyak mesin yang mengalami penurunan kinerja karena pengaruh penuaan dan keausan. Dalam praktiknya, setelah dilakukan perbaikan pada mesin, maka mesin akan mengalami kinerja yang tidak seperti mesin baru. Berdasarkan fenomena ini, Lam (1998) dalam [4] pertama kali mengusulkan sebuah pendekatan *Geometric Process* (GP) untuk memodelkan fenomena tersebut. Menurut Lam (1998), terdapat dua definisi *Geometric Process* (GP) yang diberikan sebagai berikut.

Definisi 1. Diberikan variabel random G_1, G_2, \dots untuk $r > 0$, $\{r^{n-1}G_n, n = 1, 2, \dots\}$ membentuk suatu *Renewal Process* (RP) maka $\{G_n, n = 1, 2, \dots\}$ merupakan suatu *Geometric Process* (GP), r disebut sebagai rasio atau parameter dari *Geometric Process* (GP).

Definisi 2. Jika $r > 1$, maka *Geometric Process* (GP) tersebut merupakan suatu *Geometric Process* (GP) yang menurun. Jika $0 < r < 1$, maka *Geometric Process* (GP) tersebut merupakan suatu *Geometric Process* (GP) yang meningkat. Jika $r = 1$, maka *Geometric Process* (GP) merupakan suatu *Renewal Process* (RP).

dengan:

- X_n : umur komponen setelah ke $(n - 1)$ perbaikan dengan $X_0 = 0$
- Y_n : waktu perbaikan setelah n kerusakan untuk $1, 2, 3, \dots, N$
- G_n : *Geometric Process* (X_n maupun Y_n) untuk $n = 1, 2, \dots, N$

B. *Uji Trend Laplace*

Uji trend Laplace digunakan untuk memeriksa keberadaan trend pada data. Perumusan hipotesis yang digunakan sebagai berikut:

H_0 : Data tidak memiliki trend.

H_1 : Data memiliki trend.

Statistik Uji Laplace diberikan sebagai berikut:

$$L = \frac{\frac{\sum_{n=1}^{N-1} T_n}{N-1} - \frac{T_N}{2}}{T_N \sqrt{\frac{1}{12(N-1)}}} \tag{2.1}$$

dengan:

$$T_n = \sum_{i=1}^n G_i$$

L merupakan pendekatan distribusi normal standart untuk $N \geq 4$ pada 5 persen level signifikan. Jika $|L| > 1.96$, maka

H_0 ditolak yang berarti bahwa data set $\{G_1, G_2, \dots, G_N\}$ menunjukkan adanya trend [4].

C. *Estimasi Parameter $\ln r, \alpha$, dan σ_e^2*

Persamaan regresi linier sederhana yang digunakan untuk estimasi parameter adalah sebagai berikut [4].

$$\ln G_n = -\ln r (n - 1) + \alpha + e_n \text{ untuk } n = 1, 2, \dots, N \tag{2.2}$$

Dimana e_n adalah bentuk error yang merupakan variabel random dengan mean 0 dan variansi σ_e^2 untuk semua $n = 1, 2, \dots, N$. Estimasi titik menggunakan metode *least square* (kuadrat terkecil) $\ln r, \alpha$, dan σ_e^2 dihitung menggunakan formula [4]:

$$\ln \hat{r} = \frac{6}{(N-1)N(N+1)} \left[(N-1) \sum_{n=1}^N G_n - 2 \sum_{n=1}^N (n-1) \ln G_n \right] \tag{2.3}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum_{n=1}^N \ln G_n}{N} + \left(\frac{N-1}{2} \right) \ln \hat{r} \tag{2.4}$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{N-2} \left\{ \sum_{n=1}^N (\ln G_n)^2 - \frac{\left(\sum_{n=1}^N \ln G_n \right)^2}{N} \right\} \tag{2.5}$$

$$\frac{1}{N-2} \left\{ \ln \hat{r} \left[\left(\frac{N-1}{2} \right) \sum_{n=1}^N \ln G_n + \sum_{n=1}^N (n-1) \ln G_n \right] \right\}$$

D. *Uji Geometric Process (GP)*

Untuk menguji apakah data berasal dari *Geometric Process* (GP), Lam (1992) dalam [4] menyusun hipotesis sebagai berikut.

H_0 : $r = 1$ (rasio keandalan sama dengan 1 atau merupakan *renewal process*)

H_1 : $r \neq 1$ (rasio keandalan tidak sama dengan 1 atau merupakan *geometric process*)

Statistik Uji-T diberikan sebagai berikut:

$$t = \frac{-\ln \hat{r} \sqrt{(N-1)N(N+1)}}{\sqrt{12} \hat{\sigma}_e} \tag{2.6}$$

t berdistribusi *student - t* dengan derajat bebas $(N - 2)$.

Jika $|t| >$ nilai kritis $t_{N-2; 0.025}$, maka H_0 ditolak pada 5 persen level signifikan yang berarti data set $\{G_1, G_2, \dots, G_N\}$ berasal dari *Geometric Process* (GP).

E. *Estimasi Mean dan Variansi dari G_n*

Pertama, estimasi mean dan variansi dari G_1 dilakukan dengan menggunakan estimator yang relevan. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

a. Jika rasio $r > 1$, estimasi mean dan variansi dari G_1 sebagai berikut.

$$\hat{\mu}_{G_1} = \frac{(1 - \hat{r}^{-1}) \sum_{n=1}^N G_n}{1 - \hat{r}^{-N}} \tag{2.7}$$

$$\hat{\sigma}_{G_1}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (\hat{r}^{n-1} G_n)^2 - \frac{\left(\sum_{n=1}^N \hat{r}^{n-1} G_n \right)^2}{N}}{N-1} \tag{2.8}$$

- b. Jika $0 < r < 1$, μ_{G_1} diestimasi menggunakan persamaan berikut ini.

$$2\mu_{G_1}^2 \ln \mu_{G_1} - 2\hat{\alpha}\mu_{G_1}^2 - \sigma^2_{G_1} = 0 \quad (2.9)$$

Dimana $\hat{\alpha}$ dan $\hat{\sigma}^2_{G_1}$ masing-masing ditentukan oleh persamaan (2.4) dan (2.8).

- c. Jika $r = 1$, estimasi μ_{G_1} dan $\hat{\sigma}^2_{G_1}$ masing-masing ditentukan sebagai berikut.

$$\hat{\mu}_{G_1} = \frac{\sum_{n=1}^N G_n}{N} \text{ dan } \hat{\sigma}^2_{G_1} = \frac{\sum_{n=1}^N (G_n - \hat{\mu}_{G_1})^2}{N - 1} \quad (2.10)$$

Kedua, estimasi mean dan varians dari G_n untuk $n = 2, 3, \dots, N$ dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\hat{\mu}_{G_n} = \frac{\hat{\mu}_{G_1}}{\hat{r}^{n-1}} \text{ dan } \hat{\sigma}^2_{G_n} = \frac{\hat{\sigma}^2_{G_1}}{\hat{r}^{2(n-1)}} \quad (2.11)$$

F. Kebijakan Penggantian Optimal

Diberikan Z_n merupakan waktu antara penggantian ke $(n - 1)$ dan penggantian ke- n dengan $Z_0 = 0$, maka $\{Z_n, n = 1, 2, \dots\}$ membentuk *renewal process*. Berikut ini adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung rata-rata biaya jangka panjang per hari [5].

$$l_1(N) = \frac{c_f \mu_{Y_1} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{b^{n-1}} - \mu_{X_1} \sum_{n=1}^N \frac{1}{a^{n-1}} + c_R}{\mu_{X_1} \sum_{n=1}^N \frac{1}{a^{n-1}} + \mu_{Y_1} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{b^{n-1}}} u \quad (2.13)$$

untuk $N = 1, 2, \dots$

dengan:

- c_f : biaya rata-rata penggantian
- c_R : biaya rata-rata perbaikan
- a : parameter *Geometric Process* umur komponen
- b : parameter *Geometric Process* lama waktu perbaikan
- μ_{X_1} : rata-rata umur komponen setelah kerusakan pertama
- μ_{Y_1} : rata-rata lama waktu perbaikan setelah kerusakan pertama
- $l(N)$: biaya rata-rata jangka panjang per hari

Kebijakan penggantian optimal ditentukan dengan meminimalkan $l_1(N)$ terhadap N . Berikut ini adalah langkah-langkah dalam menentukan kebijakan waktu penggantian yang optimal.

1. Menghitung rata-rata biaya jangka panjang per hari $l_1(N)$ untuk untuk $N = 1, 2, 3, \dots$ dengan persamaan (2.16).
2. Plot rata-rata biaya jangka panjang per hari $l_1(N)$ terhadap N , kemudian dapat diperoleh waktu penggantian optimal yang ditunjukkan oleh titik minimum pada kurva.

G. Air Cycle Machine (ACM)

Air Cycle Machine (ACM) merupakan komponen yang penting bagi pesawat terbang. ACM dipasang antara komponen *plenum* dan kondensator. ACM memiliki tiga fungsi sebagai berikut:

1. Mengkompresi dan mengekspansi udara yang mengalir untuk memfasilitasi mesin pendingin udara / APU (*Auxillary Power Unit*)
 2. Menghasilkan kompresi udara *precooled* menengah untuk memfasilitasi ekstraksi air pada tekanan tinggi menggunakan tenaga mesin yang dihasilkan oleh turbin
 3. Penukar panas udara yang mengalir di tanah dan ketika efek udara di ram tidak mencukupi.
- Kerusakan ACM menyebabkan pengurangan dalam kecepatan dan karena itu akan berpengaruh pada hilangnya efisiensi. Suhu akan meningkat dan aliran udara dalam pesawat terbang akan berkurang.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Sumber Data dan Variabel Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data umur komponen (*life time*) dengan satuan jam terbang (*flight hours*) dan lama waktu perbaikan komponen (*repair time*) dalam satuan hari dari komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000 dalam periode waktu Mei 2014 sampai dengan Agustus 2015 yang diperoleh dari bagian *Engineering Reliability* (TER-1) PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) Aero Asia. Terdapat 13 tipe pesawat terbang CRJ-1000 yaitu GRA, GRC, GRE, GRF, GRG, GRH, GRI, GRJ, GRK, GRL, GRM, GRN, GRO.

Di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) Aero Asia Cengkareng tidak terdapat pencatatan data lama waktu perbaikan setiap komponen ACM (*repair time*) yang mengalami kerusakan, tetapi hanya terdapat informasi mengenai estimasi lama waktu perbaikan, yaitu 30 hari termasuk *shipping* (pengiriman) komponen ACM ke Toulouse, Perancis dan proses administrasi. Pihak PT. GMF AeroAsia memperkirakan waktu *shipping* (pengiriman) dan proses administrasi yaitu selama 20 hari, sehingga perkiraan rata-rata lama waktu perbaikan komponen ACM-nya selama 10 hari. Selama ini, dalam analisis di PT. GMF AeroAsia menggunakan Distribusi Weibull. Karena informasi data lama waktu perbaikan dari PT.GMF AeroAsia terbatas, maka lama waktu perbaikan komponen ACM pada penelitian ini menggunakan *random data* Distribusi Weibull dengan parameter *Shape* (β) = 5 dan parameter *Scale* (η) = 10.

B. Langkah Analisis

Langkah – langkah yang dilakukan untuk menganalisis masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data umur komponen yang digunakan merupakan data umur komponen *Air Cycle Machine* (ACM) dari 13 tipe pesawat terbang CRJ-1000. Ketiga belas tipe pesawat terbang tersebut memiliki spesifikasi kinerja komponen ACM yang sama, sehingga dalam analisis yang dilakukan, umur komponen ACM dari ketigabelas tipe pesawat CRJ-1000 tersebut dapat digabungkan menjadi satu dataset berdasarkan tanggal kerusakan.
2. Menguji apakah terdapat trend pada data umur komponen dan lama waktu perbaikan ACM dengan menggunakan statistik uji Laplace pada persamaan (2.1).
3. Berdasarkan poin 2, jika terdapat trend dalam data maka diduga data berasal dari suatu *Geometric Process* sehingga perlu dilakukan estimasi parameter $\ln r, \alpha$, dan σ_e^2 dengan menggunakan persamaan (2.3), (2.4), dan (2.5). $\ln r$ dapat berupa $\ln a$ atau $\ln b$ dengan $\ln a$ merupakan estimasi parameter untuk data umur

komponen, sedangkan $\ln b$ merupakan estimasi parameter untuk data lama waktu perbaikan.

4. Estimasi parameter pada poin 3 digunakan untuk menguji dugaan apakah data umur komponen dan lama waktu perbaikan berasal dari *Geometric Process* (GP) dengan menggunakan statistik uji pada persamaan (2.6).
5. Berdasarkan poin 4, jika data berasal dari *Geometric Process*, maka perlu dilakukan estimasi mean dan variansi dari G_n dengan menggunakan persamaan (2.7) sampai dengan (2.11)
6. Mendapatkan optimasi penggantian komponen ACM pesawat terbang di PT. GMF AeroAsia.
 - a. Menghitung rata-rata biaya jangka panjang per hari dengan persamaan (2.13) dengan mencobakan jumlah kerusakan (N). Jika jumlah kerusakannya adalah 1, maka nilai $\sum_{n=1}^N \frac{1}{b^{n-1}} = 1$, sehingga persamaan (2.13) menjadi:

$$l_1(N) = \frac{c_f \mu_{Y_1} - \mu_{X_1} \sum_{n=1}^N \frac{1}{a^{n-1}} + c_R}{\mu_{X_1} \sum_{n=1}^N \frac{1}{a^{n-1}}}$$

- b. Membuat kurva antara rata-rata biaya jangka panjang per hari $l_1(N)$ terhadap N.
- c. Mendapatkan nilai optimum biaya penggantian (*replacement*) komponen ACM pesawat terbang dengan cara *trial and error*.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Trend Data Umur Komponen ACM dan Lama Waktu Perbaikan

Data umur komponen yang digunakan merupakan data umur komponen *Air Cycle Machine* (ACM) dari 13 tipe pesawat terbang CRJ-1000. Ketiga belas tipe pesawat terbang tersebut memiliki spesifikasi kinerja komponen ACM yang sama. Dengan demikian umur komponen ACM dari ketigabelas tipe pesawat CRJ-1000 tersebut dapat digabungkan menjadi satu dataset dengan mengurutkannya berdasarkan tanggal terjadinya kerusakan komponen ACM dari awal sampai dengan terakhir seperti yang terdapat pada Lampiran B, sehingga terdapat total kerusakan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000 sejumlah 23 kerusakan.

Langkah selanjutnya yang harus dilakukan sebelum analisis lebih lanjut adalah menguji apakah terdapat trend pada data umur komponen dan lama waktu perbaikan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000. Hal ini dilakukan sebagai pendugaan awal data berasal dari *Geometric Process*. Berikut ini adalah hasil dari pengujian trend dengan menggunakan statistik uji Laplace untuk umur komponen dan lama waktu perbaikan komponen ACM pesawat terbang CRJ-1000.

Tabel 1. Statistik Uji Laplace Umur Komponen dan Lama Waktu Perbaikan ACM

Data	Statistik	
	L	Z _{0,025}
Umur Komponen	11,1948	1,96
Lama Waktu Perbaikan	3,87738	

Tabel 1. menunjukkan bahwa dengan menggunakan toleransi kesalahan 0,05, nilai statistik uji Laplace untuk data umur komponen dan lama waktu perbaikan lebih besar dari pada nilai titik kritis ($|L| > 1,96$), sehingga H_0 ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa terdapat adanya trend pada dataset umur komponen dan lama waktu perbaikan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000.

Terdapatnya trend pada kedua dataset ini berarti diduga bahwa umur komponen dan lama waktu perbaikan ACM mengikuti *Geometric Process*, yaitu jika komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000 ini semakin sering rusak dan kemudian akan semakin sering pula diperbaiki, maka keandalan atau kinerja berfungsi baik dari komponen ACM ini akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya waktu, sedangkan tingkat laju kerusakannya akan semakin meningkat. Untuk membuktikan dugaan tersebut, perlu dilakukan pengujian lebih lanjut.

B. Estimasi Parameter $\ln r, \alpha$, dan σ_e^2 untuk Umur Komponen ACM dan Lama Waktu Perbaikan

Data umur komponen dan lama waktu perbaikan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000 menunjukkan adanya trend, sehingga diduga data mengikuti *Geometric Process*. Sebelum menguji apakah data mengikuti *Geometric Process*, perlu dilakukan perhitungan estimasi parameter $\ln r, \alpha$, dan σ_e^2 untuk umur komponen dan lama waktu perbaikan komponen ACM terlebih dahulu. $\ln r$ menunjukkan estimasi parameter untuk umur komponen maupun lama waktu perbaikan, dengan $\ln a$ menunjukkan parameter untuk umur komponen, sedangkan $\ln b$ menunjukkan parameter untuk lama waktu perbaikan. Berikut ini adalah hasil estimasi parameter $\ln r, \alpha$, dan σ_e^2 umur komponen dan lama waktu perbaikan komponen ACM.

Tabel 2. Estimasi Parameter Umur Komponen ACM dan Lama Waktu Perbaikan

Umur Komponen		Lama Waktu Perbaikan	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
$\ln(\hat{a})$	0,34808	$\ln(\hat{b})$	0,92521
\hat{a}	1,41635	\hat{b}	2,52239
$\hat{\alpha}$	2,64592	$\hat{\alpha}$	6,43860
$\hat{\sigma}_e^2$	1,31132	$\hat{\sigma}_e^2$	0,78115

Berdasarkan Tabel 2. dapat diketahui bahwa nilai estimasi parameter \hat{a} lebih besar dari 1. Hal ini mengindikasikan bahwa seiring dengan pemakaian komponen *Air Cycle Machine* (ACM), maka umur komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000 akan semakin pendek dan terus memendek hingga akhirnya komponen ACM ini akan mengalami kerusakan. Estimasi parameter variansi $\hat{\sigma}_e^2$ untuk umur komponen tergolong kecil, yaitu sebesar 1,31132 sedangkan untuk lama waktu perbaikan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) juga cukup kecil, yaitu 0,78115. Hal ini menunjukkan bahwa estimasi parameter yang dihasilkan untuk umur komponen dan lama waktu perbaikan sudah cukup baik untuk menangkap fenomena keberadaan trend.

C. Pengujian Geometric Process (GP) Umur Komponen ACM dan Lama Waktu Perbaikan

Setelah estimasi parameter $\ln r, \alpha$, dan σ_e^2 untuk umur komponen dan lama waktu perbaikan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) telah diketahui, maka pengujian *Geometric*

Process dapat dilakukan. Uji *Geometric Process* ini dilakukan untuk mengetahui apakah data umur komponen maupun lama waktu perbaikan komponen ACM berasal dari *Geometric Process* atau tidak. Berikut ini adalah hasil dari pengujian *Geometric Process* umur komponen dan lama waktu perbaikan *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000.

Tabel 3. Statistik Uji *t* Umur Komponen dan Lama Waktu Perbaikan Komponen ACM

Data	Nilai Statistik Uji <i>t</i>	Titik Kritis $t_{21;0.025}$
Umur Komponen	-9,66985	2,07961
Lama Waktu Perbaikan	-33,3015	

Tabel 3. memberikan informasi bahwa baik data umur komponen maupun lama waktu perbaikan komponen ACM pesawat terbang CRJ-1000 menghasilkan nilai $|t| >$ nilai kritis $t_{21;0,025}$, sehingga H_0 ditolak pada 5 persen level signifikan yang berarti bahwa data umur komponen maupun lama waktu perbaikan berasal dari *Geometric Process*. Hal ini menunjukkan jika komponen ACM pesawat CRJ-1000 ini semakin sering rusak dan kemudian selalu diperbaiki, maka kinerja komponen akan berfungsi baik atau kenadalan ACM pesawat CRJ-1000 ini akan semakin menurun seiring bertambahnya waktu. Tingkat laju kerusakan komponen ACM pun akan semakin meningkat.

D. *Estimasi Mean dan Variansi Umur Komponen ACM dan Lama Waktu Perbaikan*

Berikut ini adalah hasil estimasi mean dan variansi untuk data umur komponen ACM pesawat CRJ-1000.

Tabel 4. Estimasi Mean dan Variansi Umur Komponen ACM

Estimasi Parameter	Nilai
$\hat{\mu}_{X_1}$ (jam)	21498,4
$\hat{\mu}_{X_1}$ (tahun)	2,45415
$\hat{\mu}_{X_n}$ (tahun)	$2,45415/1,41635^{n-1}$

Berdasarkan Tabel 4 diperoleh informasi bahwa rata-rata umur komponen ACM pesawat CRJ-1000 dapat berfungsi dengan baik saat pertama kali digunakan atau saat komponen belum pernah mengalami kerusakan adalah 21499 jam.

Tabel 5. Estimasi Rata-rata Umur Komponen ACM Berfungsi Baik

<i>n</i>	$\hat{\mu}_{X_n}$ (jam)	<i>n</i>	$\hat{\mu}_{X_n}$ (jam)
1	21498	17	82
2	15179	18	58
3	10717	19	41
4	7566	20	29
5	5342	21	20
6	3772	22	14
7	2663	23	10
8	1880	24	7
9	1328	25	5
10	937	26	4
11	662	27	3
12	467	28	2
13	330	29	1
14	233	30	1
15	164	31	1
16	116	32	0

Tabel 5 menunjukkan bahwa komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000 tidak dapat beroperasi kembali setelah mengalami 31 kali kerusakan. Oleh karena itu, setelah terjadi 31 kerusakan, maka komponen harus mengalami penggantian dengan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) yang baru. Penggantian

komponen ACM dengan yang baru setelah mengalami kerusakan ini akan membutuhkan biaya yang besar, sebab komponen diganti dalam keadaan rusak, sehingga tidak menutup kemungkinan bahwa dengan adanya kerusakan pada komponen ini mengakibatkan beberapa komponen lain yang memiliki mendukung kerja komponen ini juga mengalami kerusakan. Prediksi rata-rata umur komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000 dapat berfungsi baik secara menyeluruh adalah sebagai berikut.

$$\sum_{n=1}^{31} \hat{\mu}_{X_n} = 73132 \text{ jam}$$

Rata-rata umur komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000 akan dapat berfungsi baik selama 73132 jam terbang.

Berikut ini adalah hasil estimasi mean dan variansi untuk data lama waktu perbaikan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000.

Tabel 6. Estimasi Mean dan Variansi Lama Waktu Perbaikan Komponen ACM

Estimasi Parameter	Nilai
$\hat{\mu}_{Y_1}$ (hari)	125
$\hat{\mu}_{Y_1}$ (tahun)	0,342288
$\hat{\mu}_{Y_n}$ (tahun)	$0,342288/2,52239^{n-1}$

Tabel 6 memberikan informasi bahwa rata-rata lama waktu perbaikan komponen ACM pesawat CRJ-1000 setelah terjadi kerusakan pertama kali adalah 125 hari.

Tabel 7. Estimasi Rata-rata Waktu Perbaikan Komponen ACM

<i>n</i>	$\hat{\mu}_{Y_n}$ (hari)
1	125
2	50
3	20
4	8
5	3
6	1
7	0

Berdasarkan Tabel 7., dapat diketahui bahwa rata-rata lama waktu perbaikan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000 adalah 0 setelah 6 kali terjadi kerusakan. Hal ini menunjukkan bahwa perusahaan tidak akan melakukan perbaikan pada komponen ACM ini setelah terjadi kerusakan yang ke-6 kali. Prediksi rata-rata lama waktu perbaikan komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000 secara menyeluruh sampai perbaikan ke-6 adalah sebagai berikut.

$$\sum_{n=1}^6 \hat{\mu}_{Y_n} = 207 \text{ hari}$$

Rata-rata lama waktu perbaikan (*repair time*) komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat terbang CRJ-1000 secara menyeluruh sampai perbaikan ke-6, yaitu selama 207 hari.

E. *Penentuan Kebijakan Waktu Penggantian Komponen Air Cycle Machine (ACM)*

Perencanaan kegiatan *maintenance* suatu komponen memerlukan perhitungan waktu yang tepat, oleh karena itu dalam pembahasan ini akan dibahas mengenai penentuan kebijakan penggantian komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000. Standar biaya perbaikan (*Cost of Repair*) komponen ACM pesawat CRJ-1000 yang diberlakukan di PT. GMF AeroAsia adalah **US\$ 12418** dalam satu kali perbaikan. Biaya komponen ACM jika terjadi kerusakan (*Cost of Replacement*) sebesar **US\$ 65740**. Selanjutnya nilai

Cost of Repair dan Cost of Replacement disubstitusikan kedalam persamaan $l_1(N)$ yang merupakan fungsi rata-rata biaya penggantian jangka panjang, sebagai berikut.

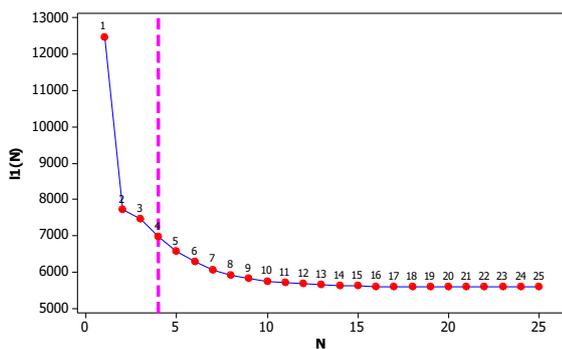
$$l_1(N) = \frac{65740\mu_{Y_1} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{b^{n-1}} - \mu_{X_1} \sum_{n=1}^N \frac{1}{a^{n-1}} + 12418}{\mu_{X_1} \sum_{n=1}^N \frac{1}{a^{n-1}} + \mu_{Y_1} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{b^{n-1}}}$$

Nilai $l_1(N)$ ini didapatkan dengan cara *trial-error* nilai N , yaitu pada saat kerusakan ke berapa sampai dengan diperoleh nilai $l_1(N)$ yang paling minimum. Rata-rata biaya penggantian jangka panjang per hari diperoleh dengan mencobakan nilai N 1 sampai 25 adalah sebagai berikut.

Tabel 8. Rata-rata Biaya Penggantian Komponen ACM Jangka Panjang per Hari

Kerusakan ke- N	$l_1(N)$	Kerusakan ke- N	$l_1(N)$
1	12487	14	5615
2	7710	15	5603
3	7446	16	5595
4	6961	17	5589
5	6559	18	5585
6	6264	19	5582
7	6056	20	5580
8	5910	21	5578
9	5809	22	5577
10	5739	23	5576
11	5690	24	5576
12	5656	25	5575
13	5632		

Plot antara $l_1(N)$ dengan N ditunjukkan oleh Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1. Plot Jumlah Kerusakan (N) dengan Rata-rata Biaya Penggantian Komponen ACM Jangka Panjang per Hari.

Gambar 1 memberikan informasi estimasi rata-rata biaya penggantian komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000 jangka panjang per hari akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya jumlah kerusakan yang telah dialami. Tetapi, jika komponen ACM telah mengalami beberapa kali kerusakan, maka umur komponen ACM pun akan semakin menurun, sehingga semakin sering diperbaiki. Semakin seringnya komponen ACM diperbaiki, maka hal ini tidak efektif lagi karena hari perbaikannya semakin bertambah, sehingga mengganggu kenyamanan penumpang sebab udara di kabin bertambah panas.

Penurunan umur komponen setelah beberapa kali diperbaiki ini dapat diketahui pada Tabel 5 mengenai estimasi rata-rata umur komponen ACM berfungsi baik. Oleh karena itu, untuk mengantisipasi seringnya melakukan perbaikan terhadap komponen ACM dan menyebabkan

pengeluaran biaya yang semakin besar akibat biaya perbaikan dan biaya pengiriman (*shipping*), maka sebagai tindakan *preventive*, komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pada pesawat CRJ-1000 akan diganti setelah terjadi kerusakan yang ke-4. Estimasi rata-rata biaya penggantian jangka panjang komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pada pesawat CRJ-1000 per-hari pada kerusakan ke-4, yaitu sebesar US\$ 6961. Pada kerusakan ke-4 ini biaya penggantian lebih murah dari pada 6 kali biaya perbaikan yang dilakukan, dan umur komponen (*life time*) dari komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pada pesawat CRJ-1000 ini lebih lama jika mengalami penggantian dari pada akumulasi estimasi umur komponen (*life time*) setelah mengalami 6 kali biaya perbaikan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, kesimpulan bahwa komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000 akan diganti setelah terjadi kerusakan yang ke-4 dengan estimasi rata-rata biaya penggantian jangka panjang komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pada pesawat CRJ-1000 per-hari pada kerusakan ke-4, yaitu sebesar US\$ 6961. Pada kerusakan ke-4 ini biaya penggantian lebih murah dari pada 6 kali biaya perbaikan yang dilakukan, dan umur komponen (*life time*) dari komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pada pesawat CRJ-1000 ini lebih lama jika mengalami penggantian dari pada akumulasi estimasi umur komponen (*life time*) setelah mengalami 6 kali biaya perbaikan.

Saran yang perlu diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan metode yang mempertimbangkan bahwa kinerja komponen yang telah diperbaiki akan memiliki keandalan yang semakin menurun dengan tingkat penurunan keandalan yang tidak sama dari perbaikan yang pertama dan selanjutnya. Sebaiknya pencatatan data terkait umur komponen dan lama waktu perbaikan komponen ACM pesawat CRJ-1000 di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) AeroAsia dapat dilakukan secara kontinu agar perhitungan penggantian komponen yang dilakukan lebih tepat dan sesuai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jenderal Perhubungan Udara Kementerian Republik Indonesia. 2007. *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2009 Tentang penerbangan*. Diakses pada 19 September 2015, dari <URL: [http:// hubud.dephub.go.id/?id/tu/download/5](http://hubud.dephub.go.id/?id/tu/download/5) >.
- [2] Ebeling, C. E. 1997. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Singapore: McGraw-Hill Book.
- [3] Krisnadi, J.W, Soemadi, K., Mustofa, F.H. 2014. Optimasi Waktu Penggantian Komponen pada Lokomotif DE CC 201 Seri 99 Menggunakan Metoda *Age Replacement* di PT. Kereta Api Indonesia. Teknik Industri Itenas No. 04 Vol. 01.
- [4] Leung, F.K.N, dan Fong, C.Y. 2000. A Repair-Replacement Study for Gearboxes Using Geometric Processes. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol 17 Iss 3 pp 285-304.
- [5] Ross, SM. 1970. *Applied Probability Models with Optimization Applications*. San Francisco: Holden-Day.