

Penentuan Kebijakan Waktu Optimum Perbaikan Komponen *Heat Exchanger* (HE) Pesawat Boeing 737-800 Menggunakan Metode *Power Law Process* di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) *Aero Asia*

Noorahma Ayuning Tyas, Haryono¹, Diaz Fitra Aksioma²
 Jurusan Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
 Jalan Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
 E-mail : ¹haryono@statistika.its.ac.id, ²diaz_fa@statistika.its.ac.id

Abstrak—Industri penerbangan yang semakin berkembang di Indonesia menuntut adanya peningkatan kualitas baik dari segi pelayanan maupun kelayakan pesawat. *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia* merupakan perusahaan yang bergerak dibidang jasa perawatan pesawat terbang yang berfungsi untuk meningkatkan keandalan dan keamanan dari pesawat. Salah satu jenis perawatan pesawat adalah perawatan pada komponen *Heat Exchanger*. Komponen *Heat Exchanger* (HE) berfungsi mentransfer *energy* panas. Perawatan komponen HE dilakukan dengan cara memperbaiki komponen dalam usia ke-*T* atau pada periode kegagalan ke-*N* setelah dilakukan instalasi. Metode yang digunakan untuk kebijakan perbaikan komponen HE adalah *Power Law Process* dengan *Non-Homogeneous Poisson Process*. Penelitian ini menghasilkan keputusan pemeliharaan yang optimal berdasarkan biaya yang minimum pada kerusakan yang pertama atau pada saat jam terbang pesawat sudah mencapai 8900 *flight hours* dengan biaya yang dikeluarkan sebesar \$0,109 per *flight hours*. Berdasarkan perhitungan ini bagian pemeliharaan dapat mengambil keputusan secara tepat kapan akan dilakukan pergantian terhadap komponen HE sehingga kerugian yang terjadi dapat dicegah.

Kata Kunci—*Heat Exchanger, Lifetime, Non-Homogeneous Poisson Process, Power Law Process, Replacement*

I. PENDAHULUAN

INDUSTRI pesawat terbang sangat berkembang di Indonesia, mulai dari tahun 2007 jumlah armada pesawat terbang mencapai 687 pesawat sampai pada tahun 2012 jumlah pesawat mencapai 950 armada pesawat terbang [1]. Salah satu aspek perijinan yang tercantum dalam undang-undang Republik Indonesia nomor 1 tahun 2009 tentang penerbangan menyatakan bahwa pesawat harus memiliki kelayakan operasi [2]. Untuk memastikan bahwa pesawat tersebut layak digunakan maka perlu diperhatikan konfigurasi internal atau kabin dan performa mesin pesawat secara keseluruhan. Kegagalan dalam suatu komponen dapat menyebabkan terjadinya berbagai kerugian, seperti *delay* bahkan pembatalan penerbangan, pilot dan penumpang *complaint* serta mengakibatkan kerugian yang besar pada maskapai penerbangan tersebut. Guna mencegah kegagalan tersebut maka diperlukan adanya pengontrolan, jika ditemukan sebuah kegagalan dari komponen maka akan dilakukan perbaikan. Setiap komponen mempunyai batas usia tertentu sehingga mesin atau komponen pesawat terbang memerlukan sebuah penggantian disaat komponen tersebut sudah tidak dapat bekerja secara maksimal setelah mengalami beberapa kali perbaikan [3].

Perbaikan akan dilakukan pada saat usia ke-*T* atau saat periode kegagalan ke-*N*, tergantung mana yang lebih dahulu

terjadi dan memberikan fungsi biaya yang paling minimum. Proses *replacement* ini menggunakan *Power Law Process* atau biasa disebut dengan *Weibull process* dengan mengaplikasikan metode *Non-Homogeneous Poisson Process* untuk model *reliability* dimana model ini akan sangat berguna untuk jenis *repairable system* [4].

Beberapa penelitian sebelumnya seperti penelitian Nakagawa dan Kowada (1983) mengenai analisis dari sebuah sistem dengan *minimal repair* yang digunakan untuk menentukan kebijakan penggantian sebuah komponen dengan melakukan penggantian pada periode ke-*T* atau pada saat terjadi kegagalan ke-*N* tergantung mana yang terjadi terlebih dahulu [5]. Tahun 2000 Francis K.N Leung dan Ada L.M. Cheng berhasil melakukan penelitian serupa pada mesin bus dengan menggunakan pemilihan kebijakan penggantian pada periode ke-*T* atau pada saat terjadi kegagalan ke-*N*, dengan menggunakan metode *Power Law Process* (PLP) [6]. Pada tahun 1990 Crow mengembangkan metode *repairable* untuk sebuah sistem yang kompleks untuk komponen *repairable*. Metode yang digunakan adalah *weibull process* atau *Power Law Process* (PLP) dengan menggunakan data *truncated* [7].

Perusahaan *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia* merupakan sebuah perusahaan yang bergerak dibidang jasa perawatan pesawat terbang yang berfungsi untuk meningkatkan keandalan dan keamanan dari pesawat, dengan visi sebagai *Maintenance Repair and Overhaul* (MRO) kelas dunia pilihan *costumer* [4]. Salah satu komponen yang terpasang pada pesawat Boeing 737-800 adalah *Heat Exchanger* (HE). Kerusakan yang terjadi pada komponen *Heat Exchanger* (HE) akan mengakibatkan gangguan pada sistem pendingin (*air conditioning*) sehingga penumpang merasa tidak nyaman karena kepanasan [5]. Untuk itu perlu dilakukan analisis keandalan dari komponen *Heat Exchanger* (HE) tersebut supaya komponen berfungsi dengan baik. Tujuan dari penelitian ini adalah bagaimana menentukan waktu perbaikan komponen *Heat Exchanger* (HE) yang tepat dan dapat meminimumkan biaya kerusakan dan kerugian yang diakibatkan oleh kerusakan komponen.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Stochastic Point Process*

Random variabel $N(t)$ adalah jumlah kejadian yang muncul dari sebuah kegagalan pada interval waktu $(0, t)$. Proses dari $\{N(t), t \geq 0\}$ yang disebut dengan *stochastic process* digunakan untuk mengetahui hubungan dari suatu runtutan peristiwa atau proses kejadian yang bersifat tidak pasti [10].

Terdapat dua jenis komponen yaitu *repairable* dan *non-repairable*, *repairable* yaitu sebuah komponen dimana ketika terjadi sebuah kerusakan maka komponen tersebut dapat diperbaiki dengan beberapa proses perbaikan selain penggantian pada seluruh sistem. *Non-repairable* jika mengalami kerusakan maka harus diganti dengan komponen yang baru dalam artian komponen tersebut tidak bisa diperbaiki [11]. Disebut proses *renewal* jika sistem atau komponen rusak maka akan dikembalikan kepada kondisi seperti komponen yang baru (*as good as new condition*) setelah mengalami perbaikan [10].

Minimal *repair* yang merupakan salah satu istilah dari *preventive maintenance* yang memiliki arti bahwa sistem yang gagal akan berfungsi kembali setelah perbaikan dilakukan dengan kondisi yang sama dan usia efektif yang sama seperti pada saat kegagalan terakhir [12].

B. Poisson Process

Jika sebuah komponen memiliki tingkat kerusakan konstan (λ) atau rusak secara tiba-tiba maka secara langsung diperbaiki atau diganti ketika mengalami kerusakan. N adalah jumlah kejadian yang muncul dari sebuah kegagalan pada interval waktu $(0, t)$ [12]. Proses Poisson dibagi menjadi dua macam yaitu proses poisson homogen dan proses poisson nonhomogen.

Homogeneous Poisson Processes (HPP) adalah proses Poisson dengan fungsi intensitas konstan, dimana waktu kedatangan bersifat independen dan berdistribusi eksponensial dengan parameter yang sama yaitu λ untuk *failure rate* [10].

Non-Homogeneous Poisson Processes (NHPP) adalah proses Poisson dengan fungsi intensitas tidak konstan dengan laju kedatangan berevolusi terhadap waktu. NHPP merupakan model yang sederhana, dapat diaplikasikan untuk sistem dengan laju kerusakan yang menurun atau meningkat, dengan menggunakan metode statistika yang relevan dan mudah untuk diaplikasikan [13]. NHPP menggambarkan proses kerusakan komponen yang memiliki pola tertentu dengan jumlah kumulatif hingga waktu t adalah $N(t)$. NHPP biasa disebut dengan *Weibull process*, karena *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) memiliki fungsi *failure rate* yang sama dengan distribusi weibull dengan parameter *shape* (β) dan parameter *scale* adalah (λ).

C. Power Law Process

Power Law Process (PLP) atau model proses Weibull merupakan salah satu model yang digunakan untuk mengecek data yang mengikuti NHPP dengan fungsi intensitas yang berasal dari persamaan berikut [12].

$$w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} \tag{1}$$

D. Failure Truncated Data dan Time Tuncated Data

Failure Truncated data terjadi ketika suatu pengamatan dalam *repairable system* berhenti setelah jumlah dari sebuah kegagalan ditetapkan sebelum observasi, jumlah kegagalan dinotasikan dengan N_k yang merupakan *fixed* variabel. T_k adalah waktu kegagalan yang merupakan variabel random.

Time truncated data berarti jika suatu pengamatan berhenti ketika telah ditentukannya waktu ke- T , dengan kondisi N_k merupakan variabel random dimana N_k merupakan jumlah

kegagalan dari interval waktu $(0, T_k)$ dan waktu kegagalan $T_1 < T_2 < \dots < T_k$ adalah *fixed* variabel [6].

E. Pengujian Trend dalam Failure Rate

Grafik yang sederhana dapat digunakan untuk melihat apakah kehandalan dari suatu komponen meningkat atau menurun, berguna untuk mengidentifikasi data, dan membentuk suatu model dari data tersebut [14]. Untuk menguji apakah terdapat *trend* pada laju kegagalan dari komponen maka digunakan *Laplace's test*. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut [12].

H_0 : Waktu kegagalan $Y_{i,k}$ mengikuti *Homogeneous Poisson Process* (HPP) atau Tidak ada *trend*

H_1 : Waktu kegagalan $Y_{i,k}$ tidak mengikuti *Homogeneous Poisson Process* (NHPP) atau *monotonic trend*

statistik uji untuk *time truncated* data dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k} Y_{i,k} \cdot T_k}{N_k} - \frac{T_k}{2}\right)}{(T_k) \sqrt{\frac{1}{12N_k}}} \text{ untuk } k = 1, \dots, K \tag{2}$$

statistik uji untuk *failure truncated* data dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k-1} Y_{i,k} \cdot Y_{N_k,k}}{N_k-1} - \frac{Y_{N_k,k}}{2}\right)}{(Y_{N_k,k}) \sqrt{\frac{1}{12(N_k-1)}}} \text{ untuk } k = 1, \dots, K \tag{3}$$

dengan $Y_{i,k}, \dots, Y_{N_k,k}$ adalah waktu kegagalan untuk poses observasi pada interval ke $(0, T_k)$, k adalah jumlah komponen yang diamati, N_k adalah angka kegagalan yang ditetapkan dan T_k adalah waktu yang ditetapkan sebelum observasi. Keputusan diambil dengan membandingkan statistik uji (L) terhadap nilai kritis pada toleransi kesalahan 0.05. Ketika nilai $L < -Z_{\frac{\alpha}{2}}$ atau $L > Z_{\frac{\alpha}{2}}$ maka hipotesis awal (H_0) ditolak sehingga waktu kegagalan $\{Y_{i,k} = 1, 2, \dots, N_k\}$ tidak mengikuti HPP.

F. Estimasi Parameter

Parameter PLP untuk satu komponen *repairable* dengan N kali kerusakan dengan waktu kegagalan bernilai $0 < T_1 < T_2 < \dots < T_N$, dengan menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE). Perhitungan untuk parameter λ dan β untuk *failure truncated* yang dinyatakan dalam persamaan berikut

$$\lambda = \frac{Y_{N_1,1}}{N^{1/\beta}} \tag{4}$$

dan

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N-1} \ln\left(\frac{Y_{N_1,1}}{Y_{i,1}}\right)} \tag{5}$$

Estimasi parameter menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk komponen *repairable* dengan N kali kerusakan dengan waktu kegagalan bernilai $0 < T_1 < T_2 < \dots < T_N$ dengan *time truncated* data. Parameter λ dan β yang dinyatakan dalam persamaan berikut [12].

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N_1} \ln\left(\frac{T_N}{Y_{i,1}}\right)} \quad (6)$$

dan

$$\lambda = \frac{T_N}{N^{1/\beta}} \quad (7)$$

G. Goodness of Fits Tests

Goodness of fit tests digunakan untuk melihat apakah model sesuai dengan *Power Law Process* atau tidak dengan menggunakan *Cramer-von Mises test* untuk menguji apakah waktu kegagalan dari sistem *repairable* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Proses* (NHPP). Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut [15].

H_0 : Waktu kegagalan untuk mesin ke- K mengikuti HPP dengan konstan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) sebesar λ atau $\beta = 1$

H_1 : Waktu kegagalan untuk mesin ke- K mengikuti NHPP dengan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) sebesar

$$\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} \text{ atau } \beta \neq 1$$

Data waktu kegagalan pada interval $[0, T_k]$ dengan data kegagalan mulai dari $0, X_{1,k} < X_{2,k} < \dots < X_{N_k,k} \leq T_k$ dengan $k = 1, 2, \dots, K$ langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut.

Untuk K *homogeneous engines*, conditional MLE dari β dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$\tilde{\beta} = \frac{M}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} \quad (8)$$

dengan

$$M_k = \begin{cases} N_k & \text{jika data pada sistem ke-}k \text{ adalah } \textit{time tuncated} \\ N_k - 1 & \text{jika data pada sistem ke-}k \text{ adalah } \textit{failure truncated} \end{cases}$$

dan

$M = \sum_{k=1}^K M_k$ adalah jumlah kegagalan dari K *homogeneous engines*. Untuk K *homogeneous engines*, *unbiased conditional MLE* dari β adalah sebagai berikut.

$$\bar{\beta} = \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} \quad (9)$$

dengan nilai $Y_{i,k}$ yang dinyatakan sebagai berikut.

$$Y_{i,k}^* = \frac{Y_{i,k}}{T_k} \quad (10)$$

langkah kedua adalah memperlakukan nilai M pada $Y_{i,k}$ menjadi satu *group* mulai dari yang terkecil sampai yang terbesar menjadi nilai Z_j , dengan Z_1 bernilai paling kecil dari $Y_{i,k}^*$, Z_2 lebih kecil dari $Y_{i,k}^*$, ..., dan Z_M lebih besar dari $Y_{i,k}^*$ untuk M adalah transformasi jumlah kegagalan dari N_k . Statistik uji untuk metode *Cramer Von Mises* dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$C_M^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2 \quad (11)$$

Hipotesis *null* ditolak jika C_M^2 lebih kecil dari nilai kritis untuk *Goodness of fit test Cramer Von Mises* pada level signifikansi sebesar 5 persen.

H. Replacement Model

Suatu mesin diperbaiki secara teratur dalam jangka waktu ke- T atau pada kegagalan ke- N setelah dilakukan instalasi, tergantung mana yang lebih dahulu terjadi pertama kali. Waktu yang digunakan untuk memperbaiki dan penggantian mesin diasumsikan sangat minimum atau dapat diabaikan. Fungsi biaya perbaikan komponen berdasarkan kerusakan ke- N dan waktu ke- T dinyatakan dalam persamaan berikut ini [5].

$$C(T; n) = \frac{c_f \left[n - \sum_{j=0}^{n-1} (n-j) \frac{[W(T)]^j}{j!} e^{-W(T)} \right] + c_p}{\sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt} \quad (12)$$

untuk $T > 0, n = 1, 2, \dots, N$ dan $j = 1, 2, \dots, (n-1)$

dengan c_f adalah *cost of failure* dan c_p adalah *cost of preventive*. Kebijakan penggantian yang optimal untuk setiap jenis komponen ditentukan dengan meminimalkan persamaan $c(T; n)$ yang berhubungan dengan nilai T dan N .

Fungsi nilai laju kerusakan terhadap waktu untuk *Power Law Proses* (PLP) dinyatakan dalam persamaan (7) berikut ini.

$$W(t) = \int_0^t w(t) dt = \left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta \quad (13)$$

I. Komponen Heat Exchanger

Penelitian kali ini akan membahas mengenai komponen *Heat Exchanger* (HE) atau alat penukar panas yang terpasang di pesawat B737-800 dengan *part number* 182820-3. Masing-masing komponen *Heat Exchanger* (HE) *part number* 182820-3 memiliki beberapa *serial number* yang berbeda-beda setiap komponennya, sehingga total komponen *Heat Exchanger* (HE) kurang lebih sebanyak 190 *serial number*.

Heat Exchanger (HE) adalah sebuah alat yang berfungsi untuk mentransfer energi panas (entalpi) antara dua atau lebih fluida, antara permukaan padat dengan fluida, atau antara partikel padat dengan fluida, pada temperatur yang berbeda serta terjadi kontak termal. *Heat Exchanger* (HE) dapat berfungsi sebagai alat membuang panas, alat sterilisasi, pasteurisasi, pemisahan campuran, distilasi (pemurnian, ekstraksi), pembentukan konsentrat, kristalisasi, atau juga untuk mengontrol sebuah poses fluida [9].

Kegagalan atau kerusakan yang terjadi pada komponen *Heat Exchanger* (HE) akan mengakibatkan gangguan pada sistem pendinginnya (*air conditioning*) pada saat masih di darat sehingga memaksa beberapa penumpang yang kepanasan untuk membuka jendela darurat (*emergency window*). Sistem pendinginan harus bekerja dengan baik guna memberikan kenyamanan penumpang pada saat penumpangnya naik (*boarding*) maupun turun (*disembark*) dari pesawat. Selain kenyamanan penumpang, sistem ini juga digunakan untuk menyediakan udara yang terkondisikan untuk mengontrol tekanan kabin, mendinginkan ruangan peralatan elektronik pesawat dan juga mengalirkan udara ke kargo pesawat.

J. Penelitian Terdahulu

Kebijakan penggantian komponen dengan menggunakan model *Non-Homogeneous Poisson Proses* (NHPP) dengan *Power Law Proses* (PLP) pernah diterapkan oleh Francis K.N Leung dan Ada L.M. Cheng pada tahun 2000. Metode ini diterapkan pada mesin sebuah bus. Penelitian yang dilakukan oleh Leung dan Cheng

menggunakan metode *truncated* untuk pengamatan yang akan dilakukan, pengamatan *lifetime engine* bus ini menggunakan metode *time truncated data* dan juga *failure truncated data*. Kebijakan penggantian komponen pada penelitian ini memberikan hasil bahwa *engine* bus harus diganti pada kerusakan pertama atau pada selang waktu 53,03 sampai 60,61 bulan, tergantung mana yang terlebih dahulu terjadi. Penelitian ini juga memberikan kesimpulan bahwa *Power Law Proses* (PLP) yang biasa disebut dengan Weibull *process* adalah model yang sederhana dan biasa digunakan untuk menjelaskan waktu kegagalan pada komponen yang dapat diperbaiki atau *repairable*.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Variabel Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT. *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia* divisi *Reliability and Service* (TER-1). TER-1 merupakan salah satu departemen di dalam PT. GMF *Aero Asia* yang fokus melakukan analisis reliabilitas terhadap suatu komponen dalam pesawat terbang. Variabel yang digunakan adalah usia komponen *Heat Exchanger* (HE) dalam satuan *flight hours* yang dihitung mulai dari komponen di *install* dalam pesawat hingga komponen mengalami kerusakan pertama sampai waktu kerusakan yang telah ditentukan. Data yang digunakan mulai dari bulan Desember 2009 sampai dengan bulan September 2015.

Struktur data yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1
Struktur Data

Kegagalan ke- <i>i</i>	<i>Serial Number</i>			
	1	2	...	<i>K</i>
1	$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$...	$Y_{1,k}$
2	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$...	$Y_{2,k}$
.
.
.
N_k	$Y_{N_k,1}$	$Y_{N_k,2}$...	$Y_{N_k,k}$

$Y_{1,1}$ adalah waktu kegagalan yang pertama pada *serial number* 1, $Y_{2,1}$ adalah waktu kegagalan kedua yang dialami *serial number* 1, $Y_{N_k,1}$ waktu kegagalan ke- N pada *serial number* 1 serta $Y_{N_k,k}$ adalah waktu kegagalan ke- N untuk *serial number* ke- k .

B. Langkah Penelitian

Langkah-langkah analisis yang dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut.

1. Mengumpulkan variabel usia komponen *Heat Exchanger* (HE).
2. Menentukan waktu *truncated* untuk pengamatan yaitu sebesar 39000 *flight hours* untuk *time truncated data* dan untuk *failure truncated data* ditentukan sebanyak 3 kali kerusakan.
3. Mendiskripsikan jumlah kerusakan dan waktu kerusakan komponen HE.

4. Menguji adanya *trend* dalam waktu kegagalan komponen HE dengan melakukan pendugaan dan pengujian menggunakan *Laplace's test*.
5. Berdasarkan poin 4, jika terdapat *trend* dalam *failure rate* maka waktu kegagalan komponen HE diduga mengikuti NHPP yang dibentuk dari PLP, maka dapat dilakukan estimasi parameter β dan λ menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk model *truncated*.
6. Menguji kebaikan model *Power Law Process* (PLP) dengan metode *Cramer-von Mises test*.
 - a. Melakukan pengujian dengan *Cramer-von Mises test* untuk mengetahui apakah waktu kegagalan komponen HE mengikuti NHPP dengan melihat apakah model yang didapat dari point 4 sesuai atau tidak.
 - b. Mendapatkan nilai dari *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) untuk komponen HE.
7. Mendapatkan model optimasi untuk menentukan waktu penggantian yang meminimumkan biaya kerusakan komponen HE
 - a. Mendapatkan fungsi $W(t)$ atau laju kerusakan terhadap waktu dengan menggunakan persamaan (13)
 - b. Memilih sepasang T dan N
 - c. Menghitung $c(T;n)$ menggunakan persamaan (12) dengan menggunakan prosedur *iterative* hingga didapatkan nilai yang minimum dari $c(T;n)$
8. Mendapatkan kesimpulan dari hasil analisis.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Data

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *failure truncated data* dengan jumlah kerusakan sebanyak 3 dan *time truncated data* dengan T yang ditetapkan adalah sebesar 39000 *flight hours*. Berikut akan dijelaskan karakteristik dari data *lifetime* untuk komponen *Heat Exchanger* (HE) pada masing-masing *serial number* yang didapatkan.

Tabel 2

No	<i>Serial Number</i>	Statistika Deskriptif <i>Lifetime</i> (<i>Flight Hours</i>)			
		Kerusakan ke- N			
		1	2	3	4
1	15552	14110	14584	15339	
2	7016	29814	30022	37412	
3	17502	11253	12215	12893	
4	49-4223	30335	35524	40611	
5	7441	24375	37423	37490	37668
6	7363	24384	30313	32239	36958
7	5658	34156	38572		
8	48-3059	36845	37846		
9	5800	33284	37653		

Waktu kerusakan yang pertama untuk *serial number* 15553 adalah sebesar 14110 *flight hours*, setelah itu komponen mengalami perbaikan dan beroperasi kembali hingga mengalami kerusakan yang kedua pada saat 14584 *flight hours* dan kerusakan yang ketiga terjadi pada saat komponen telah beroperasi selama 15339 *flight hours*.

B. Pengujian Trend dalam Failure Rate

Pengujian *trend* dari *failure rate* ini menggunakan *Laplace's test* dengan membandingkan nilai statistik uji (L) untuk *time truncated* maupun *failure truncated data* terhadap *critical value* pada toleransi kesalahan 0,05 yaitu bernilai 1,96. Hipotesis *null* yang digunakan adalah data *lifetime* untuk masing-masing *serial number* mengikuti *Homogeneous Poisson*

Proses. Berikut adalah hasil perhitungan nilai statistik uji data *lifetime* masing-masing *serial number* berdasarkan Persamaan 2.

Tabel 3

Hasil Laplace's Test untuk Failure Truncated Data			
No	Serial Number	L	Keputusan
1	15553	2,132	H ₀ ditolak
2	7016	1,468	H ₀ tidak ditolak
3	17502	2,009	H ₀ ditolak
4	49-4223	1,522	H ₀ tidak ditolak

Serial number 15553 dan 17502 memiliki nilai statistik uji masing-masing sebesar 2,132 dan 2,009 nilai ini lebih besar dari 1,96 maka keputusan yang didapat adalah H₀ di tolak sehingga data *lifetime* pada *serial number* 15553 dan 17502 mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP). Berikut statistik uji Laplace's test untuk *time truncated data* berdasarkan Persamaan 3.

Tabel 4

Hasil Laplace's Test untuk Time Truncated Data			
No	Serial Number	L	Keputusan
1	7441	2,618	H ₀ ditolak
2	7363	2,038	H ₀ ditolak
3	5658	2,118	H ₀ ditolak
4	48-3059	2,241	H ₀ ditolak
5	5800	2,005	H ₀ ditolak

Untuk kelima *serial number* memiliki statistik uji (*L*) masing-masing bernilai 2,618 ; 2,038 ; 2,118 ; 2,241 ; 2,005. Nilai statistik uji yang dihasilkan ini lebih besar dari 1,96 keputusan yang didapat adalah H₀ di tolak sehingga data *lifetime* dari kelima *serial number* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) dengan fungsi laju kerusakan yang tidak *constant*.

C. Estimasi Parameter Data Lifetime

Estimasi parameter data *lifetime* HE menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* untuk *truncated data*. Berikut nilai estimasi parameter berdasarkan Persamaan 4 hingga Persamaan 7 untuk masing-masing *serial number*.

Tabel 5

Estimasi Parameter untuk Masing-masing *Serial Number*

No	Serial Number	Estimasi Parameter	
		β	λ
1	15553	22,39	14604,53
2	17502	15,78	12026,11
3	7441	6,83	31837,24
4	7363	4,14	27906,13
5	5658	13,92	35303,61
6	48-3059	23,02	36720,76
7	5800	10,33	34101,62

Parameter β dan λ yang didapatkan akan digunakan untuk membentuk *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) untuk PLP, dan penentuan model *replacement* untuk memilih waktu optimum yang paling tepat dalam meminimumkan biaya.

D. Goodness of Fits Tests

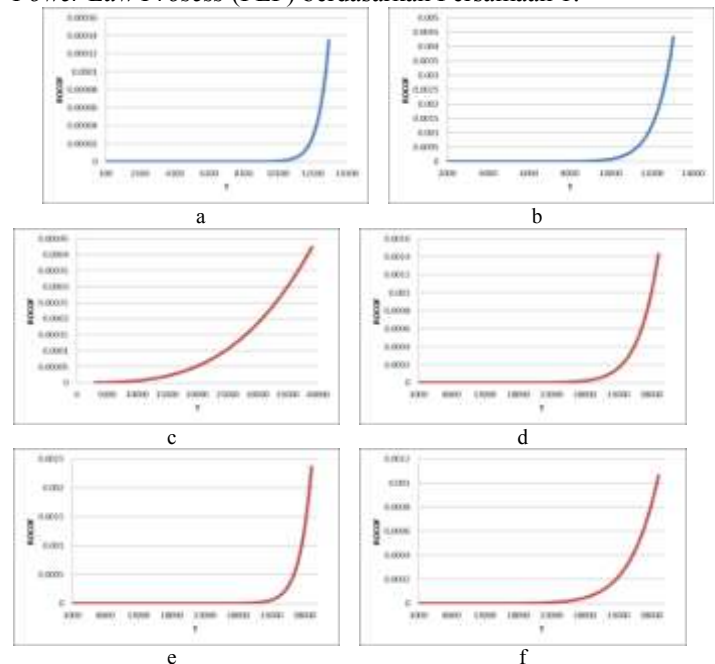
Untuk melihat apakah model sesuai dengan metode *Power Law Proses* (PLP), maka akan dilakukan pengujian dengan menggunakan *Cramer-von Mises test*. Hipotesis *null* yang

digunakan adalah data *lifetime* masing-masing *serial number* mengikuti HPP dengan konstan ROCOF. Berikut hasil perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises* berdasarkan Persamaan 8.

Tabel 6

Statistik Uji untuk Metode Cramer-von Mises				
No	Serial Number	C_M^2	Critical Value	Keputusan
1	15553	0,127	0,183	H ₀ ditolak
2	17502	0,0987	0,183	H ₀ ditolak
3	7441	0,2490	0,191	H ₀ tidak ditolak
4	7363	0,0451	0,191	H ₀ ditolak
5	5658	0,0943	0,175	H ₀ ditolak
6	48-3059	0,1163	0,175	H ₀ ditolak
7	5800	0,0852	0,175	H ₀ ditolak

Titik kritis untuk *goodness of fit test Cramer Von-Mises* pada level signifikansi sebesar 5 persen dan *m* bernilai 3 untuk *serial number* 15553 dan 17502 didapatkan nilai sebesar 0,183. Nilai statistik uji *serial number* 15553 dan 17502 lebih kecil dari *critical value*, keputusan yang didapat adalah H₀ ditolak. Hal tersebut menunjukkan bahwa NHPP dengan PLP merupakan model yang sesuai untuk data kerusakan yang terjadi pada *serial number* 15553 dan 17502. Berikut adalah *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) yang sesuai dengan *Power Law Proses* (PLP) berdasarkan Persamaan 1.



Gambar 1. *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) untuk SN (a) 15553; (b) 17502; (c) 7363; (d) 5658; (e) 48-3059; (f) 5800.

Kondisi peningkatan laju kerusakan yang dialami komponen *Heat Exchanger* dapat dilihat secara visual bahwa dari waktu ke waktu kondisi yang dialami komponen tidak *reliable* atau lemah. Grafik laju kerusakan tersebut menunjukkan adanya *trend* naik dan tidak *constant*, dengan *phase wear out* yaitu *phase* dimana laju kerusakan terus meningkat terhadap waktu.

E. Replacement Model

Berikut adalah biaya yang digunakan untuk menentukan model *replacement* yaitu c_p (*Cost of preventive*) atau rata-rata

biaya perbaikan minimal dan c_f (*Cost of failure*) yaitu rata-rata biaya penggantian yang terjadi jika komponen mengalami kerusakan.

Tabel 7
Nilai c_p dan Nilai c_f

c_p (<i>Cost of Preventive</i>)		
HE shop visit		USD 233,2 / Component
Man Hours	USD 843/ Sisi	USD 421,5 / Component
Material	USD 500 / Sisi	USD 250 / Component
	c_p	USD 904,7
c_f (<i>Cost of Failure</i>)		
HE shop visit		USD 233,2 / Component
Man Hours	USD 843/ Sisi	USD 421,5 / Component
Material	USD 500 / Sisi	USD 250 / Component
Delay /Hours		USD 6500 / Hours
Biaya konsekuensi dari delay		USD 171
	c_f	USD 7575,7

Nilai c_f dan c_p ini akan digunakan untuk menghitung biaya penggantian komponen *Heat Exchanger* menggunakan persamaan berikut.

$$C(T; n) = \frac{7575,7 \left[n - \sum_{j=0}^{n-1} (n-j) \frac{[W(T)]^j}{j!} e^{-W(T)} \right] + 904,7}{\sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt}$$

Berikut estimasi biaya yang didapatkan untuk masing-masing *serial number*.

Tabel 8

Kebijakan Optimal untuk Keenam *Serial Number* Komponen HE

No	Serial Number	N^*	T^* (Flight Hours)	Cost (USD)
1	15553	1	11500	0,0818
2	17502	1	8900	0,1090
3	7363	1	12500	0,0942
4	5658	1	24800	0,0387
5	48-3059	1	29000	0,0323
6	5800	1	22100	0,0447

Tabel 8 merupakan optimasi biaya untuk keenam *serial number*, dari sepasang T^* dan N^* maka diperoleh nilai biaya yang paling minimum. Pemilihan waktu perbaikan tergantung pada mana yang lebih dahulu terjadi, pada kerusakan pertama (N^*) atau waktu komponen telah beroperasi dalam jam (T^*). Dari hasil perhitungan estimasi biaya yang didapat maka untuk perbaikan mulai dari proses pengecekan, *cleaning*, dan *repair* untuk komponen *Heat Exchanger* sebaiknya dilakukan setelah komponen mengalami kerusakan yang pertama atau pada saat jam terbang pesawat sudah mencapai 8900 *flight hours* untuk SN 15553 dengan biaya sebesar \$0,1090 per *flight hours*. Hal ini berarti bahwa pada saat pesawat beroperasi selama 1 jam penerbangan maka biaya yang dibutuhkan oleh komponen *Heat Exchanger* untuk beroperasi adalah sebesar \$0.1090. Untuk proses perawatan pada setiap *serial number* dilakukan pada waktu yang sama karena fungsi dari masing-masing *serial number* komponen *Heat Exchanger* adalah sama

V. KESIMPULAN

Non Homogeneous Poisson Process (NHPP) dengan *Power Law Proses* (PLP) merupakan model yang sesuai untuk data kerusakan yang terjadi pada *serial number* 15553, 17502, 7363, 5658, 48-3059, dan 5800. Untuk tindakan perbaikan mulai dari pengecekan, *cleaning*, dan *repair* untuk komponen

Heat Exchanger sebaiknya dilakukan pada saat komponen telah beroperasi selama 8900 *flight hours* untuk masing-masing *serial number* atau ketika telah terjadi kerusakan yang pertama sebelum mencapai waktu 8900 *flight hours*, tergantung pada mana yang lebih dahulu terjadi, kerusakan pertama atau waktu komponen beroperasi, sehingga bila komponen sudah mengalami kerusakan yang pertama harus segera dilakukan tindakan perbaikan. Nilai estimasi biaya yang minimum dari sepasang T^* dan N^* didapatkan hasil sebesar \$0,1090 per satu *flight hours*. Hal ini berarti bahwa pada saat pesawat beroperasi selama 1 jam penerbangan maka biaya yang dibutuhkan oleh komponen *Heat Exchanger* untuk beroperasi adalah sebesar \$0,1090.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistika. (2013). *Jumlah Pesawat dan Kendaraan Bermotor Menurut Jenisnya pada Tahun 1949-2013*. Retrieved September 09, 2015, from <http://www.bps.go.id>.
- [2] Direktorat Jendral Perhubungan Udara Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2015). "Semester I -2015, Penumpang Angkutan Udara Domestik Naik 14,06 Persen". Retrieved Oktober 29, 2015, from <http://www.hubud.dephub.go.id>.
- [3] Weckman, G. R., Shell, R. L., & Marvel, J. H. (2001). Modeling the Reliability of Repairable System in the Aviation Industry. *Computers & Industrial Engineering*, 51-63.
- [4] Karbasian, M. and Ibrahim, Z. (2010). Estimation of Parameters of the Power-Law-Nonhomogeneous Poisson Process in the Case of Exact Failure Data. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, Vol. 21, pp. 105-110.
- [5] Nakagawa, T. and Kowada, M. (1983). Analysis of a systems with minimal repair and its application to replacement policy. *European Journal of Operational Research*. Vol, 12, pp. 176-182.
- [6] Leung, F.K.N, & Cheng A.L.M. (2000). Determining Replacement Policies for Bus Engines. *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 17, pp. 771-783.
- [7] Crow, L.H (1990). Evaluating the Reliability of Repairable Systems. *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 275-279.
- [8] GMF Aero Asia. (2015). *GMF Journey Over Decades of Experience*. Retrieved Oktober 29, 2015, from <http://www.gmf-aeroasia.co.id>
- [9] Aircraft Maintenance Manual. (2015). *Boeing Proprietary*. Retrieved September 09, 2015, from <http://www.ilmuterbang.com>
- [10] Hoyland, A. and Rausand, M. (1994). *System Reliability Theory*. New York: John Wiley & Sons.
- [11] O'Connor, P. (2012). *Practical Reliability Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- [12] Rigdon, S. E., & Basu, A.P. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley & Sons, INC.
- [13] Crowder, M.J., Kimber, A.C., Smith, R.L., & Sweeting, T.J. (1991). "Statistical Analysis of Reliability Data". Springer Science Business Media.
- [14] Tsang, A.H.C. (2012). A Review on Trend Tests for Failure Data Analysis. *The West Indian Journal of Engineering*, Vol. 35, pp. 4-9.
- [15] Crow, L.H. (1975). Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems. *AMSAA Technical Report No. 138*, 1-35.