



TUGAS AKHIR - SS141501

**PENENTUAN KEBIJAKAN WAKTU OPTIMUM PERBAIKAN
KOMPONEN *HEAT EXCHANGER* (HE) PESAWAT BOEING
737-800 MENGGUNAKAN METODE *POWER LAW PROCESS*
DI PT. GARUDA MAINTENANCE FACILITY (GMF)
AEROASIA**

NOORAHMA AYUNING TYAS
NRP 1312 100 002

Dosen Pembimbing
Drs. Haryono, M.Sc.

Co. Dosen Pembimbing
Diaz Fitra Aksioma, S.Si., M.Si.

Program Studi S1 Statistika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



TUGAS AKHIR - SS 141501

**PENENTUAN KEBIJAKAN WAKTU OPTIMUM PERBAIKAN
KOMPONEN *HEAT EXCHANGER* (HE) PESAWAT BOEING
737-800 MENGGUNAKAN METODE *POWER LAW*
PROCESS DI PT. GARUDA MAINTENANCE FACILITY
(GMF) AEROASIA**

NOORAHMA AYUNING TYAS
NRP 1312 100 002

Dosen Pembimbing
Drs. Haryono, M.Sc.

Co. Dosen Pembimbing
Diaz Fitra Aksioma, S.Si., M.Si.

Program Studi S1 Statistika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - SS 141501

**DETERMINATION THE OPTIMUM TIME REPAIR POLICY
OF COMPONENTS HEAT EXCHANGER (HE) BOEING
737-800 AIRCRAFT USING POWER LAW PROCESS IN
PT. GARUDA MAINTENANCE FACILITY (GMF) AEROASIA**

NOORAHMA AYUNING TYAS
NRP 1312 100 002

Supervisor
Drs. Haryono, M.Sc.

Co. Supervisor
Diaz Fitra Aksioma, S.Si., M.Si.

Undergraduate Programme of Statistics
Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

LEMBAR PENGESAHAN

PENENTUAN KEBLIJAKAN WAKTU OPTIMUM PERBAIKAN KOMPONEN *HEAT EXCHANGER* (HE) PESAWAT BOEING 737-800 MENGGUNAKAN METODE *POWER LAW* PROSESS DI PT. GARUDA MAINTENANCE FACILITY (GMF) AERO ASIA

TUGAS AKHIR

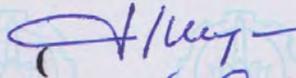
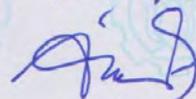
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Program Studi S-1 Jurusan Statistika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

NOORAHMA AYUNING TYAS
NRP 1312 100 002

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

1. **Drs. Haryono, M.Sc.**
NIP : 19520919 197901 1 001
2. **Diaz Fitra Aksioma, S.Si., M.Si.**
NIP : 19870602 201212 2 002

()
()

Mengetahui
Ketua Jurusan Statistika FMIPA-ITS


Dr. Suhartono

NIP. 19710929 199512 1 001

SURABAYA, JANUARI 2016

**PENENTUAN KEBIJAKAN WAKTU OPTIMUM
PERBAIKAN KOMPONEN *HEAT EXCHANGER* (HE)
PESAWAT BOEING 737-800 MENGGUNAKAN METODE
POWER LAW PROCESS DI PT. GARUDA MAINTENANCE
FACILITY (GMF) AEROASIA**

Nama Mahasiswa : Noorahma Ayuning Tyas
NRP : 1312 100 002
Jurusan : Statistika FMIPA-ITS
Dosen Pembimbing : Drs. Haryono, M.Sc.
Co Dosen Pembimbing : Diaz Fitra Aksioma, S.Si.,M.Si.

ABSTRAK

Industri penerbangan yang semakin berkembang di Indonesia menuntut adanya sebuah kualitas yang baik dalam 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. Komponen yang akan dianalisis adalah Heat Exchanger (HE), dimana komponen ini berfungsi mentransfer energy panas. Kebijakan tindakan perbaikan komponen HE dilakukan dengan cara memperbaiki komponen dalam usia ke-T atau pada periode kegagalan ke-N setelah dilakukan instalasi, tergantung pada kejadian mana yang akan berlangsung terlebih dahulu. Metode yang digunakan adalah Power Law Proses 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. Dari hasil 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, Perbaikan, Poisson Proses Non Homogen, Power Law Proses*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**DETERMINATION THE OPTIMUM TIME REPAIR
POLICY OF COMPONENTS HEAT EXCHANGER (HE)
BOEING 737-800 AIRCRAFT USING POWER LAW
PROCESS IN PT. GARUDA MAINTENANCE FACILITY
(GMF) AEROASIA**

Name : Noorahma Ayuning Tyas
NRP : 1312 100 002
Department : Statistika FMIPA-ITS
Supervisor : Drs. Haryono, M.Sc.
Co Supervisor : Diaz Fitra Aksioma, S.Si.,M.Si.

ABSTRACK

The aviation industry is growing in Indonesia requires a good quality in terms of services and aircraft worthiness. Garuda Maintenance Facility (GMF) Aero Asia is a company in aircraft maintenance services that serve to increase the reliability and safety of the aircraft. A component to be analyzed in this research is the Heat Exchanger (HE), where this component serves to transfer heat energy. HE component corrective action policies carried out by repairing components in age of T or the failure of the N -th period after installation, depending on where the events will take place first. The method used is the Power Law Process with Non-Homogeneous Poisson Process. This research resulted that the optimal maintenance based on the minimum cost of the first damage or at the time of aircraft flight hours has reached 8900 hours with costs of \$0.109 per flight hours. From the results of this calculation, the maintenance department can make decisions exactly when will be the time repair of the HE component so that the losses incurred can be prevented.

Keywords: *Heat Exchanger, Lifetime, Poisson Proses Non Homogen, Power Law Proces, Repair*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah kehadiran Allah SWT, Tuhan semesta alam atas segala ridho, rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul sehingga Tugas Akhir yang berjudul

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

Sholawat serta salam senantiasa penulis curahkan kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW beserta para keluarga serta sahabatnya yang telah memberi petunjuk kepada penulis khususnya dan seluruh umat manusia dalam menapaki jalan kehidupan sehingga selalu berada di jalan serta arah yang diridhoi oleh Allah SWT.

Terselesaikannya Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Drs. Haryono, M.Sc. dan Ibu Diaz Fitra Aksioma, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing yang telah sabar memberikan ilmu, bimbingan, dan arahan dalam penyelesaian Tugas Akhir.
2. Ibu Dra. Lucia Aridinanti, MT selaku dosen penguji dan selaku Kaprodi S1 serta Bapak Dr. Muhammad Mashuri, MT selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak Dr. Suhartono selaku Ketua Jurusan Statistika ITS.
4. Ibu Dr. Kartika Fitriyanti, M.Si dan Drs. Kresnayana yahya, M.Sc selaku dosen wali yang terus memberikan nasihat serta motivasi selama penulis menempuh pendidikan S1.
5. Para dosen pengajar dan staf Jurusan Statistika FMIPA ITS yang memberikan bekal ilmu selama masa perkuliahan.
6. Kedua orang tua yang penulis cintai dan sayangi, Bapak Ghozali Anwar dan Ibu Siti Asiyah serta kakak dan adik, terima kasih atas semua limpahan kasih sayang dan doa yang tiada tertandingi.

7. Bapak Agus Prasetyo Nugroho, Bapak Derris Surya, dan Bapak Dinar Mustika Juhara selaku selaku pembimbing di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) *Aero Asia* yang memberikan banyak ilmu, wawasan dunia kerja, dan memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian di GMF *Aero Asia*.
8. Sahabat satu kontrakan Firda, Novarani, Winda, Farrasilia, Devi, Rukmi, Dinni, Vonesa, Aulia, Yollafie, Retno, Fauzah, yang selalu memberikan semangat, doa, canda tawa serta motivasi untuk berjuang dan tidak mengenal kata menyerah.
9. Irwan Permadi Kurnianto, Wahyu Kurnia, Puspita, Ardhian, Catur, Dias, Akhmad, Andriyana, Mas Aulia Ahmad, Mbak Ririn, Mbak Eyon, Mbak Luh Ade, Mas Zaid, Mas Syaifu, Mas Adit, Mas Yusuf, Mbak Windi yang telah berbagi pengalaman berharga, semangat, dan doa kepada penulis.
10. Sonia, Pradhina, Mayang, Rista, Galih, Naliendra, Risma teman dari kecil hingga sekarang yang selalu memberikan dorongan dan semangat.
11. Teman-teman seperjuangan Wisuda 113 ITS atas segala kritik dan saran, motivasi serta semangat terkait Tugas Akhir.
12. Teman-teman PHK HIMASTA-ITS, Fungsionaris HIMASTA-ITS 2014-2015, KESMA BEM ITS 2013-2014 dan Angkatan Sigma 23 atas segala pengalaman dan motivasi yang diberikan.
13. Serta seluruh pihak yang banyak membantu penulis dan tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran diharapkan dari semua pihak sebagai bentuk pengembangan bagi penelitian selanjutnya. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberi manfaat baik untuk perusahaan terkait penyelesaian permasalahan yang sedang dialami serta untuk menambah wawasan keilmuan bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
TITLE PAGE	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Stochastic Point Process</i>	7
2.1.1 <i>Renewal Process</i>	7
2.1.2 Proses Perbaikan Minimal.....	7
2.2 <i>Poisson Process</i>	8
2.2.1 Proses Poisson Homogen.....	8
2.2.2 Proses Poisson Non Homogen.....	9
2.3 <i>Power Law Process</i>	10
2.4 <i>Failure Truncated Data dan Time Truncated Data</i>	11
2.5 Pengujian <i>Trend</i> dalam <i>Failure Rate</i>	11
2.6 Membentuk <i>Non-Homogeneous Poisson Process</i> (NHPP) model dengan <i>Power Law Process</i> (PLP).....	12
2.6.1 <i>Maximum Likelihood Estimation</i> (MLE) untuk <i>Failure Truncated Data</i>	13
2.6.2 <i>Maximum Likelihood Estimation</i> (MLE) untuk <i>Time Truncated Data</i>	14
2.7 <i>Goodness of Fit Test</i>	17

2.8	<i>Replacement Model</i>	18
2.9	Komponen <i>Heat Exchanger</i>	20
2.10	Penelitian Terdahulu	24
BAB III METODE PENELITIAN		
3.1	Variabel Penelitian	25
3.2	Langkah Analisis Penelitian	26
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		
4.1	Karakteristik Data <i>Lifetime</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) Pesawat B737-800	32
4.1.1	Karakteristik <i>Failure Truncated Data Lifetime</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) Pesawat B737-800	32
4.1.2	Karakteristik <i>Time Truncated Data Lifetime</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) Pesawat B737-800	34
4.2	Pengujian <i>Trend</i> dalam <i>Failure Rate</i> pada Data <i>Lifetime</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE)	36
4.2.1	Pengujian <i>Trend</i> dalam <i>Failure Rate</i> untuk <i>Failure Truncated Data</i>	36
4.2.2	Pengujian <i>Trend</i> dalam <i>Failure Rate</i> untuk <i>Time Truncated Data</i>	37
4.3	Estimasi Parameter Data <i>Lifetime</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE)	38
4.3.1	Estimasi Parameter Data <i>Lifetime</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Failure Truncated Data</i>	38
4.3.2	Estimasi Parameter Data <i>Lifetime</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Failure Truncated Data</i>	39
4.4	<i>Goodness of Fit Test</i>	40
4.4.1	<i>Goodness of Fit Test</i> untuk <i>Failure Truncated Data</i>	40
4.4.1	<i>Goodness of Fit Test</i> untuk <i>Time Truncated Data</i>	43
4.5	<i>Replacement Model</i>	46

4.5.1	Nilai c_f dan c_p	46
4.5.2	Perhitungan Estimasi Biaya Penggantian Komponen <i>Heat Exchanger</i> untuk <i>Serial Number</i> 15553 dan 17502.....	48
4.5.3	Perhitungan Estimasi Biaya Penggantian Komponen <i>Heat Exchanger</i> untuk <i>Serial Number</i> 7363, 5658, 48-5069, dan 5800.....	50
4.5.4	Perbandingan Hasil Analisis dengan Kondisi Kebijakan di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) <i>Aero Asia</i>	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan.....	57
5.2	Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN		61
BIODATA PENULIS		95

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 3.1	Struktur Data.....	25
Tabel 4.1	Statistika Deskriptif <i>Lifetime (Flight Hours)</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE)</i> untuk Keempat <i>Serial Number</i>	32
Tabel 4.2	Statistika Deskriptif <i>Lifetime (Flight Hours)</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE)</i> untuk Kelima <i>Serial Number</i>	34
Tabel 4.3	Hasil <i>Laplace's Test</i> untuk <i>Failure Truncated Data</i>	37
Tabel 4.4	Hasil <i>Laplace's Test</i> untuk <i>Time Truncated Data</i>	38
Tabel 4.5	Estimasi Parameter untuk <i>Failure Truncated Data Serial Number 15553 dan 17502</i>	39
Tabel 4.6	Estimasi Parameter <i>Time Truncated Data</i> untuk Kelima <i>Serial Number</i>	39
Tabel 4.7	<i>Conditional MLE dan Unbiased Conditional MLE</i> dari β untuk <i>Serial Number 15553 dan 17502</i>	41
Tabel 4.8	Statistik Uji untuk Metode <i>Camer-Von Mises</i> pada <i>Failure Truncated Data</i>	41
Tabel 4.9	<i>Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)</i> <i>Serial Number 15553 dan 17502</i>	42
Tabel 4.10	<i>Conditional MLE dan Unbiased Conditional MLE</i> dari β untuk <i>Time Truncated Data</i>	44
Tabel 4.11	Statistik Uji untuk Metode <i>Camer-Von Mises</i> pada <i>Time Truncated Data</i>	44
Tabel 4.12	<i>Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)</i> <i>Serial Number 7363, 5658, 48-3059, dan 5800</i>	45
Tabel 4.13	Nilai c_p (<i>Cost of Preventive</i>) untuk <i>Unscheduled Maintenance</i>	47
Tabel 4.14	Nilai c_f (<i>Cost of Failure</i>).....	47

Tabel 4.15	Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen <i>Heat Exchanger Serial Number</i> 15553	49
Tabel 4.16	Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen <i>Heat Exchanger Serial Number</i> 17502	49
Tabel 4.17	Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen <i>Heat Exchanger Serial Number</i> 7363	51
Tabel 4.18	Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen <i>Heat Exchanger Serial Number</i> 5658	51
Tabel 4.19	Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen <i>Heat Exchanger Serial Number</i> 48-5069	52
Tabel 4.16	Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen <i>Heat Exchanger Serial Number</i> 5800	53
Tabel 4.17	Kebijakan Optimal untuk Keenam <i>Serial</i> <i>Number</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i>	54

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	<i>General Description Air Conditioning and Cooling</i> 21
Gambar 2.2	<i>Description of Air Conditioning, Cooling, Pimary Heat Exchanger and Plenum or Diffuser Assembly</i> 22
Gambar 2.3	<i>Description of Air Conditioning, Cooling, Secondary Heat Exchanger and Plenum or Diffuser Assembly</i>
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian..... 23
Gambar 4.1	Perbandingan Jumlah Kerusakan (<i>N</i>) dengan <i>Cumulative Time</i> untuk <i>Serial Number</i> ; (a) 15553; (b) 7016; (c) 17502; (d) 49-4223 33
Gambar 4.2	Perbandingan Jumlah Kerusakan (<i>N</i>) dengan <i>Cumulative Time</i> untuk <i>Serial Number</i> ; (a) 7441; (b) 7363; (c) 5658; (d) 48-3059; dan (e) 5800..... 35
Gambar 4.3	<i>Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)</i> untuk <i>Serial Number</i> ; (a) 15553; (b) 17502 42
Gambar 4.4	<i>Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)</i> untuk <i>Serial Number</i> (a) 7363; (b) 5658; (c) 48-3059; (d) 5800..... 46
Gambar 4.5	Ekspektasi Optimasi Biaya Komponen <i>Heat Exchanger</i> Terhadap Sepasang <i>T</i> dan <i>N</i> untuk <i>Serial Number</i> (a) 15553; (b) 17503..... 50
Gambar 4.6	Ekspektasi Optimasi Biaya Komponen <i>Heat Exchanger</i> Terhadap Sepasang <i>T</i> dan <i>N</i> untuk <i>Serial Number</i> (a) 7363; (b) 5658; (c) 48-3059; (d) 5800..... 53

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1A	Data <i>Lifetime</i> dengan <i>Failure Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Serial Number</i> 15553 61
Lampiran 1B	Data <i>Lifetime</i> dengan <i>Failure Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Serial Number</i> 7016 61
Lampiran 1C	Data <i>Lifetime</i> dengan <i>Failure Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Serial Number</i> 17502 61
Lampiran 1D	Data <i>Lifetime</i> dengan <i>Failure Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Serial Number</i> 49-4223 62
Lampiran 2A	Data <i>Lifetime</i> dengan <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Serial Number</i> 7441 62
Lampiran 2B	Data <i>Lifetime</i> dengan <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Serial Number</i> 7363 62
Lampiran 2C	Data <i>Lifetime</i> dengan <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Serial Number</i> 5658 63
Lampiran 2D	Data <i>Lifetime</i> dengan <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Serial Number</i> 48-3059 63
Lampiran 2E	Data <i>Lifetime</i> dengan <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) untuk <i>Serial Number</i> 5800 63

Lampiran 3A	Statistik Deskriptif Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) dengan <i>Failure Truncated</i> untuk Keempat <i>Serial Number</i>	64
Lampiran 3B	Statistik Deskriptif Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) dengan <i>Time Truncated</i> untuk Kelima <i>Serial Number</i>	64
Lampiran 4A	<i>Syntax</i> MATLAB untuk Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) <i>Failure Truncated Data</i>	65
Lampiran 4B	Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) untuk <i>Failure Truncated Data</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 15553	65
Lampiran 4C	Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) untuk <i>Failure Truncated Data</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 7016	65
Lampiran 4D	Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) untuk <i>Failure Truncated Data</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 17502	66
Lampiran 4E	Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) untuk <i>Failure Truncated Data</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 49-4223	66
Lampiran 5A	<i>Syntax</i> MATLAB untuk Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) <i>Time Truncated Data</i>	66
Lampiran 5B	Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) untuk <i>Time Truncated Data</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 7441	67
Lampiran 5C	Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) untuk <i>Time Truncated Data</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 7363	67
Lampiran 5D	Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) untuk <i>Time Truncated Data</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 5658	67

Lampiran 5E	Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) untuk <i>Time Truncated Data</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 48-3059.....	68
Lampiran 5F	Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) untuk <i>Time Truncated Data</i> Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 5800.....	68
Lampiran 6A	Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan <i>Maximum Likelihood Estimation</i> (MLE) untuk <i>Failure Truncated</i> pada Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 15553.....	69
Lampiran 6B	Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan <i>Maximum Likelihood Estimation</i> (MLE) untuk <i>Failure Truncated</i> pada Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 17502.....	69
Lampiran 7A	Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan <i>Maximum Likelihood Estimation</i> (MLE) untuk <i>Time Truncated</i> pada Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 7441.....	70
Lampiran 7B	Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan <i>Maximum Likelihood Estimation</i> (MLE) untuk <i>Time Truncated</i> pada Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 7363.....	71
Lampiran 7C	Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan <i>Maximum Likelihood Estimation</i> (MLE) untuk <i>Time Truncated</i> pada Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number</i> 5658.....	71
Lampiran 7D	Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan <i>Maximum Likelihood</i>	

	<i>Estimation (MLE) untuk Time Truncated pada Komponen Heat Exchanger (HE) Serial Number 48-3059</i>	72
Lampiran 7E	Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan <i>Maximum Likelihood Estimation (MLE) untuk Time Truncated pada Komponen Heat Exchanger (HE) Serial Number 5800</i>	73
Lampiran 8A	Perhitungan <i>Cramer-Von Mises Test</i> untuk <i>Failure Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE) Serial Number 15553</i>	74
Lampiran 8B	Perhitungan <i>Cramer-Von Mises Test</i> untuk <i>Failure Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE) Serial Number 17502</i>	75
Lampiran 9A	Perhitungan <i>Cramer-Von Mises Test</i> untuk <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE) Serial Number 7441</i>	76
Lampiran 9B	Perhitungan <i>Cramer-Von Mises Test</i> untuk <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE) Serial Number 7363</i>	77
Lampiran 9C	Perhitungan <i>Cramer-Von Mises Test</i> untuk <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE) Serial Number 5658</i>	78
Lampiran 9D	Perhitungan <i>Cramer-Von Mises Test</i> untuk <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE) Serial Number 48-3059</i>	79
Lampiran 9E	Perhitungan <i>Cramer-Von Mises Test</i> untuk <i>Time Truncated</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE) Serial Number 5800</i>	80
Lampiran 10A	Perhitungan <i>Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)</i> Komponen <i>Heat Exchanger (HE) Serial Number 15553</i>	81

Lampiran 10B	Perhitungan <i>Rate of Occurrence of Failure</i> (ROCOF) <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 17502</i>	82
Lampiran 10C	Perhitungan <i>Rate of Occurrence of Failure</i> (ROCOF) <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 7363</i>	83
Lampiran 10D	Perhitungan <i>Rate of Occurrence of Failure</i> (ROCOF) <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 5658</i>	84
Lampiran 10E	Perhitungan <i>Rate of Occurrence of Failure</i> (ROCOF) <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 48-3059</i>	85
Lampiran 10F	Perhitungan <i>Rate of Occurrence of Failure</i> (ROCOF) <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 5800</i>	86
Lampiran 11A	<i>Syntax</i> MATLAB Optimasi Biaya <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE)	87
Lampiran 11B	Hasil Perhitungan Optimasi Biaya <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 15553</i>	88
Lampiran 11C	Hasil Perhitungan Optimasi Biaya <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 17502</i>	90
Lampiran 11D	Hasil Perhitungan Optimasi Biaya <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 7363</i>	91
Lampiran 11E	Hasil Perhitungan Optimasi Biaya <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 5658</i>	92
Lampiran 11F	Hasil Perhitungan Optimasi Biaya <i>Komponen Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 48-5069</i>	93

Lampiran 11G	Hasil Perhitungan Optimasi Biaya Komponen <i>Heat Exchanger</i> (HE) <i>Serial Number 5800</i>	94
Lampiran 12A	Surat Penerimaan Pengambilan Data dan Penelitian	95
Lampiran 12B	Surat Izin Publikasi	96

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri pesawat terbang sudah sangat berkembang di Indonesia, menurut Badan Pusat Statistik industri penerbangan menunjukkan bahwa dari tahun ke tahun mengalami peningkatan, pada tahun 2007 jumlah armada pesawat terbang mencapai 687 pesawat sampai pada tahun 2012 jumlah pesawat terus berkembang mencapai 950 armada pesawat. Beberapa maskapai penerbangan seperti Garuda sebagai maskapai nasional terbesar di Indonesia memiliki 85 pesawat, Citilink mengoperasikan 20 armada pesawat, Air Asia memiliki 23 pesawat dan Sriwijaya 40 pesawat. Menurut Direktorat Jendral Perhubungan Udara Kementerian Perhubungan Republik Indonesia selama semester I tahun 2015 jumlah penumpang angkutan udara domestik mencapai 32,3 juta orang, naik 14,06 persen dibandingkan periode yang sama di tahun 2014 sebanyak 28,3 juta orang. Salah satu aspek perijinan yang tercantum dalam undang-undang Republik Indonesia nomor 1 tahun 2009 tentang penerbangan menyatakan bahwa pesawat harus memiliki kelayakan operasi. Untuk memastikan bahwa pesawat tersebut layak digunakan maka perlu diperhatikan konfigurasi internal atau kabin dan performa mesin pesawat secara keseluruhan. Pesawat terbang yang layak dioperasikan harus memenuhi tingkat keandalan yang tinggi untuk setiap mesin dan komponen yang ada. Kegagalan dalam suatu komponen pesawat akan menyebabkan terjadinya kerugian-kerugian seperti terjadinya *delay* atau bahkan pembatalan penerbangan (*cancellation*), pilot dan *passenger complaint* serta akan mengakibatkan biaya yang semakin besar atas kerugian-kerugian tersebut. Guna mencegah kegagalan tersebut maka diperlukan sebuah pengontrolan terhadap mesin-mesin ataupun komponen pesawat terbang sehingga apabila ditemukan sebuah kerusakan dapat segera dilakukan tindakan perbaikan dan tidak menyebabkan kerusakan yang lebih parah.

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-pesawat terbang yang dimilikinya (GMF, 2015). Perusahaan GMF *Aero Asia* memperhatikan kualitas pelayanannya seiring dengan banyaknya perusahaan jasa *maintenance* pesawat yang bermunculan. Hal ini dilakukan sebagai usaha untuk mencapai visi sebagai *Maintenance Repair and Overhaul* (MRO) kelas dunia pilihan *costumer*. Beberapa strategi digunakan untuk mempertahankan posisinya bahkan menguasai persaingan yang semakin ketat dengan cara mempertahankan bahkan meningkatkan kualitas pelayanan yang diberikan kepada pelanggan dan disertai oleh keandalan dan harga yang terjangkau. PT. GMF *Aero Asia* memiliki beberapa bisnis unit yang mempunyai fungsi dan tugas masing-masing dalam melakukan jasa *maintenance* pesawat. *Engineering Service* merupakan salah satu departemen di dalam PT. GMF *Aero Asia*. Salah satu divisi dalam *Engineering Service* yang fokus melakukan analisis reliabilitas terhadap suatu komponen dalam pesawat terbang adalah *Reliability and Service* (TER-1). Dalam praktiknya perusahaan ini belum secara maksimal dalam menggunakan analisis reliabilitas untuk menentukan langkah *preventive maintenance* maupun *replacement* yang dilakukan. Untuk kebijakan perawatan maupun penggantian yang dilakukan di PT. GMF *Aero Asia* masih mengikuti umur rata-rata dari masing-masing komponen sehingga pada saat melakukan penggantian komponen akan menambah waktu, biaya, dan kerusakan yang lebih parah. Oleh karena itu, peneliti akan bekerjasama dengan bagian TER-1 untuk menentukan kebijakan penggantian suatu komponen dengan baik, hal ini merupakan metode yang tepat untuk merencanakan perawatan terencana. Melalui penentuan waktu yang tepat untuk tindakan *repair* maupun *replacement* dan menentukan ekspektasi waktu perawatan preventif yang optimal dengan melihat fungsi biaya yang dikeluarkan.

Pesawat masih bisa dinilai baik karena selalu dirawat, jika suatu komponen dalam pesawat mengalami kegagalan maka akan diambil dari sistem dan akan dilakukan sebuah perbaikan dengan menganggap kondisi komponen setelah diperbaiki akan sama seperti saat kegagalan terakhir (*as good as new*) (Hoyland and

Rausand, 1994 : 275). Pemakaian yang lama akan berakibat pula pada kehandalan mesin yang menjadi lebih buruk, fitur keselamatan pesawat pun tidak bisa secara maksimal melindungi penumpangnya, waktu pengoperasian pesawat akan berkurang, karena 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 (Weckman, Shell, & Marvel, 2001:52). Disisi biaya akan menjadi lebih mahal jika memperbaiki komponen yang lesu, akan tetapi lebih ekonomis jika menggantinya dengan komponen yang baru. Penelitian kali ini akan dibahas mengenai kebijakan perawatan komponen yang terpilih dari model biaya yang dilakukan dengan cara mengganti dalam usia ke- T atau diganti pada saat periode kegagalan ke- N , tergantung mana yang lebih dahulu terjadi dan memberikan fungsi biaya yang paling minimum. Proses *replacement* ini menggunakan *Power Law Proses* atau biasa disebut dengan Weibull *proses* dengan mengaplikasikan metode *Non-Homogeneous Poisson Proses* untuk model *reliability* dimana model ini akan sangat berguna untuk jenis *repairable system* (Kabarsian and Ibrahim, 2010: 105).

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. Metode yang dikembangkan ini berhasil membangun sebuah model *replacement* dimana sistem diganti secara regular dengan periode ke- T atau pada saat terjadi kegagalan ke- N setelah komponen dipasang, tergantung mana yang terjadi terlebih dahulu. Selain Nakagawa dan Kowada pada 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). Pada tahun 1990 Crow mengembangkan metode *repairable* untuk sebuah sistem yang kompleks dan tidak dilakukan pergantian jika komponen tersebut rusak dengan kata lain komponen tersebut dapat diperbaiki. Metode yang digunakan adalah *weibull proses*

atau *Power Law Process* (PLP) dengan data yang digunakan adalah *truncated data*. Pada penelitian kali ini model replacement dilakukan dengan kebijakan optimal *replacement* yang didasarkan dengan meminimumkan biaya jangka panjang untuk setiap jenis mesin yang ditentukan.

1.2 Rumusan Masalah

Kerusakan yang terjadi pada komponen *Heat Exchanger* (HE) yang ada dalam pesawat Boeing 737-800 dari tahun 2009 sampai tahun 2015 mencapai 260 kerusakan sehingga menyebabkan maskapai Garuda Indonesia mengalami keterlambatan atau *delay*. Kerusakan yang terjadi pada komponen *Heat Exchanger* (HE) akan mengakibatkan gangguan pada sistem pendingin (*air conditioning*) pada saat masih di darat sehingga memaksa beberapa penumpang yang kepanasan untuk membuka jendela darurat (*emergency window*). Saat pesawat parkir di darat maupun pada saat beroperasi di udara, 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 tersebut. Untuk itu perlu dilakukan analisis keandalan dari komponen *Heat Exchanger* (HE) tersebut supaya komponen berfungsi dengan baik dan memberikan kenyamanan bagi penumpang.

Berdasarkan keterangan pada alinea sebelumnya, maka permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini yaitu bagaimana menentukan waktu perbaikan komponen *Heat Exchanger* (HE) yang tepat dan dapat meminimumkan biaya kerusakan di PT. *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang didapatkan dalam penelitian ini adalah menentukan waktu optimum yang tepat untuk melakukan perbaikan pada komponen *Heat Exchanger* (HE). Waktu optimum tersebut didapatkan dari model optimasi yang

meminimumkan biaya kerusakan di PT. *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia* sehingga kerugian-kerugian yang ada seperti terjadinya *delay* atau *passenger complaint* akibat kerusakan yang dialami komponen *Heat Exchanger* (HE) dapat dicegah dan biaya *repair* komponen menjadi lebih ekonomis.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan berupa saran dan rekomendasi kepada PT. *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia* dalam melakukan *replacement* komponen *Heat Exchanger* (HE) dan untuk mengoptimalkan biaya perawatan komponen sehingga utilitas dari komponen yang telah ada menjadi maksimum. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat berguna untuk menambah wawasan dan pengetahuan pada penelitian selanjutnya mengenai peranan ilmu statistika dibidang industri.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini hanya memberikan informasi waktu penggantian komponen *Heat Exchanger* (HE) yang tepat bukan bagaimana cara pemeliharaan komponen tersebut.
2. *Heat Exchanger* (HE) bekerja secara mandiri atau independen dengan kondisi yang sama pada setiap komponen.
3. Diawal pemakaian, digunakan komponen *Heat Exchanger* (HE) yang baru dengan kondisi yang *operable*.
4. Komponen *Heat Exchanger* (HE) akan diganti dengan yang baru ketika tindakan *repair* sudah tidak lagi ekonomis.
5. Waktu *repair* dan *replacement* komponen *Heat Exchanger* (HE) sangat minimum.
6. Biaya downtime dianggap nol karena suku cadang komponen *Heat Exchanger* (HE) mencukupi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Stochastic Point Process*

Sebuah random variabel, dengan $N(t)$ 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* atau proses stokastik yang mempunyai realisasi berupa proses menghitung atau *counting process*, digunakan untuk mengetahui hubungan dari suatu runtutan peristiwa atau proses kejadian yang bersifat tidak pasti (Hoyland and Rausand, 1994 : 263).

2.1.1 *Renewal Process*

Terdapat dua jenis komponen yaitu *repairable* dan *non-repairable*, *repairable system* yaitu sebuah komponen dimana ketika terjadi sebuah kerusakan maka komponen tersebut dapat diperbaiki dengan beberapa proses perbaikan selain penggantian pada seluruh sistem. *Non-repairable system* atau *expendable* adalah suatu komponen yang jika mengalami kerusakan maka harus diganti dengan komponen yang baru dalam artian komponen tersebut tidak bisa diperbaiki atau komponen tersebut akan lebih mahal ketika diperbaiki dari pada diganti dengan komponen yang baru. Untuk *non-repairable system* umur hidup suatu komponen merupakan variabel random. Dalam pesawat terbang biasanya komponen vital merupakan komponen yang *non-repairable*, sedangkan interior dalam pesawat terbang atau *engine* pesawat terbang merupakan komponen yang *repairable* atau dapat diperbaiki (O'Connor, 2012 : 8-9).

Menurut Hoyland and Rausand pada tahun (1994 : 275) 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.

2.1.2 *Proses Perbaikan Minimal*

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. Minimal *repair* mengasumsikan bahwa waktu perbaikan dianggap sangat minimum dan untuk memperoleh model yang fleksibel dari suatu sistem kegagalan yang akan diperbaiki dalam minimal *repair*, maka hanya sebagian kecil proporsi dari unsur-unsur sistem yang akan diganti pada proses *repair*. Hal ini akan mengondisikan sistem sama seperti sebelum sistem mengalami kerusakan (Rigdon and Basu, 2000:30).

2.2 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 $(0, t)$, banyaknya kerusakan yang memiliki distribusi Poisson dapat dituliskan dalam persamaan berikut (Rigdon and Basu, 2000 : 33-35).

$$p(x) = P(N = n) = \frac{e^{-\lambda}(\lambda)^n}{n!}, \text{ untuk } n = 0,1,2, \dots \quad (2.1)$$

Rata-rata jumlah kerusakan adalah λ dan varians bernilai λ . Proses Poisson dibagi menjadi dua macam yaitu proses poisson homogen dan proses poisson nonhomogen.

2.2.1 Proses Poisson Homogen

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*. (Hoyland and Rausand, 1994 : 270-273)

Untuk menentukan probabilitas jumlah kegagalan oleh waktu ke- t maka digunakan persamaan seperti berikut.

$$P[N(t) = r] = \frac{(\lambda t)^r}{r!} e^{-\lambda t}, \text{ untuk } r = 0,1,2, \dots \quad (2.2)$$

2.2.1 Proses Poisson Non Homogen

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 (Crowder, Kimber, Smith, & Sweeting, 1991:164-175). NHPP menggambarkan proses kerusakan komponen yang memiliki pola tertentu dengan jumlah kumulatif hingga waktu t adalah $N(t)$.

Proses hitung dari $\{N(t), t \geq 0\}$ dengan fungsi intensitas sebesar $w(t)$ untuk $t \geq 0$ dikatakan memiliki proses Poisson dengan memenuhi syarat sebagai berikut.

1. $N(0) = 0$
2. $\{N(t), t \geq 0\}$ dikatakan *independent increments*
3. $P(N(t + \Delta t) - N(t) \geq 2) = 0(\Delta t)$, tidak akan terjadi lebih dari satu kejadian terhadap satu kegagalan di waktu yang sama
4. $P(N(t + \Delta t) - N(t) = 1) = w(t)\Delta t + 0(\Delta t)$

Non-Homogeneous Poisson Processes (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). ROCOF adalah estimasi nilai laju kerusakan dari suatu komponen, jika suatu komponen *repairable* telah di observasi pada interval waktu $[0, t]$ dengan t dapat ditentukan interval waktunya (*time truncated case*) atau pada kegagalan terakhir (*failure truncated case*), maka ROCOF dapat diaplikasikan dengan melihat dari beberapa kali kegagalan yang terjadi (Rigdon and Basu, 2000:99). *Cumulative intensity* dari NHPP adalah sebagai berikut (Hoyland and Rausand, 1994 : 314-315).

$$W(t) = \int_0^t w(t)dt \quad (2.3)$$

Untuk menentukan probabilitas jumlah kegagalan Pada interval waktu $[t_1, t_2]$ maka digunakan persamaan seperti berikut.

$$P[N(t_2) - N(t_1) = n] = \frac{[W(t_2) - W(t_1)]^n}{n!} e^{-[W(t_2) - W(t_1)]} \quad (2.4)$$

untuk $n = 0, 1, 2, \dots$

dengan rata-rata jumlah kegagalan pada interval $[t_1, t_2]$ adalah

$$E(N(t_2) - N(t_1)) = W(t_2) - W(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} w(t) dt \quad (2.5)$$

2.3 Power Law Process

Power Law Process (PLP) atau model proses Weibull merupakan salah satu model yang digunakan untuk mengecek data yang mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) dengan fungsi intensitas yang dibentuk dari fungsi *survival* distribusi weibull dengan persamaan berikut (Rigdon and Basu, 2000 : 16).

$$S(x) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (2.6)$$

t merupakan variabel random dengan cdf sebagai berikut

$$F(x) = 1 - S(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (2.7)$$

sehingga didapatkan pdf dan fungsi laju kerusakan sebagai berikut

$$f(x) = F'(x) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right] \quad (2.8)$$

$$w(t) = \frac{f(x)}{S(x)} = \frac{\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right]}{\exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right]} = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} \quad (2.9)$$

Parameter β membuktikan bagaimana sistem akan memburuk seiring dengan bertambahnya waktu. Jika $\beta > 1$ maka fungsi intensitas $w(t)$ meningkat, sedangkan $\beta < 1$ maka $w(t)$ akan menurun dan jika $\beta = 1$ menunjukkan penurunan power

Law Process menjadi lebih sederhana yaitu *Homogeneous Poisson Processes* dengan fungsi intensitas $\frac{1}{\lambda}$.

2.4 *Failure Truncated Data dan Time Truncated 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. Jika $Y_{N_k,k} = T_k$ maka waktu kegagalan $Y_{N_1,k}, Y_{N_2,k}, \dots, Y_{N_k-1,k}$ didistribusikan sebagai $N_k - 1$ order statistik dari distribusi *uniform* pada interval $(0, Y_{N_k,k})$.

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 yang didistribusikan sebagai N_k order statistik dari distribusi *uniform* pada interval $(0, T_k)$ (Leung and Cheng, 2000 : 773).

2.5 *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 (Tsang,2012:4). *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) merupakan model statistik yang sederhana untuk mendiskripsikan terjadinya suatu kegagalan dalam sebuah *repairable system*. Untuk menguji apakah terdapat *trend* pada laju kegagalan dari komponen maka digunakan *Laplace's test*. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut (Rigdon and Basu, 2000 :110-112).

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 2.10 berikut ini.

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k} Y_{i,k} - T_k}{N_k} \right)}{(T_k) \sqrt{\frac{1}{12N_k}}} \quad \text{untuk } k = 1, \dots, K \quad (2.10)$$

dengan $Y_{i,k}, \dots, Y_{N_k,k}$ adalah waktu kegagalan untuk proses observasi pada interval ke $(0, T_k)$ dan T_k adalah waktu yang ditetapkan sebelum observasi. Statistik uji untuk *failure truncated* data dinyatakan dalam persamaan 2.11 berikut ini.

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k-1} Y_{i,k} - \frac{Y_{N_k,k}}{2}}{N_k-1} \right)}{(Y_{N_k,k}) \sqrt{\frac{1}{12(N_k-1)}}} \quad \text{untuk } k = 1, \dots, K \quad (2.11)$$

dengan $Y_{i,k}$ adalah waktu dari kegagalan ke- i untuk $i = 1, 2, \dots, N_k$, k adalah jumlah komponen yang diamati dan N_k adalah angka kegagalan yang ditetapkan.

L merupakan pendekatan dari distribusi normal standar dengan *mean* 0 dan standar deviasi 1 untuk *time truncated* data atau *failure truncated* data pada tingkat signifikansi sebesar 5 persen. 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 *Homogeneous Poisson Process* (HPP).

2.6 Membentuk *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) model dengan *Power Law Process* (PLP)

Ketika nilai L menunjukkan tingkat signifikansi yang sangat besar berarti jumlah dari kegagalan lebih besar dari ekspektasi, hal ini mengindikasikan bahwa waktu kegagalan cenderung lebih besar diakhir interval $(0, T_k)$ dengan kata lain sistem semakin memburuk maka model non-stasioner dari proses kegagalan mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP). Nilai yang kecil dari L mengindikasikan terjadinya

peningkatan kehandalan suatu komponen sehingga proses kegagalan mengikuti *Homogeneous Poisson Process* (HPP) (Rigdon and Basu, 2000:110).

2.6.1 Maximum Likelihood Estimation (MLE) untuk Failure Truncated Data

Diberikan suatu estimator untuk dua parameter *Power Law Process* (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). Pdf dari *failure truncated* NHPP dinyatakan dalam persamaan (2.12) sebagai berikut (Rigdon and Basu, 2000:116-118).

$$f(T_1, T_2, \dots, T_N) = \left(\prod_{i=1}^N w(T_i) \right) \exp \left[- \int_0^{T_N} w(x) dx \right] \quad (2.12)$$

untuk $0 < T_1 < T_2 < \dots < T_N$

dengan $w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1}$ sehingga didapatkan nilai sebagai berikut.

$f(T_1, T_2, \dots, T_N)$

$$\begin{aligned} &= \left(\prod_{i=1}^N \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1} \right) \exp \left[- \int_0^{T_N} \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{\beta-1} dx \right] \\ &= \frac{\beta^N}{\lambda^{N\beta}} \left(\prod_{i=1}^N t_i \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{T_N}{\lambda} \right)^\beta \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

persamaan (2.13) dirubah ke dalam bentuk logaritma natural sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \ell(\lambda, \beta | T) &= N \ln \beta - N\beta \ln \lambda + \\ &(\beta - 1) \sum_{i=1}^N \ln(t_i) - \left(\frac{T_N}{\lambda} \right)^\beta \end{aligned} \quad (2.14)$$

langkah selanjutnya persamaan (2.14) diturunkan terhadap λ sehingga dinyatakan sebagai berikut.

$$0 = \frac{\partial \ell}{\partial \lambda} = -\frac{N\beta}{\lambda} + \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{T_N}{\lambda}\right)^\beta \quad (2.15)$$

Persamaan (2.15) diturunkan terhadap β sehingga dinyatakan sebagai berikut.

$$0 = \frac{\partial \ell}{\partial \beta} = \frac{N}{\beta} - N \ln \lambda + \sum_{i=1}^N \ln T_N - \left(\frac{T_N}{\lambda}\right)^\beta \ln \left(\frac{T_N}{\lambda}\right) \quad (2.16)$$

Dari persamaan (2.15) dan (2.16) maka didapatkan perhitungan untuk parameter λ dan β untuk *failure truncated* yang dinyatakan dalam persamaan (2.17) dan (2.18) seperti berikut ini.

$$\lambda = \frac{Y_{N_1,1}}{N^{1/\beta}} \quad (2.17)$$

dan

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N-1} \ln \left(\frac{Y_{N_1,1}}{Y_{i,1}}\right)} \quad (2.18)$$

2.6.2 Maximum Likelihood Estimation (MLE) untuk Time Truncated Data

Diberikan nilai waktu kegagalan sebesar $T_1 < T_2 < \dots < T_N < t$, pengamatan waktu kegagalan berhenti setelah ditetapkan waktu ke- T , sehingga kegagalan ke- N merupakan variabel random. Bisa saja dalam pengamatan ini tidak terjadi kegagalan setelah waktu ke- T . Fungsi density dari (N, T_1, \dots, T_N) adalah sebagai berikut. (Rigdon and Basu, 2000:135-137).

$$f(n, t_1, \dots, t_n) = \begin{cases} f_N(n) f(t_1, \dots, t_n | n), & n \geq 1 \\ f_N(0), & n = 0 \end{cases}$$

N adalah variabel random yang mengikuti distribusi poisson dengan *mean* sebesar $\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta$ sehingga didapatkan persamaan (2.19) sebagai berikut.

$$f_N(n) = \frac{\left[\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right]^n \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right]}{n!}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.19)$$

diketahui nilai dari $g(y) = \frac{\beta}{t} \left(\frac{t_i}{t}\right)^{\beta-1}$, $0 \leq y \leq t$. Didapatkan persamaan berikut.

$$f(t_1, t_2, \dots, t_n | n) = n! \prod_{i=1}^n G'(t_i) = n! \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{t} \left(\frac{t_i}{t}\right)^{\beta-1} \quad (2.20)$$

untuk $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t$. Fungsi kepadatan peluang dari N dan $T_1 < T_2 < \dots < T_N$ adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} f(n, t_1, \dots, t_n) &= \frac{\left[\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right]^n \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right]}{n!} n! \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{t} \left(\frac{t_i}{t}\right)^{\beta-1} \\ &= \frac{t^{n\beta} \beta^n}{\lambda^{n\beta} t^n} \left[\prod_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{t}\right)\right]^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right] \\ &= \frac{\beta^n}{\lambda^{n\beta}} \left[\prod_{i=1}^n t_i\right]^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta\right] \end{aligned} \quad (2.21)$$

untuk $n \geq 1, 0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t$. Sama halnya dengan perhitungan MLE untuk kasus *failure truncated* persamaan (2.14) dapat dirubah ke dalam bentuk logaritma natural sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \ell(\lambda, \beta | n, t) &= n \ln \beta - n \ln \lambda + \\ &(\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n(\beta - 1) \ln \lambda - \left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta \end{aligned} \quad (2.22)$$

jika persamaan (2.22) diturunkan terhadap β dan λ maka satu komponen dengan *time truncated data*, *Maximum Likelihood*

Estimation (MLE) untuk β dan λ dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N_1} \ln \left(\frac{T_N}{Y_{i,1}} \right)} \quad (2.23)$$

dan

$$\lambda = \frac{T_N}{N^{1/\beta}} \quad (2.24)$$

dengan $T_N = t$

Untuk K *homogeneous engines*, *conditional* MLE atau estimasi yang bias dari β dinyatakan dalam persamaan berikut ini (Leung and Cheng, 2000 : 774-775).

$$\tilde{\beta} = \frac{M}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln \left(\frac{T_k}{Y_{i,k}} \right)} \quad (2.25)$$

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.

$$\bar{\beta} = \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} \quad (2.26)$$

Untuk K *homogeneous engines*, MLE untuk λ pada *time* dan *failure truncated* data masing-masing dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{k=1}^K N_k}{\sum_{k=1}^K T_k^{\bar{\beta}}} \quad (2.27)$$

dan

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{k=1}^K N_k}{\sum_{k=1}^K Y_{N_k, k}^{\bar{\beta}}} \quad (2.28)$$

2.7 Goodness of Fit Tests

Kecukupan model *Power Law Proses* (PLP) dapat diuji dengan *goodness of fit tests* dengan melihat apakah model sesuai atau tidak. Digunakan metode *Cramer-von Mises test* untuk menguji apakah waktu kegagalan dari sistem *repairable* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Proses* (NHPP) dengan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) sebesar $\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1}$. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut (Crow, 1975 : 28).

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 $\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1}$ 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 untuk menghitung statistik uji (C_M^2) adalah sebagai berikut.

Pertama, jika data merupakan *failure truncated* dengan $X_{N_k, k} = T_k$ maka $M_k = N_k - 1$ dan jika data merupakan *time truncated* dengan $X_{k, k} < T$ maka $M_k = N_k$, sehingga nilai $M = \sum_{k=1}^K M_k$.

Untuk setiap komponen pada masing-masing data kegagalan sampai pada waktu ke- T_k , dengan $i = 1, 2, \dots, M_k$, sehingga dapat dihitung nilai $Y_{i, k}$ dengan rumus yang dinyatakan sebagai berikut.

$$Y_{i,k}^* = \frac{Y_{i,k}}{T_k} \quad (2.29)$$

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.

$$C_M^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2 \quad (2.30)$$

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 sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa waktu kegagalan untuk mesin ke- K mengikuti *Non Homogeneous Poisson Proses* dengan *Power Law Proses* dan *Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)* bernilai $\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1}$ atau $\beta \neq 1$.

2.8 Replacement Model

Penggantian komponen secara mendadak akan menimbulkan biaya yang lebih besar, apalagi jika pesawat mengalami *delay* pasti biaya yang ditanggung sebuah maskapai penerbangan akan semakin tinggi. Biaya yang timbul karena penggantian terencana akan lebih ekonomis karena akan mengurangi waktu operasi yang hilang dan mengurangi dampak yang ditimbulkan terhadap komponen lain. Agar jumlah komponen yang rusak dapat dikurangi maka penggantian terencana dapat dijadwalkan pada interval waktu tertentu. Penentuan waktu penggantian optimal diharapkan dapat meminimalkan total biaya per satuan waktu. Suatu mesin diganti secara teratur dalam jangka waktu ke- T atau pada kegagalan ke- N setelah dilakukan instalasi, tergantung mana yang lebih dahulu

terjadi pertama kali. Mesin ini akan mengalami perbaikan minimal diantara penggantian secara berkala saat terjadi kegagalan, sehingga tingkat kegagalan suatu mesin tidak terganggu. Waktu yang digunakan untuk memperbaiki dan penggantian mesin diasumsikan sangat minimum atau dapat diabaikan. Kebijakan penggantian optimal yang berdasarkan dengan meminimalkan jangka panjang dari model biaya dinyatakan dalam persamaan berikut ini (Nakagawa and Kowada, 1983:180-182).

$$\begin{aligned}
 & T \Pr\{Y_n > T\} + \int_0^T t d \Pr\{Y_n \leq t\} \\
 &= \int_0^T \Pr\{Y_n > t\} dt \\
 &= \sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

untuk $j = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$

nilai ekspektasi dari waktu kegagalan sampai *replacement* komponen dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=0}^{n-1} j \Pr\{N(T) = j\} + n \Pr\{Y_n \leq T\} \\
 &= n - \sum_{j=0}^{n-1} (n - j) \frac{[W(T)]^j}{j!} e^{-W(T)}
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

Fungsi biaya penggantian komponen berdasarkan kerusakan ke- N dan waktu kerusakan ke- T dinyatakan dalam persamaan (2.33) berikut ini.

$$C(T; n) = \frac{c_f \left[n - \sum_{j=0}^{n-1} (n - j) \frac{[W(T)]^j}{j!} e^{-W(T)} \right] + c_p}{\sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt} \tag{2.33}$$

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

dengan c_f adalah *cost of failure* atau rata-rata biaya perbaikan karena kerusakan dan c_p adalah rata-rata biaya perbaikan minimal atau biaya *preventive maintenance*. Kebijakan penggantian yang optimal untuk setiap jenis *engine* atau 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 (2.34) berikut ini.

$$W(t) = \int_0^t w(t)dt = \left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta \quad (2.34)$$

2.9 Komponen *Heat Exchanger* (HE)

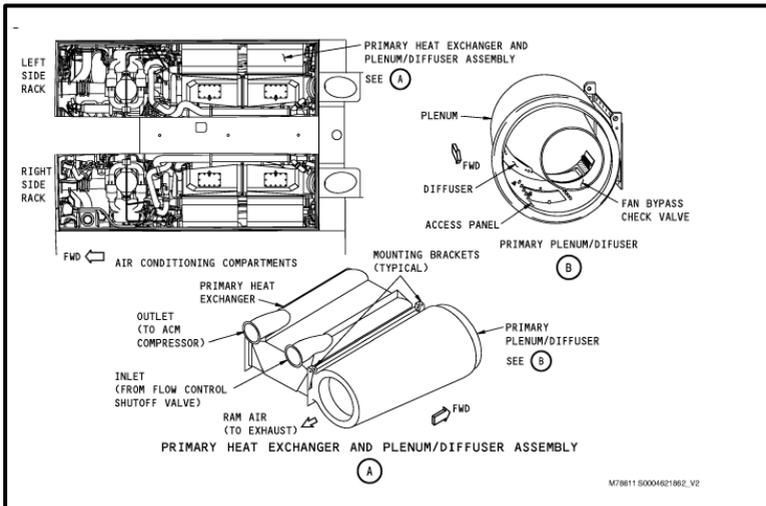
Pesawat B737-800 yang dimiliki oleh Garuda Indonesia sampai tahun 2015 berjumlah 47 armada pesawat terbang. Penelitian kali ini akan membahas mengenai komponen *Heat Exchanger* (HE) atau alat penukar panas yang terpasang di pesawat B737-800. Pada pesawat B737-800 terdapat 4 buah komponen *Heat Exchanger* (HE) yang terinstal di dalamnya 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*. Masing-masing *serial number* bekerja secara independen, tidak bergantung pada *serial number* yang lain (Aircraft Maintenance Manual, 2015).

Sistem pendingin yang umum menggunakan beberapa komponen dan sistem seperti.

1. *Air conditioning/bleed air controls panel*
2. *Flow control and shutoff valve*
3. *Heat Exchangers*
4. *Air cycle machine*
5. *Reheater*
6. *Condenser*
7. *Ram air system*
8. *Water extraction*

menjadi udara dengan temperatur hangat (*warm air*) sedangkan setelah melewati *secondary heat exchanger* akan menjadi udara dingin (*cold air*).

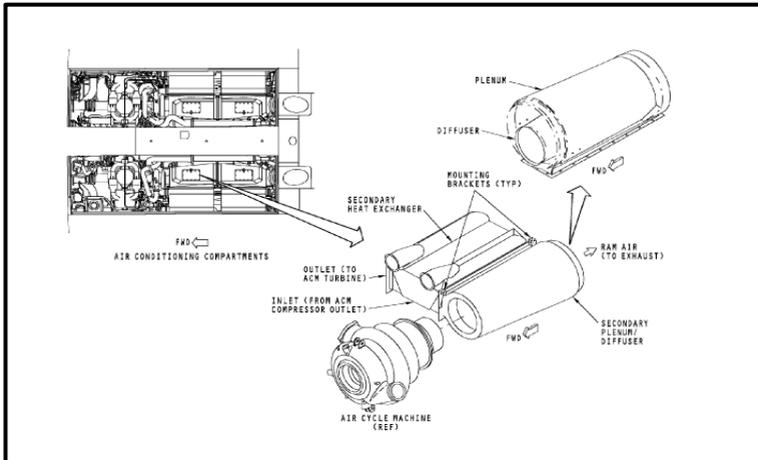
Primary Heat Exchanger (HX) berfungsi untuk menghilangkan panas dari *bleed air* menuju ke kompresor udara dibagian mesin siklus udara atau *air cycle machine* (ACM). *Primary plenum* atau *diffuser* memungkinkan ram aliran udara melalui *primary heat exchanger* dan keluar pada alat pembuangan uap. Lokasi dari *primary heat exchanger, plenum* atau *diffuser* pada bagian belakang kapal, pada bagian temple wadah penyejuk udara atau *conditioning*. *Physical Description* dari *primary heat exchanger* adalah *air-to-air*, jenis aliran silang *heat exchanger*. Dinding saluran yang terdiri dari pelat dan sirip yang meningkatkan wilayah permukaan. Berikut ini adalah gambaran dari komponen *Primary Heat Exchanger*.



Gambar 2.2 Description of Air Conditioning, Cooling, Primary Heat Exchanger and Plenum or Diffuser Assembly

Secondary Heat Exchanger menerima udara bertekanan dari mesin siklus udara. Sebagian berjalan melalui udara penukar panas, ram menghilangkan udara panas. Setelah udara bertekanan didinginkan melalui saluran *water extractor* dan kembali ke mesin siklus udara. Temperatur udara dingin keluaran dari

secondary heat exchanger diharapkan tidak kurang dari 35 derajat *Fahrenheit* (sekitar 2 derajat *Celcius*) agar tidak terjadi pembekuan. Sensor 35F akan memberikan sinyal ke pengontrol agar suhu udara yang akan disalurkan ke kabin pesawat berada pada kisaran 2 derajat *Celcius*. Berikut adalah diskripsi dari *Secondary Heat Exchanger*.



Gambar 2.3 *Description of Air Conditioning, Cooling, Secondary Heat Exchanger and Plenum or Diffuser Assembly*

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. Kegagalan yang terjadi pada komponen *Heat Exchanger* (HE) ini pasti membuat penumpang merasa tidak nyaman berada didalam pesawat.

2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu untuk 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 proses* adalah model yang sederhana dan biasa digunakan untuk menjelaskan waktu kegagalan pada komponen yang dapat diperbaiki atau *repairable*.

BAB III METODELOGI PENELITIAN

3.1 Variabel Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT. *Garuda Maintenance Facility (GMF) Aero Asia* divisi *Reliability and Service (TER-1)*. *Reliability and Service (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 dalam penelitian ini 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. Pengambilan data dilakukan oleh departemen *Aircraft Maintenance Planning* yang kemudian data tersebut digunakan untuk bahan evaluasi *performance* dari setiap komponen, serta digunakan sebagai informasi komponen apa saja yang menyebabkan pesawat mengalami *delay*. Struktur data yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan dalam Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Struktur Data

Kegagalan ke- i	<i>Serial Number (k)</i>			
	1	2	...	K
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 .

3.2 Langkah Analisis

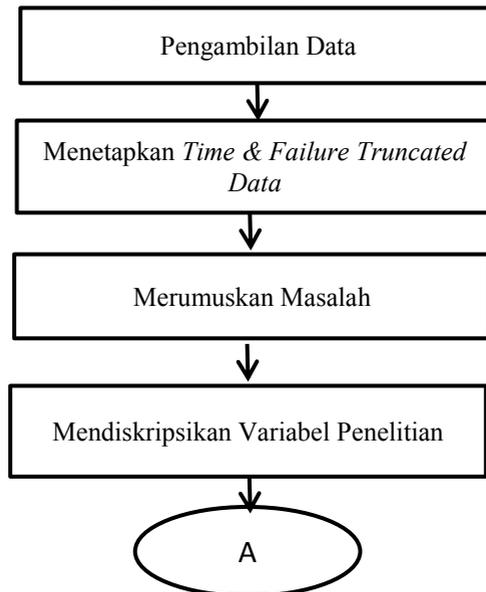
Langkah analisis yang dilakukan untuk mengembangkan model optimasi dan menentukan waktu penggantian komponen *Heat Exchanger* (HE) adalah sebagai berikut.

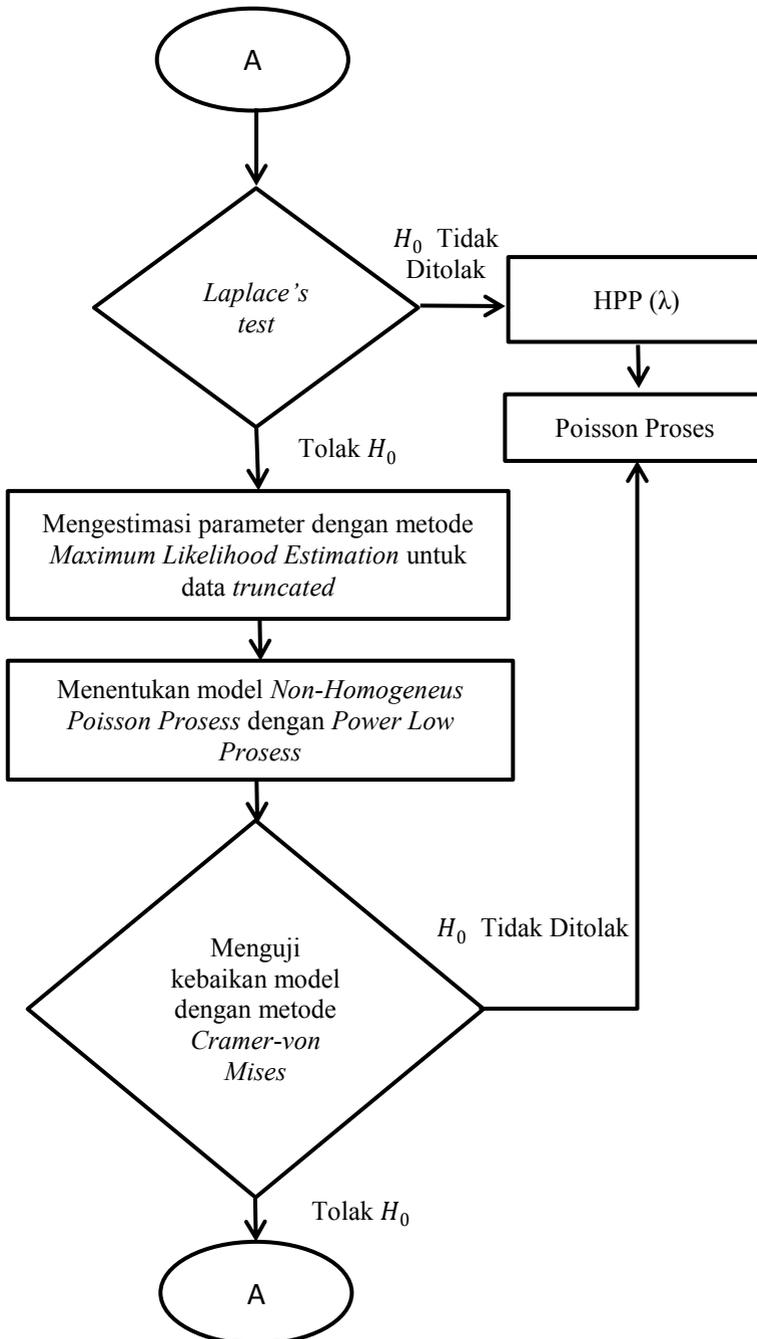
1. Mengumpulkan variabel usia komponen *Heat Exchanger* (HE) yang mengalami kerusakan minimal tiga kali.
2. Menetapkan waktu *truncated* untuk pengamatan yaitu sebesar 40000 *flight hours* untuk *time truncated data* dan untuk *failure truncated data* ditentukan sebanyak 3 kali kerusakan.
3. Mendeskripsikan jumlah kerusakan dan waktu kerusakan komponen *Heat Exchanger* (HE) di PT. *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia*.
4. Menguji adanya *trend* dalam waktu kegagalan komponen *Heat Exchanger* (HE) di PT. *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia*. Melakukan pendugaan dan pengujian menggunakan *Laplace's test* pada Persamaan (2.10) untuk *time truncated* dan (2.11) untuk *failure truncated*.
5. Berdasarkan poin 2, jika terdapat *trend* dalam *failure rate* maka waktu kegagalan komponen *Heat Exchanger* (HE) di PT. *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia* diduga mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Proses* (NHPP) yang dibentuk dari *Power Law Process* (PLP) dengan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) yang tidak konstan atau sebesar $w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1}$, sehingga dapat dilakukan estimasi parameter menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk model *truncated* dengan menggunakan Persamaan (2.17) dan (2.18) untuk *failure truncated data* serta Persamaan (2.23) dan (2.24) untuk *time truncated data*.
6. Menguji kebaikan model *Power Law Proses* (PLP) dengan metode *Cramer-von Mises test*.
 - a. Melakukan pengujian dengan *Cramer-von Mises test* untuk mengetahui apakah waktu kegagalan komponen *Heat Exchanger* (HE) mengikuti *Non-Homogeneous*

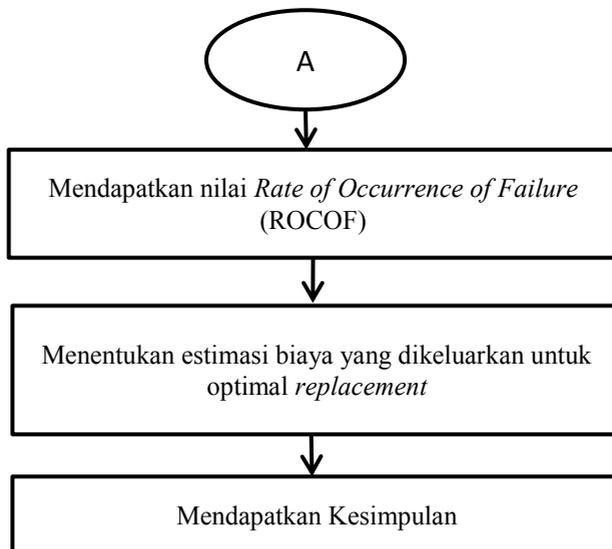
Poisson Proses (NHPP) dengan melihat apakah model yang didapat dari point 4 sesuai atau tidak dengan menggunakan Persamaan (2.30).

- b. Mendapatkan grafik dari nilai *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) untuk komponen *Heat Exchanger* (HE)
7. Mendapatkan model optimasi untuk menentukan waktu penggantian yang meminimumkan biaya kerusakan komponen *Heat Exchanger* (HE) di PT. *Garuda Maintenance Facility* (GMF) *Aero Asia*.
 - a. Mendapatkan fungsi $W(t)$ atau laju kerusakan terhadap waktu dengan menggunakan Persamaan (2.34)
 - b. Memilih sepasang T dan N
 - c. Menghitung $c(T; N)$ menggunakan Persamaan (2.33) dengan menggunakan prosedur iteratif menggunakan perhitungan integral trapesium hingga didapatkan nilai yang minimum dari $c(T; N)$
 8. Mendapatkan kesimpulan dari hasil analisis yang telah didapatkan.

Proses analisis dari penelitian, dapat disusun ke dalam diagram alir penelitian yang disajikan pada Gambar 3.1 berikut.







Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Komponen *Heat Exchanger* (HE) dengan *part number* 182820-3 ini memiliki beberapa *serial number* yang berbeda-beda, namun komponen ini memiliki fungsi yang sama yaitu untuk mentransfer energi panas, atau dapat pula berfungsi sebagai alat pembuang panas. Komponen *Heat Exchanger* (HE) merupakan komponen *repairable*, sehingga ketika terjadi sebuah kerusakan pada komponen *Heat Exchanger* (HE) maka akan dilakukan beberapa proses perbaikan. Hal ini akan membuat kondisi dari komponen *Heat Exchanger* (HE) kembali seperti semula seperti pada saat sebelum mengalami kerusakan atau bisa disebut juga dengan kondisi *as good as new*.

Perawatan yang dilakukan bertujuan agar komponen *Heat Exchanger* (HE) dapat berfungsi dengan baik agar pesawat layak digunakan pada saat terbang dan memberikan kenyamanan pada penumpang. Dalam kasus ini perbaikan tidak dapat dilakukan secara terus menerus, harus ada sebuah penggantian komponen pada waktu tertentu, karena semakin sering diperbaiki akan ada indikasi bahwa biaya yang akan dikeluarkan akan semakin besar. Penelitian kali ini akan menjelaskan bagaimana karakteristik kerusakan dari komponen *Heat Exchanger* (HE) dan kapan komponen *Heat Exchanger* (HE) harus dilakukan tindakan perbaikan dengan menggunakan metode *Power Law Proses* (PLP).

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*. Penetapan dari *truncated* data ini harus sesuai dengan karakteristik dari data induknya, sehingga dari data yang terpotong ini dapat dihasilkan informasi yang maksimal untuk menentukan waktu perbaikan dari komponen *Heat Exchanger*. Berikut akan dijelaskan karakteristik dari data *lifetime* untuk komponen *Heat Exchanger* (HE) pada masing-masing *serial number* yang didapatkan.

4.1 Karakteristik Data *Lifetime* Komponen *Heat Exchanger* (HE) Pesawat B737-800

Pesawat Boeing 737-800 memiliki empat buah komponen *Heat Exchanger* yang terinstal didalamnya, dengan kondisi empat komponen tersebut bekerja secara mandiri. Pesawat Boeing 737-800 yang dimiliki oleh maskapai penerbangan Garuda Indonesia berjumlah 47 pesawat terbang, sehingga kurang lebih ada 190 *serial number* komponen *Heat Exchanger* (HE) yang beroperasi didalamnya.

4.1.1 Karakteristik *Failure Truncated Data Lifetime* Komponen *Heat Exchanger* (HE) Pesawat B737-800

Failure truncated data yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak tiga kali kerusakan, hal ini berarti pengamatan akan dihentikan jika komponen sudah mengalami kerusakan sebanyak tiga kali. Waktu atau usia kerusakan yang didapatkan selama mengalami kerusakan sebanyak tiga kali merupakan variabel random, sehingga untuk masing-masing komponen memiliki usia yang berbeda sampai pada saat kerusakan ketiga. Hasil perhitungan statistika diskriptif dari komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk masing-masing *serial number* berdasarkan Lampiran 1A-1D yang dirangkum dalam Tabel 4.1 sebagai berikut.

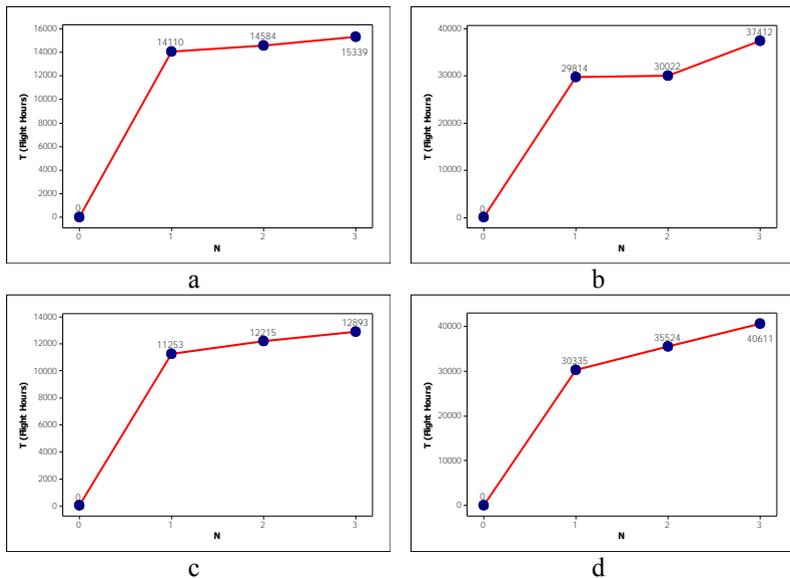
Tabel 4.1 Statistika Deskriptif *Lifetime* (*Flight Hours*) Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk Keempat *Serial Number*

Kerusakan ke-N	<i>Serial Number</i>			
	15553	7016	17502	49-4223
1	14110	29814	11253	30335
2	14584	30022	12215	35524
3	15339	37412	12893	40611

Pada Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa *serial number* komponen *Heat Exchanger* (HE) waktu hidup komponen yang paling tinggi yaitu pada *serial number* 49-4223, umur komponen *serial number* 49-4223 memiliki waktu hidup yang paling lama yaitu sebesar 40611 *flight hours* dan mengalami kerusakan yang pertama pada saat pesawat telah beroperasi selama 30335 *flight*

hours. Komponen *Heat Exchanger* (HE) yang mengalami kerusakan paling cepat adalah *serial number* 17502 dengan waktu kerusakan pertama sebesar 11253 *flight hours* dan waktu kerusakan terakhir yaitu sebesar 12893 *flight hours*.

Berdasarkan data yang terlampir pada Lampiran 1A-1D berikut disajikan plot antara jumlah kerusakan (N) dengan kumulatif waktu kerusakan yang dialami komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk keempat *serial number*.



Gambar 4.1 Perbandingan Jumlah Kerusakan (N) dengan *Cumulative Time* untuk *Serial Number*; (a) 15553; (b) 7016; (c) 17502; dan (d) 49-4223.

Pengamatan dengan *failure truncated data* yang ditentukan sebanyak tiga kali kerusakan menghasilkan umur kerusakan yang berbeda-beda pada setiap *serial number*. Pada kasus ini komponen masih digunakan setelah kerusakan ketiga karena masih berfungsi dengan baik. Gambar 4.1 poin a menunjukkan komponen *Heat Exchanger* (HE) *serial number* 15553 waktu pertama kali komponen mengalami kerusakan adalah ketika komponen sudah beroperasi selama 14110 *flight hours*. Untuk

jarak antar kerusakan pertama dan kerusakan kedua yaitu sebesar 474 *flight hours*, jarak kerusakan kedua dengan kerusakan ketiga sebesar 755 *flight hours*. Waktu kerusakan yang dialami komponen *Heat Exchanger* (HE) *serial number* 15553 menunjukkan bahwa semakin sering komponen tersebut mengalami kerusakan maka waktu antar kerusakan selanjutnya akan semakin kecil, hal ini menandakan bahwa komponen semakin cepat rusak seiring dengan bertambahnya waktu.

4.1.2 Karakteristik *Time Truncated Data Lifetime* Komponen *Heat Exchanger* (HE) Pesawat B737-800

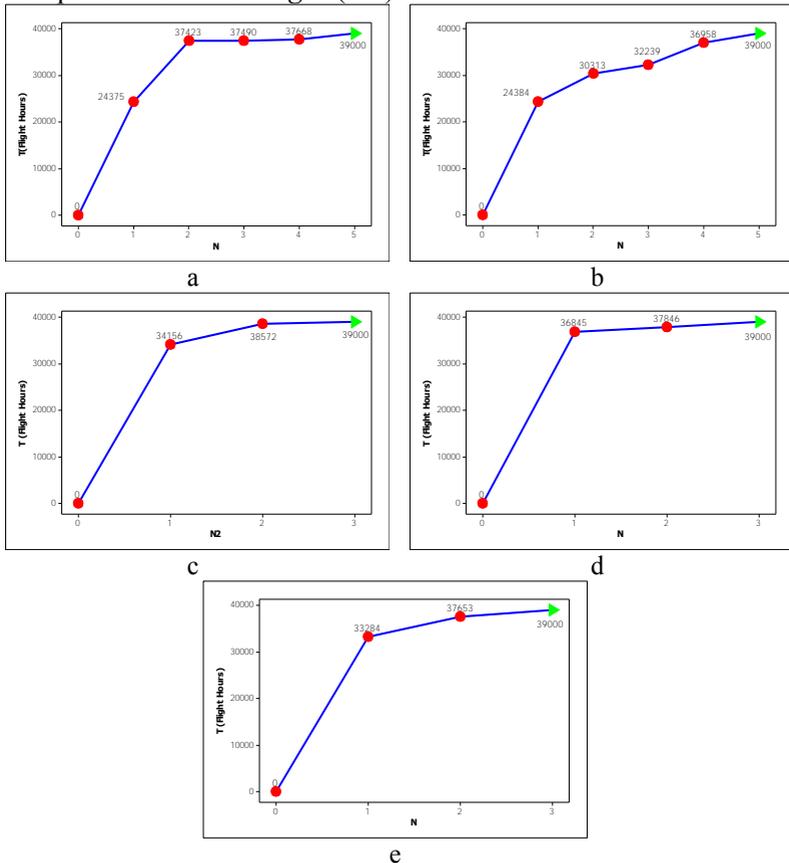
Penelitian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan *time truncated data* dengan T yang ditetapkan adalah sebesar 39000 *flight hours*, hal ini berarti pengamatan akan berhenti pada waktu komponen telah beroperasi selama 39000 *flight hours*. Selama interval waktu yang telah ditentukan maka akan didapatkan jumlah kerusakan (N) yang berbeda-beda pada masing-masing *serial number*, karena jumlah kerusakan yang didapat merupakan variabel random. Hasil perhitungan statistika deskriptif dari komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk masing-masing *serial number* berdasarkan Lampiran 2A-2E yang dirangkum dalam Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Statistika Deskriptif *Lifetime (Flight Hours)* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk Kelima *Serial Number*

Kerusakan ke- N	<i>Serial Number</i>				
	7441	7363	5658	48-3059	5800
1	24375	24384	34156	36845	33284
2	37423	30313	38572	37846	37653
3	37490	32239			
4	37668	36958			

Pada komponen *Heat Exchanger* (HE) dengan *serial number* 7441 dan 7363 mengalami kerusakan sebanyak 4 kali pada pengamatan yang terpotong pada usia ke 39000 *flight hours*, sedangkan *serial number* 5658, 48-3059, dan 5800 mengalami kerusakan sebanyak 2 kali selama interval waktu pengamatan 0 *flight hours* sampai dengan 39000 *flight hours*. Kelima *serial*

number tersebut masih digunakan setelah beroperasi selama 39000 *flight hours*, namun dipasang pada pesawat dengan nomor registrasi yang berbeda. *Serial number* yang memiliki rata-rata hidup paling lama yaitu *serial number* 48-3059 yaitu sebesar 37346 *flight hours*, dengan kerusakan pertama pada saat pesawat sudah beroperasi selama 36845 *flight hours*. Berdasarkan data pada Lampiran 2A-2E berikut disajikan plot antara jumlah kerusakan (N) dengan kumulatif waktu kerusakan yang dialami komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk kelima *serial number*.



Gambar 4.2 Perbandingan Jumlah Kerusakan (N) dengan *Cumulative Time* untuk *Serial Number*; (a) 7441; (b) 7363; (c) 5658; (d) 48-3059; dan (e) 5800.

Pada Gambar 4.2 untuk komponen *Heat Excanger* (HE) *serial number* 7441 terdapat 4 kali kerusakan yang pernah dialami selama beroperasi. Waktu pertama kali komponen mengalami kerusakan adalah ketika komponen sudah beroperasi selama 24375 *flight hours*. Untuk jarak antar kerusakan pertama dan kerusakan kedua yaitu sebesar 13048 *flight hours*. Jarak kerusakan kedua dengan kerusakan ketiga hanya sebesar 67 *flight hours* dan jarak antara kerusakan ketiga sampai kerusakan terakhir adalah sebesar 178 *flight hours*. Waktu kerusakan yang dialami komponen *Heat Excanger* (HE) *serial number* 7441 menunjukkan bahwa semakin sering komponen tersebut mengalami kerusakan maka waktu antar kerusakan selanjutnya akan semakin kecil, hal ini menandakan bahwa komponen semakin cepat rusak seiring dengan bertambahnya waktu.

4.2 Pengujian *Trend* dalam *Failure Rate* pada Data *Lifetime* Komponen *Heat Exchanger* (HE)

Pengujian *trend* dari *failure rate* merupakan langkah awal yang dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat *trend* pada laju kegagalan dari komponen *Heat Excanger* (HE). *Laplace's Test* merupakan metode yang dapat digunakan untuk menguji adanya *trend*, dengan membandingkan statistik uji (L) untuk *time truncated* data atau *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 Process*. Nilai statistik uji dihitung dengan rumus yang dinyatakan pada Persamaan (2.11) untuk *failure truncated data* dan Persamaan (2.10) untuk *time truncated*.

4.2.1 Pengujian *Trend* dalam *Failure Rate* untuk *Failure Truncated Data*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai pengujian dengan menggunakan data *failure truncated*. Hasil perhitungan nilai

statistik uji data *lifetime* masing-masing *serial number* komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk perhitungan *failure truncated data* menggunakan Persamaan (2.11) berdasarkan Lampiran 4A-4E dirangkum dalam Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.3 Hasil *Laplace's Test* untuk *Failure Truncated Data*

<i>Serial Number</i>	<i>L</i>	Keputusan
15553	2,132	H ₀ ditolak
7016	1,468	H ₀ tidak ditolak
17502	2,009	H ₀ ditolak
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). Untuk *serial number* 7016 dan *serial number* 49-4223 mengikuti *Homogeneous Poisson Process* (HPP) yang ditandai dengan nilai statistik uji yang lebih besar dari 1,96. *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) mempunyai arti bahwa data *lifetime* dari komponen *Heat Exchanger* (HE) memiliki fungsi laju kerusakan yang tidak *constant*.

Serial number yang dapat dianalisis lebih lanjut adalah yang mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) yaitu komponen *Heat Exchanger* (HE) dengan *serial number* 15553 dan 17502.

4.2.2 Pengujian *Trend* dalam *Failure Rate* untuk *Time Truncated Data*

Pada Tabel 4.4 untuk *serial number* 7441, 7363, 5658, 48-3059, dan 5800 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 maka 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*. Hasil perhitungan nilai statistik uji data *lifetime* berdasarkan Persamaan (2.10) untuk masing-masing *serial number* pada *time truncated data* dalam Lampiran 5A-5F yang dirangkum pada Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.4 Hasil *Laplace's Test* untuk *Time Truncated Data*

<i>Serial Number</i>	<i>L</i>	Keputusan
7441	2,618	H ₀ ditolak
7363	2,038	H ₀ ditolak
5658	2,118	H ₀ ditolak
48-3059	2,241	H ₀ ditolak
5800	2,005	H ₀ ditolak

4.3 Estimasi Parameter Data *Lifetime* Komponen *Heat Exchanger* (HE)

Estimasi parameter untuk data *lifetime* komponen *Heat Exchanger* (HE) pada masing-masing *serial number* dilakukan dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* untuk *failure truncated data* dan *time truncated data*. Perhitungan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk model *truncated* dengan menggunakan persamaan (2.17) dan (2.18) untuk *failure truncated data* serta persamaan (2.23) dan (2.24) untuk *time truncated data*.

4.3.1 Estimasi Parameter Data *Lifetime* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Failure Truncated Data*

Berikut ini adalah hasil perhitungan estimasi parameter untuk data *lifetime* masing-masing *serial number* pada pengamatan *failure truncated data*, untuk parameter β dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.18) dan untuk parameter λ dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.17) yang dirangkum berdasarkan Lampiran 6A-6B dalam Tabel 4.5 sebagai berikut.

Tabel 4.5 Estimasi Parameter *Failure Truncated Data*

<i>Serial Number</i>	Estimasi Parameter	
	β	λ
15553	22,39	14604,53
17502	15,78	12026,11

Tabel 4.5 menunjukkan hasil perhitungan estimasi parameter β dan λ untuk *failure truncated data* pada masing-masing *serial number*. Untuk *serial number* 15553 didapatkan penaksiran parameter β sebesar 22,39 dan λ sebesar 14604,53. *Serial number* 17502 memiliki taksiran parameter β sebesar 15,78 dan λ sebesar 12026,11.

4.3.2 Estimasi Parameter Data *Lifetime* Komponen *Heat Exchanger (HE)* untuk *Time Truncated Data*

Berikut ini adalah hasil perhitungan estimasi parameter untuk data *lifetime* masing-masing *serial number* pada pengamatan *time truncated data*, untuk parameter β dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.23) dan untuk parameter λ dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.24). Hasil dari perhitungan dirangkum berdasarkan Lampiran 7A-7F dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Estimasi Parameter *Time Truncated*

<i>Serial Number</i>	Estimasi Parameter	
	β	λ
7441	6,83	31837,24
7363	4,14	27906,13
5658	13,92	35303,61
48-3059	23,02	36720,76
5800	10,33	34101,62

Tabel 4.6 menunjukkan hasil perhitungan estimasi parameter β dan λ untuk *time truncated data* pada masing-masing *serial number*. Parameter β dan λ yang didapatkan ini akan digunakan untuk membentuk *Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)* atau fungsi nilai laju kerusakan terhadap waktu untuk

Power Law Proses (PLP), dan penentuan model *replacement* untuk memilih waktu optimum yang paling tepat dalam meminimumkan biaya. Langkah selanjutnya adalah melihat *goodness of fits test*, pengujian ini dilakukan untuk melihat apakah model sesuai dengan metode *Power Law Proses* (PLP) atau tidak.

4.4 *Goodness of Fit Tests*

Untuk melihat apakah model sesuai dengan metode *Power Law Proses* (PLP), maka akan dilakukan pengujian dengan menggunakan *Cramer-von Mises test*. *Cramer-von Mises test* digunakan untuk menguji apakah waktu kegagalan dari sistem *repairable* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Proses* (NHPP) dengan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) atau laju kerusakan yang tidak konstan. Hipotesis *null* yang digunakan adalah data *lifetime* masing-masing *serial number* mengikuti *Homogeneous Poisson Proses* dengan konstan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) sebesar $\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1}$.

4.4.1 *Goodness of Fit Tests untuk Failure Truncated Data*

Sebelum mendapatkan nilai dari statistik uji C_M^2 , langkah awal yang dilakukan adalah mendapatkan nilai dari *unbiased conditional* MLE dari β . Jika menggunakan *failure truncated data* maka nilai dari $M_k = N_k - 1$, berikut adalah perhitungan *conditional* MLE dari β .

$$\tilde{\beta} = \frac{M}{\sum_{i=1}^M \ln \frac{Y}{\bar{Y}_i}} = \frac{N-1}{\sum_{i=1}^{N-1} \ln \frac{Y_N}{Y_i}}$$

sehingga perhitungan nilai *unbiased conditional* MLE dari β dengan menggunakan Persamaan (2.26) seperti dibawah ini.

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

Berikut adalah nilai dari *unbiased conditional* MLE dari β yang disajikan dalam Tabel 4.7 berdasarkan perhitungan pada Lampiran 8A-8B.

Tabel 4.7 *Conditional MLE dan Unbiased Conditional MLE dari β*

<i>Serial Number</i>	$\tilde{\beta}$	$\bar{\beta}$
15553	14,92	7,46
17502	10,52	5,26

Setelah mendapatkan nilai dari *unbiased conditional* MLE dari β selanjutnya akan dihitung nilai dari statistik uji C_M^2 . Untuk *failure truncated data* maka C_M^2 dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

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

Hasil perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises* berdasarkan Lampiran 8A-8B yang dirangkum dalam Tabel 4.8 sebagai berikut.

Tabel 4.8 *Statistik Uji untuk Metode Cramer-von Mises pada Failure Truncated Data*

<i>Serial Number</i>	C_M^2	<i>Critical Value</i>	<i>Keputusan</i>
15553	0,127	0,175	H_0 ditolak
17502	0,0987	0,175	H_0 ditolak

Berdasarkan Tabel 4.8 diatas menunjukkan nilai statistik uji dengan menggunakan *Cramer-von Mises test* untuk masing-masing *serial number* dari komponen *Heat Exchanger*. Nilai kritis untuk *goodness of fit test Cramer Von-Mises* pada level signifikansi sebesar 5 persen dan $m = n - 1$ didapatkan nilai sebesar 0,175. Nilai statistik uji yang didapatkan pada *serial number* 15553 dan 17502 lebih kecil dari *critical value*, maka keputusan yang didapat adalah H_0 ditolak. Hal tersebut menunjukkan bahwa *Non Homogeneous Poisson Proses* dengan

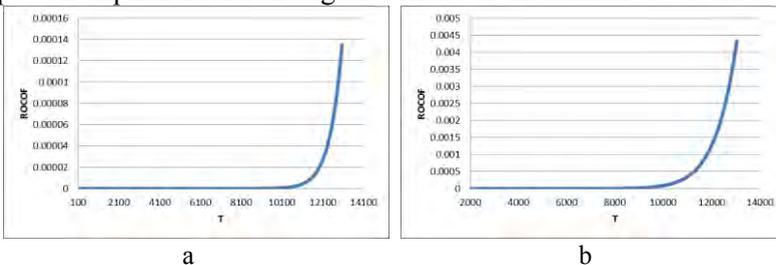
Power Law Proses (PLP) merupakan model yang sesuai untuk data kerusakan yang terjadi pada *serial number* 15553 dan 17502.

Komponen *Heat Exchanger* (HE) *serial number* 17502 mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) dengan laju kerusakan komponen adalah *non-constant*. Hal ini dapat dibuktikan dari Tabel 4.9 yang menunjukkan bahwa laju kerusakan komponen dari waktu ke waktu terus meningkat. Adanya *trend* tersebut menunjukkan bahwa semakin besar laju kerusakan yang dialami *serial number* 17502 maka semakin besar pula kemungkinan komponen tersebut akan gagal beroperasi. Berikut adalah *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) yang sesuai dengan *Power Law Proses* (PLP) berdasarkan Persamaan (2.9) diringkas dalam Tabel 4.9 berdasarkan Lampiran 10A-10B.

Tabel 4.9 *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) *Serial Number* 15553 dan 17502

<i>Time (Flight Hours)</i>	<i>Serial Number</i>	
	15553	17502
100	7.71234E-50	2.32355E-34
1000	1.89314E-28	1.41203E-19
3000	3.03952E-18	1.59756E-12
5000	1.69102E-13	3.0423E-09
7000	2.25854E-10	4.40062E-07
9000	4.88009E-08	1.80747E-05
10000	4.64708E-07	8.58097E-05

Secara visual *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) untuk *serial number* 17502 hasil perhitungan yang dilampirkan pada Lampiran 10A-10B digambarkan dalam Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) untuk *Serial Number* (a) 15553; (b) 17502.

Gambar 4.3 menunjukkan secara visual dari laju kerusakan untuk *serial number* 17502 dapat dilihat bahwa nilai laju kerusakan meningkat seiring dengan bertambahnya waktu pemakaian pesawat terbang. Peningkatan laju kerusakan yang dialami komponen *Heat Exchanger* menunjukkan bahwa kondisi atau kehandalan dari komponen tersebut terus melemah seiring bertambahnya waktu. Grafik laju kerusakan tersebut menunjukkan adanya *trend* naik atau tidak *constant*, sehingga hal ini menunjukkan bahwa komponen *Heat Exchanger* (HE) *serial number* 15553 dan 17502 mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP).

4.4.2 Goodness of Fit Tests untuk Time Truncated Data

Jika menggunakan *time truncated data* maka nilai dari $M_k = N_k$, berikut adalah perhitungan *conditional* MLE dari β untuk *time truncated data*.

$$\tilde{\beta} = \frac{M}{\sum_{i=1}^M \ln \frac{Y}{Y_i}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln \frac{Y}{Y_i}}$$

sehingga perhitungan nilai *unbiased conditional* MLE dari β dengan menggunakan Persamaan (2.26) seperti dibawah ini.

$$\bar{\beta} = \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} = \frac{N-1}{N} \tilde{\beta}$$

untuk *failure truncated data* maka C_M^2 dihitung dengan mengganti nilai M dengan nilai dari N seperti pada persamaan sebagai berikut ini.

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

berikut adalah nilai dari *unbiased conditional* MLE dan *Conditional* MLE dari β yang disajikan dalam Tabel 4.10 berdasarkan pada Lampiran 9A-9E.

Tabel 4.10 *Conditional MLE dan Unbiased Conditional MLE dari β untuk Time Truncated Data*

<i>Serial Number</i>	$\tilde{\beta}$	$\bar{\beta}$
7441	6,83	5,1237
7363	4,14	3,106
5658	13,92	6,96
48-3059	23,02	11,51
5800	10,33	5,164

Nilai kritis untuk *goodness of fit test Cramer Von-Mises* pada level signifikansi sebesar 5 persen dan $m = n$ bernilai 4 didapatkan hasil sebesar 0,191, jika m bernilai 2 maka nilai yang didapatkan sebesar 0,175. Hasil perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises* berdasarkan Lampiran 9A-9E yang dirangkum dalam Tabel 4.6 sebagai berikut.

Tabel 4.11 *Statistik Uji untuk Metode Cramer-von Mises pada Time Truncated Data*

<i>Serial Number</i>	C_M^2	<i>Critical Value</i>	Keputusan
7441	0,2490	0,191	H_0 tidak ditolak
7363	0,0451	0,191	H_0 ditolak
5658	0,0943	0,175	H_0 ditolak
48-3059	0,1163	0,175	H_0 ditolak
5800	0,0852	0,175	H_0 ditolak

Nilai statistik uji dengan menggunakan *Cramer-von Mises test* untuk *serial number* 7363, 5658, 48-3059, dan 5800 masing-masing bernilai 0,0451; 0,0943; 0,1163; dan 0,0852, keempat nilai tersebut lebih kecil dari *critical value*. Keputusan yang didapat adalah H_0 ditolak, hal tersebut menunjukkan bahwa kerusakan yang terjadi pada komponen *Heat Exchanger* (HE) *serial number* 7363, 5658, 48-3059, dan 5800 sesuai dengan model *Non Homogeneous Poisson Proses* dengan *Power Law Proses* (PLP). Berikut adalah *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) dari keempat *serial number* dengan menggunakan

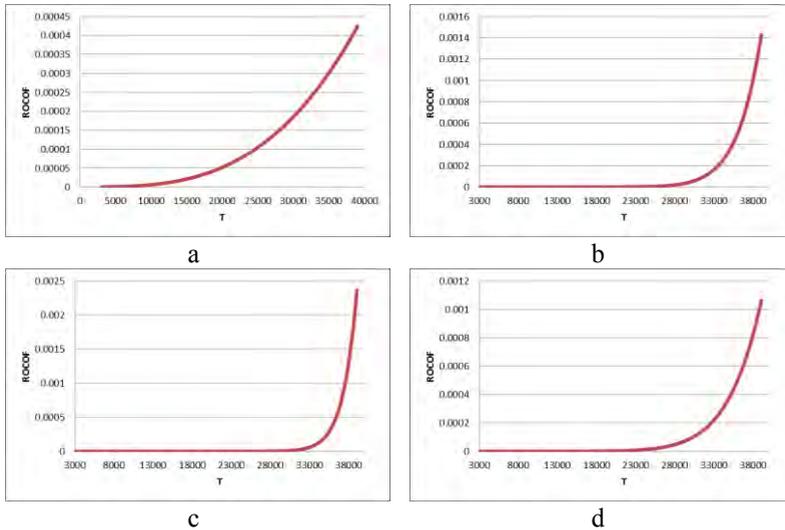
Persamaan (2.9) yang diringkas dalam Tabel 4.12 berdasarkan Lampiran 10C-10F.

Tabel 4.12 *Rate of Occurrence of Failure (ROCOF) Serial Number 7363, 5658, 48-3059, dan 5800*

<i>Time (Flight Hours)</i>	<i>Serial Number</i>			
	7363	5658	48-3059	5800
3000	1.3E-07	5.78634E-18	6.98311E-28	4.28623E-14
5000	6.7E-07	4.25294E-15	5.35992E-23	5.03413E-12
10000	5.9E-06	3.29608E-11	2.2795E-16	3.23992E-09
15000	2.1E-05	6.21007E-09	1.71937E-12	1.42386E-07
20000	5.2E-05	2.55449E-07	9.69437E-10	2.08518E-06
25000	0.00011	4.56438E-06	1.31971E-07	1.6723E-05
30000	0.00019	4.81287E-05	7.31221E-06	9.1638E-05
35000	0.0003	0.00035266	0.00021788	0.000386091

Untuk membuktikan bahwa komponen *Heat Exchanger* (HE) *serial number* 7363, 5658, 48-3059, dan 5800 mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) maka akan dilihat apakah laju kerusakan adalah *non-constant*. Tabel 4.12 menunjukkan nilai laju kerusakan dari waktu ke waktu terus meningkat untuk masing-masing *serial number*. Adanya *trend* tersebut menunjukkan bahwa semakin besar laju kerusakan yang dialami komponen maka semakin besar pula kemungkinan komponen tersebut akan gagal beroperasi.

Gambar 4.4 menunjukkan laju kerusakan untuk masing-masing *serial number* meningkat hingga waktu ke- t yaitu 39000 *flight hours*. Kondisi peningkatan laju kerusakan yang dialami komponen *Heat Exchanger* dapat dilihat secara visual bahwa dari waktu ke waktu menunjukkan bahwa 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. Hal ini menunjukkan bahwa komponen *Heat Exchanger* (HE) *serial number* 7363, 5658, 48-3059, dan 5800 mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP). Secara visual laju kerusakan berdasarkan Tabel 4.12 diatas dapat dilihat dalam grafik yang disajikan dalam Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Rate of Occurrence of Failure (ROCOF) untuk Serial Number; (a) 7363; (b) 5658; (c) 48-3059; (d) 5800.

4.5 Replacement Model

Untuk *preventive maintenance* hal yang paling diperhatikan adalah biaya yang dikeluarkan akibat proses *maintenance* tersebut. Begitu pula dengan *minimal repair* yang akan dilakukan pasti melihat pada biaya yang paling minimum. Pada bab ini akan dibahas analisis mengenai waktu yang tepat untuk *preventive maintenance* dengan meminimalkan biaya pada komponen *Heat Exchanger* (HE).

4.5.1 Nilai c_f dan c_p

Terdapat dua biaya yang harus diketahui agar dapat menghitung model *replacement*. Biaya tersebut adalah c_p atau rata-rata biaya perbaikan minimal atau biaya penggantian secara terencana (*preventive maintenance*) dan c_f yaitu rata-rata biaya penggantian yang terjadi jika komponen yang mengalami kerusakan (*Cost of Failure*). Berikut disajikan nilai *cost of preventive* berdasarkan informasi yang diperoleh dari PT. GMF Aero Asia.

Tabel 4.13 Nilai c_p (*Cost of Preventive*)

c_p (<i>Cost of Preventive</i>)		
HE <i>shop visit</i>		USD 233,2 / <i>Component</i>
<i>Man Hours</i>	USD 843/ Sisi	USD 421,5 / <i>Component</i>
<i>Material</i>	USD 500 / Sisi	USD 250 / <i>Component</i>
c_p		USD 904,7

Biaya penggantian terencana yang dibutuhkan untuk proses *repair* meliputi biaya *shop visit* yaitu sebesar 233,3 per satu komponen *Heat Exchanger* ditambah dengan *man hours* (biaya pekerja) sebesar \$843 per sisi yaitu RH dan LH (sisi kanan dan kiri pesawat terbang), dimana per sisi pesawat terdapat dua komponen *Heat Exchanger* yang terpasang didalamnya, sehingga untuk mengganti satu komponen dibutuhkan biaya sebesar \$421,5. Untuk biaya material yang dibutuhkan untuk mengganti bagian-bagian kecil dari komponen *Heat Exchanger* yaitu sebesar \$500 untuk per sisi pesawat, sehingga per satu komponen *Heat Exchanger* membutuhkan biaya material sebesar \$250. Jika komponen *Heat Exchanger* mengalami proses perbaikan terencana maka total biaya minimal yang akan dikeluarkan adalah sebesar \$904,7 per satu kali kerusakan yang dialami komponen *Heat Exchanger*. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari PT. GMF Aero Asia nilai biaya yang dikeluarkan pada saat komponen *Heat Exchanger* mengalami kerusakan (*Cost of Failure*) disajikan dalam Tabel 4.14 berikut.

Tabel 4.14 Nilai c_f (*Cost of Failure*)

HE Replacement		
HE <i>shop visit</i>		USD 233,2 / <i>Component</i>
<i>Man Hours</i>	USD 843/ Sisi	USD 421,5 / <i>Component</i>
<i>Material</i>	USD 500 / Sisi	USD 250 / <i>Component</i>
<i>Delay /Hours</i>		USD 6500 / <i>Hours</i>
Biaya konsekuensi dari <i>delay</i>		USD 171
c_f		USD 7575,7

Biaya yang dibutuhkan jika komponen *Heat Exchanger* (HE) dilakukan perbaikan akibat dari kerusakan yang mendadak dari komponen maka biaya yang dibutuhkan meliputi biaya *preventive maintenance* ditambah dengan biaya *delay* dari sebuah

penerbangan yang diakibatkan karena kerusakan mendadak dari komponen yaitu sebesar \$6500 per satu jam *delay* ditambah dengan biaya-biaya konsekuensi lainnya yaitu sebesar \$171. Total biaya yang dibutuhkan jika terjadi kerusakan yang mendadak pada komponen *Heat Exchanger* adalah sebesar \$7575,7. Nilai c_f dan c_p ini akan digunakan untuk menghitung biaya penggantian komponen *Heat Exchanger* menggunakan persamaan berikut.

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

4.5.2 Perhitungan Estimasi Biaya Penggantian Komponen *Heat Exchanger* untuk *Serial Number* 15553 dan 17502

Untuk mendapatkan nilai minimum dari $C(T; n)$ maka terlebih dahulu akan dicari nilai dari laju kerusakan terhadap waktu dengan mensubstitusikan nilai parameter β dan λ kedalam persamaan. Langkah selanjutnya adalah memilih sepasang T dan N yang akan dihitung dengan mensubstitusikan nilai c_f dan c_p kedalam persamaan yang telah dijabarkan.

Untuk mendapatkan nilai fungsi biaya yang minimum dari $C(T; n)$ maka digunakan perhitungan dengan prosedur iteratif menggunakan perhitungan integral trapesium yang ditunjukkan pada Lampiran 11A dengan menggunakan Persamaan (2.33). Berikut adalah estimasi biaya yang didapatkan pada pengamatan dengan menggunakan *failure truncated* yang ditentukan sebanyak tiga kali kerusakan untuk *serial number* 15553 dan 17502. Hasil perhitungan dari persamaan $C(T; n)$ untuk *serial number* 15553 menunjukkan nilai masing-masing biaya yang dihasilkan pada kerusakan pertama sampai kerusakan keempat pada waktu ke- T mengacu pada Lampiran 11B yang ringkas dalam Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen *Heat Exchanger Serial Number 15553*

<i>Time (Flight Hours)</i>	Kerusakan ke-N			
	1	2	3	4
1000	0.9048	0.9048	0.9048	0.9048
3000	0.3016	0.3016	0.3016	0.3016
5000	0.181	0.181	0.181	0.181
7000	0.1293	0.1293	0.1293	0.1293
9000	0.1005	0.1005	0.1005	0.1005
11000	0.0835	0.0835	0.0835	0.0835
11500	0,0818*	0,0818	0,0818	0,0818
13000	0.1114	0.1126	0.1126	0.1126
15000	0.5102	0.771	0.9013	0.9543

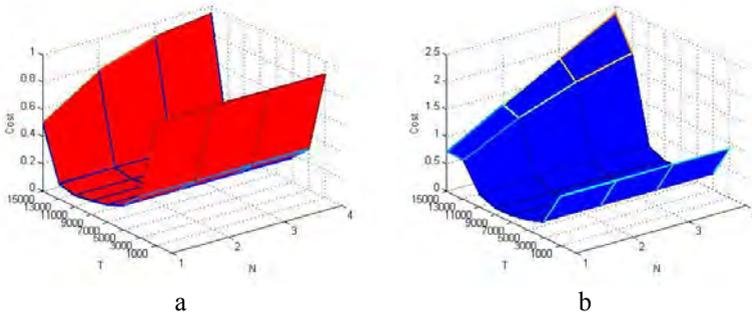
Dari Tabel 4.15 dapat diketahui bahwa biaya yang paling minimum pada komponen *Heat Exchanger serial number 15553* adalah pada kerusakan pertama. Minimum biaya tersebut terjadi pada waktu pesawat sudah beroperasi selama 11500 *flight hours*, biaya tersebut sebesar \$0,0818 per *flight hours*. Untuk perbaikan mulai dari proses pengecekan komponen, *cleaning*, dan *repair* sebaiknya dilakukan saat jam terbang pesawat sudah mencapai 11500 *flight hours* atau pada saat komponen mengalami kerusakan yang pertama, tergantung pada mana yang lebih dahulu terjadi kerusakan pertama atau pencapaian jam terbang pesawat. Berikut adalah estimasi biaya untuk *serial number 17502*, mengacu pada Lampiran 11C yang ringkas dalam Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen *Heat Exchanger Serial Number 17502*

<i>Time (Flight Hours)</i>	Kerusakan ke-N			
	1	2	3	4
1000	0,9048	0,9048	0,9048	0,9048
3000	0,3016	0,3016	0,3016	0,3016
5000	0,181	0,181	0,181	0,181
7000	0,1295	0,1295	0,1295	0,1295
8900	0,109*	0,109	0,109	0,109
9000	0,1092	0,1092	0,1092	0,1092
11000	0,235	0,2496	0,2508	0,2509
13000	0,7081	1,1926	1,5583	1,7999
15000	0,7291	1,2981	1,852	2,3951

Dari Tabel 4.16 yaitu biaya untuk *serial number* 17502 menghasilkan biaya yang minimum yaitu sebesar \$0.109 per *flight hours*. Sama halnya dengan *serial number* 15553, biaya minimum untuk *serial number* 17502 terjadi pada saat komponen mengalami kerusakan yang pertama dan terjadi saat pesawat sudah beroperasi selama 8900 *flight hours*. Untuk proses perbaikan *serial number* 17502 sebaiknya dilakukan pada saat jam operasi sudah mencapai 8900 *flight hours* atau pada saat komponen mengalami kerusakan pertama.

Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa titik yang paling minimum untuk *serial number* 15553 dan 17502 terdapat pada kerusakan pertama. Jika digambarkan dalam bentuk grafik tiga dimensi, maka hasil perhitungan biaya dari persamaan $C(T; n)$ untuk waktu ke- T dan kerusakan ke- N , maka didapatkan grafik yang disajikan dalam Gambar 4.5 untuk *serial number* 15553 dan 17502.



Gambar 4.5 Ekspektasi Optimasi Biaya Komponen *Heat Exchanger* Terhadap Sepasang T dan N untuk *Serial Number* (a) 15553; (b) 17502.

4.5.3 Perhitungan Estimasi Biaya Penggantian Komponen *Heat Exchanger* untuk *Serial Number* 7363, 5658, 48-5069, dan 5800

Berikut adalah pembahasan bagaimana waktu yang optimal untuk melakukan *preventive maintenance* atau *scheduled maintenance* pada komponen *Heat Exchanger* jika pengamatan yang digunakan adalah dengan *time truncated*. Berikut adalah

estimasi biaya untuk *serial number* 7363 yang mengacu pada Lampiran 11D yang ringkas dalam Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen *Heat Exchanger Serial Number 7363*

<i>Time (Flight Hours)</i>	Kerusakan ke-N			
	1	2	3	4
5000	0.1822	0.1822	0.1822	0.1822
10000	0.1015	0.1013	0.1013	0.1013
12500	0.0942*	0.0942	0.0942	0.0942
15000	0.099	0.099	0.099	0.099
20000	0.1358	0.1402	0.1406	0.1406
25000	0.1994	0.2226	0.2275	0.2283
30000	0.2676	0.3342	0.3601	0.3682
35000	0.314	0.4378	0.5121	0.5508

Berdasarkan Tabel 4.17 yang menunjukkan nilai estimasi biaya untuk perbaikan komponen *Heat Exchanger* pada *serial number* 7363 menghasilkan biaya yang minimum yaitu sebesar \$0,0942 per *flight hours*, biaya tersebut terdapat pada kerusakan pertama dan saat pesawat sudah beroperasi selama 12500 *flight hours*. Tindakan yang tepat untuk melakukan perbaikan pada *serial number* 7363 adalah pada saat telah terjadi kerusakan yang pertama atau pada saat komponen sudah beroperasi selama 12500 *flight hours*. Berikut adalah estimasi biaya *serial number* 5658 berdasarkan Lampiran 11E yang dirangkum dalam Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen *Heat Exchanger Serial Number 5658*

<i>Time (Flight Hours)</i>	Kerusakan ke-N	
	1	2
5000	0.181	0.181
10000	0.0905	0.0905
15000	0.0603	0.0603
20000	0.0454	0.0454
24800	0.0387*	0.0387
30000	0.0554	0.0563
35000	0.1609	0.2032

Berdasarkan Tabel 4.18 komponen *Heat Exchanger* pada *serial number* 5658 menghasilkan biaya yang minimum sebesar

\$0,0387 per *flight hours*, biaya tersebut terdapat pada kerusakan pertama dan pada saat pesawat sudah beroperasi selama 24800 *flight hours*. Tindakan yang tepat untuk melakukan perbaikan pada *serial number* 5658 adalah pada saat telah terjadi kerusakan yang pertama atau pada saat komponen sudah beroperasi selama 24800 *flight hours*, tergantung mana yang lebih dahulu terjadi.

Berikut estimasi biaya untuk *serial number* 48-5069 berdasarkan Lampiran 11F yang dirangkum dalam Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen *Heat Exchanger Serial Number* 48-5069

<i>Time (Flight Hours)</i>	Kerusakan ke-N	
	1	2
5000	0.181	0.181
10000	0.0905	0.0905
15000	0.0603	0.0603
20000	0.0452	0.0452
25000	0.0362	0.0362
29000	0.0323*	0.0323
30000	0.0326	0.0326
35000	0.088	0.0965

Berdasarkan Tabel 4.19 pada *serial number* 48-5069 menghasilkan biaya yang minimum sebesar \$0,0323 per *flight hours*. Minimum biaya tersebut terdapat pada kerusakan pertama dan kerusakan kedua pada saat pesawat sudah beroperasi selama 29000 *flight hours*. Perbaikan yang tepat pada *serial number* 48-5069 adalah pada saat komponen sudah beroperasi selama 29000 *flight hours* atau komponen mengalami kerusakan yang pertama, tergantung mana yang lebih dahulu terjadi.

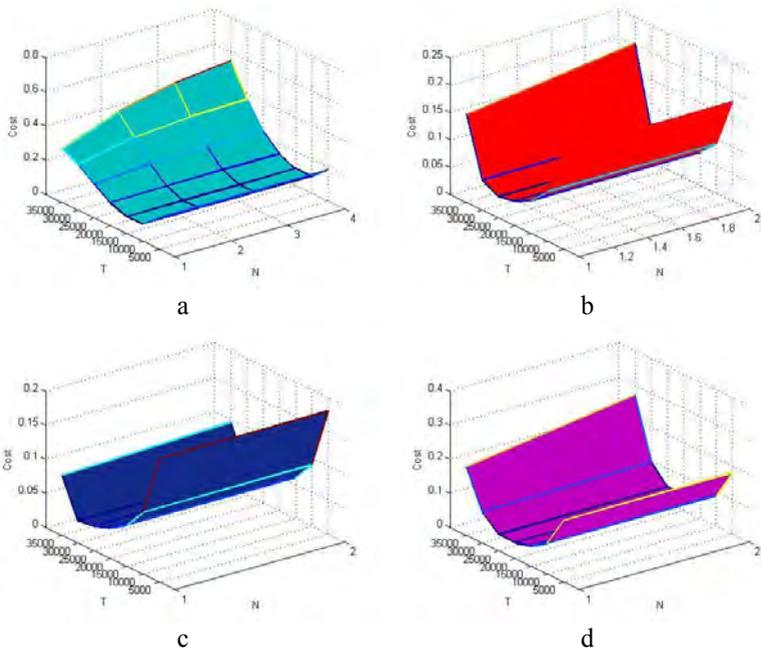
Berdasarkan Tabel 4.20 yang menunjukkan nilai estimasi biaya untuk perbaikan komponen *Heat Exchanger* pada *serial number* 5800. Untuk tindakan perbaikan, *cleaning*, dan pengecekan komponen HE *serial number* 5800 seharusnya dilakukan pada saat komponen telah beroperasi selama 22100 *flight hours* atau pada saat komponen mengalami kerusakan pertama, tergantung pada mana yang lebih dahulu terjadi. Minimum biaya yang didapat adalah sebesar \$0,0447 per *flight hours*. Berikut estimasi biaya yang didapatkan untuk *serial*

number 5800 berdasarkan Lampiran 11G yang dirangkum dalam Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Ekspektasi Biaya (USD) untuk Penggantian Komponen *Heat Exchanger Serial Number 5800*

<i>Time (Flight Hours)</i>	<i>Kerusakan ke-N</i>	
	1	2
5000	0.181	0.181
10000	0.0905	0.0905
15000	0.0604	0.0604
20000	0.0468	0.0468
22100	0.0447*	0.0447
30000	0.0912	0.0968
35000	0.2009	0.2714

Berikut disajikan gambar dalam bentuk grafik tiga dimensi, hasil perhitungan biaya dari persamaan $C(T; n)$ untuk sepasang waktu ke- T dan kerusakan ke- N .



Gambar 4.6 Ekspektasi Optimasi Biaya Terhadap Sepasang T dan N untuk *Serial Number* (a) 7363; (b) 5658; (c) 48-5069; (d) 5800.

Dari Gambar 4.6 terlihat bahwa titik yang paling minimum untuk *serial number* 7363, 5658, 48-5069, dan 5800 terdapat pada kerusakan pertama dengan waktu yang berbeda-beda tiap *serial number*. Berikut disajikan hasil ringkasan dari hasil estimasi biaya yang dihasilkan untuk keenam *serial number* yang telah diamati.

Tabel 4.21 Kebijakan Optimal untuk Keenam *Serial Number* Komponen *Heat Exchanger*

<i>Serial Number</i>	<i>N*</i>	<i>T* (Flight Hours)</i>	<i>Cost (USD)</i>
15553	1	11500	0,0818
17502	1	8900	0,1090
7363	1	12500	0,0942
5658	1	24800	0,0387
48-3059	1	29000	0,0323
5800	1	22100	0,0447

Pemilihan waktu perbaikan tergantung pada mana yang lebih dahulu terjadi, pada kerusakan pertama atau waktu *flight* terbang pesawat. Untuk proses perawatan pada setiap *serial number* dilakukan pada waktu yang sama karena fungsi dari masing-masing *serial number* komponen *Heat Exchanger* adalah sama. Dari hasil perhitungan estimasi biaya yang didapat maka untuk perbaikan mulai dari proses pengecekan komponen, *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 masing-masing *serial number*. Nilai estimasi biaya yang paling minimum didapatkan sebesar \$0,1092 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.

4.5.4 Perbandingan Hasil Analisis dengan Kondisi Kebijakan di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) Aero Asia

Hasil analisis pada subbab sebelumnya menyatakan bahwa bila semua *serial number* pada komponen *Heat Exchanger* (HE)

diperlakukan secara sama yaitu dengan melakukan pengecekan, perawatan, dan proses *repair* pada saat komponen telah beroperasi selama 8900 *flight hours* atau saat komponen mengalami kerusakan pertama tergantung pada mana yang lebih dahulu terjadi, dengan biaya minimum yang dihasilkan sebesar \$0,1090 per satu *flight hours*.

Informasi yang diperoleh dari perusahaan yang telah melakukan perhitungan untuk *scheduled maintenance*, yang berarti pesawat akan dilakukan pengecekan, perawatan, dan proses *repair* secara berkala pada saat pesawat beroperasi selama 5045 *flight hours* dengan biaya minimum yang dikeluarkan perusahaan sebesar \$0,92 per *flight hours*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Untuk pengujian *trend* dalam *failure rate* pada pengamatan dengan menggunakan *failure truncated* menggunakan *Laplace's Test* didapatkan kesimpulan bahwa komponen *Heat Exchanger* dengan *serial number* 15553, dan 17502 mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP). Jika pengamatan yang dilakukan dengan menggunakan *time truncated* maka *serial number* yang mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) adalah 7441, 7363, 5658, 48-3059, dan 5800.
2. Pada uji kebaikan model dengan menggunakan *Cramer-von Mises test* didapatkan hasil bahwa *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.
3. Melihat dari fungsi laju kerusakan untuk masing-masing komponen menunjukkan bahwa laju kerusakan terus meningkat dari waktu ke waktu, hal ini membuktikan bahwa laju kerusakan tidak *constant*. Trend tersebut menunjukkan bahwa semakin besar laju kerusakan yang dialami komponen *Heat Exchanger* maka semakin besar pula kemungkinan komponen tersebut akan gagal beroperasi.
4. 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, 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.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil analisis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini menganggap bahwa komponen akan bekerja *as good as new* setelah mengalami perbaikan, padahal kondisi komponen yang sebenarnya tidak demikian sehingga untuk penelitian selanjutnya diharapkan peneliti mampu menerapkan metode yang lain untuk memberikan alternatif yang baru.
2. Penelitian ini masih menggunakan faktor internal dalam menganalisis akibat dari sebuah kegagalan yang dialami komponen *Heat Exchanger*, untuk penelitian selanjutnya diharapkan peneliti dapat mencari faktor eksternal yang mengakibatkan kegagalan dari komponen sehingga penentuan *preventive maintenance* dari komponen *Heat Exchanger* akan menjadi lebih maksimal.
3. Data yang digunakan dalam penelitian ini sangat sedikit maka diharapkan dalam penelitian selanjutnya peneliti dapat mencari data yang lebih banyak dan valid serta mencari informasi bagaimana komponen tersebut bekerja.
4. Pada tahap *pre-processing* data banyak ditemukan data yang tidak sesuai, sehingga diharapkan pihak perusahaan lebih teliti dalam melakukan pengambilan dan pengecekan data agar evaluasi dari *performance* setiap komponen dapat dilakukan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aircraft Maintenance Manual. (2015). *Boeing Propretary*. Retrieved September 09, 2015, from <http://www.ilmuterbang.com>.
- 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>.
- Bandara Soekarno Hatta. (18 Februari 2015). *Daftar Nama Maskapai Penerbangan yang Beroperasi di Indonesia*. Retrieved September 09, 2015, from <http://bandarasoekarnohatta.com>.
- Crowder, M.J., Kimber, A.C., Smith, R.L., & Sweeting, T.J. (1991). *“Statistical Analysis of Reliability Data”*. Springer Science Business Media.
- Crow, L.H. (1975). Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems. *AMSAA Technical Report No. 138, 1-35*.
- Crow, L.H (1990). Evaluating the Reliability of Repairable Systems. *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 275-279*.
- 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>
- GMF Aero Asia. (2015). *GMF Journey Over Decades of Experience*. Retrieved Oktober 29, 2015, from <http://www.gmf-aeroasia.co.id>
- Karbasiyan, M. and Ibrahim, Z. (2010). Estimation of Parameters of the Power-Law-Nonhomogeneous Poisson Proses in the Case of Exact Failure Data. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research, Vol. 21, pp. 105-110*.
- 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.*
- 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.
- O'Connor, P. (2012). *Practical Reliability Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Rigdon, S. E., & Basu, A.P. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley & Sons, INC.
- 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.*
- 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.*

LAMPIRAN

Lampiran 1A.

Data *Lifetime* dengan *Failure Truncated* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Serial Number* 15553 .

Kerusakan ke-N	Tanggal	<i>Lifetime</i> (flight hours)	$X_i - X_{i-1}$ (flight hours)
1	6/18/2014	14110	14110
2	9/13/2014	14584	474
3	5/23/2015	15339	755

Lampiran 1B.

Data *Lifetime* dengan *Failure Truncated* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Serial Number* 7016 .

Kerusakan ke-N	Tanggal	<i>Lifetime</i> (flight hours)	$X_i - X_{i-1}$ (flight hours)
1	10/27/2012	29814	29814
2	12/5/2012	30022	208
3	5/21/2014	37412	7390

Lampiran 1C.

Data *Lifetime* dengan *Failure Truncated* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Serial Number* 17502 .

Kerusakan ke-N	Tanggal	<i>Lifetime</i> (flight hours)	$X_i - X_{i-1}$ (flight hours)
1	5/15/2014	11253	11253
2	11/18/2014	12215	962
3	5/23/2015	12893	678

Lampiran 1D.

Data *Lifetime* dengan *Failure Truncated* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Serial Number* 49-4223 .

Kerusakan ke-N	Tanggal	<i>Lifetime</i> (flight hours)	$X_i - X_{i-1}$ (flight hours)
1	1/7/2011	30335	30335
2	7/23/2012	35524	5189
3	12/17/2014	40611	5087

Lampiran 2A.

Data *Lifetime* dengan *Time Truncated* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Serial Number* 7441 .

Kerusakan ke-N	Tanggal	<i>Lifetime</i> (flight hours)	$X_i - X_{i-1}$ (flight hours)
1	12/24/2009	24375	24375
2	5/10/2014	37423	13048
3	6/21/2014	37490	67
4	7/31/2014	37668	178

Lampiran 2B.

Data *Lifetime* dengan *Time Truncated* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Serial Number* 7363 .

Kerusakan ke-N	Tanggal	<i>Lifetime</i> (flight hours)	$X_i - X_{i-1}$ (flight hours)
1	12/25/2009	24384	24384
2	7/31/2012	30313	5929
3	8/26/2013	32239	1926
4	5/30/2015	36958	4719

Lampiran 2C.

Data *Lifetime* dengan *Time Truncated* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Serial Number* 5658.

Kerusakan ke-N	Tanggal	<i>Lifetime</i> (flight hours)	$X_i - X_{i-1}$ (flight hours)
1	10/24/2012	34156	341562
2	11/18/2014	38572	4416

Lampiran 2D.

Data *Lifetime* dengan *Time Truncated* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Serial Number* 48-3059.

Kerusakan ke-N	Tanggal	<i>Lifetime</i> (flight hours)	$X_i - X_{i-1}$ (flight hours)
1	9/20/2014	36845	36845
2	5/4/2015	37846	1001

Lampiran 2E.

Data *Lifetime* dengan *Time Truncated* Komponen *Heat Exchanger* (HE) untuk *Serial Number* 5800.

Kerusakan ke-N	Tanggal	<i>Lifetime</i> (flight hours)	$X_i - X_{i-1}$ (flight hours)
1	7/28/2012	33284	33284
2	6/10/2014	37653	4369

Lampiran 3A
Statistika Deskriptif Komponen *Heat Exchanger* dengan *Failure Truncated* untuk Keempat *Serial Number*.

Descriptive Statistics: 15553, 7016, 17502, 49-4223

Variable	N	Minimum	Maximum
15553	3	14110	15339
7016	3	29814	37412
17502	3	11253	12893
49-4223	3	30335	40611

Lampiran 3B
Statistika Deskriptif Komponen *Heat Exchanger* dengan *Time Truncated* untuk Kelima *Serial Number*.

Descriptive Statistics: 7441, 7363, 5658, 48-3059, 5800

Variable	N	Minimum	Maximum
7441	4	24375	37668
7363	4	24384	36958
5658	2	34156	38572
48-3059	2	36845	37846
5800	2	33284	37653

Lampiran 4A.**Syntax MATLAB untuk Perhitungan Statistik Uji (L) *Failure Truncated Data***

```

clc;
x=input('x=');
N=length(x);
a=0;
for i=1:N-1
    a=a+x(i);
    at=a/(N-1);
end
b=x(N, :)/2;
c=x(N, :)/sqrt(12*(N-1));
L=(at-b)/c;
L

```

Lampiran 4B.**Perhitungan Statistik Uji (L) untuk *Failure Truncated Data* Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 15553***

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k-1} Y_{i,k}}{N_k - 1} - \frac{Y_{N_k,k}}{2} \right)}{Y_{N_k,k} \sqrt{\frac{1}{12(N_k - 1)}}} = \frac{\left(\frac{28694}{3-1} - \frac{15339}{2} \right)}{15339 \times \sqrt{\frac{1}{12 \times (3-1)}}} = 2,133$$

Lampiran 4C.**Perhitungan Statistik Uji (L) untuk *Failure Truncated Data* Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 7016***

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k-1} Y_{i,k}}{N_k - 1} - \frac{Y_{N_k,k}}{2} \right)}{Y_{N_k,k} \sqrt{\frac{1}{12(N_k - 1)}}} = \frac{\left(\frac{59836}{3-1} - \frac{37412}{2} \right)}{37412 \times \sqrt{\frac{1}{12 \times (3-1)}}} = 1,468$$

Lampiran 4D.

Perhitungan Statistik Uji (L) untuk *Failure Truncated Data* Komponen *Heat Exchanger* (HE) Serial Number 17502

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k-1} Y_{i,k}}{N_k - 1} - \frac{Y_{N_k,k}}{2} \right)}{Y_{N_k,k} \sqrt{\frac{1}{12(N_k - 1)}}} = \frac{\left(\frac{23468}{3-1} - \frac{12893}{2} \right)}{12893 \times \sqrt{\frac{1}{12 \times (3-1)}}} = 2,009$$

Lampiran 4E.

Perhitungan Statistik Uji (L) untuk *Failure Truncated Data* Komponen *Heat Exchanger* (HE) Serial Number 49-4223

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k-1} Y_{i,k}}{N_k - 1} - \frac{Y_{N_k,k}}{2} \right)}{Y_{N_k,k} \sqrt{\frac{1}{12(N_k - 1)}}} = \frac{\left(\frac{65859}{3-1} - \frac{40611}{2} \right)}{40611 \times \sqrt{\frac{1}{12 \times (3-1)}}} = 1,523$$

Lampiran 5A.

Syntax MATLAB untuk Perhitungan Statistik Uji (L) *Time Truncated Data*

```

clc;
x=input('x=');
T=input('T=');
n=length(x)
for i=1:n
    a=(sum(x)/n)-(T/2);
    b=T/(sqrt(12*n));
    L=a/b;
end
L

```

Lampiran 5B.

**Perhitungan Statistik Uji (L) untuk *Time Truncated Data*
Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 7441***

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k} Y_{i,k}}{N_k} - \frac{T_k}{2} \right)}{T_k \sqrt{\frac{1}{12N_k}}} = \frac{\left(\frac{136956}{4} - \frac{39000}{2} \right)}{39000 \times \sqrt{\frac{1}{12 \times 4}}} = 2,618$$

Lampiran 5C.

**Perhitungan Statistik Uji (L) untuk *Time Truncated Data*
Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 7363***

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k} Y_{i,k}}{N_k} - \frac{T_k}{2} \right)}{T_k \sqrt{\frac{1}{12N_k}}} = \frac{\left(\frac{123894}{4} - \frac{39000}{2} \right)}{39000 \times \sqrt{\frac{1}{12 \times 4}}} = 2,038$$

Lampiran 5D.

**Perhitungan Statistik Uji (L) untuk *Time Truncated Data*
Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 5658***

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k} Y_{i,k}}{N_k} - \frac{T_k}{2} \right)}{T_k \sqrt{\frac{1}{12N_k}}} = \frac{\left(\frac{72728}{2} - \frac{39000}{2} \right)}{39000 \times \sqrt{\frac{1}{12 \times 2}}} = 2,118$$

Lampiran 5E.

**Perhitungan Statistik Uji (L) untuk *Time Truncated Data*
Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 48-3059***

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k} Y_{i,k}}{N_k} - \frac{T_k}{2} \right)}{T_k \sqrt{\frac{1}{12N_k}}} = \frac{\left(\frac{74691}{2} - \frac{39000}{2} \right)}{39000 \times \sqrt{\frac{1}{12 \times 2}}} = 2,241$$

Lampiran 5F.

**Perhitungan Statistik Uji (L) untuk *Time Truncated Data*
Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 5800***

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_k} Y_{i,k}}{N_k} - \frac{T_k}{2} \right)}{T_k \sqrt{\frac{1}{12N_k}}} = \frac{\left(\frac{70937}{2} - \frac{39000}{2} \right)}{39000 \times \sqrt{\frac{1}{12 \times 2}}} = 2,005$$

Lampiran 6A.

Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk Data *Failure Truncated* pada Komponen *Heat Exchanger* (HE) *Serial Number* 15553

i	$\frac{Y_{N_1,1}}{Y_{i,1}}$	$\ln\left(\frac{Y_{N_1,1}}{Y_{i,1}}\right)$
1	1.087101	0.083515
2	1.051769	0.050474
3	1	0

Parameter β didapat hasil sebagai berikut.

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N_1-1} \ln\left(\frac{Y_{N_1,1}}{Y_{i,1}}\right)} = \frac{3}{0,133988} = 22,39$$

Parameter λ didapat hasil sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{Y_{N_1,1}}{N_1^{\frac{1}{\beta}}} = \frac{15339}{3^{22,39}} = 14604,53$$

Lampiran 6B.

Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk Data *Failure Truncated* pada Komponen *Heat Exchanger* (HE) *Serial Number* 17502

i	$\frac{Y_{N_1,1}}{Y_{i,1}}$	$\ln\left(\frac{Y_{N_1,1}}{Y_{i,1}}\right)$
1	1.145739	0.13605
2	1.055506	0.05402
3	1	0

Parameter β didapat hasil sebagai berikut.

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N_1-1} \ln\left(\frac{Y_{N_1,1}}{Y_{i,1}}\right)} = \frac{3}{0,19007} = 15,783$$

Parameter λ didapat hasil sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{Y_{N_1,1}}{N_1^{\frac{1}{\beta}}} = \frac{12893}{3^{15,783}} = 12026,11$$

Lampiran 7A.

Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk Data *Time Truncated* pada Komponen *Heat Exchanger* (HE) *Serial Number* 7441

i	$\frac{T_1}{Y_{i,1}}$	$\ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)$
1	1.6	0.470004
2	1.04214	0.041276
3	1.040277	0.039487
4	1.035362	0.034751

Parameter β didapat hasil sebagai berikut.

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N_1} \ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)} = \frac{4}{0,5855} = 6,83$$

Parameter λ didapat hasil sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{T_1}{N_1^{\frac{1}{\beta}}} = \frac{39000}{4^{6,83}} = 31837,24$$

Lampiran 7B.

Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk Data *Time Truncated* pada Komponen *Heat Exchanger* (HE) *Serial Number* 7363

i	$\frac{T_1}{Y_{i,1}}$	$\ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)$
1	1.599409	0.469634
2	1.286577	0.251985
3	1.209715	0.190385
4	1.055252	0.05378

Parameter β didapat hasil sebagai berikut.

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N_1} \ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)} = \frac{4}{0,966} = 4,14$$

Parameter λ didapat hasil sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{T_1}{N_1^{\frac{1}{\beta}}} = \frac{39000}{4^{4,14}} = 27906,13$$

Lampiran 7C.

Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk Data *Time Truncated* pada Komponen *Heat Exchanger* (HE) *Serial Number* 5658

i	$\frac{T_1}{Y_{i,1}}$	$\ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)$
1	1.14182	0.132623
2	1.011096	0.011035

Parameter β didapat hasil sebagai berikut.

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N_1} \ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)} = \frac{2}{0,143658} = 13,92$$

Parameter λ didapat hasil sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{T_1}{\frac{1}{N_1^\beta}} = \frac{39000}{\frac{1}{2^{13,92}}} = 35303,61$$

Lampiran 7D.

Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk Data *Time Truncated* pada Komponen *Heat Exchanger* (HE) *Serial Number* 48-3059

i	$\frac{T_1}{Y_{i,1}}$	$\ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)$
1	1.058488	0.056842
2	1.030492	0.030036

Parameter β didapat hasil sebagai berikut.

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N_1} \ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)} = \frac{2}{0,08687} = 23,02$$

Parameter λ didapat hasil sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{T_1}{\frac{1}{N_1^\beta}} = \frac{39000}{\frac{1}{2^{23,02}}} = 36720,76$$

Lampiran 7E.

Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk Data *Time Truncated* pada Komponen *Heat Exchanger* (HE) *Serial Number 5800*

i	$\frac{T_1}{Y_{i,1}}$	$\ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)$
1	1.171734	0.158485
2	1.035774	0.035149

Parameter β didapat hasil sebagai berikut.

$$\beta = \frac{N_1}{\sum_{i=1}^{N_1} \ln\left(\frac{T_1}{Y_{i,1}}\right)} = \frac{2}{0,193634} = 10,3287$$

Parameter λ didapat hasil sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{T_1}{N_1^{\frac{1}{\beta}}} = \frac{39000}{2^{\frac{1}{10,3287}}} = 34101,62$$

Lampiran 8A.**Perhitungan *Cramer-von Mises Test* untuk *Failure Truncated Komponen Heat Exchanger (HE) Serial Number 15553***Perhitungan *conditional* MLE dari β

$$\begin{aligned}\tilde{\beta} &= \frac{M}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} = \frac{N-1}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N-1} \ln\left(\frac{Y_{N_1,1}}{Y_{i,k}}\right)} \\ &= \frac{3-1}{0,8898} = 14,92\end{aligned}$$

Perhitungan *unbiased conditional* MLE dari β

$$\begin{aligned}\bar{\beta} &= \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} = \frac{(N-1)-1}{N-1} \tilde{\beta} \\ &= \frac{(3-1)-1}{3-1} \times 14,92 = 7,4633\end{aligned}$$

Perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises*

$$\begin{aligned}C_M^2 &= \frac{1}{12(N-1)} + \sum_{j=1}^{N-1} \left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2(N-1)} \right)^2 \\ &= \frac{1}{12 \times (3-1)} + 0,0859 = 0,1276\end{aligned}$$

i	$Z_j^{\bar{\beta}}$	$\frac{2j-1}{2M}$	$\left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2$
1	0.536173	0.25	0.081895
2	0.686121	0.75	0.004081

Lampiran 8B.**Perhitungan *Cramer-von Mises Test* untuk *Failure Truncated Komponen Heat Exchanger (HE) Serial Number 17502***

Perhitungan *conditional MLE* dari β

$$\begin{aligned}\tilde{\beta} &= \frac{M}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} = \frac{N-1}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N-1} \ln\left(\frac{Y_{N_{1,1}}}{Y_{i,k}}\right)} \\ &= \frac{3-1}{0,19007} = 10,5224\end{aligned}$$

Perhitungan *unbiased conditional MLE* dari β

$$\begin{aligned}\bar{\beta} &= \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} = \frac{(N-1)-1}{N-1} \tilde{\beta} \\ &= \frac{(3-1)-1}{3-1} \times 10,5224 = 5,261\end{aligned}$$

Perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises*

$$\begin{aligned}C_M^2 &= \frac{1}{12(N-1)} + \sum_{j=1}^{N-1} \left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2(N-1)} \right)^2 \\ &= \frac{1}{12 \times (3-1)} + 0,057 = 0,09876\end{aligned}$$

i	$Z_j^{\bar{\beta}}$	$\frac{2j-1}{2M}$	$\left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2$
1	0.488806	0.25	0.057028
2	0.752608	0.75	6.8E-06

Lampiran 9A.**Perhitungan *Cramer-von Mises Test* untuk *Time Truncated Komponen Heat Exchanger (HE) Serial Number 7441***Perhitungan *conditional* MLE dari β

$$\begin{aligned}\tilde{\beta} &= \frac{M}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} = \frac{N}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} \\ &= \frac{4}{0,5855} = 6,83\end{aligned}$$

Perhitungan *unbiased conditional* MLE dari β

$$\begin{aligned}\bar{\beta} &= \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} = \frac{N-1}{N} \tilde{\beta} \\ \bar{\beta} &= \frac{4-1}{4} \times 6,83 = 5.124\end{aligned}$$

Perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises*

$$\begin{aligned}C_M^2 &= \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left(z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2 \\ &= \frac{1}{12 \times 4} + 0,228165 = 0,249\end{aligned}$$

i	$z_j^{\bar{\beta}}$	$\frac{2j-1}{2M}$	$\left(z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2$
1	0.089982	0.125	0.001226
2	0.809381	0.375	0.188687
3	0.816833	0.625	0.0368
4	0.8369	0.875	0.001452

Lampiran 9B.**Perhitungan *Cramer-von Mises Test* untuk *Time Truncated* Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 7363***

Perhitungan *conditional MLE* dari β

$$\begin{aligned}\tilde{\beta} &= \frac{M}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} = \frac{N}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} \\ &= \frac{4}{0,9657} = 4,14\end{aligned}$$

Perhitungan *unbiased conditional MLE* dari β

$$\begin{aligned}\bar{\beta} &= \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} = \frac{N-1}{N} \tilde{\beta} \\ \bar{\beta} &= \frac{4-1}{4} \times 4,14 = 3,106\end{aligned}$$

Perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises*

$$\begin{aligned}C_M^2 &= \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2 \\ &= \frac{1}{12 \times 4} + 0,0242 = 0,04507\end{aligned}$$

i	$Z_j^{\bar{\beta}}$	$\frac{2j-1}{2M}$	$\left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2$
1	0.232511	0.125	0.011559
2	0.457153	0.375	0.006749
3	0.553558	0.625	0.005104
4	0.846153	0.875	0.000832

Lampiran 9C.**Perhitungan *Cramer-von Mises Test* untuk *Time Truncated Komponen Heat Exchanger (HE) Serial Number 5658***Perhitungan *conditional* MLE dari β

$$\begin{aligned}\tilde{\beta} &= \frac{M}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} = \frac{N}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} \\ &= \frac{2}{0,14365} = 13,92\end{aligned}$$

Perhitungan *unbiased conditional* MLE dari β

$$\begin{aligned}\bar{\beta} &= \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} = \frac{N-1}{N} \tilde{\beta} \\ \bar{\beta} &= \frac{2-1}{2} \times 13,92 = 6,96\end{aligned}$$

Perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises*

$$\begin{aligned}C_M^2 &= \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2 \\ &= \frac{1}{12 \times 2} + 0,05268 = 0,0943\end{aligned}$$

i	$Z_j^{\bar{\beta}}$	$\frac{2j-1}{2M}$	$\left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2$
1	0.397252	0.25	0.021683
2	0.926062	0.75	0.030998

Lampiran 9D.**Perhitungan *Cramer-von Mises Test* untuk *Time Truncated* Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 48-3059***Perhitungan *conditional MLE* dari β

$$\begin{aligned}\tilde{\beta} &= \frac{M}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} = \frac{N}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} \\ &= \frac{2}{0,0868} = 23,02\end{aligned}$$

Perhitungan *unbiased conditional MLE* dari β

$$\begin{aligned}\bar{\beta} &= \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} = \frac{N-1}{N} \tilde{\beta} \\ \bar{\beta} &= \frac{2-1}{2} \times 23,02 = 11,51\end{aligned}$$

Perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises*

$$\begin{aligned}C_M^2 &= \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2 \\ &= \frac{1}{12 \times 2} + 0,0745 = 0,116\end{aligned}$$

i	$Z_j^{\bar{\beta}}$	$\frac{2j-1}{2M}$	$\left(Z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2$
1	0.519821	0.25	0.072804
2	0.707704	0.75	0.001789

Lampiran 9E.**Perhitungan *Cramer-von Mises Test* untuk *Time Truncated Komponen Heat Exchanger (HE) Serial Number 5800***Perhitungan *conditional* MLE dari β

$$\begin{aligned}\tilde{\beta} &= \frac{M}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} = \frac{N}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} \ln\left(\frac{T_k}{Y_{i,k}}\right)} \\ &= \frac{2}{0,1936} = 10,33\end{aligned}$$

Perhitungan *unbiased conditional* MLE dari β

$$\begin{aligned}\bar{\beta} &= \frac{M-1}{M} \tilde{\beta} = \frac{N-1}{N} \tilde{\beta} \\ \bar{\beta} &= \frac{2-1}{2} \times 10,33 = 5,16\end{aligned}$$

Perhitungan statistik uji untuk metode *Cramer-von Mises*

$$\begin{aligned}C_M^2 &= \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left(z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2 \\ &= \frac{1}{12 \times 4} + 0,0436 = 0,085\end{aligned}$$

i	$z_j^{\bar{\beta}}$	$\frac{2j-1}{2M}$	$\left(z_j^{\bar{\beta}} - \frac{2j-1}{2M} \right)^2$
1	0.441103	0.25	0.03652
2	0.833999	0.75	0.007056

Lampiran 10A.**Perhitungan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF)
Komponen *Heat Exchanger* (HE) Serial Number 15553**

$$w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} = \frac{22,39}{14604,53} \left(\frac{t}{14604,53}\right)^{22,39-1}$$

Dari persamaan diatas didapatkan hasil sebagai berikut.

T	ROCOF	T	ROCOF	T	ROCOF
100	7.71234E-50	123	6.46035E-48	146	2.52751E-46
101	9.54158E-50	124	7.68203E-48	147	2.92485E-46
102	1.178E-49	125	9.12202E-48	148	3.3813E-46
103	1.45136E-49	126	1.08171E-47	149	3.90517E-46
104	1.78455E-49	127	1.281E-47	150	4.50586E-46
105	2.1899E-49	128	1.51498E-47	151	5.19401E-46
106	2.68212E-49	129	1.78937E-47	152	5.98164E-46
107	3.27873E-49	130	2.11074E-47	153	6.88233E-46
108	4.00055E-49	131	2.48667E-47	154	7.91141E-46
109	4.87235E-49	132	2.92592E-47	155	9.08617E-46
110	5.92346E-49	133	3.43853E-47	156	1.04261E-45
111	7.1886E-49	134	4.03606E-47	157	1.19531E-45
112	8.70882E-49	135	4.73179E-47	158	1.36918E-45
113	1.05326E-48	136	5.54093E-47	159	1.567E-45
114	1.27169E-48	137	6.48095E-47	160	1.79189E-45
115	1.5329E-48	138	7.5718E-47	161	2.04735E-45
116	1.84477E-48	139	8.83634E-47	162	2.33729E-45
117	2.21657E-48	140	1.03006E-46	163	2.66611E-45
118	2.65915E-48	141	1.19945E-46	164	3.03875E-45
119	3.18519E-48	142	1.39519E-46	165	3.46072E-45
120	3.80954E-48	143	1.62115E-46	.	.
121	4.54951E-48	144	1.88174E-46	.	.
122	5.42529E-48	145	2.18196E-46	.	.

Lampiran 10B.**Perhitungan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF)
Komponen *Heat Exchanger* (HE) *Serial Number* 17502**

$$w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1} = \frac{15,78}{12026,11} \left(\frac{t}{12026,11} \right)^{15,78-1}$$

Dari persamaan diatas didapatkan hasil sebagai berikut.

T	ROCOF	T	ROCOF	T	ROCOF
100	2.32355E-34	123	4.95771E-33	146	6.2502E-32
101	2.69177E-34	124	5.58816E-33	147	6.91384E-32
102	3.11382E-34	125	6.29273E-33	148	7.64273E-32
103	3.59694E-34	126	7.07944E-33	149	8.44275E-32
104	4.14923E-34	127	7.95708E-33	150	9.32031E-32
105	4.77978E-34	128	8.93533E-33	151	1.02823E-31
106	5.49877E-34	129	1.00248E-32	152	1.13363E-31
107	6.3176E-34	130	1.12371E-32	153	1.24903E-31
108	7.249E-34	131	1.2585E-32	154	1.37531E-31
109	8.30718E-34	132	1.40825E-32	155	1.51341E-31
110	9.50798E-34	133	1.57448E-32	156	1.66436E-31
111	1.08691E-33	134	1.75885E-32	157	1.82924E-31
112	1.24101E-33	135	1.96321E-32	158	2.00926E-31
113	1.41529E-33	136	2.18952E-32	159	2.20569E-31
114	1.61219E-33	137	2.43998E-32	160	2.41991E-31
115	1.83438E-33	138	2.71695E-32	161	2.65339E-31
116	2.08487E-33	139	3.023E-32	162	2.90775E-31
117	2.36696E-33	140	3.36096E-32	163	3.18469E-31
118	2.68431E-33	141	3.73389E-32	164	3.48608E-31
119	3.04099E-33	142	4.14511E-32	165	3.81388E-31
120	3.44146E-33	143	4.59824E-32	.	.
121	3.89068E-33	144	5.09723E-32	.	.
122	4.39409E-33	145	4.95771E-33	.	.

Lampiran 10C.**Perhitungan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF)
Komponen *Heat Exchanger* (HE) Serial Number 7363**

$$w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} = \frac{4,14}{27906,13} \left(\frac{t}{27906,13}\right)^{4,14-1}$$

Dari persamaan diatas didapatkan hasil sebagai berikut.

T	ROCOF	T	ROCOF	T	ROCOF
.	.	3092	1.5E-07	3184	1.6E-07
.	.	3096	1.5E-07	3188	1.6E-07
.	.	3100	1.5E-07	3192	1.6E-07
3012	1.4E-07	3104	1.5E-07	3196	1.6E-07
3016	1.4E-07	3108	1.5E-07	3200	1.7E-07
3020	1.4E-07	3112	1.5E-07	3204	1.7E-07
3024	1.4E-07	3116	1.5E-07	3208	1.7E-07
3028	1.4E-07	3120	1.5E-07	3212	1.7E-07
3032	1.4E-07	3124	1.5E-07	3216	1.7E-07
3036	1.4E-07	3128	1.5E-07	3220	1.7E-07
3040	1.4E-07	3132	1.5E-07	3224	1.7E-07
3044	1.4E-07	3136	1.6E-07	3228	1.7E-07
3048	1.4E-07	3140	1.6E-07	3232	1.7E-07
3052	1.4E-07	3144	1.6E-07	3236	1.7E-07
3056	1.4E-07	3148	1.6E-07	3240	1.7E-07
3060	1.4E-07	3152	1.6E-07	3244	1.7E-07
3064	1.4E-07	3156	1.6E-07	3248	1.7E-07
3068	1.4E-07	3160	1.6E-07	3252	1.7E-07
3072	1.5E-07	3164	1.6E-07	3256	1.7E-07
3076	1.5E-07	3168	1.6E-07	3260	1.8E-07
3080	1.5E-07	3172	1.6E-07	.	.
3084	1.5E-07	3176	1.6E-07	.	.
3088	1.5E-07	3180	1.6E-07	.	.

Lampiran 10D.**Perhitungan *Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)*
Komponen *Heat Exchanger (HE)* Serial Number 5658**

$$w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1} = \frac{13,92}{35303,61} \left(\frac{t}{35303,61} \right)^{13,92-1}$$

Dari persamaan diatas didapatkan hasil sebagai berikut.

T	ROCOF	T	ROCOF	T	ROCOF
.	.	3092	8.54853E-18	3184	1.24856E-17
.	.	3096	8.69251E-18	3188	1.26898E-17
.	.	3100	8.83874E-18	3192	1.2897E-17
3012	6.09261E-18	3104	8.98723E-18	3196	1.31074E-17
3016	6.19798E-18	3108	9.13801E-18	3200	1.33209E-17
3020	6.30503E-18	3112	9.29113E-18	3204	1.35377E-17
3024	6.41378E-18	3116	9.44661E-18	3208	1.37577E-17
3028	6.52426E-18	3120	9.60449E-18	3212	1.3981E-17
3032	6.63649E-18	3124	9.76481E-18	3216	1.42076E-17
3036	6.7505E-18	3128	9.92758E-18	3220	1.44376E-17
3040	6.86632E-18	3132	1.00929E-17	3224	1.4671E-17
3044	6.98396E-18	3136	1.02607E-17	3228	1.4908E-17
3048	7.10347E-18	3140	1.04311E-17	3232	1.51484E-17
3052	7.22486E-18	3144	1.0604E-17	3236	1.53924E-17
3056	7.34816E-18	3148	1.07797E-17	3240	1.56401E-17
3060	7.4734E-18	3152	1.0958E-17	3244	1.58914E-17
3064	7.6006E-18	3156	1.1139E-17	3248	1.61464E-17
3068	7.7298E-18	3160	1.13228E-17	3252	1.64052E-17
3072	7.86103E-18	3164	1.15094E-17	3256	1.66678E-17
3076	7.9943E-18	3168	1.16988E-17	3260	1.69343E-17
3080	8.12966E-18	3172	1.18911E-17	.	.
3084	8.26713E-18	3176	1.20863E-17	.	.
3088	8.40674E-18	3180	1.22844E-17	.	.

Lampiran 10E.**Perhitungan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF)
Komponen *Heat Exchanger* (HE) Serial Number 48-3059**

$$w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} = \frac{23,02}{36720,76} \left(\frac{t}{36720,76}\right)^{23,02-1}$$

Dari persamaan diatas didapatkan hasil sebagai berikut.

T	ROCOF	T	ROCOF	T	ROCOF
.	.	3092	1.35804E-27	3184	2.59004E-27
.	.	3096	1.39726E-27	3188	2.66264E-27
.	.	3100	1.43755E-27	3192	2.73718E-27
3012	7.62474E-28	3104	1.47896E-27	3196	2.81371E-27
3016	7.85085E-28	3108	1.5215E-27	3200	2.89229E-27
3020	8.08336E-28	3112	1.5652E-27	3204	2.97295E-27
3024	8.32242E-28	3116	1.61011E-27	3208	3.05576E-27
3028	8.56823E-28	3120	1.65624E-27	3212	3.14077E-27
3032	8.82096E-28	3124	1.70363E-27	3216	3.22803E-27
3036	9.08079E-28	3128	1.75232E-27	3220	3.31761E-27
3040	9.34792E-28	3132	1.80233E-27	3224	3.40955E-27
3044	9.62255E-28	3136	1.8537E-27	3228	3.50393E-27
3048	9.90486E-28	3140	1.90647E-27	3232	3.60079E-27
3052	1.01951E-27	3144	1.96067E-27	3236	3.70021E-27
3056	1.04934E-27	3148	2.01634E-27	3240	3.80224E-27
3060	1.08E-27	3152	2.07352E-27	3244	3.90696E-27
3064	1.11152E-27	3156	2.13224E-27	3248	4.01443E-27
3068	1.14392E-27	3160	2.19254E-27	3252	4.12471E-27
3072	1.17721E-27	3164	2.25448E-27	3256	4.23789E-27
3076	1.21143E-27	3168	2.31808E-27	3260	4.35402E-27
3080	1.2466E-27	3172	2.38339E-27	.	.
3084	1.28274E-27	3176	2.45046E-27	.	.
3088	1.31988E-27	3180	2.51932E-27	.	.

Lampiran 10F.**Perhitungan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF)
Komponen *Heat Exchanger* (HE) *Serial Number* 5800**

$$w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1} = \frac{10,33}{34101,62} \left(\frac{t}{34101,62} \right)^{10,33-1}$$

Dari persamaan diatas didapatkan hasil sebagai berikut.

T	ROCOF	T	ROCOF	T	ROCOF
.	.	3092	5.68158E-14	3184	7.46918E-14
.	.	3096	5.75052E-14	3188	7.55719E-14
.	.	3100	5.82022E-14	3192	7.64612E-14
3012	4.44889E-14	3104	5.89066E-14	3196	7.73599E-14
3016	4.50432E-14	3108	5.96187E-14	3200	7.82679E-14
3020	4.56036E-14	3112	6.03384E-14	3204	7.91855E-14
3024	4.61703E-14	3116	6.10659E-14	3208	8.01126E-14
3028	4.67432E-14	3120	6.18012E-14	3212	8.10495E-14
3032	4.73225E-14	3124	6.25444E-14	3216	8.19961E-14
3036	4.79082E-14	3128	6.32956E-14	3220	8.29526E-14
3040	4.85004E-14	3132	6.40548E-14	3224	8.3919E-14
3044	4.9099E-14	3136	6.48221E-14	3228	8.48954E-14
3048	4.97043E-14	3140	6.55976E-14	3232	8.5882E-14
3052	5.03162E-14	3144	6.63814E-14	3236	8.68788E-14
3056	5.09349E-14	3148	6.71736E-14	3240	8.78859E-14
3060	5.15603E-14	3152	6.79742E-14	3244	8.89035E-14
3064	5.21926E-14	3156	6.87832E-14	3248	8.99315E-14
3068	5.28317E-14	3160	6.96009E-14	3252	9.09702E-14
3072	5.34779E-14	3164	7.04273E-14	3256	9.20195E-14
3076	5.41311E-14	3168	7.12623E-14	3260	9.30796E-14
3080	5.47914E-14	3172	7.21063E-14	.	.
3084	5.54589E-14	3176	7.29591E-14	.	.
3088	5.61337E-14	3180	7.38209E-14	.	.

Lampiran 11A.

Syntax MATLAB Optimasi Biaya Komponen *Heat Exchanger* (HE)

```

clc;
clear;
Lambda=input('lambda=');
Beta=input('beta=');
Cf=7575.7;
Cp=904.7;
N=1:1:4;
T=1:1:15000;
Tl=length(T);
Nl=length(N);
for a=1:Tl
    t=T(a);
    for b=1:Nl
        n=N(b);
        Rt=(t/Lambda).^Beta;
        at=0;
        bw=0;
        for i=0:(b-1)
            at=at+((b-i)*((Rt^i)/factorial(i))*exp(-1*Rt));
            q=0;
            c=0;
            h=(t-0)/10000;
            Luas=0;
            for p=1:(10000-1)
                ba=(((c/Lambda).^Beta)^i)./factorial(i))*exp(-
                    (c/Lambda).^Beta);
                    d=c+h;

                bb=(((d/Lambda).^Beta)^i)./factorial(i))*exp(-
                    (d/Lambda).^Beta);
                    Luas=Luas+(0.5*(ba+bb)*h);
                    c=d;
            end
            bw=bw+Luas;
        end
        C(a,b)=((Cf*(n-at))+Cp)/bw
    end
end
mesh(C)

```

Lampiran 11B.
Hasil Perhitungan Optimasi Biaya Komponen *Heat Exchanger (HE)* Serial Number 15553

No	<i>T (Flight Hours)</i>	<i>N</i>			
		1	2	3	4
1	1	904.7905	904.7905	904.7905	904.7905
2	2	452.3952	452.3952	452.3952	452.3952
3	3	301.5968	301.5968	301.5968	301.5968
4	4	226.1976	226.1976	226.1976	226.1976
5	5	180.9581	180.9581	180.9581	180.9581
6	.	.	.	.	.
7	.	.	.	.	.
8	.	.	.	.	.
9	9000	0.1005	0.1005	0.1005	0.1005
10	9100	0.0994	0.0994	0.0994	0.0994
11	9200	0.0984	0.0984	0.0984	0.0984
12	9300	0.0973	0.0973	0.0973	0.0973
13	9400	0.0963	0.0963	0.0963	0.0963
14	9500	0.0953	0.0953	0.0953	0.0953
15	9600	0.0943	0.0943	0.0943	0.0943
16	9700	0.0934	0.0934	0.0934	0.0934
17	9800	0.0924	0.0924	0.0924	0.0924
18	9900	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915
19	10000	0.0906	0.0906	0.0906	0.0906
20	10100	0.0898	0.0898	0.0898	0.0898
21	10200	0.0889	0.0889	0.0889	0.0889
22	10300	0.0881	0.0881	0.0881	0.0881
23	10400	0.0874	0.0874	0.0874	0.0874
24	10500	0.0866	0.0866	0.0866	0.0866
25	10600	0.0859	0.0859	0.0859	0.0859
26	10700	0.0852	0.0852	0.0852	0.0852
27	10800	0.0846	0.0846	0.0846	0.0846
28	10900	0.084	0.084	0.084	0.084
29	11000	0.0835	0.0835	0.0835	0.0835

No	<i>T</i> (Flight Hours)	<i>N</i>			
		1	2	3	4
30	11100	0.083	0.083	0.083	0.083
31	11200	0.0826	0.0826	0.0826	0.0826
32	11300	0.0822	0.0822	0.0822	0.0822
33	11400	0.082	0.082	0.082	0.082
34	11500	0.0818	0.0818	0.0818	0.0818
35	11600	0.0818	0.0818	0.0818	0.0818
36	11700	0.0819	0.0819	0.0819	0.0819
37	11800	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821
38	11900	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825
39	12000	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832
40	12100	0.084	0.0841	0.0841	0.0841
41	12200	0.0852	0.0852	0.0852	0.0852
42	12300	0.0867	0.0867	0.0867	0.0867
43	12400	0.0885	0.0886	0.0886	0.0886
44	12500	0.0908	0.091	0.091	0.091
45	12600	0.0936	0.0939	0.0939	0.0939
46	12700	0.097	0.0974	0.0974	0.0974
47	12800	0.101	0.1016	0.1016	0.1016
48	12900	0.1058	0.1066	0.1066	0.1066
49	13000	0.1114	0.1126	0.1126	0.1126
50	.	.	.	.	.
51	.	.	.	.	.
52	.	.	.	.	.

Lampiran 11C.
Hasil Perhitungan Optimasi Biaya Komponen *Heat Exchanger (HE)* Serial Number 17502

No	<i>T (Flight Hours)</i>	<i>N</i>			
		1	2	3	4
1	1	904.7905	904.7905	904.7905	904.7905
2	2	452.3952	452.3952	452.3952	452.3952
3	3	301.5968	301.5968	301.5968	301.5968
4	4	226.1976	226.1976	226.1976	226.1976
5	5	180.9581	180.9581	180.9581	180.9581
6	.	.	.	.	.
7	.	.	.	.	.
8	.	.	.	.	.
9	8000	0.1146	0.1146	0.1146	0.1146
10	8100	0.1135	0.1135	0.1135	0.1135
11	8200	0.1125	0.1125	0.1125	0.1125
12	8300	0.1117	0.1116	0.1116	0.1116
13	8400	0.1109	0.1108	0.1108	0.1108
14	8500	0.1102	0.1102	0.1102	0.1102
15	8600	0.1097	0.1096	0.1096	0.1096
16	8700	0.1093	0.1093	0.1093	0.1093
17	8800	0.1091	0.109	0.109	0.109
18	8900	0.109	0.109	0.109	0.109
19	9000	0.1092	0.1092	0.1092	0.1092
20	9100	0.1097	0.1097	0.1097	0.1097
21	9200	0.1104	0.1104	0.1104	0.1104
22	9300	0.1114	0.1114	0.1114	0.1114
23	9400	0.1127	0.1128	0.1128	0.1128
24	9500	0.1145	0.1146	0.1146	0.1146
25	9600	0.1167	0.1168	0.1168	0.1168
26	9700	0.1194	0.1196	0.1196	0.1196
27	9800	0.1226	0.1229	0.1229	0.1229
28	9900	0.1265	0.1269	0.1269	0.1269
29	10000	0.131	0.1317	0.1317	0.1317

Lampiran 11D.
Hasil Perhitungan Optimasi Biaya Komponen Heat Exchanger (HE) Serial Number 7363

No	T (Flight Hours)	N			
		1	2	3	4
1	1	904.7905	904.7905	904.7905	904.7905
2	2	452.3952	452.3952	452.3952	452.3952
3	3	301.5968	301.5968	301.5968	301.5968
4	4	226.1976	226.1976	226.1976	226.1976
5	5	180.9581	180.9581	180.9581	180.9581
6	.	.	.	.	.
7	.	.	.	.	.
8	.	.	.	.	.
9	11000	0.0971	0.0969	0.0968	0.0968
10	11100	0.0968	0.0965	0.0965	0.0965
11	11200	0.0965	0.0962	0.0962	0.0962
12	11300	0.0962	0.096	0.096	0.096
13	11400	0.096	0.0957	0.0957	0.0957
14	11500	0.0957	0.0955	0.0955	0.0955
15	11600	0.0955	0.0952	0.0952	0.0952
16	11700	0.0953	0.0951	0.095	0.095
17	11800	0.0951	0.0949	0.0949	0.0949
18	11900	0.095	0.0947	0.0947	0.0947
19	12000	0.0948	0.0946	0.0946	0.0946
20	12100	0.0947	0.0945	0.0945	0.0945
21	12200	0.0946	0.0944	0.0944	0.0944
22	12300	0.0946	0.0943	0.0943	0.0943
23	12400	0.0945	0.0942	0.0942	0.0942
24	12500	0.0942	0.0942	0.0942	0.0942
25	12600	0.0944	0.0942	0.0942	0.0942
26	12700	0.0944	0.0942	0.0942	0.0942
27	12800	0.0944	0.0942	0.0942	0.0942
28	12900	0.0945	0.0942	0.0942	0.0942
29	13000	0.0945	0.0943	0.0943	0.0943

Lampiran 11E.
Hasil Perhitungan Optimasi Biaya Komponen *Heat Exchanger (HE) Serial Number 5658*

No	$T (FH)$	N		No	$T (FH)$	N	
		1	2			1	2
1	1	904.7905	904.7905	30	23500	0.0396	0.0396
2	2	452.3952	452.3952	31	23600	0.0395	0.0395
3	3	301.5968	301.5968	32	23700	0.0394	0.0394
4	4	226.1976	226.1976	33	23800	0.0393	0.0393
5	5	180.9581	180.9581	34	23900	0.0393	0.0392
6	.	.	.	35	24000	0.0392	0.0392
7	.	.	.	36	24100	0.0391	0.0391
8	.	.	.	37	24200	0.039	0.039
9	22500	0.0409	0.0408	38	24300	0.039	0.039
10	22600	0.0407	0.0407	39	24400	0.0389	0.0389
11	22700	0.0406	0.0406	40	24500	0.0389	0.0388
12	22800	0.0404	0.0404	41	24600	0.0388	0.0388
13	22900	0.0403	0.0403	42	24700	0.0388	0.0388
14	23000	0.0402	0.0402	43	24800	0.0387	0.0387
15	23100	0.0401	0.0401	44	24900	0.0387	0.0387
16	23200	0.04	0.0399	45	25000	0.0387	0.0387
17	23300	0.0398	0.0398	46	25100	0.0387	0.0387
18	23400	0.0397	0.0397	47	25200	0.0387	0.0387
19	23500	0.0396	0.0396	48	25300	0.0387	0.0387
20	23600	0.0395	0.0395	49	25400	0.0387	0.0387
21	23700	0.0394	0.0394	50	25500	0.0387	0.0387
22	23800	0.0393	0.0393	51	25600	0.0387	0.0387
23	23900	0.0393	0.0392	52	25700	0.0388	0.0388
24	24000	0.0392	0.0392	53	25800	0.0388	0.0388
25	23000	0.0402	0.0402	54	25900	0.0389	0.0389
26	23100	0.0401	0.0401	55	26000	0.0389	0.0389
27	23200	0.04	0.0399	56	.	.	.
28	23300	0.0398	0.0398	57	.	.	.
29	23400	0.0397	0.0397	58	.	.	.

Lampiran 11F.
Hasil Perhitungan Optimasi Biaya Komponen Heat Exchanger (HE) Serial Number 48-3059

No	$T (FH)$	N		No	$T (FH)$	N	
		1	2			1	2
1	1	904.7905	904.7905	30	28100	0.0328	0.0328
2	2	452.3952	452.3952	31	28200	0.0327	0.0327
3	3	301.5968	301.5968	32	28300	0.0326	0.0326
4	4	226.1976	226.1976	33	28400	0.0326	0.0326
5	5	180.9581	180.9581	34	28500	0.0325	0.0325
6	.	.	.	35	28600	0.0325	0.0325
7	.	.	.	36	28700	0.0324	0.0324
8	.	.	.	37	28800	0.0324	0.0324
9	26000	0.0349	0.0349	38	28900	0.0324	0.0324
10	26100	0.0348	0.0348	39	29000	0.0323	0.0323
11	26200	0.0347	0.0347	40	29100	0.0323	0.0323
12	26300	0.0345	0.0345	41	29200	0.0323	0.0323
13	26400	0.0344	0.0344	42	29300	0.0323	0.0323
14	26500	0.0343	0.0343	43	29400	0.0323	0.0323
15	26600	0.0342	0.0342	44	29500	0.0323	0.0323
16	26700	0.0341	0.0341	45	29600	0.0324	0.0324
17	26800	0.034	0.034	46	29700	0.0324	0.0324
18	26900	0.0339	0.0339	47	29800	0.0324	0.0324
19	27000	0.0337	0.0337	48	29900	0.0325	0.0325
20	27100	0.0336	0.0336	49	30000	0.0326	0.0326
21	27200	0.0335	0.0335	50	30100	0.0326	0.0326
22	27300	0.0334	0.0334	51	30200	0.0327	0.0327
23	27400	0.0333	0.0333	52	30300	0.0329	0.0329
24	27500	0.0333	0.0333	53	30400	0.033	0.033
25	27600	0.0332	0.0332	54	30500	0.0331	0.0331
26	27700	0.0331	0.0331	55	30600	0.0333	0.0333
27	27800	0.033	0.033	56	.	.	.
28	27900	0.0329	0.0329	57	.	.	.
29	28000	0.0328	0.0328	58	.	.	.

Lampiran 11G.
Hasil Perhitungan Optimasi Biaya Komponen *Heat Exchanger (HE)* Serial Number 5800

No	$T (FH)$	N		No	$T (FH)$	N	
		1	2			1	2
1	1	904.7905	904.7905	30	20900	0.0456	0.0455
2	2	452.3952	452.3952	31	21000	0.0454	0.0454
3	3	301.5968	301.5968	32	21100	0.0454	0.0453
4	4	226.1976	226.1976	33	21200	0.0453	0.0452
5	5	180.9581	180.9581	34	21300	0.0452	0.0452
6	.	.	.	35	21400	0.0451	0.0451
7	.	.	.	36	21500	0.045	0.045
8	.	.	.	37	21600	0.045	0.0449
9	18800	0.049	0.049	38	21700	0.0449	0.0449
10	18900	0.0488	0.0488	39	21800	0.0449	0.0448
11	19000	0.0486	0.0485	40	21900	0.0448	0.0448
12	19100	0.0483	0.0483	41	22000	0.0448	0.0447
13	19200	0.0482	0.0481	42	22100	0.0447	0.0447
14	19300	0.048	0.0479	43	22200	0.0447	0.0447
15	19400	0.0478	0.0478	44	22300	0.0447	0.0447
16	19500	0.0476	0.0476	45	22400	0.0447	0.0447
17	19600	0.0474	0.0474	46	22500	0.0447	0.0447
18	19700	0.0472	0.0472	47	22600	0.0447	0.0447
19	19800	0.0471	0.0471	48	22700	0.0447	0.0447
20	19900	0.0469	0.0469	49	22800	0.0448	0.0447
21	20000	0.0467	0.0467	50	22900	0.0448	0.0448
22	20100	0.0466	0.0466	51	23000	0.0448	0.0448
23	20200	0.0464	0.0464	52	20900	0.0456	0.0455
24	20300	0.0463	0.0463	53	21000	0.0454	0.0454
25	20400	0.0462	0.0461	54	21100	0.0454	0.0453
26	20500	0.046	0.046	55	21200	0.0453	0.0452
27	20600	0.0459	0.0459	56	.	.	.
28	20700	0.0458	0.0458	57	.	.	.
29	20800	0.0457	0.0456	58	.	.	.

Lampiran 12A. Surat Penerimaan Pengambilan Data dan Penelitian


GMFAeroAsia
GARUDA INDONESIA GROUP

PT. GMF AeroAsia
 Jl. Jenderal Sudirman No. 100
 Jakarta 10110
 Telp. (021) 5200 2000
 Fax. (021) 5200 2001
 www.gmf.aeroasia.com

Kepada Yth:
 Dr. Irhamah, M.Si
 Ketua Jurusan Statistika Institut Teknologi Sepuluh Nopember
 Di tempat

02 Oktober 2015
 TWK/2355/2015
RE : Balasan Permohonan Penelitian

Dengan Hormat,

Menunjuk surat No : 1911/IT2.1.1.3/KM.05.00/2015 dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember perihal Penelitian, dengan ini diberitahukan bahwa pada prinsipnya kami menyetujui permohonan Mahasiswa Bapak/Ibu yaitu :

1. Noorahma Ayuning Tyas

Untuk melaksanakan Penelitian di area GMF AeroAsia terhitung mulai tanggal 05 Oktober 2015 s.d. 28 Desember 2015

Guna ketertiban administrasi, mohon yang bersangkutan memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

1. Hadir di GMF pada hari Selasa atau Kamis sebelum tanggal 05 Oktober 2015 untuk melakukan proses pembuatan ID/Pas Intern GMF.
2. Menyerahkan pas foto ukuran 3x4 dengan latar belakang berwarna merah 2 (dua) lembar.
3. Menyerahkan pas foto ukuran 4x6 dengan latar belakang berwarna merah 1 (satu) lembar.
4. Menyerahkan foto copy Kartu Pelajar/ KTP 2 (dua) lembar.
5. Khusus untuk mahasiswa membawa fotocopy KTP 2 (dua) lembar.
6. Siswa diharuskan berpakaian rapi dan mengikuti ketentuan jam kerja sesuai dengan aturan yang berlaku.
7. Pihak PT. GMF AeroAsia tidak menyediakan fasilitas (akomodasi) selama Penelitian.
8. Pihak PT. GMF AeroAsia tidak memungut biaya pelaksanaan Penelitian.

Demikian kami sampaikan dan terima kasih atas perhatiannya.

Hormat kami,
PT. GMF AeroAsia
GM. Knowledge Management


Ali Hartanto
 GMFAeroAsia
GARUDA INDONESIA GROUP
 Knowledge Management

Lampiran 12B. Surat Izin Publikasi

SURAT KETERANGAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menerangkan bahwa :

1. Mahasiswa Statistika FMIPA-ITS dengan identitas berikut :

Nama : Noorahma Ayuning Tyas

NRP : 1312100002

Telah mengambil data di instansi / perusahaan kami :

Nama Instansi : Garuda Maintenance Facility Aero Asia

Divisi/Bagian : Reliability Engineering Services (TER-1)

Sejak tanggal 5 Oktober 2015 sampai dengan 28 Desember 2015 untuk keperluan Tugas Akhir/Thesis Semester Gasal/Genap* 2015/2016 .

2. Tidak Keberatan/Keberatan* nama perusahaan dicantumkan dalam Tugas Akhir/Thesis mahasiswa Statistika yang akan disimpan di perpustakaan ITS dan dibaca di lingkungan ITS.
3. Tidak Keberatan/Keberatan* bahwa hasil analisis data dari perusahaan dipublikasikan dalam E-journal ITS yaitu Jurnal Sains dan Seni ITS

Cengkareng 18 Desember 2015

Pimpinan Perusahaan



(DIMAEL M SUHABA)

NIP 580 985

*(coret yang tidak perlu)

BIODATA PENULIS



Penulis yang memiliki nama lengkap Noorahma Ayuning Tyas, lahir di Kabupaten Ponorogo pada tanggal 18 November 1993. Penulis yang akrab dipanggil Uti ini merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Ghozali Anwar dan Ibu Siti Asiyah. Pendidikan formal yang telah ditempuh antara lain adalah MI Ma'arif Ngrupit, SMPN 1 Ponorogo, SMAN 1 Ponorogo. Pada tahun 2012 penulis lulus SMA dan melanjutkan pendidikannya di Jurusan Statistika Program Studi S1 Institut

Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) Undangan. Dalam kurun waktu 3,5 tahun penulis menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis lulus S1 dengan Tugas Akhirnya yang berjudul **“Penentuan Kebijakan Waktu Optimum Perbaikan Komponen *Heat Exchanger* (HE) Pesawat Boeing 737-800 dengan Metode *Power Law Proses* di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) Aero Asia”**. Selama menempuh pendidikannya penulis aktif dalam berbagai kegiatan dan organisasi kemahasiswaan antara lain pada tahun 2013-2014 menjadi Staff Kementerian Kesejahteraan Mahasiswa (KESMA) di BEM ITS dan Tim Sekretaris di HIMASTA-ITS, selanjutnya pada tahun 2014-2015 penulis menjadi Wakil Ketua HIMASTA-ITS. Pada tahun 2015 penulis pernah melakukan kerja praktek di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) Aero Asia. Segala saran dan kritik yang membangun untuk Tugas Akhir ini dan bagi yang ingin berdiskusi lebih lanjut dengan penulis mengenai Tugas Akhir ini dapat menghubungi via email ke noorahma12@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)