



TUGAS AKHIR - SS141501

**MENENTUKAN WAKTU PENGGANTIAN KOMPONEN
DALAM MESIN *BOTTOMER* DI PT. INDUSTRI
KEMASAN SEMEN GRESIK (IKSG) MENGGUNAKAN
*POWER LAW PROCESS (PLP)***

**MIFTAHUL INNAYAHTUL HAKIMA
NRP 0621 1645 000 018**

**Dosen Pembimbing
Dra. Wiwiek Setya Winahju, MS
Diaz Fitra Aksioma, M.Si**

**PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN STATISTIKA
FAKULTAS MATEMATIKA, KOMPUTASI DAN SAINS DATA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**



TUGAS AKHIR - SS141501

**MENENTUKAN WAKTU PENGGANTIAN KOMPONEN
DALAM MESIN *BOTTOMER* DI PT. INDUSTRI
KEMASAN SEMEN GRESIK (IKSG) MENGGUNAKAN
*POWER LAW PROCESS (PLP)***

**MIFTAHUL INNAYAHTUL HAKIMA
NRP 0621 1645 000 018**

**Dosen Pembimbing
Dra. Wiwiek Setya Winahju, MS
Diaz Fitra Aksioma, M.Si**

**PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN STATISTIKA
FAKULTAS MATEMATIKA, KOMPUTASI, DAN SAINS DATA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**



FINAL PROJECT - SS141501

**DETERMINE TIME TO REPLACEMENT
COMPONENT IN BOTTOMER MACHINE AT PT.
INDUSTRI KEMASAN SEMEN GRESIK (IKSG)
USING POWER LAW PROCESS (PLP)**

**MIFTAHUL INNAYAHTUL HAKIMA
SN 0621 1645 000 018**

Supervisors

**Dra. Wiwiek Setya Winahju, MS
Diaz Fitra Aksioma, M.Si**

**UNDERGRADUATE PROGRAMME
DEPARTMENT OF STATISTICS
FACULTY OF MATHEMATICS, COMPUTING AND DATA SCIENCE
INSTITUTE TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**

LEMBAR PENGESAHAN

MENENTUKAN WAKTU PENGGANTIAN KOMPONEN DALAM MESIN *BOTTOMER* DI PT. INDUSTRI KEMASAN SEMEN GRESIK (IKSG) MENGGUNAKAN *POWER LAW PROCESS (PLP)*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada

Program Studi Sarjana Departemen Statistika
Fakultas Matematika, Komputasi Dan Sains Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Miftahul Innayahtul Hakima
NRP. 0621 1645 000 018

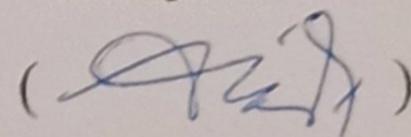
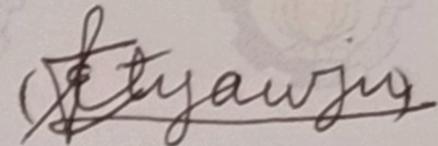
Disetujui oleh Pembimbing:

Dra. Wiwiek Setya Winahju, MS

NIP. 19560424 198303 2 001

Diaz Fitra Aksioma, M.Si

NIP. 19870602 201212 2 002



Mengetahui,
Kepala Departemen



Dr. Suhartono

NIP. 19710929 199512 1 001

SURABAYA, JULI 2018

**MENENTUKAN WAKTU PENGGANTIAN
KOMPONEN DALAM MESIN *BOTTOMER* DI PT.
INDUSTRI KEMASAN SEMEN GRESIK (IKSG)
MENGUNAKAN *POWER LAW PROCESS* (PLP)**

Nama Mahasiswa : Miftahul Innayahtul Hakima
NRP : 0621 1645 000 018
Departemen : Statistika-FMKSD-ITS
Dosen Pembimbing : Dra. Wiwiek Setya Winahju, MS
Diaz Fitria Aksioma, M.Si

Abstrak

PT. IKSG merupakan perusahaan yang memproduksi kemasan semen. Terdapat dua mesin yang digunakan untuk menghasilkan kemasan yaitu mesin Tuber dan Bottomer. Mesin yang sering mengalami kerusakan adalah mesin Bottomer, penelitian berfokus pada komponen dalam mesin Bottomer. Tujuan dari penelitian adalah menentukan waktu penggantian komponen dalam mesin Bottomer menggunakan power law process (PLP), sehingga bisa meminimumkan biaya yang timbul akibat kerusakan. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari bagian maintenance di PT. Industri Kemasan Semen Gresik (IKSG). Data yang digunakan berupa data life time komponen bagian dalam Mesin Bottomer di line satu mulai dari bulan Januari 2015 sampai Nopember 2017. Hasil analisis dilakukan pengecekan setelah kerusakan pertama atau mesin sudah beroperasi selama 20 hari dengan estimasi biaya sebesar Rp 78.468,952/hari. Penggantian komponen Bearing dilakukan setelah 2 kali pengecekan dengan MTTF (Mean Time to Failure) 48 hari. Komponen selain Bearing dilakukan penggantian komponen setelah melakukan 6 kali pengecekan dengan MTTF 128 hari.

Kata kunci: Komponen dalam Mesin Bottomer, MTTF, Life Time, PLP

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**DETERMINE TIME TO REPLACEMENT
COMPONENT IN BOTTOMER MACHINE AT PT
INDUSTRI KEMASAN SEMEN GRESIK (IKSG)
USING POWER LAW PROCESS (PLP)**

Name : Miftahul Innayahtul Hakima
Student Number : 0621 1645 000 018
Department : Statistika-FMKSD-ITS
Supervisors : Dra. Wiwiek Setya Winahju, MS
Diaz Fitria Aksioma, M.Si

Abstract

PT. IKSG is a company that produces cement packaging. There are two machines used to produce packaging of Tuber and Bottomer machines. Machines that are often damaged are Bottomer machines, research focuses on components in Bottomer machines. The purpose of this research is to determine the time of component replacement in Bottom machine using power law prcess (PLP), so it can minimize the cost arising from damage. The data used is secondary data obtained from the maintanance at PT. Industry Kemasan Semen Gresik (IKSG). The data used are life time component data in Bottomer Machine in line one starting from January 2015 until November 2017. The result of analysis checked after the first damage or the machine has been operating for 20 days with estimated cost of Rp 78.468,952/day. Bearing component replacement is done after 2 checked times with MTTF (Mean Time to Failure) 48 days. Components other than Bearings are replaced by 6 parts of checked with 128 days of MTTF.

Keywords: *Components in Bottomer Machines, MTTF, Life Time, PLP*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil‘alamin. Rasa syukur senantiasa penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**MENENTUKAN WAKTU PENGGANTIAN KOMPONEN DALAM MESIN *BOTTOMER* DI PT. INDUSTRI KEMASAN SEMEN GRESIK (IKSG) MENGGUNAKAN *POWER LAW PROCESS (PLP)***” dengan lancar dan tepat waktu. Keberhasilan penyelesaian tugas akhir ini tidak terlepas dari partisipasi dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dra. Wiwiek Setya Winahju, MS serta Diaz Fitra Aksioma, M.Si selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan ilmu, perhatian, bimbingan dan pengarahan dengan begitu baik selama menyelesaikan tugas akhir ini dan semoga senantiasa diberkahi oleh-Nya.
2. Bapak Dr. Suhartono, M.Sc selaku Kepala Departemen Statistika dan Bapak Dr. Sutikno, M.Si selaku Koordinator Program Studi Sarjana Departemen Statistika.
3. Bapak Prof. Drs. Nur Iriawan, Mkom, PhD dan Bu Irhamah, M.Si, PhD selaku dosen penguji yang telah memberikan ilmu, kritik dan saran membangun untuk kesempurnaan tugas akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. Drs. I Nyoman Budiantara, M. Si selaku dosen wali yang selalu memberikan dukungan, semangat dan inspirasinya dalam menjalani perkuliahan.
5. Bapak Yayuk selaku pembimbing lapangan di PT. IKSG dan seluruh pihak PT. IKSG yang telah memberikan kesempatan, pengarahan, ilmu dan bimbingan selama penulis mengerjakan tugas akhir ini.
6. Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan doa, bimbingan, dukungan, kasih sayang serta kesabarannya dalam mendidik baik secara materiil, moril, maupun spiritual.

7. Teman-teman mahasiswa Statistika ITS khususnya teman-teman Lintas Jalur angkatan 2016 dan semua pihak yang telah membantu dalam tugas akhir ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Semoga kebaikan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis dibalas dengan kebaikan yang lebih oleh Allah SWT. Amin. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat baik bagi penulis, pembaca, dan semua pihak.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | v |
| ABSTRAK | vii |
| ABSTRACT | ix |
| KATA PENGANTAR | xi |
| DAFTAR GAMBAR | xv |
| DAFTAR TABEL | xvii |
| LAMPIRAN | xix |
| BAB 1 PENDAHULUAN | |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 4 |
| 1.3 Tujuan..... | 4 |
| 1.4 Manfaat..... | 4 |
| 1.5 Batasan Masalah..... | 4 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA | |
| 2.1 <i>Stochastic Process</i> | 7 |
| 2.2 <i>Power Law Process (PLP)</i> | 8 |
| 2.3 <i>Time Truncated Case dan Failure Truncated Case</i> | 10 |
| 2.4 Pengujian <i>Trend</i> | 11 |
| 2.5 Estimasi Parameter <i>Time Truncated Case</i> | 11 |
| 2.6 <i>Replacement Model</i> | 12 |
| 2.7 <i>Mesin Bottomer</i> | 14 |
| BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN | |
| 3.1 Sumber Data..... | 19 |
| 3.2 Variabel Penelitian..... | 19 |
| 3.3 Langkah Analisis..... | 19 |
| 3.4 Diagram Alir..... | 21 |
| BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN | |
| 4.1 Karakteristik <i>Life Time</i> <i>Mesin Bottomer</i> | 24 |
| 4.2 Pengujian <i>Trend</i> pada Data <i>Life Time</i> | 26 |
| 4.3 Estimasi Parameter dan Grafik <i>ROCOF</i> | 27 |
| 4.4 <i>Replacement Model</i> | 28 |
| BAB 5 Kesimpulan dan Saran | |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 5.1 Kesimpulan..... | 33 |
| 5.2 Saran | 33 |
| DAFTAR PUSTAKA | 35 |
| LAMPIRAN..... | 37 |
| BIODATA PENULIS | |

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|---|----------------|
| Gambar 2.1 <i>Bathtub-Shape</i> | 9 |
| Gambar 2.2 Mesin <i>Bottomer</i> | 17 |
| Gambar 3.1 Diagram Alir | 21 |
| Gambar 4.1 <i>Life Time</i> Komponen Dalam Mesin <i>Bottomer</i> | 24 |
| Gambar 4.2 <i>Life Time</i> Komponen <i>Bearing</i> | 25 |
| Gambar 4.3 <i>Life Time</i> Komponen Selain <i>Bearing</i> | 25 |
| Gambar 4.4 Nilai ROCOF | 28 |
| Gambar 4.5 <i>Replacement Model</i> | 29 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|---|----------------|
| Tabel 3.1 Struktur Data..... | 19 |
| Tabel 4.1 Nilai ROCOF Mesin <i>Bottomer</i> | 27 |
| Tabel 4.2 Estimasi Biaya Kerusakan Mesin <i>Bottomer</i> | 31 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

| | Halaman |
|--|----------------|
| Lampiran 1A Data <i>Life Time</i> Komponen Dalam <i>Bottomer</i> | 37 |
| Lampiran 1B Data <i>Life Time</i> Komponen <i>Bearing</i> | 38 |
| Lampiran 1C Data <i>Life Time</i> Komponen Selain <i>Bearing</i> | 39 |
| Lampiran 2 Pengujian <i>Trend</i> | 40 |
| Lampiran 3 Perhitungan Estimasi Parameter..... | 41 |
| Lampiran 4 Perhitungan <i>ROCOF</i> | 42 |
| Lampiran 5 <i>Syntax</i> Matlab <i>Replacement Model</i> | 43 |
| Lampiran 6 Gambar dan Hasil Perhitungan <i>Replacement</i> | 44 |
| Lampiran 7 Perhitungan Nilai <i>MTTF</i> | 46 |
| Lampiran 8 Pengujian Distribusi | 46 |
| Lampiran 9 Perhitungan <i>MTTF</i> | 47 |
| Lampiran 10 Estimasi Parameter..... | 48 |
| Lampiran 11 Pengujian <i>Trend Laplace</i> dan <i>MIL-HDBK 189</i> ... 51 | 51 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menjaga kelancaran proses produksi merupakan cara yang harus dilakukan oleh perusahaan untuk menjaga kepercayaan konsumen. Cara yang digunakan untuk menjaga kelancaran proses produksi adalah dengan melakukan pemeliharaan pada mesin. Mesin yang bekerja dengan baik akan menghasilkan produk yang diinginkan oleh konsumen, sehingga tidak membuat konsumen kecewa. Berbanding terbalik jika mesin yang digunakan sering mengalami kerusakan, keadaan tersebut membuat hasil produksi tidak maksimal atau tidak sesuai dengan apa yang diharapkan konsumen. Salah satu cara yang digunakan untuk melakukan pemeliharaan mesin adalah dengan mengetahui kapan mesin tersebut harus diberikan perbaikan atau penggantian komponen sebelum rusak. Adanya perbaikan pada komponen yang mengalami kerusakan tidak selamanya efisien. Jika komponen yang rusak telah mengalami perbaikan beberapa kali, maka reliabilitas dari komponen tersebut akan semakin menurun dan laju kerusakannya akan semakin meningkat. Perbaikan yang dilakukan tersebut tidak lagi menjadi ekonomis dan perusahaan akan mengeluarkan biaya yang lebih besar dalam perbaikan komponen yang mengalami kerusakan, sehingga komponen yang rusak akan dibuang dan diganti yang baru (Ebeling, 1997). Menentukan waktu penggantian mesin membutuhkan perhitungan yang tepat menggunakan *replacement model*. *Replacement model* digunakan untuk menentukan waktu komponen atau mesin diberikan penggantian secara berkala setelah periode ke T atau kerusakan ke N setelah instalasi, tergantung mana yang lebih dulu terjadi (Leung & Cheng, 2000).

PT. Industri Kemasan Semen Gresik (IKSG) merupakan anak perusahaan PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk yang didirikan pada bulan Juni 1992 dan mulai beroperasi secara komersil pada tanggal 4 April 1994 dengan bidang usaha pembuatan kemasan industri. Proses produksi dibedakan menjadi dua yaitu proses produksi kemasan jahit dan kemasan lem. Nama produk yang di-

hasilkan dari proses kemasan jahit adalah *Sewn* (Kemasan *Kraft* Jahit) dan nama produk untuk kemasan lem adalah *Pasted Kraft* (Kemasan *Kraft* Lem) dan *Pasted Woven* (Kemasan *Woven* Lem). Perbedaan diantara dua produk kemasan lem adalah bahan yang digunakan, *Pasted Kraft* menggunakan bahan kertas *kraft* sedangkan *Pasted Woven* menggunakan bahan kertas *polypropylene woven*. Terdapat enam line yang digunakan untuk produksi dimana setiap line mempunyai dua mesin yang digunakan yaitu mesin *Tuber* dan *Bottomer*. Produk kemasan semen diproduksi sesuai dengan permintaan konsumen. Enam line yang digunakan memiliki jenis dan tujuan yang berbeda dimana line satu, dua, dan enam memproduksi kemasan isi 40 kg, PPC (jenis semen), Kemasan semen gresik, JTM (Pemasaran Jawa dan Bali), A (kemasan yang diproduksi di Tuban) dengan nama OP (operator), 023 (kode operator), E (kualitas kertas). Line 3 memproduksi kemasan semen Bima, line 4 untuk kemasan Semen Gresik untuk proyek, line 5 isi 50 kg SG. Mesin *Tuber* mempunyai konstruksi mesin yang meliputi *printing machine, paper roll stand, separate roll unit, EPC unit, web draw unit, perforation unit, cross pasting unit, longitudinal pasting, forming unit, cutting unit, delivery conveyor*. Sedangkan mesin *Bottomer* mempunyai konstruksi mesin yaitu *rotary feeder, tube aligning unit, diagonal greasing unit, bottom opening unit, valve unit, bottom pasting unit, bottom forming unit, bottom turning unit, pressing and counting unit, stacking unit, press conveyor, switch conveyor*.

Mesin yang sering mengalami kerusakan adalah mesin *Bottomer* di line satu. Mesin *Bottomer* mempunyai dua bagian komponen yaitu komponen bagian dalam dan komponen bagian luar mesin. Komponen bagian dalam mesin terdiri dari *Bearing, Spring, Pin, Gear, dan Baut*. Bagian luar mesin terdiri dari *Flat Belt, Timing Belt, Transporter Belt, Shaft, Pulley, dan lain-lain*. Pemeliharaan mesin di PT. IKSG adalah dengan melakukan *overhaul* dan melakukan pengecekan komponen sebelum mesin berproduksi setelah tidak beroperasi. *Overhaul* adalah perbaikan atau penggantian komponen setiap satu tahun sekali pada line yang dirasa memerlukan perbaikan atau penggantian. Line yang *overhaul* adalah line yang mempunyai permintaan tinggi. Terdapat perbedaan pemeliharaan antara komponen dalam mesin dan kom-

ponen luar mesin *Bottomer*. Komponen dalam akan dilakukan perbaikan atau penggantian pada komponen rusak maupun tidak rusak, sedangkan komponen luar dilakukan penggantian atau perbaikan bila komponen tersebut mengalami kerusakan. Mesin yang mengalami kerusakan akan membuat produk yang dihasilkan menjadi produk cacat. Cacat pada produk yang sering terjadi diakibatkan oleh lem yang tidak bisa merekat dengan baik, hal tersebut dikarenakan kerusakan komponen dalam mesin. Kerusakan yang terjadi disebabkan perbaikan dan penggantian komponen yang tidak terjadwal. Sehingga penelitian yang dilakukan berfokus pada komponen bagian dalam mesin.

Menentukan waktu yang tepat dalam melakukan penggantian komponen bagian dalam *Bottomer*, sehingga biaya yang dikeluarkan akibat kerusakan komponen menjadi minimum menggunakan metode *Power Law Process* (PLP). PLP atau model *Weibull Process* adalah salah satu model yang digunakan untuk data yang mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* dengan distribusi *Weibull*. *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) disebut dengan *Weibull Process* karena *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) memiliki fungsi *failure rate* yang sama dengan distribusi *Weibull*. *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) merupakan proses *poisson* dengan laju kerusakan tidak konstan (Rigdon & Bosu, 2000). Kerusakan komponen pada mesin *Bottomer* bagian dalam beroperasi mengikuti *Stochastic Process*, karena kerusakan komponen pada mesin *Bottomer* bagian dalam yang terjadi pada interval waktu $[0, t]$ dengan runtutan kejadian yang bersifat tidak pasti.

Penelitian sebelumnya yang menggunakan metode *Power Law Process* dilakukan oleh Tyas (2016) menyatakan bahwa tindakan perbaikan terhadap komponen *Heat Exchanger* (HE) sebaiknya dilakukan pada saat komponen telah beroperasi selama 8900 *flight hours* atau ketika terjadi kerusakan pertama sebelum mencapai waktu operasi 8900 *flight hours* dengan estimasi biaya yang minimum sebesar 0,1090 per *flight hours*. Penelitian yang dilakukan oleh Hidayati (2017) menggunakan dua mesin yaitu mesin HSB *Kazo* dan HSB *By AB*, dengan komponen yang diteliti sama yaitu komponen *Impeler*. Waktu penggantian yang tepat untuk komponen *Impeler* mesin HSB *Kaza* adalah jika kom-

ponen sudah beroperasi selama 601 jam dengan biaya minimum sebesar Rp 93.665,99/jam. Komponen *Impeler* mesin HSB By AB akan diganti setelah beroperasi selama 634 jam dengan biaya minimum sebesar Rp 88.881,61/jam.

1.2 Rumusan Masalah

Kerusakan yang terjadi pada komponen pada mesin *Bottomer* bagian dalam membuat produksi di PT. IKSG menjadi tidak sesuai dengan target produksi. Pemeliharaan mesin adalah dengan melakukan *overhoul* dan melakukan pengecekan komponen sebelum mesin berproduksi setelah tidak beroperasi. *Overhoul* merupakan perbaikan atau penggantian komponen setiap satu tahun sekali akan tetapi tidak semua line dilakukan *overhoul*. Pemeliharaan komponen bagian dalam mesin *Bottomer* yang tidak terjadwal membuat produk yang dihasilkan sering mengalami kerusakan. Salah satunya ditunjukkan dengan lem yang tidak bisa merekatkan kemasan semen dengan baik. Akibat yang ditimbulkan dari kerusakan tersebut adalah biaya produksi yang semakin besar. Dibutuhkan penentuan waktu penggantian komponen pada mesin *Bottomer* bagian dalam yang tepat untuk meminimumkan biaya akibat kerusakan.

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah menentukan waktu penggantian komponen pada mesin *Bottomer* bagian dalam di line satu, sehingga meminimumkan biaya akibat kerusakan komponen tersebut.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diperoleh dari hasil penelitian adalah memberikan tambahan informasi kepada PT. Industri Kemasan Semen Gresik (IKSG) dalam menentukan waktu yang tepat dalam penggantian komponen pada mesin bagian dalam, sehingga biaya akibat dari kerusakan menjadi minimum.

1.5 Batasan Masalah

Data *life time* yang digunakan hanya komponen bagian dalam mesin *Bottomer*. Komponen bagian dalam mesin *Bottomer*

terdiri dari *Bearing*, *Spring*, Pin, *Gear*, dan Baut. Diasumsikan komponen bagian dalam mesin *Bottomer* setelah pemeliharaan mempunyai kinerja seperti terakhir terjadi kerusakan, serta faktor kerusakan pada mesin *Bottomer* hanya disebabkan oleh *life time* dari komponen dalam mesin.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Menentukan waktu perbaikan atau penggantian dan biaya menggunakan *Power Law Process* (PLP) mempunyai beberapa proses yaitu *Stochastic Process*, Pengujian *Trend*, Estimasi Parameter, *Replacement Model*. Penjelasan proses dari PLP adalah sebagai berikut.

2.1 *Stochastic Process*

Jumlah kerusakan sebesar N , dimana N adalah variabel random pada interval waktu $(0, t)$. Proses dari $\{N, t \geq 0\}$ disebut dengan *stochastic process* yang memiliki realisasi berupa *counting process*, yang digunakan untuk mengetahui hubungan dari suatu runtutan peristiwa atau proses kejadian yang bersifat tidak pasti. Proses yang timbul dari pengembangan *stochastic process* dan penelitian tentang strategi penggantian komponen adalah *Renewal Process* dan *Minimal Repair* (Hoyland & Rausand, 2004). Dikatakan *Renewal Process* jika sistem atau komponen rusak akan dilakukan pengembalian kepada kondisi seperti komponen baru (*as good as new*) setelah dilakukan perbaikan. *Minimal Repair* merupakan sistem yang gagal akan berfungsi kembali setelah perbaikan dilakukan dengan kondisi sama dan usia efektif sama seperti pada saat kerusakan terakhir. *Minimal repair* mengasumsikan waktu perbaikan dianggap sangat minimum dan untuk memperoleh model yang fleksibel dari suatu sistem kerusakan yang akan diperbaiki dalam *minimal repair*, maka hanya sebagian kecil proporsi dari unsur-unsur sistem akan diganti pada proses *repair*. Hal ini akan mengondisikan sistem sama seperti sebelum sistem mengalami kerusakan (Rigdon & Basu, 2000).

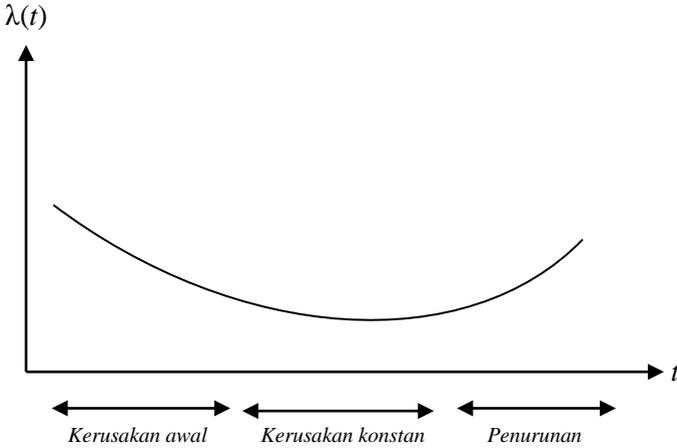
Terdapat dua jenis sistem yaitu *repairable* dan *nonrepairable system*, *repairable system* yaitu sebuah sistem dimana ketika terjadi sebuah kerusakan sistem tersebut dapat diperbaiki dengan beberapa proses perbaikan selain penggantian pada seluruh sistem. Komponen *repairable system* mempunyai dua kemungkinan yaitu mengalami penurunan atau peningkatan laju kerusakan. Penurunan pada *repairable system* memberikan arti bahwa waktu

antar kerusakan cenderung pendek dan peningkatan menunjukkan waktu kerusakan cenderung mempunyai jarak yang jauh. *Non-repairable system* adalah suatu sistem jika mengalami kerusakan harus diganti dengan sistem baru yang artinya sistem tersebut tidak dapat dilakukan perbaikan atau biaya kan lebih mahal ketika diperbaiki dari pada dilakukan penggantian dengan sistem baru (Rigdon & Basu, 2000).

2.2 Power Law Process (PLP)

Proses poisson dibagi menjadi dua yaitu *Homogeneous Poisson process* (HPP) dan *Non-Homogeneous Poisson Processes* (NHPP). HPP adalah proses poisson dengan laju kerusakan komponen atau mesin yang konstan. HPP merupakan salah satu model yang sederhana untuk *repairable system*. Fungsi laju kerusakan yang konstan atau HPP tidak dapat digunakan untuk model sistem yang mengalami penurunan dan peningkatan laju kerusakan dari komponen atau mesin yang digunakan. Distribusi untuk proses poisson yang HPP adalah distribusi eksponensial. Jika waktu kerusakan dari HPP adalah $T_1 < T_2 < \dots < T_n$ maka kondisi dari $T_n = t_n$ adalah random variabel $T_1 < T_2 < \dots < T_{n-1}$ didistribusikan sebagai $n-1$ order statistik dari distribusi uniform dengan interval $(0, t_n)$. NHPP adalah proses poisson dengan laju kerusakan tidak konstan. NHPP menggambarkan proses kerusakan komponen yang memiliki pola tertentu dengan jumlah kumulatif kerusakan hingga waktu t adalah N . Data pengamatan untuk laju kerusakan NHPP adalah *time truncated case* atau *failure truncated case*.

PLP atau proses *Weibull* merupakan salah satu model yang digunakan untuk data yang mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Processes* (NHPP). NHPP biasa disebut dengan *Weibull process*, karena *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) memiliki fungsi *failure rate* yang sama dengan distribusi *Weibull*. 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 *time truncated case* atau *failure truncated case*, maka ROCOF dapat diaplikasikan dengan melihat beberapa kali kerusakan yang terjadi.

Gambar 2.1 *Bathtub-Shape*

Repairable system mempunyai ROCOF yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Kerusakan awal pada waktu t ketika sistem masih baru, ROCOF tinggi dan kerusakan sering terjadi. Setelah kerusakan pada sistem dilakukan perbaikan, ROCOF akan kecil dan sistem akan kembali dapat digunakan. Saat sistem sudah berjalan lama, maka ROCOF meningkat dan sistem mengalami penurunan. *Power Law Process* dapat digunakan jika sistem mengalami penurunan atau peningkatan. Distribusi *Weibull* mempunyai fungsi reliabilitas yang dijelaskan pada Persamaan (2.1) (Rigdon & Basu, 2000).

$$S(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (2.1)$$

t merupakan variabel random dengan fungsi distribusi kumulatif yang dijelaskan pada Persamaan (2.2)

$$F(t) = 1 - S(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (2.2)$$

sehingga didapatkan fungsi densitas, laju kerusakan, dan *Mean Time to Failure* (MTTF) yang dipaparkan pada Persamaan (2.3), Persamaan (2.4), dan Persamaan (2.5).

$$f(t) = F'(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (2.3)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = \frac{\frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]}{\exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]} = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (2.4)$$

$$MTTF = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.5)$$

dimana θ adalah parameter *scale* dan β adalah parameter *shape* (Hoyland & Rausand, 2004).

2.3 Time Truncated Case dan Failure Truncated Case

Terdapat dua jenis data yang digunakan untuk pengamatan yaitu *time truncated case* dan *failure truncated case*. Data dikatakan menjadi *time truncated case* bila pengamatan berhenti setelah ditentukan waktu t . Pengamatan sistem sampai waktu t , menghasilkan jumlah kerusakan sebesar N dimana N adalah variabel random. Jika NHPP dengan laju kerusakan $\lambda(t)$ adalah pengamatan sampai waktu t dan jika waktu kerusakan $T_1 < T_2 < \dots < T_N$ dimana N adalah jumlah kerusakan dalam interval $(0, t)$, dengan kondisi $N = n$ maka variabel random $T_1 < T_2 < \dots < T_n$ didistribusikan sebagai n order statistik.

Suatu pengamatan berhenti setelah ditentukan jumlah kerusakan, maka data dikatakan *failure truncated case* dengan waktu kerusakan $T_1 < T_2 < \dots < T_n$. Jika waktu kerusakan dari NHPP adalah $T_1 < T_2 < \dots < T_n$ dengan kondisi $T_n = t_n$, variabel random $T_1 < T_2 < \dots < T_{n-1}$ didistribusikan sebagai $n-1$ order statistik. Pengamatan kerusakan komponen menggunakan *time truncated case* maka t merupakan *fixed variabel* dan N merupakan variabel random. Sedangkan pengamatan sistem yang menggunakan *failure truncated case* mempunyai nilai t sebagai variabel random dan N sebagai *fixed variabel* (Rigdon & Basu, 2000).

2.4 Pengujian *Trend*

Pengujian *trend* digunakan untuk mengetahui apakah *rate of failure* mengalami peningkatan atau tidak. Peningkatan *rate of failure* (waktu kerusakan) pada sistem mengindikasikan bahwa komponen dalam keadaan yang tidak baik dimana *rate of failure* menunjukkan *life time* suatu mesin. Langkah selanjutnya adalah melakukan analisis data dengan pengujian statistik untuk mengetahui apakah *rate of failure* mengalami kenaikan. Berikut merupakan hipotesis yang digunakan.

H_0 : *Rate of failure* tidak mengalami *trend* atau mengikuti *Homogeneous Poisson Process*.

H_1 : *Rate of failure* mengalami *trend* atau mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process*.

Statistik uji menggunakan *Cramer-von Mises test* dengan rumus yang dipaparkan pada Persamaan (2.6).

$$C_R^2 = \frac{1}{12N} + \sum_{i=1}^N \left(\hat{R}_i - \frac{2i-1}{2N} \right)^2 \quad (2.6)$$

$$\hat{R}_i = \left(\frac{T_i}{t} \right)^{\bar{\beta}} \text{ dan } \bar{\beta} = \frac{N-1}{N} \hat{\beta}$$

keterangan :

\hat{R}_i : *Ratio power transformation*

$\bar{\beta}$: Estimator tidak bias untuk β

$\hat{\beta}$: Estimasi parameter β

Ratio power transformation digunakan untuk tidak mudah menolak H_0 jika data yang digunakan besar dan gagal menolak H_0 jika data yang digunakan kecil. Hasil dari perhitungan menggunakan Persamaan (2.6) dibandingkan dengan nilai tabel $C_{R_{tabel}(n,\alpha)}^2$, H_0 akan ditolak jika C_R^2 lebih kecil $C_{R_{tabel}(n,\alpha)}^2$ (Rigdon & Basu, 2000).

2.5 Estimasi Parameter *Time Truncated Case*

Nilai waktu kerusakan sebesar $T_1 < T_2 < \dots < T_N < t$, pengamatan waktu kerusakan berhenti setelah ditetapkan waktu t , se-

hingga kerusakan ke- N adalah variabel random. *Time truncated case* harus mempertimbangkan keacakan dari N dan keacakan dari waktu kerusakan $t_1 < t_2 < \dots < t_N$. Persamaan *likelihood* untuk *time truncated* didapatkan dari turunan peluang bersama (N, T_1, \dots, T_N) yang dijelaskan pada Persamaan (2.7) (Rigdon & Basu, 2000).

$$f(n, t_1, \dots, t_n) = \begin{cases} f_N(n) f(t_1, \dots, t_n | n), & n \geq 1 \\ f_N(0) & n = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

N merupakan variabel random yang mengikuti distribusi *Poisson* dengan *mean* $\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$ sehingga diberikan pada persamaan (2.8) yang merupakan fungsi densitas ketika kejadian rusak lebih besar sama dengan 1.

$$f_N(n) = \frac{\left[\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]^n \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]}{n!}, \quad n = 0, 1, \dots \quad (2.8)$$

Distribusi $T_1 < T_2 < \dots < T_N$ yang bersyarat n diberikan $N=n$, maka variabel random $T_1 < T_2 < \dots < T_n$ telah didistribusikan sebagai n order statistik dari distribusi *Weibull* dengan CDF (*Cumulative Density Function*) yang dipaparkan pada Persamaan (2.9).

$$G(y) = \begin{cases} 0 & y < 0 \\ \Lambda(y) / \Lambda(t) & 0 \leq y \leq t \\ 1 & y > 1 \end{cases} \quad (2.9)$$

Sehingga untuk *Power Law Process* (PLP) mempunyai CDF

$$\text{yaitu } G(y) = \frac{\left(\frac{y}{\theta}\right)^\beta}{\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} = \left(\frac{y}{t}\right)^\beta, \quad 0 \leq y \leq t. \text{ Fungsi densitas dari } G(y)$$

adalah $g(y) = \frac{\beta}{t} \left(\frac{y}{t}\right)^{\beta-1}$, $0 \leq y \leq t$ diberikan nilai $N=n$ dan $T_1 < T_2 < \dots < T_n$, dengan nilai $n \geq 1$ maka Persamaan 2.7 pada t ber-

syarat n , mempunyai fungsi densitas yang dinyatakan dalam Persamaan (2.10) adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} f(t_1, t_2, \dots, t_n | n) &= n! \prod_{i=1}^n G'(t_i) \\ &= n! \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{t} \left(\frac{t_i}{t} \right)^{\beta-1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

untuk $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t$. Peluang bersama dari N dan $T_1 < T_2 < \dots < T_N$ merupakan model yang digunakan untuk estimasi parameter, dijelaskan pada Persamaan (2.11).

$$\begin{aligned} f(n, t_1, \dots, t_n) &= \frac{\left[\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right]^n \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right]}{n!} n! \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{t} \left(\frac{t_i}{t} \right)^{\beta-1} \\ &= \frac{t^{n\beta}}{\theta^{n\beta}} \frac{\beta^n}{t^n} \left[\prod_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{t} \right) \right]^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \\ &= \frac{\beta^n}{\theta^{n\beta}} \left[\prod_{i=1}^n t_i \right]^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \\ &= \frac{\beta^n}{\theta^n \theta^{n\beta-n}} \left[\prod_{i=1}^n t_i \right]^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \\ &= \frac{\beta^n}{\theta^n \theta^{n(\beta-1)}} \left[\prod_{i=1}^n t_i \right]^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

untuk $n \geq 1$, $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t$ dan jika $n=0$ maka peluang densitas dipaparkan pada Persamaan (2.12).

$$f_N(0) = \exp \left(- \frac{t}{\theta} \right)^\beta \quad (2.12)$$

Persamaan (2.11) dapat diubah ke dalam bentuk fungsi *log-likelihood* pada Persamaan (2.13).

$$\ell(\theta, \beta | n, t) = n \ln \beta - n \ln \theta + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n(\beta - 1) \ln \theta - \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \quad (2.13)$$

Persamaan (2.13) diturunkan terhadap β dan θ , hasil estimasi parameter menggunakan MLE (*Maximum Likelihood Estimation*) dijelaskan pada Persamaan (2.14) dan (2.15).

$$\hat{\theta} = \frac{t}{N^{\frac{1}{\hat{\beta}}}} \quad (2.14)$$

dan

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{t}{T_i}\right)} \quad (2.15)$$

2.6 Replacement Model

Replacement model adalah penggantian mesin atau komponen secara teratur dalam periode ke- T atau pada kerusakan ke- N setelah instalasi, tergantung mana yang lebih dahulu terjadi pertama kali. Mesin hanya mengalami perbaikan minimal pada kerusakan antara penggantian secara berkala, sehingga ROCOF suatu mesin tidak terganggu. Waktu yang dibutuhkan untuk perbaikan dan penggantian diasumsikan dapat diabaikan. Rata-rata waktu penggantian pada Persamaan (2.16) yang dijelaskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} T \Pr\{Y_n > T\} + \int_0^T t d \Pr\{Y_n \leq t\} &= \int_0^T \Pr\{Y_N > t\} dt \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} \int_0^T \frac{[\Lambda(t)]^i}{i!} e^{-\Lambda(t)} dt \end{aligned} \quad (2.16)$$

Asumsi bahwa nilai T dan N adalah *finite* dengan Y_n adalah waktu kerusakan yang terjadi sebelum periode ke- T . Ekspektasi jumlah kerusakan sampai penggantian dijelaskan pada Persamaan (2.17).

$$\sum_{i=0}^{N-1} i \Pr\{N(T) = i\} + N \Pr\{Y_n \leq T\} = N - \sum_{i=0}^{N-1} (N - i) \frac{[\Lambda(T)]^i}{i!} e^{-\Lambda(T)} \quad (2.17)$$

Praktek penggantian dalam periode ke- T atau pada kerusakan ke- N , menggunakan model penggantian yang dirumuskan

oleh Nakagawa dan Kowada (1983), dan Kebijakan penggantian optimal yang berdasarkan dengan meminimumkan ekspektasi biaya jangka panjang yang dijelaskan pada Persamaan (2.18).

$$c(T; N) = \frac{c_f \left[N - \sum_{i=0}^{N-1} (N-i) \frac{[\Lambda(T)]^i}{i!} e^{-\Lambda(T)} \right] + c_p}{\sum_{i=0}^{N-1} \int_0^T \frac{[\Lambda(t)]^i}{i!} e^{-\Lambda(t)} dt} \quad (2.18)$$

dimana $T > 0$, $N = 1, 2, \dots$ dengan nilai c_f adalah *cost of failure* dan c_p adalah *cost of preventive*. Kebijakan penggantian yang optimal untuk setiap jenis komponen ditentukan dengan meminimalkan persamaan $c(T; N)$ yang berhubungan dengan nilai T dan N . Laju kerusakan *Power Law Proses* (PLP) untuk waktu kerusakan *Non-Homogeneous Poisson Process* dinyatakan dalam Persamaan (2.19) sebagai berikut.

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t) = \left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \quad (2.19)$$

dimana parameter $\beta > 0$ dan $\theta > 0$, parameter β menunjukkan sistem yang memburuk seiring dengan bertambahnya waktu. Jika $\beta > 1$ maka laju kerusakan $\lambda(t)$ akan meningkat yang mengindikasikan komponen atau mesin mengalami kerusakan. Nilai $\beta < 1$ menunjukkan laju kerusakan $\lambda(t)$ akan menurun, hal tersebut mengartikan bahwa komponen atau mesin baik untuk digunakan. Nilai $\beta = 1$ menunjukkan waktu kerusakan *Homogeneous Poisson Process* dengan fungsi intensitas $\lambda(t) = 1/\theta$ (Rigdon & Basu, 2000).

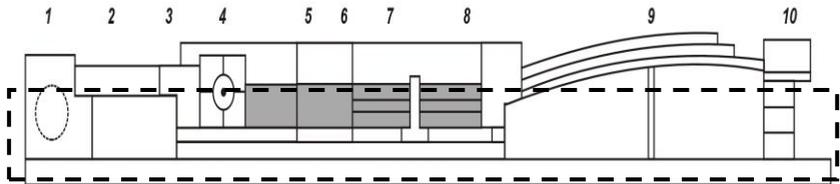
2.7 Mesin Bottomer

Proses produksi yang sering mengalami kendala di PT. IKSG adalah proses produksi kemasan lem. Terdapat enam line dan setiap line mempunyai dua mesin yang digunakan yaitu mesin *Tuber* dan *Bottomer*. Setiap line mempunyai jenis dan tujuan yang berbeda. Line satu, dua, dan enam memproduksi kemasan isi 40 kg, PPC (jenis semen), Kemasan semen gresik, JTM (Pemasaran Jawa dan Bali), A (kemasan yang diproduksi di Tuban) dengan nama OP (operator), 023 (kode operator), E (kualitas ker-

tas). Line 3 memproduksi kemasan semen Bima, line 4 untuk kemasan Semen Gresik untuk proyek, line 5 isi 50 kg SG. Mesin *Tuber* mempunyai konstruksi mesin yang meliputi *printing machine, paper roll stand, separate roll unit, EPC unit, web draw unit, perforation unit, cross pasting unit, longitudinal pasting, forming unit, cutting unit, delivery conveyor*. Sama halnya dengan mesin *Tuber*, mesin *Bottomer* mempunyai konstruksi mesin yaitu *rotary feeder, tube aligning unit, diagonal greasing unit, bottom opening unit, valve unit, bottom pasting unit, bottom forming unit, bottom turning unit, pressing and counting unit, stacking unit, press conveyor, switch conveyor*. Mesin yang sering mengalami kerusakan pada proses produksi kemasan lem adalah mesin *Bottomer* pada line I.

Konstruksi mesin *Bottomer* mempunyai fungsi berbeda-beda yaitu *rotary feeder* yang berfungsi dari peralatan ini mengambil *tube* dari tumpukan satu persatu dan untuk selanjutnya masuk kedalam *Aligning Unit*. *Tube aligning unit* yang digunakan untuk menjamin bahwa masing-masing tube berjalan sepanjang arah yang tetap pada mesin. *Diagonal greasing unit*, alat ini digunakan untuk memberikan lipatan diagonal pada kedua sisi tube agar memudahkan pembukaan dan penutupan bagian atas dan bawah. *Bottom opening unit*, fungsinya untuk membuka bagian *bottom* dari *tube*. Tiap-tiap *tube* dijepit diantara dua *suction bar*, vakum *disupply* pada *cuction bar* melalui *valve* untuk menarik *tube* pada waktu tertentu. *Valve unit* merupakan perlengkapan ini digunakan untuk melekatkan sebuah *Valve Patch* pada setiap *bottom tube*. *Bottom pasting unit* mempunyai fungsi untuk memberikan perekatan pada *bottom tube* yang telah terbuka dan lem tersebut disejajarkan dengan sisi pemotong tersebut. *Bottom forming unit*, mesin ini digunakan untuk mengelem *valve patch*, dilengkapi dengan pelipat tambahan pada bagian bawah, selanjutnya diberikan lem dan menutup *bottom*. *Bottom turning unit* Digunakan untuk bagian horizontal dan vertikal bagian atas dan bawah *tube*. *Pressing and counting unit* berfungsi untuk mengepres penutup atas dan bawah *tube* untuk mencegah agar *tube* tidak terbuka kembali. *Stacking unit*, mesin ini digunakan untuk tempat

penumpukan kantong-kantong yang sudah dihitung. Skema mesin *Bottomer* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.2 Mesin *Bottomer*

Konstruksi pada mesin :

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| 1. <i>Rotary Feeder</i> | 7. <i>Bottom Forming Unit</i> |
| 2. <i>Tube Aligning Unit</i> | 8. <i>Bottom Turning Unit</i> |
| 3. <i>Diagonal Greasing Unit</i> | 9. <i>Pressing dan Counting Unit</i> |
| 4. <i>Bottom Opening Unit</i> | 10. <i>Stacking Unit</i> |
| 5. <i>Valve Unit</i> | 11. <i>Press conveyer</i> |
| 6. <i>Bottom Pasting Unit</i> | 12. <i>Switch conveyer</i> |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sumber Data

Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari bagian *maintanance* di PT. Industri Kemasan Semen Gresik (IKSG). Data yang digunakan berupa data *life time* komponen bagian dalam Mesin *Bottomer* di line satu mulai dari bulan Januari 2015 sampai Nopember 2017. Data *life time* dari komponen mesin dalam *Bottomer* didapatkan dari laporan data kerusakan dengan pencatatan pada satuan hari.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan adalah data *life time* pada komponen bagian dalam mesin *Bottomer* yang ditampilkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Struktur Data

| Kerusakan ke- i | <i>Life Time</i> (1065 Hari) |
|-------------------|------------------------------|
| 1 | T_1 |
| 2 | T_2 |
| 3 | T_3 |
| . | . |
| . | . |
| . | . |
| N | T_N |

Keterangan :

T_1 : Waktu kerusakan pertama pada komponen bagian dalam mesin *Bottomer*.

T_2 : Waktu kerusakan kedua pada komponen bagian dalam mesin *Bottomer*.

T_N : Waktu kerusakan ke- N pada komponen bagian dalam mesin *Bottomer*.

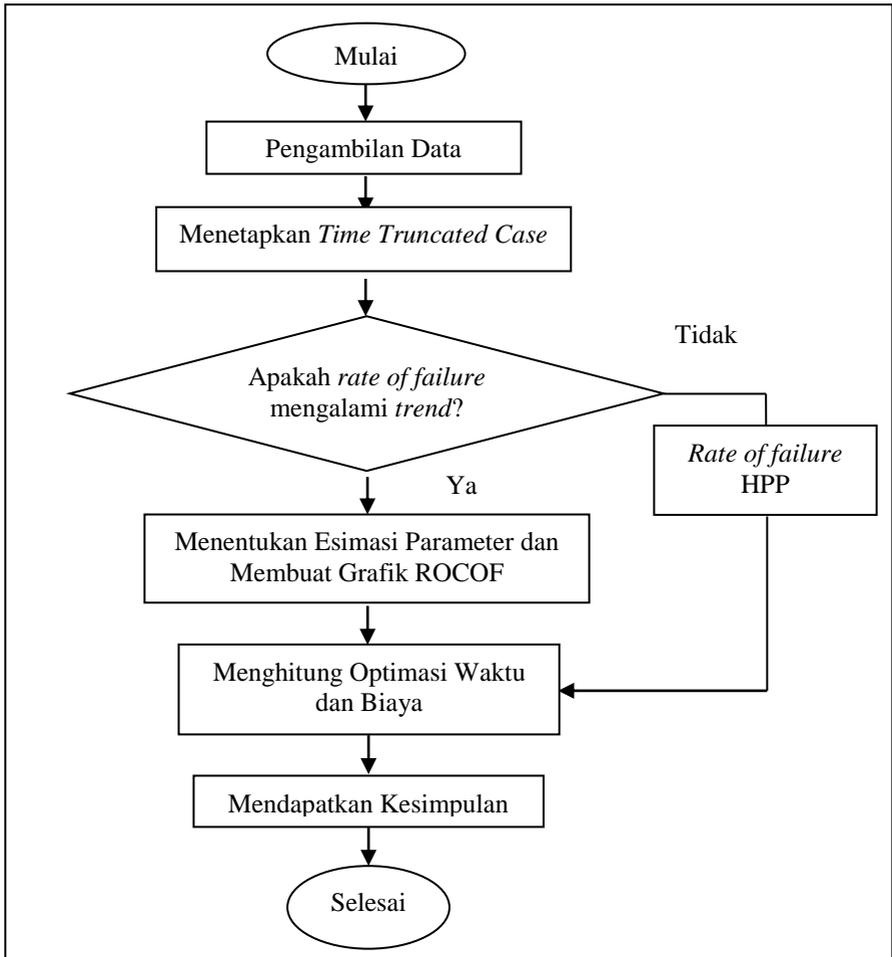
3.3 Langkah Analisis

Langkah analisis yang digunakan dalam menentukan optimasi waktu penggantian komponen bagian dalam mesin *Bottomer* adalah sebagai berikut.

1. Mengumpulkan data *life time* komponen bagian dalam mesin *Bottomer*, *life time* dapat diketahui dari waktu kerusakan komponen bagian dalam mesin *Bottomer*.
2. Menetapkan *time truncated case* untuk pengamatan, *time truncated case* adalah waktu yang diambil untuk penelitian yaitu tiga tahun dari Januari 2015 sampai Nopember 2017.
3. Menguji adanya *trend* dalam *rate of failure* komponen bagian dalam mesin *Bottomer* dengan metode *Cramer-von Mises test* pada persamaan (2.6). Pengujian tersebut digunakan untuk mengetahui apakah *rate of failure* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process*.
4. Menentukan model estimasi parameter *life time* komponen bagian dalam mesin *Bottomer* menggunakan Persamaan (2.15) dan (2.14) dan membuat grafik ROCOF. Grafik ROCOF digunakan untuk mengetahui laju kerusakan komponen bagian dalam mesin *Bottomer*.
5. Mendapatkan model optimasi untuk menentukan waktu penggantian yang meminimumkan biaya kerusakan komponen bagian dalam mesin *Bottomer*, dengan penaksir parameter $\hat{\theta}$ dan $\hat{\beta}$.
 - a. Memperoleh fungsi $\lambda(t)$ atau laju kerusakan terhadap waktu dengan menggunakan persamaan (2.19).
 - b. Menghitung $c(T; N)$ untuk mendapatkan waktu dan biaya yang optimum menggunakan persamaan (2.18).
6. Menarik kesimpulan dari hasil analisis.

3.4 Diagram Alir

Proses analisis dalam penelitian dapat digambarkan dengan diagram alir sebagai berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir (Lanjutan)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

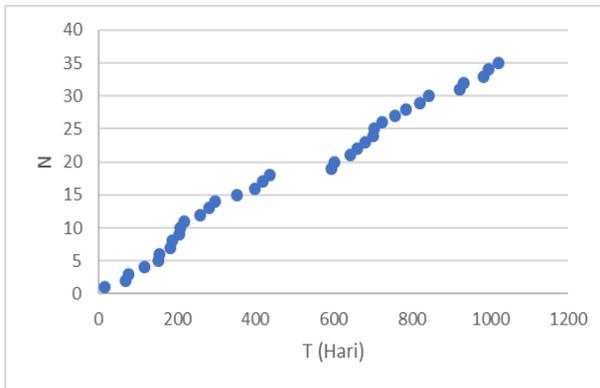
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Produksi yang terdapat pada PT. IKSG tergantung pada permintaan konsumen, sehingga banyaknya produk yang dihasilkan untuk setiap jenis kemasan berbeda. Ada beberapa tipe komponen yang berbeda untuk produk yang berbeda. Proses produksi kemasan yang setengah jadi hasil produksi di mesin *Tuber* akan dilanjutkan ke mesin *Bottomer* untuk menjadi kemasan semen. Mesin *Bottomer* digunakan untuk memberikan lem ke kemasan semen. Mesin yang sering mengalami kerusakan pada saat produksi kemasan semen adalah mesin *Bottomer* di line satu. Kecacatan produk yang sering terjadi disebabkan oleh lem yang tidak merekat dengan baik, sehingga penelitian hanya berfokus pada komponen dalam mesin *Bottomer* karena proses pengeleman menggunakan komponen dalam mesin *Bottomer*. Dibutuhkan pemeliharaan mesin yang tepat untuk meminimumkan produk yang dihasilkan menjadi cacat. Terdapat dua jenis pemeliharaan yaitu melakukan perbaikan atau penggantian pada komponen mesin yang rusak.

Penelitian ini lebih berfokus pada penggantian komponen yang mengalami kerusakan. Terdapat dua macam jenis sistem yaitu *reparable system* dan *non-reparable system*. Mesin *Bottomer* merupakan *reparable system*, karena saat terjadi kerusakan mesin dilakukan proses perbaikan tidak langsung dilakukan penggantian. Perbaikan yang dilakukan terus menerus tidak selamanya efisien, sehingga penggantian merupakan langkah yang didapat dilakukan. Penggantian yang dilakukan membuat mesin *Bottomer* mempunyai kinerja sebelum terjadi kerusakan atau disebut dengan kondisi *as good as new*. Data *life time* yang digunakan untuk penelitian menggunakan *time truncated case*, dengan T yang ditetapkan selama 1065 hari. Berdasarkan penentuan *time truncated case* selama 1065 hari akan diketahui seberapa sering kerusakan yang terjadi di komponen dalam mesin *Bottomer*. Langkah awal untuk melakukan penggantian komponen adalah mengetahui karakteristik kerusakan dari komponen dalam mesin *Bottomer*.

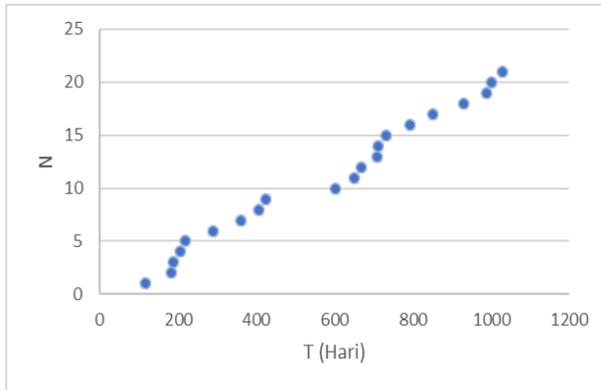
4.1 Karakteristik *Life Time* Komponen Bagian dalam Mesin *Bottomer*

Komponen bagian dalam mesin *Bottomer* mempunyai beberapa komponen yaitu *Bearing*, *Baut*, *Gear*, *Pin*, *Spring*, *Shaft*. Karakteristik *life time* komponen dalam mesin *Bottomer* dapat disajikan secara visual dengan menggambarkan plot antara banyaknya kerusakan dengan waktu kumulatif *life time* komponen bagian dalam mesin *Bottomer*. Sumbu vertikal pada plot *life time* komponen dalam mesin *Bottomer* adalah banyaknya kerusakan, sedangkan sumbu horizontal adalah waktu kumulatif *life time* komponen bagian dalam mesin *Bottomer*.



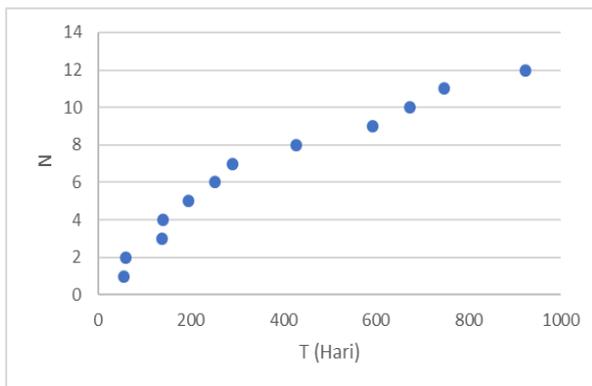
Gambar 4.1 *Life Time* Komponen dalam Mesin *Bottomer*

Karakteristik *life time* komponen dalam mesin *Bottomer* dijelaskan pada Gambar 4.1, yang mengindikasikan bahwa *life time* dari komponen dalam mesin *Bottomer* tetap stabil atau *life time* komponen tidak terdapat *trend* (*Homogeneous Poisson Process*). Dikatakan *Homogeneous Poisson Process* karena Gambar 4.1 mempunyai titik-titik yang membentuk garis linier selama tiga tahun terakhir yaitu dari tahun Januari 2015 sampai Nopember 2017. Gambar 4.1 juga menunjukkan terdapat *life time* dari komponen yang cukup jauh yaitu pada tanggal 26 Maret sampai 30 Agustus 2016, hal tersebut dikarenakan banyak permintaan kemasan produk yang tidak sama sehingga komponen mesin sering dilakukan penggantian.



Gambar 4.2 *Life Time* Komponen *Bearing*

Life time komponen *Bearing* dijelaskan secara visual pada Gambar 4.2. Gambar 4.2 menjelaskan bahwa *life time* komponen *Bearing* membentuk garis linier, sehingga *life time* komponen *Bearing* selama 3 tahun terakhir tetap stabil yaitu dari tahun Januari 2015 sampai Nopember 2017. *Life time* yang diindikasikan stabil menunjukkan bahwa tidak terdapat *trend* atau *Homogeneous Poisson Process* (HPP).



Gambar 4.3 *Life Time* Komponen Selain *Bearing*

Gambar 4.3 menjelaskan bahwa terdapat peningkatan reliabilitas atau keandalan dari kinerja komponen selain *Bearing*. *life time* yang semakin besar mengindikasikan bahwa komponen selain *Bearing* adalah *Non-Homogeneous Poisson Process*. Peningka-

tan keandalan komponen ditunjukkan dengan *life time* yang semakin besar. Hal tersebut digambarkan dengan titik-titik pada Gambar 4.3 yang semakin besar. *Life time* dari komponen yang besar memberikan informasi bahwa pemeliharaan untuk komponen selain *Bearing* sudah bagus.

4.2 Pengujian *Trend* pada Data *Lifetime* Komponen dalam Mesin *Bottomer*

Pengujian *trend* pada data *lifetime* komponen dalam mesin *Bottomer* merupakan langkah awal untuk mengetahui, apakah *lifetime* mesin *Bottomer* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Proses* (NHPP). *Lifetime* dari komponen dalam mesin *Bottomer* dapat diketahui dari data kerusakan komponen dalam mesin *Bottomer*. Pengujian *trend* pada data *life time* menggunakan metode *Cramer-von Mises test*. Pengujian *trend* menggunakan *Cramer-von Mises test* karena metode tersebut tidak mudah untuk menolak H_0 jika data yang digunakan kecil dan gagal menolak H_0 jika data tersebut besar. Hasil perhitungan pengujian *trend* dapat dilihat pada Lampiran 2 dan memberikan kesimpulan tolak H_0 karena nilai *Cramer-von Mises test* (C_R^2) sebesar 0,0477 lebih kecil dari nilai tabel *Cramer-von Mises test* ($C_{R\text{tabel}(n,\alpha)}^2$) sebesar 0,219. Menolak H_0 mempunyai arti bahwa *lifetime* pada komponen dalam mesin *Bottomer* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process*.

Pengujian *trend* pada komponen dalam mesin *Bottomer* mempunyai beberapa metode yaitu *Cramer-von Mises test*, *Laplace test*, *Military Handbook test*. *Laplace test* dan *Military Handbook test* digunakan untuk membandingkan apakah hasil uji yang menggunakan *Cramer-von Mises test* mempunyai hasil yang sama. Pengujian *Laplace test* akan dibandingkan dengan Z_{tabel} , tolak H_0 jika perhitungan *Laplace test* kurang dari -1,96 atau lebih besar dari 1,96. Metode *Military Handbook test* dibandingkan dengan tabel *chi-square*, tolak H_0 jika perhitungan lebih kecil dari 47,092 atau lebih besar dari 95,023. Hasil perhitungan pada Lampiran 11 memberikan kesimpulan bahwa tolak H_0 jika menggunakan metode *Laplace test* dan gagal tolak H_0 untuk metode

Military Handbook test. Terdapat dua metode yang menunjukkan bahwa *life time* dari komponen dalam mesin *Bottomer* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process*, sehingga keputusan yang diambil adalah tolak H_0 . Metode *Laplace test* juga menunjukkan bahwa komponen dalam mesin *Bottomer* mengalami peningkatan *life time* karena -9,685 lebih kecil dari -1,96.

4.3 Estimasi Parameter dan Grafik ROCOF (*Rate of Occurrence of Failure*)

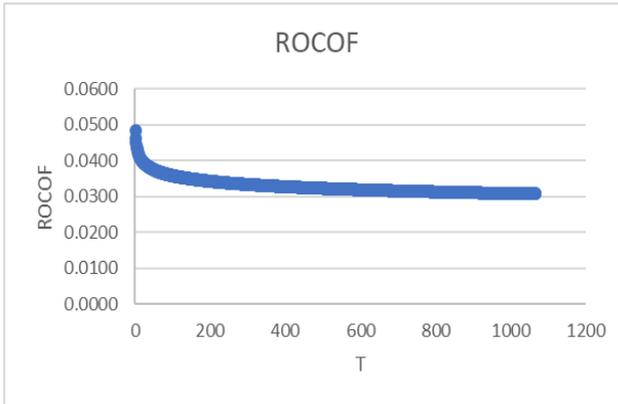
Estimasi parameter untuk *life time* komponen dalam mesin *Bottomer* dapat dihitung dengan Persamaan (2.15) untuk menghitung nilai β dan Persamaan (2.14) untuk nilai θ . Hasil perhitungan menunjukkan nilai parameter β sebesar 0,935 dan parameter θ sebesar 23,762. Perhitungan estimasi parameter dapat dilihat pada Lampiran 3. Parameter β yang lebih kecil dari satu menunjukkan bahwa laju kerusakan mesin dalam *Bottomer* semakin menurun. Setelah mendapatkan nilai parameter, maka nilai tersebut akan digunakan untuk menghitung nilai ROCOF dari komponen dalam mesin *Bottomer*. ROCOF digunakan untuk mengetahui nilai laju kerusakan terhadap waktu untuk *Power Law Process* (PLP). Berikut adalah nilai ROCOF yang dipaparkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nilai ROCOF Komponen dalam Mesin *Bottomer*

| Waktu (Hari) | Nilai ROCOF |
|--------------|-------------|
| 100 | 0,0358 |
| 300 | 0,0334 |
| 500 | 0,0323 |
| 700 | 0,0316 |
| 900 | 0,0311 |
| 1065 | 0,0307 |

Nilai ROCOF pada Tabel 4.1 menunjukkan laju kerusakan dari waktu ke waktu terus mengalami penurunan untuk komponen bagian dalam mesin *Bottomer*. Adanya pola *trend* turun menunjukkan jika semakin kecil laju kerusakan semakin kecil kemungkinan terjadi kerusakan dalam waktu dekat dari kerusakan satu ke kerusakan lainnya. Komponen dalam mesin *Bottomer*, Digambarkan secara detail dari hari pertama sampai hari ke 1065 melalui

plot antara waktu kerusakan (T) dengan nilai ROCOF. Nilai ROCOF dapat dihitung dengan Persamaan (2.4). Berikut penjelasan kerusakan komponen dalam mesin *Bottomer* secara visual.



Gambar 4.4 Nilai ROCOF

Sumbu vertikal pada Gambar 4.4 adalah nilai ROCOF, sedangkan untuk sumbu horizotal merupakan waktu atau *life time* dari komponen dalam mesin *Bottomer*. Gambar 4.4 menunjukkan secara detail nilai laju kerusakan komponen dalam mesin *Bottomer* semakin turun. Hal tersebut menunjukkan bahwa pemeliharaan yang dilakukan untuk komponen dalam mesin *Bottomer* sudah bagus, sehingga kondisi komponen baik untuk melakukan produksi kemasan.

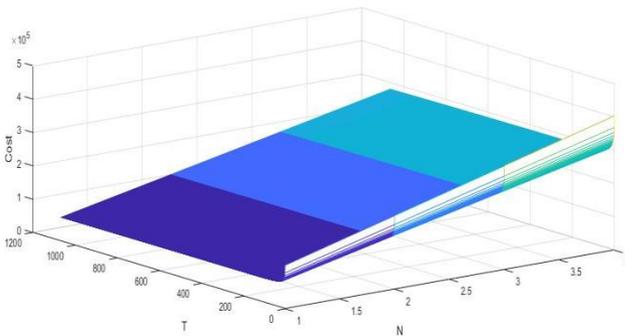
4.4 Replacement Model untuk Komponen dalam Mesin *Bottomer*

Pemeliharaan mesin yang paling diperhatikan adalah biaya yang dikeluarkan untuk proses pemeliharaan. Sehingga dalam *replacement model* akan dihitung waktu yang tepat untuk pemeliharaan komponen dalam mesin *Bottomer*. Terdapat dua biaya yang digunakan untuk *replacement model* yaitu c_p adalah biaya pemeliharaan terencana dan c_f adalah biaya yang dikeluarkan saat mesin mengalami kerusakan. Biaya pemeliharaan terencana didapatkan dari biaya *overhaul*, sedangkan biaya yang dikeluarkan sa-

at mesin rusak dari biaya penggantian komponen dan *lost product* saat mesin mengalami kerusakan. Minimal biaya yang selama ini dikeluarkan pihak PT. IKSG untuk pemeliharaan terencana untuk komponen dalam mesin *Bottomer* sebesar Rp 38.129,342/hari, sedangkan biaya minimal yang harus dikeluarkan saat mesin mengalami kerusakan yaitu sebesar Rp 1.738.350,011/hari. Informasi biaya c_p dan c_f didapatkan dari bagian akuntansi dan *maintenance* PT. IKSG. Nilai c_p dan c_f akan digunakan untuk menghitung *replacement model* dengan persamaan sebagai berikut.

$$c(T; N) = \frac{c_f \left[N - \sum_{i=0}^{N-1} (N-i) \frac{\left[\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right]^i}{i!} e^{-\Lambda(t)} \right] + c_p}{\sum_{i=0}^{N-1} \int_0^T \frac{\left[\left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \right]^i}{i!} e^{-\Lambda(t)} dt}$$

Mendapatkan nilai minimum dari $c(T; N)$ membutuhkan nilai parameter θ dan β , perhitungan nilai parameter menggunakan Persamaan (2.14) dan (2.15) serta hasil perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 3. Data yang digunakan untuk menghitung parameter adalah data kumulatif *life time* (data kerusakan) komponen dalam mesin *Bottomer*. Selain menghitung nilai parameter perlu menentukan waktu (T) dan jumlah kerusakan (N).



Gambar 4.5 *Replacemenet Model Mesin Dalam Bottomer*

Hasil perhitungan dari *replacement model* yang digunakan untuk mendapatkan ekspektasi biaya dari penggantian komponen dalam mesin *Bottomer* dijelaskan pada Gambar 4.5. Gambar 4.5 menunjukkan hasil perhitungan ekspektasi biaya tidak mendapatkan hasil yang minimum, hal tersebut digambarkan dengan grafik yang terus mengalami penurunan. Tidak didapatkannya ekspektasi biaya yang minimum, sehingga langkah selanjutnya adalah menghitung nilai MTTF setiap komponen dan seluruh komponen dalam mesin *Bottomer* serta memilih selisih harga yang dianggap kecil dan sudah *stady state*. MTTF digunakan untuk mengetahui rata-rata kerusakan dari komponen dalam mesin *Bottomer* yang dijelaskan pada Persamaan (2.3).

Hasil perhitungan MTTF untuk seluruh komponen dalam mesin *Bottomer* digunakan untuk waktu pengecekan, sedangkan MTTF setiap komponen digunakan untuk waktu penggantian. Waktu pemeliharaan dapat digunakan untuk melakukan perbaikan atau penggantian ketika komponen dalam mesin *Bottomer* mengalami kerusakan. Ketika komponen mengalami kerusakan maka akan dilakukan pemeliharaan apakah komponen tersebut masih bisa dilakukan perbaikan atau tidak. Perhitungan MTTF untuk setiap komponen menginterpretasikan waktu penggantian yang tepat jika komponen mengalami kerusakan setelah beberapa kali dilakukan perbaikan. *Replacement model* yang dirumuskan oleh Nakagawa dan Kowada yang digunakan pada analisis waktu penggantian komponen dalam mesin *Bottomer* mempertimbangkan waktu kerusakan ke- T atau kejadian ke- N tergantung mana yang terlebih dulu terjadi setelah instalasi. Waktu kerusakan ke- T dan kejadian ke- N pada komponen dalam Mesin *Bottomer* diasumsikan *infinite*, yang disesuaikan dengan periode data yang digunakan. Hasil perhitungan MTTF yang dicantumkan pada Lampiran 7 untuk seluruh komponen dalam mesin *Bottomer* didapatkan hasil MTTF sebesar 24 hari, artinya pengecekan dilakukan sebelum 24 hari karena pada hari ke-24 komponen dianggap sudah mengalami kerusakan. Ekspektasi biaya pada komponen dalam mesin *Bottomer* menggunakan *replacement model* yang menggunakan Persamaan (2.18). Hasil perhitungan ekspektasi biaya

pada komponen dalam mesin *Bottomer*, yang menggunakan Persamaan (2.18) ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Ekspektasi Biaya (Rp) Kerusakan Komponen dalam Mesin *Bottomer*

| Waktu (Hari) | Kerusakan ke- | | | |
|--------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 130392,80 | 221242,18 | 312091,55 | 402940,93 |
| 2 | 107146,12 | 194043,19 | 280940,26 | 367837,33 |
| 3 | 98496,42 | 183180,94 | 267865,45 | 352549,97 |
| 4 | 93753,83 | 176915,90 | 260077,98 | 343240,05 |
| 5 | 90669,45 | 172679,53 | 254689,61 | 336699,70 |
| 6 | 88460,14 | 169548,96 | 250637,78 | 331726,60 |
| : | : | : | : | : |
| 18 | 79110,17 | 155119,12 | 231128,07 | 307137,02 |
| 19 | 78776,67 | 154562,11 | 230347,55 | 306132,99 |
| 20 | 78468,95 | 154045,28 | 229621,61 | 305197,95 |
| 21 | 78183,94 | 153564,12 | 228944,30 | 304324,47 |
| 22 | 77919,07 | 153114,81 | 228310,55 | 303506,29 |
| 23 | 77672,16 | 152694,11 | 227716,05 | 302738,00 |
| 24 | 77441,37 | 152299,23 | 227157,09 | 302014,95 |

Ekspektasi biaya (Rp) kerusakan pada Tabel 4.2 menunjukkan waktu pengecekan komponen bagian dalam mesin *Bottomer* dilakukan sebelum 24 hari yaitu 20 hari atau pengecekan dilakukan setelah kerusakan pertama, pengecekan dilakukan tergantung mana yang terlebih dahulu terjadi antara kerusakan pertama atau setelah beroperasi selama 20 hari. Pengecekan dilakukan 20 hari sekali karena pada hari ke-20 selisih biaya yang dianggap sudah kecil, yaitu sebesar Rp 307,72 dan sudah *steady state* atau Biaya yang dikeluarkan untuk pengecekan jika terjadi kerusakan yaitu sebesar Rp 78.468,952/hari atau Rp 1.569.379 selama 20 hari. Hasil perhitungan yang lengkap dapat dilihat pada Lampiran 6. Waktu penggantian komponen mesin bagian dalam dapat diketahui dengan menghitung nilai MTTF setiap komponen. Perhitungan MTTF setiap komponen mesin dalam *Bottomer* dapat dilihat pada Lampiran 9. Langkah awal untuk menghitung MTTF adalah mengetahui distribusi dari data *life time* setiap komponen bagian dalam mesin *Bottomer*.

Life time komponen bagian dalam mesin dibagi menjadi dua yaitu komponen *Bearing* dan komponen selain *Bearing*. Komponen selain *Bearing* dijadikan menjadi satu data karena jumlah data yang sedikit dan untuk mengetahui pola data *life time*. Hasil uji distribusi menunjukkan bahwa komponen *Bearing* dan komponen selain *Bearing* berdistribusi *Weibull* yang ditampilkan pada Lampiran 8. Setelah mengetahui distribusi yang digunakan, maka akan melakukan estimasi parameter. Hasil estimasi parameter didapatkan nilai β untuk komponen *Bearing* sebesar 49,151 dan θ sebesar 1,063. Komponen selain *Bearing* mempunyai nilai β sebesar 89,16 dan nilai θ sebesar 0,622. Nilai estimasi parameter digunakan untuk menghitung MTTF komponen *Bearing* dan selain *Bearing*. Perhitungan MTTF pada setiap komponen dalam mesin *Bottomer* dapat dilihat pada Lampiran 9. Berdasarkan perhitungan MTTF didapat rata-rata kerusakan dari komponen *Bearing* adalah 48 hari, sehingga dilakukan penggantian setelah 2 kali pengecekan dimana jadwal tersebut terjadi lebih dulu sebelum 48 hari. Rata-rata kerusakan komponen selain *Bearing* adalah 128 hari, sehingga akan dilakukan penggantian setelah 6 kali pengecekan sebelum 128 hari. Gambar 4.5 yang menjelaskan secara visual tentang waktu pengecekan dan penggantian mempunyai interval waktu sebesar 200 hari, hal tersebut tidak dapat menunjukkan secara detail waktu pengecekan dan penggantian maka *time truncated data* akan diperkecil menjadi 50 dan 150 hari dan gambar *replacement model* dapat dilihat pada Lampiran 6.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil analisis menggunakan *Replacement Model* tidak menemukan titik optimum, sehingga interpretasi dari *Replacement Model* menggunakan MTTF atau rata-rata kerusakan. MTTF dibagi menjadi dua yaitu MTTF seluruh komponen dalam mesin *Bottomer* dan MTTF per komponen. Hasil perhitungan MTTF seluruh komponen dalam mesin *Bottomer*, digunakan untuk pengecekan komponen dan MTTF per komponen digunakan untuk waktu penggantian. Waktu pengecekan dan penggantian dilakukan sejak komponen mesin dalam *Bottomer* digunakan atau pada penelitian ini disesuaikan dengan data yang didapat yaitu bulan Januari 2015.

Perhitungan *Replacement Model* memberikan kesimpulan bahwa, waktu pengecekan komponen dalam mesin *Bottomer* dilakukan setelah kerusakan pertama atau mesin sudah beroperasi 20 hari, jika terjadi kerusakan pada hari ke 20 maka ekspektasi biaya yang akan keluar sebesar Rp 1.569.379. Waktu penggantian untuk komponen *Bearing* dilakukan sebelum 48 hari setelah melakukan pengecekan 2 kali, sedangkan untuk komponen selain *Bearing* dilakukan penggantian sebelum 128 hari setelah melakukan pengecekan 6 kali.

5.2 Saran

Saran yang diberikan berdasarkan hasil analisis dan pembahasan adalah faktor kerusakan hanya disebabkan oleh *life time* komponen dalam mesin *Bottomer*, sehingga pada penelitian selanjutnya diharapkan peneliti dapat mencari faktor lain dari kerusakan komponen. Serta melakukan perhitungan pada komponen luar mesin *Bottomer*, agar pemeliharaan yang dilakukan lebih maksimal. Saran untuk pihak perusahaan adalah pencatatan pada komponen yang rusak harus lebih detail untuk tipe dari komponen yang rusak, sehingga tahu komponen mana yang masuk ke dalam komponen dalam mesin atau komponen luar mesin.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Ebeling, C. E. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Singapore: McGraw-Hill Book.
- Hidayati, E. (2017). *Optimasi Penentuan Waktu Penggantian Komponen Impeler pada Mesin Hanger Shot Blast di PT. Barata Indonesia (Persero) Menggunakan Metode Power Law Process (PLP)*. Laporan Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jurusan Statistika, Surabaya.
- Leung, F., & Cheng, A. (2000). Determining Replacement Policies for Bus Engines. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 17, 771-783.
- Nakagawa, T., & Kowada, M. (1983). Analysis of a Systems With Minimal Repair and its Application to Replacement Policy. *European Journal of Operational Research*, 17, 176-182.
- Rausand, M., & Hoyland, A. (2004). *System Reliability Theory Models, Statistical Methods, and Applications* (2nd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Rigdon, S., & Basu, A. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley & Sons.
- Tyas, N. A. (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) Aero Asia*. Laporan Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jurusan Statistika, Surabaya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1A. Data *Life Time* Komponen Dalam *Bottomer*

| <i>i</i> | <i>Life Time</i> | Waktu Kerusakan (T_i) | <i>i</i> | <i>Life Time</i> | Waktu Kerusakan (T_i) |
|----------|------------------|---------------------------|----------|------------------|---------------------------|
| 1 | 15 | 15 | 21 | 42 | 643 |
| 2 | 54 | 69 | 22 | 17 | 660 |
| 3 | 6 | 75 | 23 | 22 | 682 |
| 4 | 42 | 117 | 24 | 20 | 702 |
| 5 | 36 | 153 | 25 | 2 | 704 |
| 6 | 1 | 154 | 26 | 20 | 724 |
| 7 | 28 | 182 | 27 | 32 | 756 |
| 8 | 6 | 188 | 28 | 30 | 786 |
| 9 | 18 | 206 | 29 | 34 | 820 |
| 10 | 3 | 209 | 30 | 23 | 843 |
| 11 | 9 | 218 | 31 | 80 | 923 |
| 12 | 41 | 259 | 32 | 10 | 933 |
| 13 | 23 | 282 | 33 | 49 | 982 |
| 14 | 15 | 297 | 34 | 13 | 995 |
| 15 | 56 | 353 | 35 | 27 | 1022 |
| 16 | 46 | 399 | | | |
| 17 | 19 | 418 | | | |
| 18 | 19 | 437 | | | |
| 19 | 157 | 594 | | | |
| 20 | 7 | 601 | | | |

Lampiran 1B. Data *Life Time* Komponen *Bearing*

| <i>i</i> | <i>Life Time</i> | Waktu Kerusakan (T_i) |
|----------|------------------|---------------------------|
| 1 | 117 | 117 |
| 2 | 65 | 182 |
| 3 | 6 | 188 |
| 4 | 18 | 206 |
| 5 | 12 | 218 |
| 6 | 71 | 289 |
| 7 | 71 | 360 |
| 8 | 46 | 406 |
| 9 | 19 | 425 |
| 10 | 176 | 601 |
| 11 | 49 | 650 |
| 12 | 17 | 667 |
| 13 | 42 | 709 |
| 14 | 2 | 711 |
| 15 | 20 | 731 |
| 16 | 62 | 793 |
| 17 | 57 | 850 |
| 18 | 80 | 930 |
| 19 | 59 | 989 |
| 20 | 13 | 1002 |
| 21 | 27 | 1029 |

Lampiran 1C. Data *Life Time* Komponen Selain *Bearing*

| <i>i</i> | <i>Life Time</i> | Waktu Kerusakan (T_i) |
|----------|------------------|---------------------------|
| 1 | 54 | 54 |
| 2 | 6 | 60 |
| 3 | 78 | 138 |
| 4 | 1 | 139 |
| 5 | 55 | 194 |
| 6 | 57 | 251 |
| 7 | 38 | 289 |
| 8 | 139 | 428 |
| 9 | 164 | 592 |
| 10 | 81 | 673 |
| 11 | 74 | 747 |
| 12 | 177 | 924 |

Lampiran 2. Pengujian *Trend*

| <i>i</i> | <i>Life Time</i> | R_i | $2_i-(1/2n)$ | $(R_i-(2_i-1/2n))^2$ |
|----------|------------------|---------|--------------|----------------------|
| 1 | 15 | 0.02082 | 0.01429 | 0.00004 |
| 2 | 69 | 0.08327 | 0.04286 | 0.00163 |
| 3 | 75 | 0.08982 | 0.07143 | 0.00034 |
| 4 | 117 | 0.13453 | 0.10000 | 0.00119 |
| 5 | 153 | 0.17164 | 0.12857 | 0.00186 |
| 6 | 154 | 0.17266 | 0.15714 | 0.00024 |
| 7 | 182 | 0.20095 | 0.18571 | 0.00023 |
| 8 | 188 | 0.20696 | 0.21429 | 0.00005 |
| 9 | 206 | 0.22488 | 0.24286 | 0.00032 |
| 10 | 209 | 0.22785 | 0.27143 | 0.00190 |
| 11 | 218 | 0.23675 | 0.30000 | 0.00400 |
| 12 | 259 | 0.27686 | 0.32857 | 0.00267 |
| 13 | 282 | 0.29911 | 0.35714 | 0.00337 |
| 14 | 297 | 0.31352 | 0.38571 | 0.00521 |
| 15 | 353 | 0.36678 | 0.41429 | 0.00226 |
| 16 | 399 | 0.40995 | 0.44286 | 0.00108 |
| 17 | 418 | 0.42764 | 0.47143 | 0.00192 |
| 18 | 437 | 0.44526 | 0.50000 | 0.00300 |
| 19 | 594 | 0.58843 | 0.52857 | 0.00358 |
| 20 | 601 | 0.59472 | 0.55714 | 0.00141 |
| 21 | 643 | 0.63235 | 0.58571 | 0.00218 |
| 22 | 660 | 0.64752 | 0.61429 | 0.00110 |
| 23 | 682 | 0.66709 | 0.64286 | 0.00059 |
| 24 | 702 | 0.68484 | 0.67143 | 0.00018 |
| 25 | 704 | 0.68661 | 0.70000 | 0.00018 |
| 26 | 724 | 0.70431 | 0.72857 | 0.00059 |
| 27 | 756 | 0.73252 | 0.75714 | 0.00061 |
| 28 | 786 | 0.75888 | 0.78571 | 0.00072 |
| 29 | 820 | 0.78864 | 0.81429 | 0.00066 |
| 30 | 843 | 0.80870 | 0.84286 | 0.00117 |
| 31 | 923 | 0.87812 | 0.87143 | 0.00004 |
| 32 | 933 | 0.88675 | 0.90000 | 0.00018 |
| 33 | 982 | 0.92895 | 0.92857 | 0.00000 |
| 34 | 995 | 0.94012 | 0.95714 | 0.00029 |
| 35 | 1022 | 0.96326 | 0.98571 | 0.00050 |

$$\bar{\beta} = \frac{N-1}{N} \hat{\beta} = 0,9083$$

Lampiran 3. Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan MLE pada Komponen Dalam Mesin *Bottomer*

| i | T_i | $\ln\left(\frac{t}{t_i}\right)$ | i | T_i | $\ln\left(\frac{t}{t_i}\right)$ |
|-----|-------|---------------------------------|-----|-------|---------------------------------|
| 1 | 15 | 4.26268 | 21 | 643 | 0.504585 |
| 2 | 69 | 2.736624 | 22 | 660 | 0.47849 |
| 3 | 75 | 2.653242 | 23 | 682 | 0.4457 |
| 4 | 117 | 2.208556 | 24 | 702 | 0.416797 |
| 5 | 153 | 1.940292 | 25 | 704 | 0.413952 |
| 6 | 154 | 1.933777 | 26 | 724 | 0.385939 |
| 7 | 182 | 1.766723 | 27 | 756 | 0.342689 |
| 8 | 188 | 1.734288 | 28 | 786 | 0.303773 |
| 9 | 206 | 1.642854 | 29 | 820 | 0.261426 |
| 10 | 209 | 1.628396 | 30 | 843 | 0.233763 |
| 11 | 218 | 1.586235 | 31 | 923 | 0.143101 |
| 12 | 259 | 1.413902 | 32 | 933 | 0.132325 |
| 13 | 282 | 1.328823 | 33 | 982 | 0.081139 |
| 14 | 297 | 1.276998 | 34 | 995 | 0.067987 |
| 15 | 353 | 1.104262 | 35 | 1022 | 0.041213 |
| 16 | 399 | 0.981769 | | | |
| 17 | 418 | 0.935249 | | | |
| 18 | 437 | 0.890797 | | | |
| 19 | 594 | 0.583851 | | | |
| 20 | 601 | 0.572135 | | | |

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{t}{t_i}\right)} = \frac{35}{37,4343} = 0,935$$

$$\hat{\theta} = \frac{t}{N^{\frac{1}{\hat{\beta}}}} = \frac{1065}{35^{1/0,935}} = 23,762$$

Lampiran 4. Perhitungan ROCOF Komponen dalam Mesin *Bottomer*

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} = \frac{0,935}{23,762} \left(\frac{t}{23,762}\right)^{0,935-1}$$

| T_i | ROCOF | T_i | ROCOF | T_i | ROCOF |
|-------|-------------|-------|----------|-------|----------|
| 1 | 0.048348509 | 31 | 0.038672 | 61 | 0.037007 |
| 2 | 0.046217589 | 32 | 0.038593 | 62 | 0.036968 |
| 3 | 0.045014889 | 33 | 0.038515 | 63 | 0.036929 |
| 4 | 0.044180588 | 34 | 0.038441 | 64 | 0.036892 |
| 5 | 0.043544118 | 35 | 0.038368 | : | : |
| 6 | 0.043030896 | 36 | 0.038298 | 1041 | 0.030772 |
| 7 | 0.042601695 | 37 | 0.03823 | 1042 | 0.03077 |
| 8 | 0.042233366 | 38 | 0.038164 | 1043 | 0.030768 |
| 9 | 0.041911121 | 39 | 0.038099 | 1044 | 0.030767 |
| 10 | 0.041624947 | 40 | 0.038037 | 1045 | 0.030765 |
| 11 | 0.041367755 | 41 | 0.037976 | 1046 | 0.030763 |
| 12 | 0.041134345 | 42 | 0.037916 | 1047 | 0.030761 |
| 13 | 0.040920792 | 43 | 0.037858 | 1048 | 0.030759 |
| 14 | 0.040724061 | 44 | 0.037802 | 1049 | 0.030757 |
| 15 | 0.040541759 | 45 | 0.037746 | 1050 | 0.030755 |
| 16 | 0.040371966 | 46 | 0.037693 | 1051 | 0.030753 |
| 17 | 0.040213118 | 47 | 0.03764 | 1052 | 0.030751 |
| 18 | 0.040063924 | 48 | 0.037588 | 1053 | 0.030749 |

| T_i | ROCOF | T_i | ROCOF | T_i | ROCOF |
|-------|-------------|-------|----------|-------|----------|
| 19 | 0.039923308 | 49 | 0.037538 | 1054 | 0.030747 |
| 20 | 0.039790363 | 50 | 0.037489 | 1055 | 0.030746 |
| 21 | 0.039664317 | 51 | 0.03744 | 1056 | 0.030744 |
| 22 | 0.039544507 | 52 | 0.037393 | 1057 | 0.030742 |
| 23 | 0.039430362 | 53 | 0.037347 | 1058 | 0.03074 |
| 24 | 0.039321384 | 54 | 0.037302 | 1059 | 0.030738 |
| 25 | 0.039217139 | 55 | 0.037257 | 1060 | 0.030736 |
| 26 | 0.039117243 | 56 | 0.037213 | 1061 | 0.030734 |
| 27 | 0.039021358 | 57 | 0.037171 | 1062 | 0.030732 |
| 28 | 0.038929183 | 58 | 0.037129 | 1063 | 0.03073 |
| 29 | 0.038840449 | 59 | 0.037087 | 1064 | 0.030729 |
| 30 | 0.038754916 | 60 | 0.037047 | 1065 | 0.030727 |

Lampiran 5. Syntax Matlab Replacement Model

```

clc;
clear;
teta=input('teta= ');
beta=input('beta=');
cf=1738350.011;
cp=38129.342;
N=1:1:4;
T=1:1:1065;
T1=length(T);
N1=length(N);
for a=1:T1
    t=T(a);
    n=N;
    Rt=(t/teta)^beta;
    at=0;
    for i=0:(N-1)
        at=at+((N-i)*((Rt^i)/factorial(i))*exp(-1*Rt));
        bw=0;
    end
end

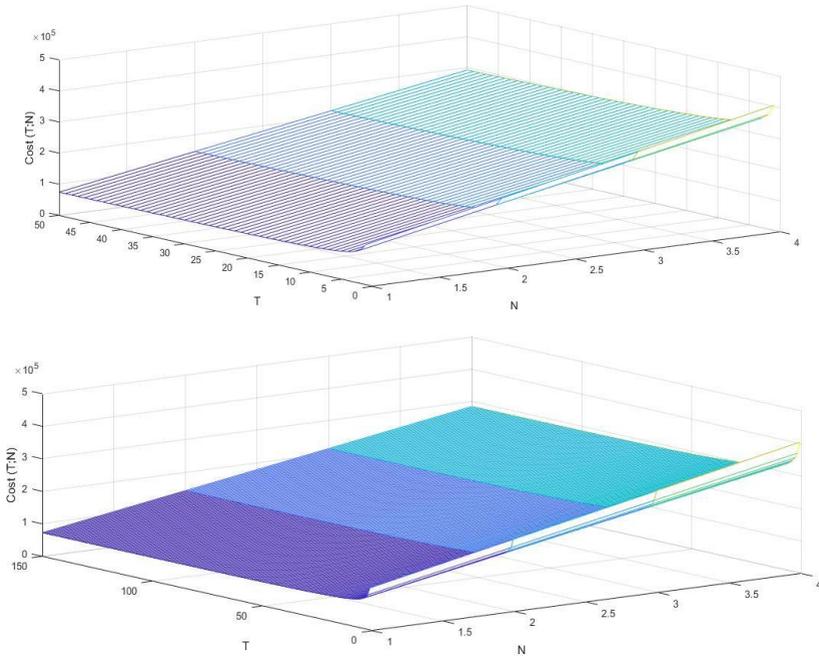
```

```

c=0;
h=(t-0)/100;
Luas=0;
for p=1:(100-1)
bb=(((c/teta)^beta)^i)/factorial(i)*exp(-(c/teta)^beta)
d=c+h;
ba=(((d/teta)^beta)^i)/factorial(i)*exp(-(d/teta)^beta)
Luas=Luas+(0.5*(bb+ba)*h);
c=d;
end
bw=bw+Luas;
end
C(a,N)=((cf*(n-at))+cp)/bw;
end
mesh(C)

```

Lampiran 6. Gambar dan Hasil Perhitungan *Replacement Model*



| C(T;N) | | | | | | | |
|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|
| | Selisih Harga | | Selisih Harga | | Selisih Harga | | Selisih Harga |
| 130392.8 | | 221242.2 | | 312091.6 | | 402940.9 | |
| 107146.1 | 23246.68 | 194043.2 | 27198.99 | 280940.3 | 31151.29 | 367837.3 | 35103.60 |
| 98496.42 | 8649.70 | 183180.9 | 10862.25 | 267865.5 | 13074.81 | 352550 | 15287.36 |
| 93753.83 | 4742.59 | 176915.9 | 6265.03 | 260078 | 7787.47 | 343240.1 | 9309.92 |
| 90669.45 | 3084.38 | 172679.5 | 4236.37 | 254689.6 | 5388.36 | 336699.7 | 6540.36 |
| 88460.14 | 2209.31 | 169549 | 3130.57 | 250637.8 | 4051.83 | 331726.6 | 4973.09 |
| 86776.54 | 1683.60 | 167101.4 | 2447.59 | 247426.2 | 3211.58 | 327751 | 3975.56 |
| : | : | : | : | : | : | : | : |
| 80306.69 | 483.15 | 157091.2 | 784.86 | 233875.8 | 1086.56 | 310660.3 | 1388.26 |
| 79870.13 | 436.57 | 156376.4 | 714.82 | 232882.7 | 993.07 | 309389 | 1271.32 |
| 79473.15 | 396.98 | 155721.7 | 654.70 | 231970.3 | 912.42 | 308218.8 | 1170.15 |
| 79110.17 | 362.98 | 155119.1 | 602.59 | 231128.1 | 842.20 | 307137 | 1081.80 |
| 78776.67 | 333.50 | 154562.1 | 557.01 | 230347.6 | 780.52 | 306133 | 1004.02 |
| 78468.95 | 307.72 | 154045.3 | 516.83 | 229621.6 | 725.94 | 305197.9 | 935.04 |
| 78183.94 | 285.01 | 153564.1 | 481.17 | 228944.3 | 677.32 | 304324.5 | 873.47 |
| 77919.06 | 264.87 | 153114.8 | 449.31 | 228310.5 | 633.75 | 303506.3 | 818.19 |
| 77672.16 | 246.91 | 152694.1 | 420.70 | 227716 | 594.50 | 302738 | 768.29 |
| 77441.37 | 230.79 | 152299.2 | 394.87 | 227157.1 | 558.96 | 302015 | 723.04 |
| 77225.12 | 216.25 | 151927.8 | 371.44 | 226630.5 | 526.64 | 301333.1 | 681.83 |
| 77022.03 | 203.09 | 151577.7 | 350.11 | 226133.3 | 497.12 | 300689 | 644.14 |
| 76830.92 | 191.12 | 151247.1 | 330.60 | 225663.3 | 470.08 | 300079.4 | 609.56 |
| : | : | : | : | : | : | : | : |
| 71133.51 | 2.40 | 140740.3 | 4.74 | 210347 | 7.08 | 279953.7 | 9.43 |
| 71131.12 | 2.40 | 140735.5 | 4.74 | 210339.9 | 7.09 | 279944.3 | 9.44 |
| 71128.72 | 2.40 | 140730.8 | 4.75 | 210332.8 | 7.10 | 279934.9 | 9.44 |
| 71126.31 | 2.40 | 140726 | 4.75 | 210325.7 | 7.10 | 279925.4 | 9.45 |
| 71123.91 | 2.40 | 140721.3 | 4.75 | 210318.6 | 7.11 | 279916 | 9.46 |

Lampiran 7. Perhitungan Nilai MTTF Komponen dalam Mesin *Bottomer*

$$\begin{aligned}
 MTTF &= \theta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \\
 &= 23,762 \Gamma \left(1 + \frac{1}{0,935} \right) \\
 &= 24,509
 \end{aligned}$$

Lampiran 8. Pengujian Distribusi Komponen dalam Mesin *Bottomer*

Komponen *Bearing*

| Weibull [#58] | | | | | |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Kolmogorov-Smirnov | | | | | |
| Sample Size | 21 | | | | |
| Statistic | 0.14236 | | | | |
| P-Value | 0.73651 | | | | |
| Rank | 20 | | | | |
| α | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |
| Critical Value | 0.22617 | 0.25858 | 0.28724 | 0.32104 | 0.34427 |
| Reject? | No | No | No | No | No |
| Anderson-Darling | | | | | |
| Sample Size | 21 | | | | |
| Statistic | 0.40204 | | | | |
| Rank | 17 | | | | |
| α | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |
| Critical Value | 1.3749 | 1.9286 | 2.5018 | 3.2892 | 3.9074 |
| Reject? | No | No | No | No | No |

Komponen Selain *Bearing*

| Weibull [#59] | | | | | |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Kolmogorov-Smirnov | | | | | |
| Sample Size | 12 | | | | |
| Statistic | 0.2781 | | | | |
| P-Value | 0.25926 | | | | |
| Rank | 37 | | | | |
| α | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |
| Critical Value | 0.29577 | 0.33815 | 0.37543 | 0.41918 | 0.44905 |
| Reject? | No | No | No | No | No |
| Anderson-Darling | | | | | |
| Sample Size | 12 | | | | |
| Statistic | 1.0513 | | | | |
| Rank | 25 | | | | |
| α | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |
| Critical Value | 1.3749 | 1.9286 | 2.5018 | 3.2892 | 3.9074 |
| Reject? | No | No | No | No | No |

Lampiran 9. Perhitungan MTTF Komponen *Bearing* dan Selain *Bearing*Komponen *Bearing*

Weibull

α 1.0626

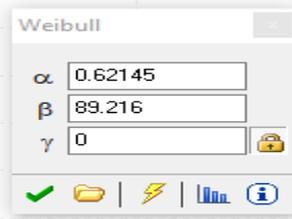
β 49.151

γ 0

✓ | 📁 | ⚡ | 📊 | ⓘ

$$\begin{aligned}
 MTTF &= \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\
 &= 49,151 \Gamma\left(1 + \frac{1}{1,0626}\right) \\
 &= 47,990
 \end{aligned}$$

Komponen Selain *Bearing*



$$\begin{aligned}
 MTTF &= \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\
 &= 89,216 \Gamma\left(1 + \frac{1}{0,62145}\right) \\
 &= 128,4264
 \end{aligned}$$

Lampiran 10. Estimasi Parameter Menggunakan *Maximum Likelihood Estimation*

$$\ell(\theta, \beta | n, t) = n \ln \beta - n \ln \theta + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n(\beta - 1) \ln \theta - \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}$$

$$\frac{\partial \ell(\theta, \beta | n, t)}{\partial \theta} = -\frac{n}{\theta} - \frac{n(\beta - 1)}{\theta} - \beta \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta - 1} (t\theta^{-1})$$

$$0 = -\frac{n}{\theta} - \frac{n(\beta - 1)}{\theta} - \beta \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta - 1} (-t\theta^{-2})$$

$$0 = -\frac{n}{\theta} - \frac{n(\beta - 1)}{\theta} + \beta \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta - 1} \left(\frac{t}{\theta^2}\right)$$

$$0 = -\frac{n}{\theta} - \frac{n(\beta-1)}{\theta} + \beta \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \left(\frac{\theta}{t}\right) \left(\frac{t}{\theta^2}\right)$$

$$0 = -\frac{n}{\theta} - \frac{n(\beta-1)}{\theta} + \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$$

$$0 = -\frac{n}{\theta} - \frac{n\beta}{\theta} + \frac{n}{\theta} + \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$$

$$0 = -\frac{n\beta}{\theta} + \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$$

$$0 = \frac{\beta}{\theta} \left(-n + \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \right)$$

$$n = \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$$

$$\sqrt[\beta]{n} = \sqrt[\beta]{\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}$$

$$n^{\frac{1}{\beta}} = \frac{t}{\theta}$$

$$\theta = \frac{t}{n^{\frac{1}{\beta}}}$$

$$\hat{\theta} = \frac{t}{N^{\frac{1}{\beta}}}$$

$$\ell(\theta, \beta | n, t) = n \ln \beta - n \ln \theta + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n(\beta - 1) \ln \theta - \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$$

$$\frac{\partial \ell(\theta, \beta | n, t)}{\partial \beta} = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n \ln \theta - \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \ln\left(\frac{t}{\theta}\right)$$

$$0 = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n \ln \frac{t}{n^\beta} - \left(\frac{t}{n^\beta}\right)^\beta \ln\left(\frac{t}{n^\beta}\right)$$

$$0 = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n \ln\left(\frac{t}{n^\beta}\right) - n \ln\left(n^{\frac{1}{\beta}}\right)$$

$$0 = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n \left(\ln t - \ln n^{\frac{1}{\beta}}\right) - \frac{n}{\beta} \ln n$$

$$0 = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n \ln t + \frac{n}{\beta} \ln n - \frac{n}{\beta} \ln n$$

$$0 = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n \ln t$$

$$0 = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - \sum_{i=1}^n \ln t$$

$$0 = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{t_i}{t}\right)$$

$$0 = \frac{n}{\beta} - \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{t}{t_i}\right)$$

$$-\frac{n}{\beta} = -\sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{t}{t_i}\right)$$

$$\beta = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{t}{t_i}\right)}$$

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{t}{T_i}\right)}$$

Lampiran 11. Pengujian *Trend* Menggunakan *Laplace* dan *MIL-HDBK 189 test*

Laplace test

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n T_i / n - t/2}{t / \sqrt{12n}} = \frac{1022/35 - 1065/2}{1065 / \sqrt{12 \times 35}} = -9,685$$

MIL-HDBK 189 test (*Military Handbook Test*)

$$Z = 2 \sum_{i=1}^N \ln \frac{T_N}{T_i} = 74,869$$

$$T_N = 1065$$

| T_i | $\ln (T_N / T_i)$ |
|-------|-------------------|
| 15 | 4.2627 |
| 69 | 2.7366 |
| 75 | 2.6532 |
| 117 | 2.2086 |
| 153 | 1.9403 |
| 154 | 1.9338 |
| 182 | 1.7667 |
| 188 | 1.7343 |
| 206 | 1.6429 |
| 209 | 1.6284 |
| 218 | 1.5862 |
| 259 | 1.4139 |
| 282 | 1.3288 |
| 297 | 1.2770 |
| 353 | 1.1043 |

| T_i | $\ln(T_N/T_i)$ |
|-------|----------------|
| 399 | 0.9818 |
| 418 | 0.9352 |
| 437 | 0.8908 |
| 594 | 0.5839 |
| 601 | 0.5721 |
| 643 | 0.5046 |
| 660 | 0.4785 |
| 682 | 0.4457 |
| 702 | 0.4168 |
| 704 | 0.4140 |
| 724 | 0.3859 |
| 756 | 0.3427 |
| 786 | 0.3038 |
| 820 | 0.2614 |
| 843 | 0.2338 |
| 923 | 0.1431 |
| 933 | 0.1323 |
| 982 | 0.0811 |
| 995 | 0.0680 |
| 1022 | 0.0412 |

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Sukoharjo dengan nama lengkap Miftahul Innayahtul Hakima dan biasa dipanggil Ima. Penulis merupakan anak ketiga dari pasangan Bapak Wiranto dan Ibu Soemarni. Pendidikan formal yang ditempuh penulis adalah MI Masyariah Peterongan, SMP Muhammadiyah 1 Jombang, dan SMA Muhammadiyah 1 Jombang. Pada tahun 2012 penulis diterima di Departemen Statistika ITS program studi D-III. Setelah lulus pada tahun 2015, penulis melanjutkan program studi Lintas Jalur (LJ) pada tahun 2016 di Departemen Statistika ITS. Bagi pembaca yang ingin berdiskusi, memberikan saran, maupun kritik tentang Tugas Akhir ini dapat disampaikan melalui email miftahulhakima@gmail.com. Terima kasih.