



TUGAS AKHIR - KM184801

**PENENTUAN ESTIMASI SISA UMUR *HIGH PRESSURE BOILER FEED PUMP* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FAKTOR PEMELIHARAAN DI PT X**

**DIAN WULANDARI**  
**0611164000024**

Dosen Pembimbing  
Dr. Valeriana Lukitosari, S.Si, MT

Departemen Matematika  
Fakultas Sains dan Analitika Data  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020



**TUGAS AKHIR– SM141501**

**PENENTUAN ESTIMASI SISA UMUR *HIGH PRESSURE BOILER FEED PUMP* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FAKTOR PEMELIHARAAN DI PT X**

DIAN WULANDARI  
NRP. 0611164000024

Dosen Pembimbing  
Dr. Valeriana Lukitosari, S.Si, MT

**DEPARTEMEN MATEMATIKA**  
Fakultas Sains dan Analitika Data  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



**FINAL PROJECT– SM141501**

***DETERMINATION OF HIGH PRESSURE BOILER FEED  
PUMP RESIDUAL LIFE ESTIMATION BY CONSIDERING  
MAINTENANCE FACTOR IN PT X***

DIAN WULANDARI  
NRP. 0611164000024

Supervisor  
Dr. Valeriana Lukitosari, S.Si, MT

**DEPARTMENT OF MATHEMATICS**  
Faculty of Science and Data Analytics  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2020

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENENTUAN ESTIMASI SISA UMUR *HIGH PRESSURE BOILER FEED PUMP* DENGAN EMPERTIMBANGKAN FAKTOR PEMELIHARAAN DI PT X**

***DETERMINATION OF HIGH PRESSURE BOILER FEED PUMP RESIDUAL LIFE ESTIMATION BY CONSIDERING MAINTENANCE FACTOR IN PT X***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Matematika Pada bidang studi Matematika Terapan Program Studi S1 Departemen Matematika Fakultas Sains dan Analitika Data Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

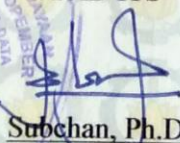
**DIAN WULANDARI**  
NRP. 0611164000024

Menyetujui,  
Dosen Pembimbing



**Dr. Valeriana Lukitosari, S.Si, MT**  
NIP. 19710928 199802 2 001

Mengetahui,  
Kepala Departemen Matematika  
FSAD ITS



**Subchan, Ph.D**

**NIP. 19710513 199702 1 001**  
Surabaya, Agustus 2020



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **PENENTUAN ESTIMASI SISA UMUR *HIGH PRESSURE BOILER FEED PUMP* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FAKTOR PEMELIHARAAN DI PT X**

Nama : Dian Wulandari  
NRP : 0611164000024  
Departemen : Matematika FSAD ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Valeriana Lukitosari, S.Si, MT

## **Abstrak**

*High Pressure Boiler Feed Pump* (HP BFP) merupakan salah satu pompa pada *feed water system* yang mempunyai peranan penting untuk mensirkulasikan air dari *deaerator* ke *Heat Recovery System Generator* (HRSG) pada pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU). Kegagalan pada pompa dapat menyebabkan *temperature stress* pada HRSG sehingga unit mengalami trip. Hal ini berdampak pada kerugian operasional dan berkurangnya *supply* listrik. Pada penelitian ini dilakukan estimasi sisa umur menggunakan fungsi *Mean Residual Life* (MRL) dan reliabilitas HP BFP dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan *preventive* sebagai pencegahan dini sebelum kegagalan terjadi. Metode yang digunakan untuk mengestimasi adalah metode Bayes dengan distribusi *Mixture Weibull*, Exponensial, Weibull, Normal, dan Lognormal sebagai distribusi kerusakan. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah reliabilitas HP BFP dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan sebesar 84,9% dan estimasi sisa umur HP BFP dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan adalah 247 hari.

**Kata Kunci:** *High Pressure Boiler Feed Pump, Metode Bayes, Mixture, Mean Residual Life (MRL)*



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

***DETERMINATION OF HIGH PRESSURE BOILER FEED  
PUMP RESIDUAL LIFE ESTIMATION BY CONSIDERING  
MAINTENANCE FACTOR IN PT X***

Name : Dian Wulandari  
NRP : 06111640000024  
Department : Mathematics FSDA ITS  
Supervisor : Dr. Valeriana Lukitosari, S.Si, MT

***Abstract***

*High Pressure Boiler Feed Pump (HP BFP) is one of the pumps on the feed water system which has an important role to circulate water from the deaerator to the Heat Recovery System Generator (HRSG) in gas and steam power plants (PLTGU). Failure at the pump may cause temperature stress on the HRSG, thereby the unit will trip. This has an impact on operational losses and reduced electricity supply. In this study estimated the remaining life using the Mean Residual Life (MRL) function and reliability of the HP BFP by considering the recovery factor as early prevention before it occurs. The method used for estimates is Bayes's method with the Mixture Weibull distribution, Exponential, Weibull, Normal and Lognormal as a distribution of damage. The results obtained from this study are the reliability of HP BFP by considering maintenance factors 84,9% and the estimated remaining life of HP BFP by considering the maintenance factor is 247 days.*

***Key Words:*** *High Pressure Boiler Feed Pump, Bayes Method, Mixture, Mean Residual Life (MRL)*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'aalamiin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan limpahan rahmat, taufik serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“PENENTUAN ESTIMASI SISA UMUR *HIGH PRESSURE BOILER FEED PUMP* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FAKTOR PEMELIHARAAN DI PT X”** sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Departemen Matematika FSAD Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Abdul Salam dan Ana, serta kakak penulis Bagus Aprianto, S.T, yang telah memberikan dukungan, motivasi, doa, dan semangat kepada penulis.
2. Bapak Subchan, Ph.D, selaku kepala Departemen Matematika FSAD ITS yang telah memberikan dukungan kepada penulis.
3. Ibu Dr. Dwi Ratna Sulistyaningrum, S.Si, MT, selaku Sekdep Bidang Akademik S1 Departemen Matematika FSAD ITS, yang telah membantu penulis dalam hal menyelesaikan kebutuhan administrasi selama periode pengambilan Tugas Akhir.
4. Ibu Dr. Valeriana Lukitosari, S.Si, MT, selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, saran, kritik, motivasi, dan pengalaman yang tak terlupakan selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
5. Ibu Dra. Laksmi Prita Wardhani, M.Si, ibu Dian Winda Setyawati, S.Si, M.Si, dan Bapak Drs. Iis Herisman, M.Si, selaku dosen penguji.
6. Bapak Drs. Nurul Hidayat, M.Kom selaku dosen wali yang telah memberikan arahan akademik selama penulis kuliah di Departemen Matematika FSAD ITS.

7. Bapak dan Ibu dosen serta para staf Departemen Matematika ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.
8. Keluarga besar penulis yang berada di Lamongan dan di Surabaya atas dukungan yang telah diberikan.
9. Bapak Purwasito, S.T, MT, bapak Eko, dan bapak Bachtiar, selaku pegawai di PT X yang telah memberikan pengalaman, bantuan, arahan, dan dukungan selama pengerjaan Tugas Akhir dan Kerja Praktik.
10. Teman-teman penulis, Windya, Nita, Safira, Ratna, Ika, Sovia, Septi dan seluruh teman-teman LEMNISCATE 2016 yang penulis sayangi yang telah membantu, mendukung, dan memotivasi penulis.
11. Rekan-rekan di Kabinet Cipta dan Student Welfare 18/19 atas pengalaman, bantuan, dan dukungan yang telah diberikan.
12. Teman-teman SMA penulis, Siti, Nuris, Anggi, dan Alin yang telah memotivasi dan memberikan dukungan kepada penulis.
13. Teman SD penulis, Ida yang telah menemani, memotivasi, dan mendukung penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
14. Teman-teman lain maupun kakak tingkat yang telah mendukung, membantu, dan memberi masukan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih mempunyai banyak kekurangan. Kritik dan saran dari berbagai pihak yang bersifat membangun juga sangat diharapkan sebagai bahan perbaikan di masa yang akan datang.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
DAFTAR SIMBOL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)...	8
2.3 Pompa Sentrifugal.....	11
2.4 Statistika Deskriptif.....	11
2.5 Distribusi Kerusakan.....	14
2.6 <i>Index of Fit</i> .....	18
2.7 Uji Kesesuaian Distribusi.....	19
2.8 Pemeliharaan.....	21
2.9 Sistem Redundansi <i>k-out-of-n</i> dengan Satu Komponen <i>Cold Standby</i> .....	22
2.10 Reliabilitas.....	23
2.11 Estimasi Sisa Umur.....	25
2.12 Metode Bayes.....	27
2.13 Fungsi <i>Likelihood</i> .....	27
2.14 Distribusi Prior.....	27
2.15 Distribusi Posterior.....	28

2.16 <i>Markov Chain Monte Carlo</i> (MCMC).....	28
2.17 <i>Akaike's Information Criterion</i> (AIC) .....	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	31
3.1 Jenis dan Sumber Data.....	31
3.2 Tahap Penelitian .....	31
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....	35
4.1 <i>High Pressure Boiler Feed Pump</i> .....	35
4.2 Penentuan Distribusi yang Sesuai dengan Identifikasi Distribusi .....	38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	41
5.1 Kesimpulan .....	41
5.2 Saran .....	41
DAFTAR PUSTAKA.....	43
LAMPIRAN .....	47
BIODATA PENULIS.....	53

## DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Alur Proses Produksi PLTGU .....	10
Gambar 2.2 Pompa Sentrifugal .....	11
Gambar 2.3 Histogram.....	12
Gambar 2.4 Kurtosis .....	14
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	34
Gambar 4.1 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) PT X dalam Satu Blok .....	36
Gambar 4.2 <i>High Pressure Boiler Feed Pump</i> PLTGU PT X..	37
Gambar 4.3 Skema HP BFP Blok I.....	37
Gambar 4.4 Histogram Data TBF HP BFP 1A .....	40



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Parameter Bentuk Weibull .....	16
Tabel 4.1 Perhitungan Statistik Deskriptif HP BFP .....	39

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR LAMPIRAN

	Hal
LAMPIRAN A Jadwal dan Instruksi Pekerjaan <i>Preventive Maintenance</i> HP BFP Blok I PLTGU PT X ...	47
LAMPIRAN B Data <i>Time Between Failure</i> (TBF) HP BFP Blok I PLTGU PT X Periode Januari 2010-Desember 2019 .....	49

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR SIMBOL

- $R_{k,n;z}(t)$  : Fungsi reliabilitas sistem  $k$ -out-of- $n$  dengan satu komponen *cold standby* pada waktu  $t$
- $R_m(t)$  : Fungsi reliabilitas pada waktu  $t$  dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan
- $F(t)$  : Fungsi distribusi kumulatif (*cdf*) pada waktu  $t$
- $f(t)$  : Fungsi padat peluang (*pdf*) pada waktu  $t$
- $t_i$  : Waktu kerusakan ke- $i$
- $i$  : Urutan sejumlah data waktu antar kerusakan sistem yang disusun menurut urutan terkecil
- $n$  : Banyaknya data waktu kerusakan
- $\lambda$  : Parameter skala dari distribusi Eksponensial
- $\theta$  : Parameter skala dari distribusi Weibull
- $\beta$  : Parameter bentuk dari distribusi Weibull
- $\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$  : Probabilitas nilai  $Z$
- $\mu$  : Nilai tengah
- $\sigma$  : Standar deviasi
- $M(t)$  : Fungsi MRL atau rata-rata sisa umur pada waktu  $t$
- $M_m(t)$  : Fungsi MRL atau rata-rata sisa umur pada waktu  $t$  dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan manfaat dari Tugas Akhir.

### **1.1 Latar Belakang**

Listrik merupakan kebutuhan pokok manusia dalam berbagai aktivitas, tidak ada aktivitas yang tidak menggunakan energi listrik. Berdasarkan rilis keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) (2019), memproyeksikan rata-rata pertumbuhan kebutuhan energi listrik nasional sekitar 6,9% per tahun. Pertumbuhan kebutuhan energi listrik menuntut suatu industri pembangkit untuk memenuhi kebutuhan pasokan listrik. Produksi listrik dapat ditingkatkan dengan cara melakukan penambahan kapasitas baru atau mengoptimalkan output yang ada. Penambahan kapasitas baru pembangkit listrik membutuhkan modal sangat besar dan waktu yang lama, sehingga mengoptimalkan output pembangkit yang sudah ada menjadi opsi yang akan dipilih. Pengoptimalan output pembangkit yang sudah ada dapat dilakukan dengan cara mempertahankan agar komponen atau sistem tetap beroperasi secara maksimum dalam kondisi kelayakan bekerja atau suatu standar kondisi tertentu. Dengan kata lain, dalam masa kerjanya suatu komponen atau sistem diharapkan tidak mengalami kerusakan yang berdampak pada performa kerja dan efisiennya.

Suatu sistem atau komponen jika dioperasikan secara terus menerus akan mengalami penurunan tingkat keandalan sesuai dengan fungsi waktu. Keandalan atau reliabilitas merupakan peluang sebuah komponen, subsistem atau sistem untuk dapat beroperasi sesuai dengan kurun waktu dan kondisi operasi tertentu yang telah ditentukan [1]. Keterandalan dapat menyebabkan efisiensi dan meningkatkan produktivitas. Salah satu karakteristik utama dari suatu keandalan adalah sisa umur [2]. Sisa umur



komponen merupakan lamanya komponen tersebut dapat beroperasi setelah waktu tertentu. Estimasi sisa umur dapat ditentukan dengan menghitung fungsi *Mean Residual Life*. *Mean Residual Life* merupakan ukuran penting dalam analisis reliabilitas dan pemodelan, menawarkan informasi ringkas untuk berbagai masalah pengambilan keputusan seperti mengoptimalkan *burn-in test*, merencanakan percepatan *life test*, menetapkan kebijakan garansi, dan membuat keputusan pemeliharaan [3]. *Mean Residual Life* sangat menjanjikan untuk perencanaan pemeliharaan karena tidak terbatas pada mekanisme kegagalan dan bisa menjadi alternatif yang baik untuk mengkarakterisasi sistem dengan banyak mode kegagalan [4].

Salah satu komponen penting pembangkit listrik tenaga gas dan uap adalah *Boiler Feed Pump*. *Boiler Feed Pump* merupakan pompa pada *feed water system* yang mempunyai peranan penting untuk mensirkulasikan air dari *deaerator* ke *Heat Recovery System Generator (HRSG)* tepatnya pada *economizer* sebelum nantinya akan menjadi gas uap (*steam*). *Boiler Feed Pump* terdiri dari *High Pressure Boiler Feed Pump* dan *Low Pressure Boiler Feed Pump*. *High Pressure Boiler Feed Pump* memiliki tugas untuk memindahkan air dalam jumlah yang sangat besar daripada *Low Pressure Boiler Feed Pump* dan juga beroperasi secara terus menerus. Kegagalan pada pompa dapat menyebabkan *temperature stress* pada HRSG sehingga unit mengalami trip. Hal ini berdampak pada kerugian operasional dan berkurangnya *supply* listrik. Proses kegagalan pada *High Pressure Boiler Feed Pump* dipengaruhi oleh banyak faktor internal seperti umur material maupun faktor luar. Oleh karena itu, diperlukan suatu estimasi sisa umur dengan menggunakan *Mean Residual Life* dalam mencegah kerusakan lebih lanjut pada HRSG, dan pencegahan lebih dini dalam melakukan pemeliharaan dengan mempertimbangkan pemeliharaan yang sudah ada.

Penelitian terkait *High Pressure Boiler Feed Pump* telah dilakukan untuk perencanaan ulang instalasi *High Pressure Boiler Feed Pump* [5]. Sedangkan penelitian mengenai *Mean Residual*

*Life* pada sistem  $k$ -out-of- $n$ :  $G$  dengan satu komponen *cold standby* juga pernah dilakukan, dimana sistem gagal ketika  $k$  dari  $n$  komponen gagal [6]. Penelitian selanjutnya mengenai taksiran sisa umur komponen *bearing* pada mesin cetak dengan membandingkan Metode *Least Square* dan Metode Estimasi Maksimum Likelihood untuk mengestimasi parameter [7]. Pada penelitian ini menganggap kerusakan komponen mesin sebagai kerusakan mesin tanpa mempertimbangkan model sistemnya. Sedangkan penelitian mengenai estimasi sisa umur pompa air PDAM mempertimbangkan jaringan paralel dan jaringan seri pada sistem dengan menggunakan Metode *Least Square*, Metode Estimasi Maksimum Likelihood dan Bayes untuk mengestimasi parameter [8].

Keakuratan estimasi tergantung pada ukuran sampel dan metode yang digunakan dalam mengestimasi. Penelitian mengenai penerapan metode Bayes telah dilakukan dalam penentuan model estimasi reliabilitas pompa *submersible* pada rumah pompa wendit I PDAM pada sistem paralel [9]. Dalam kasus output yang dihasilkan, ada situasi di mana beberapa output yang dihasilkan selama periode waktu dipengaruhi oleh item dari vendor yang berbeda, tenaga kerja, bahan baku, dan mesin berbeda. Karakteristik fisik dan reliabilitas dari komponen tersebut mungkin berbeda, tapi kadang-kadang sulit untuk membedakannya dengan jelas. Dalam situasi seperti itu, campuran dari distribusi sering digunakan dalam analisis data keandalan untuk komponen ini [10]. Distribusi *Mixture Weibull* merupakan salah satu distribusi campuran yang tepat untuk diimplementasikan pada data kerusakan komponen pesawat [10]. Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini dilakukan penelitian estimasi sisa umur *High Pressure Boiler Feed Pump* dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan menggunakan metode Bayes dan juga mempertimbangkan distribusi *Mixture Weibull*, Exponensial, Weibull, Normal, dan Lognormal sebagai distribusi kerusakan mesin.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana reliabilitas *High Pressure Boiler Feed Pump* dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan ?
2. Bagaimana estimasi sisa umur *High Pressure Boiler Feed Pump* dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan ?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Data yang digunakan adalah data sekunder *Time Between Failure* (TBF), dan jadwal pemeliharaan *preventive* dari *High Pressure Boiler Feed Pump* Blok I PLTGU PT X pada periode Januari 2010-Desember 2019.
2. Kerusakan komponen yang membentuk *High Pressure Boiler Feed Pump* saling independen.
3. Taraf signifikan yang digunakan sebesar 0,05.
4. Jenis pemeliharaan yang menjadi pertimbangan adalah pemeliharaan *preventive*.
5. Diasumsikan komponen *standby* hanya diaktifkan ketika ( $n-k+1$ ) komponen aktif mengalami kegagalan, tanpa mempertimbangkan HRSG.

## 1.4 Tujuan

Tujuan pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan reliabilitas *High Pressure Boiler Feed Pump* dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan.
2. Mendapatkan estimasi sisa umur *High Pressure Boiler Feed Pump* dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan.

## 1.5 Manfaat

Manfaat pada Tugas Akhir ini sebagai berikut :

1. Mengetahui reliabilitas dan estimasi sisa umur dari *high pressure boiler feed pump* dengan mempertimbangkan faktor

pemeliharaan sebagai upaya pencegahan lebih dini sebelum kegagalan terjadi.

2. Dapat dijadikan masukan atau usulan kepada pihak perusahaan dalam melakukan pemeliharaan di masa yang akan datang.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan mengenai penelitian terdahulu, Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU), pompa sentrifugal, statistika deskriptif, distribusi kerusakan, *index of fit*, uji kesesuaian distribusi, pemeliharaan, sistem redundansi *k-out-of-n* dengan satu komponen *cold standby*, reliabilitas, estimasi sisa umur, metode Bayes, fungsi likelihood, distribusi prior, distribusi posterior, *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC), dan *Akaike's Information Criterion* (AIC).

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang pernah dilakukan diantaranya mengenai perencanaan ulang instalasi *High Pressure Boiler Feed Pump* dengan cara perhitungan ulang dan pemilihan pompa. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa dapat dipilih pompa sentrifugal multi stage sebagai pilihan yang tepat untuk *High Pressure Boiler Feed Pump* [5]. Penelitian selanjutnya terkait pengaplikasian *Mean Residual Life* (MRL) pada sistem *k-out-of-n: G* dengan satu komponen *cold standby*, dimana sistem gagal ketika *k* dari *n* komponen gagal. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan komponen *cold standby* memberikan pengaruh terhadap sisa umur sistem *k-out-of-n* [6].

Penelitian selanjutnya tentang penentuan sisa umur *bearing* pada mesin cetak dengan membandingkan metode *Least Square* dan metode Estimasi Maksimum Likelihood untuk mengestimasi parameter. Hasil dari penelitian tersebut adalah metode yang terbaik dalam pendugaan menggunakan data TTF (*Time to Failure*) *bearing* mesin cetak adalah Metode *Least Square* [7]. Pada penelitian ini menganggap kerusakan *bearing* sebagai kerusakan mesin tanpa mempertimbangkan model sistemnya dengan menggunakan distribusi kerusakan Weibull 2 parameter.

Penelitian mengenai estimasi sisa umur juga telah dilakukan pada pompa air PDAM pada sistem jaringan paralel dan jaringan

seri dengan menggunakan Metode *Least Square*, Metode Estimasi Maksimum Likelihood dan Bayes untuk mengestimasi parameter dengan menggunakan data TBF (*Time Between Failure*) mesin pompa. Hasil dari penelitian tersebut didapatkan model estimasi distribusi kerusakan dan model estimasi umur dan sisa umur pada jaringan paralel dan jaringan seri [8]. Distribusi kerusakan yang digunakan pada penelitian ini adalah distribusi Weibull 2 parameter untuk pompa air baku dan distribusi Eksponensial pada pompa distribusi. Namun, pada penelitian ini jaringan paralel dan jaringan seri disajikan dalam sistem yang berbeda.

Penelitian selanjutnya mengenai penerapan metode Bayes dalam penentuan model estimasi reliabilitas pompa *submersible* pada rumah pompa wendit I PDAM pada sistem paralel [9]. Hasil dari penelitian tersebut didapatkan model estimasi reliabilitas distribusi Weibull dan distribusi Lognormal dengan menggunakan metode Bayes. Penelitian mengenai distribusi *Mixture Weibull* telah dilakukan dalam menganalisis reliabilitas komponen pesawat berdasarkan dari data kerusakan komponen pesawat dan pengamatan yang disensor. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa distribusi *Mixture* mampu memodelkan keragaman dari item dari vendor yang berbeda [10].

## **2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)**

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) adalah pembangkit termal yang menggabungkan prinsip kerja PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas) dan PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), atau disebut juga *combined cycle* (pembangkit siklus ganda). Tujuan utama dari pembangkit kombinasi tersebut yaitu untuk meningkatkan efisiensi termal yang cukup tinggi mencapai 50%. Hal ini dikarenakan pertumbuhan akan energi listrik yang meningkat pesat. Sedangkan penggunaan turbin gas sebagai pembangkit energi listrik (PLTG) mempunyai efisiensi termal rendah yaitu 30% dan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) memiliki efisiensi termal 35%, sehingga dibutuhkan suatu

pembangkit listrik dengan siklus kombinasi yang menghasilkan energi yang lebih besar. Peralatan utama PLTGU terdiri atas :

1. Sistem PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas), meliputi kompresor, ruang bakar, turbin gas, dan generator
2. HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), yaitu: alat pembangkit produksi uap.
3. Turbin Uap
4. Generator
5. Kondensor
6. Peralatan lain, diantaranya pompa, pemanas air (*Water Heater*), pipa-pipa, dan pompa pengisi HRSG.

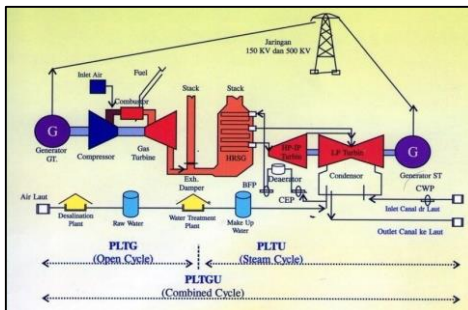
Proses produksi Tenaga Listrik pada PLTGU dijelaskan sebagai berikut :

1. Kompresor menghisap udara bebas yang masuk melalui filter, kemudian menekannya ke dalam ruang bakar.
2. Udara bertekanan dalam gas alam dibakar didalam ruang bakar dan menghasilkan gas panas bertekanan tinggi yang diarahkan ke sudu-sudu turbin oleh *nozzle*.
3. Turbin berputar akibat pancaran gas panas terarah pada sudu-sudunya. Putaran turbin menghasilkan daya untuk menggerakkan generator.
4. Generator yang digerakkan oleh turbin gas menghasilkan energi listrik.
5. Gas panas yang keluar dari turbin gas (*Exhaust Gas*) masuk ke HRSG guna memanaskan air.
6. LP BFP (*Low Pressure Boiler Feed Pump*) memompa air dari *deaerator* ke LP *Economizer* dan HP BFP (*High Pressure Boiler Feed Pump*) memompa air dari *deaerator* ke HP *Economizer*.
7. Air dalam *Economizer* dialirkan LP *Drum* untuk kemudian dipompa oleh LP BCP (*Low Pressure Boiler Circulating Pump*)



- ke LP *Evaporator* selanjutnya uap yang dihasilkan LP *Evaporator* dialirkan kembali ke LP *Drum*.
8. Air dalam HP *Economizer* dialirkan ke HP *Drum* untuk kemudian dipompa oleh HP BCP (*High Pressure Boiler Circulation Pump*) ke HP *Evaporator* selanjutnya uap yang dihasilkan HP *Evaporator* dialirkan ke HP *Drum*.
  9. Uap dari LP *Drum* dialirkan ke LP *Steam Turbine* guna menggerakkan sudu-sudu LP *Steam Turbine*.
  10. Uap dari HP *Drum* dialirkan ke *Super Heater* untuk mendapatkan uap kering. Kemudian uap tersebut dialirkan ke HP *Steam Turbine* guna menggerakkan sudu-sudu *Steam Turbine*. Selanjutnya uap dari HP *Steam Turbine* dialirkan ke LP *Steam Turbine* guna menggerakkan sudu-sudu LP *Steam Turbine*.
  11. Generator yang digerakkan oleh turbin uap (HP dan LP) menghasilkan energi listrik.
  12. Dalam kondensor uap dari turbin mengalami pengembunan air. Hasil pengembunan dipompa oleh CEP (*Condensate Extraction Pump*) ke *preheater*. Setelah dipanaskan di *preheater*, air tersebut dialirkan ke *deaerator*.

Proses Produksi PLTGU dapat digambarkan secara ringkas pada Gambar 1.

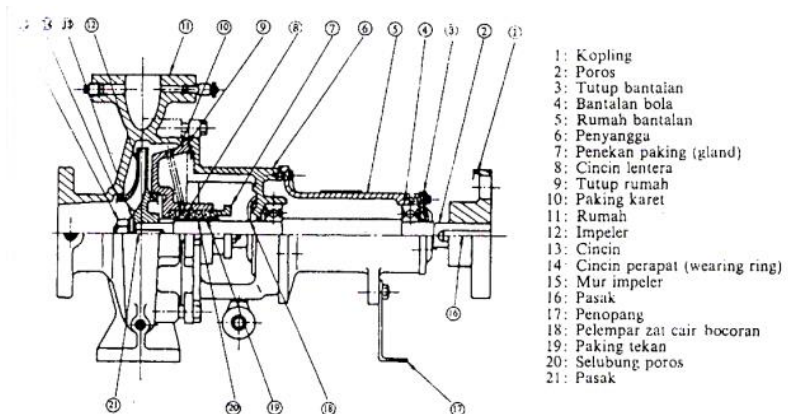


**Gambar 2.1** Alur Proses Produksi PLTGU

## 2.3 Pompa Sentrifugal

Pompa merupakan mesin untuk menggerakkan fluida dari suatu tempat ke tempat yang lain dengan menggunakan media pipa. Pompa memiliki prinsip kerja membuat perbedaan tekanan antara bagian masuk (*suction*) dengan bagian keluar (*discharge*). Dengan kata lain, pompa mengubah energi mekanik dari suatu sumber tenaga (penggerak/motor) menjadi energi aliran fluida.

Pompa sentrifugal merupakan salah satu pompa dinamik untuk memindahkan fluida dengan memanfaatkan gaya sentrifugal yang berasal dari putaran impeler. Pompa ini mampu beroperasi pada kecepatan dan tekanan aliran yang tinggi. Suatu pompa sentrifugal pada dasarnya terdiri dari satu impeler atau lebih yang dilengkapi dengan sudu-sudu yang dipasangkan pada poros yang berputar dan diselubungi sebuah rumah (*casing*). Komponen utama pompa dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Pompa Sentrifugal

## 2.4 Statistika Deskriptif

Statistika deskriptif merupakan metode-metode yang berkaitan dengan pengumpulan dan penyajian suatu gugus data, sehingga memberikan informasi yang berguna [11]. Histogram, ukuran pemusatan data, ukuran sebaran, *skewness* dan *kurtosis*

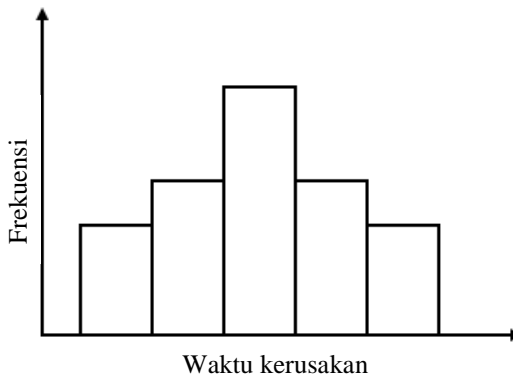
merupakan contoh statistika deskriptif. Histogram adalah grafik yang dihasilkan dari pengelompokan waktu kerusakan ke dalam kelas dan menggambarkan frekuensi atau frekuensi relatif dari jumlah pengamatan dalam setiap kelas berbanding dengan waktu interval setiap kelas [1], ditunjukkan seperti Gambar 2.3. Histogram dapat mencerminkan bentuk fungsi kepadatan peluang (*pdf*) jika penentuan jumlah interval dilakukan dengan tepat. Aturan yang baik dalam penentuan jumlah kelas adalah dengan menggunakan aturan Sturges, yaitu [1] :

$$k = [1 + 3,3 \log_{10} n] \quad (2.1)$$

dengan :

$k$  : Jumlah kelas

$n$  : Banyaknya data waktu kerusakan



**Gambar 2.3** Histogram

Ukuran pemusatan data yang paling banyak digunakan adalah nilai tengah (*mean*), median, dan modus. Bila segugus data  $x_1, x_2, \dots, x_N$  tidak harus semuanya berbeda menyusun sebuah populasi terhingga berukuran  $N$ , maka nilai tengahnya yaitu [11] :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2.2)$$

Modus merupakan nilai yang terjadi paling sering atau yang mempunyai frekuensi paling tinggi. Sedangkan, median segugus data yang telah diurutkan dari yang terkecil sampai terbesar atau

sebaliknya adalah pengamatan yang tepat ditengah-tengah apabila banyaknya ganjil, atau rata-rata kedua pengamatan yang ada di tengah bila banyaknya pengamatan genap, dapat ditulis sebagai berikut [11] :

$$\begin{aligned} Me &= x_{\frac{n+1}{2}}, && \text{untuk data ganjil} \\ Me &= \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2}, && \text{untuk data genap} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Ukuran sebaran didefinisikan sebagai seberapa jauh pengamatan-pengamatan menyebar perlu diketahui dengan beberapa ukuran keragaman yang sangat penting adalah ragam (variansi), simpangan baku (standar deviasi), nilai minimal dan nilai maksimal. Sebuah sampel acak  $x_1, x_2, \dots, x_n$  didefinisikan sebagai variansi sampel sebagai berikut [11] :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1} \quad (2.4)$$

sedangkan standar deviasi sampel dapat ditulis sebagai berikut :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (2.5)$$

Nilai maksimal adalah nilai yang paling tinggi atau besar dari sekumpulan data yang telah diurutkan, sedangkan nilai minimal adalah nilai yang paling rendah atau kecil dari sekumpulan data yang telah diurutkan.

*Skewness* merupakan suatu nilai yang menunjukkan tingkat kemiringan kurva dari suatu distribusi. Suatu distribusi dapat memiliki kurva yang miring ke kanan maupun kiri. Kurva yang cenderung miring ke kanan memiliki ekor kanan yang menjulur lebih panjang daripada ekor kiri, begitu sebaliknya. *Skewness* Pearson dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [11] :

$$sk = \frac{3(\mu - \bar{x})}{s} \quad (2.6)$$

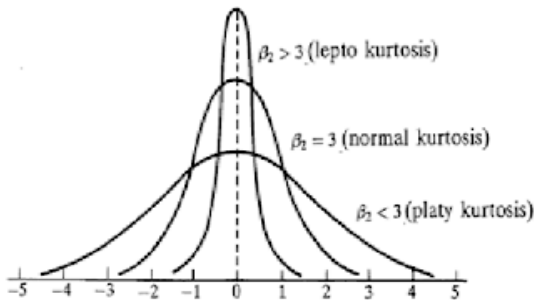
Koefisien *skewness* dapat berkisar dari -3 sampai 3. Jika *skewness* bertanda positif, maka kurva cenderung miring ke kanan dan memiliki nilai *mean* lebih besar daripada mediannya,

sedangkan jika *skewness* bertanda negatif, maka kurva cenderung miring ke kiri dan memiliki nilai *mean* lebih kecil daripada mediannya. Kurva simetrik memiliki nilai *mean* dan mediannya terletak pada posisi yang sama pada sumbu datar.

*Kurtosis* merupakan suatu nilai yang menunjukkan tingkat kelancipan kurva dari suatu distribusi. *Kurtosis* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [12]:

$$kurtosis = \frac{\sum(x - \bar{\mu})^4}{nS^4} \quad (2.7)$$

Jika *kurtosis* memiliki nilai 3 maka kurva berbentuk normal/*mesokurtic*, sedangkan jika bernilai  $> 3$  maka kurva berbentuk lancip/*leptokurtosis*, dan apabila bernilai  $< 3$  maka kurva datar/*platykurtic*. Kurva dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Kurtosis

## 2.5 Distribusi Kerusakan

Langkah pertama untuk menghitung reliabilitas suatu peralatan/ komponen adalah dengan mengetahui model probabilitas peralatan/komponen yang dinyatakan dengan distribusi statistik. Distribusi kerusakan yang digunakan pada penelitian ini adalah distribusi *Mixture Weibull*, Eksponensial, Weibull, Normal, dan Lognormal, Nilai  $F(t_i)$  dapat didekati dengan persamaan [1] :

$$F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (2.8)$$

dengan :

$F(t_i)$  : Fungsi kepadatan kumulatif distribusi pada waktu antar kerusakan ke- $i$

$t_i$  : Waktu kerusakan ke- $i$

$i$  : Urutan sejumlah data waktu antar kerusakan sitem yang disusun menurut urutan terkecil

$n$  : Banyaknya data waktu kerusakan

### 2.5.1 Distribusi *Mixture*

Distribusi *Mixture* merupakan distribusi campuran yang menggabungkan dua komponen atau lebih distribusi menggunakan pencampuran parameter (proporsi) yang non-negatif [13]. Fungsi kepadatan peluang (*pdf*) distribusi *Mixture* dapat direpresentasikan sebagai berikut [10] :

$$f(t) = \sum_{j=1}^k \omega_j f_j(t) \quad (2.9)$$

dengan:

$f_j(t)$  : Fungsi kepadatan peluang ke- $j$  dari sebanyak  $k$  komponen penyusun distribusi *Mixture*

$\omega_j$  : Parameter proporsi komponen *Mixture* dengan

$$\sum_{j=1}^k \omega_j = 1 \quad \text{serta} \quad 0 \leq \omega_j \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, k$$

$k$  : Banyaknya komponen *Mixture*

Sedangkan fungsi kepadatan kumulatif (*cdf*) dari distribusi *Mixture* adalah [10] :

$$F(t) = \sum_{j=1}^k \omega_j F_j(t) \quad (2.10)$$

### 2.5.2 Distribusi Eksponensial

Distribusi Eksponensial adalah distribusi kontinu yang digunakan untuk memodelkan fungsi reliabilitas dimana laju kerusakan dianggap konstan, yaitu tidak tergantung pada waktu atau umur komponen [14]. Distribusi Eksponensial memiliki nilai mean jauh lebih besar daripada nilai median, dan hampir sama dengan nilai simpangan bakunya. Parameter yang digunakan

distribusi eksponensial adalah  $\lambda$ . Fungsi kepadatan peluang (*pdf*) pada waktu  $t$  dari distribusi Eksponensial,  $f(t)$  adalah [1] :

$$f(t) = \lambda e^{(-\lambda.t)}, \quad t \geq 0, \lambda > 0 \quad (2.11)$$

Sedangkan fungsi kepadatan kumulatif (*cdf*) dari distribusi Eksponensial,  $F(t)$  adalah

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.12)$$

dengan :

$t$  : Waktu kerusakan

$\lambda$  : Parameter skala dari distribusi Eksponensial

**Tabel 2.1** Parameter Bentuk Weibull

Nilai	Sifat
$0 < \beta < 1$	<i>Decreasing Failure Rate</i> (DFR) memiliki bentuk kurva seperti Eksponensial, distribusi Lognormal. DFR adalah komponen yang fungsi kerusakannya menurun seiring dengan lamanya komponen tersebut dipakai.
$\beta = 1$	<i>Constant Failure Rate</i> (CFR) memiliki bentuk identik dengan distribusi Eksponensial. CFR adalah komponen yang fungsi kerusakannya konstan tidak dipengaruhi oleh umur sebuah komponen.
$1 < \beta < 3$	<i>Increasing Failure Rate</i> (IFR) memiliki bentuk kemiringan ( <i>skewed</i> ). IFR adalah komponen yang fungsi kerusakannya meningkat seiring dengan makin tuanya umur komponen tersebut.
$\beta \geq 3$	<i>Increasing Failure Rate</i> (IFR) memiliki bentuk kurva simetrik seperti distribusi Normal

### 2.5.3 Distribusi Weibull

Distribusi Weibull merupakan distribusi kontinu yang paling banyak digunakan untuk data waktu kerusakan dalam analisis reliabilitas dan juga untuk laju kerusakan yang meningkat maupun menurun. Parameter distribusi Weibull adalah  $\beta$  dan  $\theta$ .  $\beta$  disebut sebagai parameter bentuk, sedangkan  $\theta$  disebut sebagai parameter skala. Kurva distribusi Weibull dapat diasumsikan berbagai macam bentuk yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Fungsi kepadatan peluang (*pdf*) pada waktu  $t$  dari distribusi Weibull,  $f(t)$  adalah [1] :

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}, \quad t \geq 0; \beta, \theta > 0 \quad (2.13)$$

Sedangkan fungsi kepadatan kumulatif (*cdf*) dari distribusi Weibull,  $F(t)$  adalah

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (2.14)$$

dengan :

$t$  : Waktu kerusakan

$\theta$  : Parameter skala dari distribusi Weibull

$\beta$  : Parameter bentuk dari distribusi Weibull

### 2.5.4 Distribusi Normal

Distribusi Normal merupakan distribusi kontinu yang dapat digunakan untuk model kelelahan dan keausan dari mesin. Distribusi Normal memiliki *skewness* 0 dan kurtosis adalah tiga. Fungsi kepadatan peluang dari distribusi Normal memiliki kurva yang menyerupai lonceng sehingga memiliki nilai simetris terhadap dua parameter yaitu nilai tengah ( $\mu$ ) dan standar deviasi ( $\sigma$ ). Fungsi kepadatan peluang (*pdf*) pada waktu  $t$  dari distribusi Normal,  $f(t)$  adalah [1] :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad 0 < t < +\infty \quad (2.15)$$

Sedangkan fungsi kepadatan kumulatif (*cdf*) dari distribusi Normal,  $F(t)$  adalah

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (2.16)$$



dengan :

$t$  : Waktu kerusakan

$\mu$  : Nilai tengah

$\sigma$  : Standar deviasi

$\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$  : Probabilitas nilai z

### 2.5.5 Distribusi Lognormal

Distribusi Lognormal merupakan distribusi kontinu yang digunakan untuk mempresentasikan distribusi waktu perbaikan komponen yang gagal. Data yang dapat didekati dengan distribusi Weibull biasanya juga dapat didekati dengan distribusi Lognormal. Bentuk kurva distribusi Lognormal memiliki kemiringan kurva ke kanan (*skewness positive*) dan memiliki nilai *mean* lebih kecil daripada variansinya. Fungsi kepadatan peluang (*pdf*) pada waktu  $t$  distribusi Lognormal,  $f(t)$  adalah [15] :

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad 0 < t < +\infty \quad (2.17)$$

Sedangkan fungsi kepadatan kumulatif (*cdf*) dari distribusi Lognormal,  $F(t)$  adalah

$$F(t) = \phi\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right) \quad (2.18)$$

dengan :

$t$  : Waktu kerusakan

$\mu$  : Nilai tengah

$\sigma$  : Standar deviasi

$\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$  : Probabilitas nilai z

### 2.6 Index of Fit

*Index Of Fit* atau koefisien korelasi ( $r$ ) menunjukkan hubungan linear antara dua peubah acak  $X_i$  dan  $Y_i$ . Semakin besar nilai  $r$  menandakan bahwa hubungan linear antara  $X_i$  dan  $Y_i$  semakin baik. Rumus umum *Index of Fit* adalah [1] :

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2 \right]}} \quad (2.19)$$

Identifikasi nilai awal  $(x_i, y_i)$  dilakukan dengan pendekatan plot regresi linier yang mendekati data. Nilai  $(x_i, y_i)$  untuk distribusi Eksponensial, Weibull, Normal, dan Lognormal sebagai berikut [1] :

1. Distribusi Eksponensial

$$(x_i, y_i) = \left( t_i, \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t_i)} \right] \right) \quad (2.20)$$

2. Distribusi Weibull

$$(x_i, y_i) = \left( \ln t_i, \ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t_i)} \right] \right) \quad (2.21)$$

3. Distribusi Normal

$$(x_i, y_i) = (t_i, \Phi^{-1}[F(t_i)]) \quad (2.22)$$

4. Distribusi Lognormal

$$(x_i, y_i) = (\ln t_i, \Phi^{-1}[F(t_i)]) \quad (2.23)$$

## 2.7 Uji Kesesuaian Distribusi

Uji ini dilakukan untuk mengetahui kesesuaian data dengan kriteria distribusi tertentu. Pengujian ini dilakukan berdasarkan nilai *index of fit* yang terbesar dan pada masing-masing distribusi dugaan. Uji kesesuaian distribusi (*Goodness of Fit*) akan dilakukan untuk masing-masing distribusi sebagai berikut :

1. Uji Barlett untuk Distribusi Eksponensial

Misalkan  $t_1, t_2, \dots, t_n$  adalah sampel acak dari populasi  $T$ . Diberikan hipotesis bahwa distribusi  $T$  adalah  $F(t)$ . Maka hipotesis untuk uji ini adalah [1] :

Hipotesis :

$$H_0 : T = F(t)$$

$$H_1 : T \neq F(t)$$

Statistik uji:

$$B = \frac{2n \left[ \ln \left( \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n t_i \right) - \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \ln t_i \right]}{1 + \frac{(n+1)}{6n}} \quad (2.24)$$

Kriteria pengujian :

Jika  $x_{1-\alpha/2, n-1}^2 < B < x_{\alpha/2, n-1}^2$  maka  $H_0$  diterima dan  $H_1$  ditolak.

dengan :

$t_i$  : Waktu kerusakan ke- $i$

$n$  : Banyaknya data waktu antar kerusakan

$B$  : Nilai uji statistik untuk uji Barlett

$\alpha$  : Batas kesalahan maksimal

## 2. Uji Mann untuk Distribusi Weibull

Misalkan  $t_1, t_2, \dots, t_n$  adalah sampel acak dari populasi  $T$ . Diberikan hipotesis bahwa distribusi  $T$  adalah  $F(t)$ . Maka hipotesis untuk uji ini adalah [1] :

Hipotesis :

$H_0: T = F(t)$

$H_1: T \neq F(t)$

Statistik uji :

$$M = \frac{k_1 \sum_{i=k_1+1}^{n-1} \left[ \frac{(\ln t_{i+1} - \ln t_i)}{M_i} \right]}{k_2 \sum_{i=1}^{k_1} \left[ \frac{(\ln t_{i+1} - \ln t_i)}{M_i} \right]} \quad (2.25)$$

Dengan :

$M_i = Z_{i+1} - Z_i$

$Z_i = \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{i-0,5}{n+0,25} \right) \right]$

$k_1 = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$  ;  $k_2 = \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor$

$v_1 = 2k_1$  ;  $v_2 = 2k_2$

$t_i$  : Waktu kerusakan ke- $i$

$M$  : Sebuah taksiran

$n$  : Banyaknya data waktu kerusakan

$\alpha$  : Batas kesalahan maksimal

Kriteria pengujian :

Jika  $M < F_{\alpha, v_1, v_2}$  maka  $H_0$  diterima dan  $H_1$  ditolak.

### 3. Uji Kolmogorov-Smirnov untuk Distribusi Normal dan Lognormal

Misalkan  $t_1, t_2, \dots, t_n$  adalah sampel acak dari populasi  $T$ . Diberikan hipotesa bahwa distribusi  $T$  adalah  $F(t)$ . Maka hipotesis untuk uji ini adalah [1] :

Hipotesis :

$$H_0: T = F(t)$$

$$H_1: T \neq F(t)$$

Statistik uji :

$$D_n = \max\{D_1, D_2\} \quad (2.26)$$

dengan :

$$D_1 = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \phi \left( \frac{t_i - \bar{t}}{s} \right) - \frac{i-1}{n} \right\}$$

$$D_2 = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{i}{n} - \phi \left( \frac{t_i - \bar{t}}{s} \right) \right\}$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left( t_i - \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n} \right)^2}{n-1}$$

$t_i$  : Waktu kerusakan ke- $i$

$D_i$  : Sebuah taksiran

$\phi \left( \frac{t_i - \bar{t}}{s} \right)$  : Probabilitas nilai  $z$

$n$  : Banyaknya data waktu kerusakan

$\alpha$  : Batas kesalahan maksimal

Kriteria pengujian :

Jika  $D_n < D_{n,\alpha}$  maka  $H_0$  diterima dan  $H_1$  ditolak.

## 2.8 Pemeliharaan

Pemeliharaan merupakan bentuk kegiatan yang dilakukan untuk mencapai hasil yang mampu mengembalikan komponen atau mempertahankan komponen agar tetap dalam kondisi selalu dapat berfungsi [1]. Fungsi dari pemeliharaan adalah agar dapat memperpanjang umur ekonomis dari mesin atau komponen. Sistem pemeliharaan dapat dibedakan beberapa jenis diantaranya :

1. Pemeliharaan *Preventive*  
Pemeliharaan yang bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan, atau cara pemeliharaan yang direncanakan untuk pencegahan.
2. Pemeliharaan *Corrective*  
Pemeliharaan yang dilakukan untuk memperbaiki dan meningkatkan kondisi fasilitas sehingga mencapai standar yang diterima.
3. Pemeliharaan *Predictive*  
Pemeliharaan dilakukan untuk mengetahui terjadinya perubahan atau kelainan dalam kondisi fisik maupun fungsi dari sistem komponen.

## 2.9 Sistem Redundansi *k-out-of-n* dengan Satu Komponen *Cold Standby*

Sebuah  $n$  komponen sistem bekerja dengan baik jika dan hanya jika setidaknya terdapat  $k$  dari  $n$  komponen bekerja dengan baik disebut *k-out-of-n: G system*. Sedangkan  $n$  komponen sistem gagal jika dan hanya jika terdapat  $k$  dari  $n$  komponen gagal disebut *k-out-of-n: F system*. Berdasarkan dua definisi tersebut, *k-out-of-n: G system* sama dengan *(n-k+1)-out-of-n: F system* [16].

Nilai  $n$  yang lebih besar dari nilai  $k$  menyebabkan redundansi pada umumnya dibangun ke dalam sistem *k-out-of-n*. Redundansi merupakan sistem dengan komponen lebih dari satu yang beroperasi untuk menjalankan fungsi tertentu. Baik sistem paralel maupun sistem seri adalah kasus khusus dari sistem *k-out-of-n*. Ketika komponen bekerja dengan baik, nilai  $k = n$  maka disebut sistem seri atau *n-out-of-n: G system* atau *1-out-of-n: F system*, sedangkan sistem paralel didefinisikan sebagai *1-out-of-n: G system* atau *n-out-of-n: F system* yaitu ketika komponen  $k$  yang bekerja dengan baik  $k = 1$ .

Pada *k-out-of-n: G system* dengan komponen identik dan idependen, jumlah komponen yang bekerja mengikuti distribusi Binomial dengan parameter  $n$  dan  $p$  didefinisikan sebagai berikut [16] :

$$P(x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, n$$

Bentuk redundansi lainnya adalah redundansi *standby* atau sering disebut *cold standby*. Apabila komponen utama mengalami gagal beroperasi, maka komponen *standby* akan diaktifkan. Komponen *standby* relevan dengan kinerja sistem ketika diaktifkan, sehingga kinerja sistem dipengaruhi oleh kinerja komponen siaga hanya setelah waktu acak komponen utama. Dalam hal ini, sistem redundansi *k-out-of-n* dengan satu komponen *cold standby* tidak dapat dianggap sebagai sistem yang terhubung (koheren) [6].

## 2.10 Reliabilitas

Reliabilitas dapat didefinisikan sebagai peluang sebuah komponen, subsistem atau sistem melakukan fungsinya dengan baik sesuai dengan kurun waktu dan kondisi tertentu yang telah ditentukan [1] atau dengan kata lain fungsi reliabilitas menafsirkan peluang lamanya komponen atau sistem tersebut dapat beroperasi setelah waktu tertentu. Reliabilitas menjadi suatu yang penting karena akan mempengaruhi biaya pemeliharaan komponen atau sistem yang akan mempengaruhi profit perusahaan. Reliabilitas dari suatu sistem didefinisikan sebagai berikut [1] :

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt - \int_0^t f(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^0 f(t) dt + \int_0^t f(t) dt + \int_t^{\infty} f(t) dt - \int_0^t f(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^0 0 dt + \int_t^{\infty} f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \end{aligned} \quad (2.27)$$

dengan :

$R(t)$  : Fungsi reliabilitas pada waktu  $t$

$F(t)$  : Fungsi distribusi kumulatif pada waktu  $t$

$f(t)$  : Fungsi padat peluang pada waktu  $t$

Range nilai :  $0 \leq R(t) \leq 1$  ,  $0 \leq F(t) \leq 1$

Reliabilitas dari sistem redundansi  $k$ -out-of- $n$  pada waktu  $t$  didefinisikan sebagai berikut [1] :

$$R_{k,n}(t) = \sum_{x=k}^n \binom{n}{x} R(t)^x (1 - R(t))^{n-x} \quad (2.28)$$

dengan :

$n$  : Jumlah komponen dalam suatu sistem

$k$  : Jumlah minimum komponen yang bekerja

$R(t)$  : Fungsi reliabilitas komponen ketika semua komponen IID pada waktu  $t$

Sedangkan reliabilitas dari sistem redundansi  $k$ -out-of- $n$  dengan satu komponen *cold standby* dalam kondisi komponen aktif (utama) beroperasi pada waktu  $s$  didefinisikan oleh [6] :

$$\begin{aligned} R_{k,n;z}(t|s) &= P\{T > t | T_{n-k+1:n} > s\} \\ &= \frac{1}{P\{T_{n-k+1:n} > s\}} \\ &\quad \times \left[ P\{T_{n-k+1:n} > t\} + \frac{R_{k,n}^{k-1}(t)}{B(n-k+1, k)} \right. \\ &\quad \left. \times \int_s^t R_z(t-x) F_{k,n}^{n-k}(x) dF(x) \right] \\ &= \frac{1}{R_{k,n}(s)} \times \left[ R_{k,n}(t) + \frac{R_{k,n}^{k-1}(t)}{B(n-k+1, k)} \right. \\ &\quad \left. \times \int_s^t R_z(t-x) F_{k,n}^{n-k}(x) dF(x) \right] \end{aligned}$$

dengan :

$$t > s > 0, B(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)}, \quad a, b > 0$$

$R_{k,n}(t)$  : Fungsi reliabilitas sistem redundansi  $k$ -out-of- $n$  pada waktu  $t$

$B(a, b)$  : Fungsi beta

$R_z$  : Fungsi reliabilitas komponen *cold standby*

$F_{k,n}$  : Fungsi kepadatan kumulatif sistem redundansi  $k$ -out-of- $n$

Untuk sistem redundansi *k-out-of-n* dengan satu komponen *cold standby* tanpa diketahui komponen aktif beroperasi pada waktu  $s$  didefinisikan oleh [6] :

$$\begin{aligned}
 R_{k,n;z}(t) &= P\{T > t\} \\
 &= P\{T_{n-k+1:n} > t\} + \frac{R_{k,n}^{k-1}(t)}{B(n-k+1, k)} \\
 &\quad \times \int_0^t R_z(t-x) F_{k,n}^{n-k}(x) dF_{k,n}(x) \\
 &= \left[ R_{k,n}(t) + \frac{R_{k,n}^{k-1}(t)}{B(n-k+1, k)} \right. \\
 &\quad \left. \times \int_0^t R_z(t-x) F_{k,n}^{n-k}(x) dF_{k,n}(x) \right] \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

Reliabilitas dengan pemeliharaan *preventive* pada waktu  $t$  didefinisikan oleh [1] :

$$\begin{aligned}
 R_m(t) &= R(T)^m R(t - mT), \\
 mT &\leq t < (m+1)T, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.30)
 \end{aligned}$$

dengan :

- $T$  : Interval waktu antar pemeliharaan *preventive*
- $m$  : Jumlah pemeliharaan yang dilakukan
- $R(T)^m$  : Reliabilitas interval ke- $m$  pemeliharaan *preventive*
- $R(t - mT)$ : Reliabilitas selama jangka waktu  $t - mT$  setelah melewati pemeliharaan *preventive* terakhir.

## 2.11 Estimasi Sisa Umur

Sisa umur komponen merupakan lamanya komponen tersebut dapat beroperasi setelah waktu tertentu. Fungsi *Mean Residual Life* (MRL) dapat digunakan untuk mengetahui ekspektasi rata-rata sisa umur suatu komponen atau mesin dengan diketahui mesin tersebut tersebut sudah bertahan hingga waktu  $t$  [3]. Fungsi *Mean Residual Life* (MRL) dapat digunakan untuk mengetahui ekspektasi rata-rata sisa umur suatu komponen atau mesin dengan diketahui mesin tersebut tersebut sudah bertahan hingga waktu  $t$  [3]. Fungsi MRL menyatakan berapa lama lagi suatu komponen yang telah dipakai



dan belum rusak diharapkan dapat dipakai. Misalkan  $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$  merupakan umur  $n$  komponen, maka umur sistem  $k$ -out-of- $n$  dapat direpresentasikan dengan  $(n-k+1)$  order statistik  $U_{n-k+1:n}$  dan diasumsikan sebagai variabel acak kontinu dan tak negatif yang terdistribusi independen dan identik. Sedangkan,  $U_z$  merupakan umur komponen *cold standby* yang dimasukkan ke dalam operasi ketika  $(n-k+1)$  komponen aktif mengalami kegagalan. Maka, umur komponen  $k$ -out-of- $n$  dengan satu *cold standby* didefinisikan sebagai [6] :

$$U = U_{n-k+1:n} + \min(U_{n-k+2:n} - U_{n-k+1:n}, U_z) \quad \text{untuk } k = 2, 3, \dots, n$$

dan  $U = U_{n:n} + U_z$ , untuk  $k = 1$ , dimana  $U_{1:n} < \dots < U_{n:n}$  adalah urutan umur dari komponen aktif.

Komponen *standby* sebanding dengan kinerja sistem ketika dalam kondisi aktif. Dengan demikian kinerja sistem dipengaruhi oleh kinerja komponen *standby* hanya setelah waktu acak  $U_{n-k+1:n}$ . Fungsi MRL mesin,  $M(t)$ , tanpa diketahui komponen *standby* dalam kondisi aktif didefinisikan oleh [6] :

$$M(t) = E(U - t | U > t) = \frac{\int_t^\infty R_{k,n;z}(s) ds}{R_{k,n;z}(t)} \quad (2.31)$$

dengan :

$t$  : Waktu kerusakan

$M(t)$  : Rataan sisa umur pada waktu  $t$

$R_{k,n;z}(t)$  : Fungsi reliabilitas sistem  $k$ -out-of- $n$  dengan satu *cold standby* pada waktu  $t$

Misalkan  $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$  merupakan umur terurut  $n$  mesin yang terurut setelah mengalami *burn-in* pada waktu  $b$ , maka fungsi MRL pada sistem didefinisikan oleh [17] :

$$\begin{aligned} M(b) &= E(U - b | U > b) \\ &= \frac{\int_b^\infty R(t) dt}{R(b)} \end{aligned} \quad (2.32)$$

dengan :

$M(b)$  : Fungsi MRL setelah *burn-in* pada waktu  $b$

$R(b)$  : Fungsi reliabilitas pada waktu  $b$

## 2.12 Metode Bayes

Metode bayes merupakan suatu metode estimasi yang menggabungkan distribusi prior dan distribusi sampel. Secara umum peluang dengan menggunakan teorema Bayes dideskripsikan dengan keadaan jika  $A$  dan  $E$  adalah kejadian dimana  $P(E) \neq 0, P(A|E)$ , dan  $P(E|A)$  saling berhubungan sebagai berikut [18] :

$$P(A|E) = \frac{P(E|A)P(A)}{P(E)}$$

## 2.13 Fungsi Likelihood

Fungsi *likelihood* mengandung informasi yang dibawa oleh pengamatan  $t$  tentang  $\theta$  dan dinotasikan dengan  $L(\theta|t)$ . Jika  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$  mempresentasikan sebuah sampel acak dari  $f(t; \theta)$  maka fungsi *likelihood* didefinisikan sebagai berikut [18] :

$$L(\theta|t) = \prod_{i=1}^n f(t_i; \theta) \quad (2.33)$$

## 2.14 Distribusi Prior

Distribusi Prior merupakan suatu distribusi yang menggambarkan informasi awal tentang parameter sebelum pengamatan dilakukan. Distribusi prior bersifat subjektif berdasarkan kepercayaan peneliti dan diformulasikan sebelum data diketahui. Secara umum pemilihan distribusi prior dilakukan atas dasar diketahui atau tidaknya informasi tentang parameter. Distribusi prior bersifat informatif dan non-informatif.

Distribusi prior informatif merupakan distribusi prior yang mengacu pada pemberian parameter dari distribusi yang telah dipilih baik distribusi prior konjugat atau tidak. Sedangkan distribusi prior non informatif merupakan distribusi yang mengandung makna bahwa tidak adanya informasi distribusi peluang yang digunakan sebelumnya. Prior noninformatif ini tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi sehingga

informasi yang diperoleh dari data amatan bersifat objektif. Salah satu pendekatan dari prior non-informatif adalah metode Jeffrey's. Aturan Jeffrey's menyatakan bahwa [18] :

$$f(\theta) = \sqrt{I(\theta)} \quad (2.34)$$

dengan  $I(\theta)$  merupakan informasi Fisher dengan data berukuran  $n$  sebagai berikut [19] :

$$I(\theta) = -nE \left[ \frac{\partial^2 (\ln f(t; \theta))}{\partial \theta^2} \right] \quad (2.35)$$

Distribusi prior yang independen dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\pi(\theta) = f(\theta_1) \cdot f(\theta_2) \quad (2.36)$$

## 2.15 Distribusi Posterior

Distribusi posterior merupakan distribusi hasil dari kombinasi informasi dalam distribusi prior dengan data sampel melalui teorema Bayes yang menyatakan derajat keyakinan seseorang tentang posisi parameter setelah sampel diamati. Distribusi posterior didapat melalui pendekatan berdasarkan distribusi  $\theta$  bersyarat  $T$ . Distribusi posterior, didefinisikan oleh [18] :

$$\pi(\theta_1, \theta_2 \dots | T) = \frac{L(\theta|t) \pi(\theta)}{\int L(\theta|t) \pi(\theta) d\theta} \quad (2.37)$$

## 2.16 Markov Chain Monte Carlo (MCMC)

*Markov Chain Monte Carlo* (MCMC) merupakan pendekatan yang digunakan untuk mengatasi kesulitan dalam menentukan integral posterior yang membutuhkan proses integrasi yang rumit dan cukup lama. *Markov Chain* atau rantai markov merupakan proses stokastik dimana waktu dan ruang keadaan adalah distrit. Secara umum dapat dikatakan bahwa kondisi  $n + 1$  *Markov Chain* hanya dipengaruhi oleh kondisi  $n$  bukan kondisi sebelum-sebelumnya. Sedangkan pendekatan *Monte Carlo* merupakan metode numerik menggunakan generasi nomor acak untuk menghitung integral atau permasalahan matematis yang sulit dipecahkan.

Skenario yang digunakan data sampel pada umumnya adalah dengan metode *Gibbs Sampler*. *Gibbs Sampling* merupakan teknik untuk membangkitkan variabel random dari suatu distribusi marginal secara langsung tanpa harus menghitung fungsi kepadatan peluang [20]. Algoritma dari *Gibbs Sampling* adalah sebagai berikut [20] :

1. Menentukan nilai awal (*initial value*) untuk masing-masing parameter  

$$\boldsymbol{\theta}^{(0)} = (\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, \dots, \theta_p^{(0)})$$
2. Membangkitkan komponen  $\boldsymbol{\theta}^{(q+1)} = (\theta_1^{(q+1)}, \theta_2^{(q+1)}, \dots, \theta_p^{(q+1)})$ , dimana nilai dari  
 $\theta_1^{(q+1)}$  berasal dari  $p(\theta_1 | x, \theta_2^{(q)}, \theta_3^{(q)}, \dots, \theta_p^{(q)})$   
 $\theta_2^{(q+1)}$  berasal dari  $p(\theta_2 | x, \theta_1^{(q+1)}, \theta_3^{(q)}, \dots, \theta_p^{(q)})$   
 $\vdots$   
 $\theta_p^{(q+1)}$  berasal dari  $p(\theta_p | x, \theta_1^{(q+1)}, \theta_2^{(q+1)}, \dots, \theta_{p-1}^{(q+1)})$
3. Melakukan *monitoring* terhadap kekonvergenan algoritma. Apabila algoritma belum konvergen, maka perlu membangkitkan lebih banyak observasi dan mengulangi langkah (1) dan (2).
4. Membuang  $b$  observasi pertama (*burn in period*) untuk menghindari *initial value*.
5. Menganggap  $\boldsymbol{\theta}^{(1)}, \boldsymbol{\theta}^{(2)}, \dots, \boldsymbol{\theta}^{(x)}$  sebanyak  $b$  observasi pertama sudah dibuang, kemudian diperoleh  $\boldsymbol{\theta}^{(b+1)}, \boldsymbol{\theta}^{(b+2)}, \dots, \boldsymbol{\theta}^{(r)}$  sebagai sampel untuk analisis *posterior*.
6. Membuat *plot* distribusi *posterior*.
7. Mendapatkan *mean*, median, simpangan baku dari distribusi *posterior*.

### 2.17 Akaike's Information Criterion (AIC)

AIC adalah penduga kualitas relatif dari model statistik untuk sekumpulan data yang diberikan. Diberikan beberapa model untuk data, AIC memperkirakan kualitas masing-masing model, menyediakan sarana untuk pemilihan model tersebut. Kriteria ini

mempertimbangkan banyaknya parameter pada model dan dapat digunakan untuk membandingkan model dengan distribusi probabilitas. Kriteria AIC dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$AIC = -2 \ln L(\hat{\theta}) + 2N \quad (2.38)$$

dengan :

$L(\hat{\theta})$  : Nilai maksimum dari fungsi *likelihood*

$N$  : Jumlah parameter

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini dijelaskan mengenai metodologi penelitian untuk menyelesaikan Tugas Akhir. Metodologi penelitian meliputi penjelasan tentang objek penelitian, tahap penelitian, serta diagram alir.

#### **3.1 Jenis dan Sumber Data**

##### **1. Jenis Data**

Jenis data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yaitu jadwal & instruksi pemeliharaan *preventive* periode Januari 2010-Desember 2019 pada Lampiran A, dan data waktu antar kerusakan (*Time Between Failure*) *High Pressure Boiler Feed Pump* periode Januari 2010-Desember 2019 pada Lampiran B.

##### **2. Sumber Data**

Data berasal dari divisi perencanaan dan pengendalian pemeliharaan PLTGU PT X yang telah tercatat. Data yang diperoleh adalah jadwal & instruksi pemeliharaan *preventive* periode Januari 2010-Desember 2019 pada Lampiran A, dan data *downtime High Pressure Boiler Feed Pump* yang berasal dari pemeliharaan *breakdown*, *overhaul*, dan *preventive* yang didefinisikan sebagai data waktu antar kerusakan periode Januari 2010-Desember 2019 pada Lampiran B.

#### **3.2 Tahap Penelitian**

Adapun tahap-tahap penyelesaian penelitian Tugas Akhir ini sebagai berikut:

##### **1. Studi Literatur**

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan teori pendukung yang menunjang dan relevan dengan masalah Tugas Akhir ini, yaitu mengenai *High Pressure Boiler Feed Pump*, distribusi kerusakan, penentuan distribusi yang sesuai, estimasi parameter, reliabilitas, estimasi sisa umur, metode Bayes, dan pemeliharaan. Studi literatur yang digunakan berupa *e-book*, jurnal, hasil penelitian

sebelumnya, dan *paper* internasional yang berkaitan dengan Tugas Akhir.

## 2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data sekunder waktu kerusakan mesin (*downtime*) dan jadwal & instruksi pemeliharaan *preventive High Pressure Boiler Feed Pump* pada lokasi tujuan penelitian Tugas Akhir di PT X periode Januari 2010-Desember 2019. Data *downtime* yang telah diperoleh akan diolah sehingga didapatkan data waktu antar kerusakan (*time between failure* (TBF)) dari *High Pressure Boiler Feed Pump*. Setelah itu, dilakukan penentuan distribusi yang sesuai dengan identifikasi distribusi berdasarkan data waktu antar kerusakan (TBF).

## 3. Penentuan Distribusi yang Sesuai dengan Identifikasi Distribusi

Distribusi kerusakan yang digunakan pada penelitian ini adalah distribusi *Mixture Weibull*, Eksponensial, Weibull, Lognormal, dan Normal. Pada tahap ini dilakukan beberapa tahap identifikasi yaitu dengan membuat statistika deskriptif untuk mengetahui sifat dari data tersebut sehingga dapat ditentukan kemungkinan distribusi yang sesuai, selanjutnya membuat histogram untuk mempermudah pembacaan data dan mengidentifikasi adanya distribusi bimodal/ multimodal, tahap selanjutnya adalah dengan pencarian *Index of Fit* terbesar dari kemungkinan distribusi kerusakan yang sesuai. Pada distribusi *Mixture Weibull* dilakukan estimasi parameter terlebih dahulu.

## 4. Uji Kesesuaian Distribusi

Pada tahap ini dilakukan uji kesesuaian distribusi dari *Index of Fit* terbesar sebagai dugaan. Uji kesesuaian distribusi atau *Goodness of Fit* pada penelitian ini terdiri dari Uji Barlett untuk distribusi Eksponensial, Uji Mann untuk distribusi Weibull, dan Uji Kolmogorov-Smirnov untuk distribusi Normal dan Lognormal. Setelah itu, apabila distribusi dari *Index of Fit* terbesar tidak

memenuhi uji kesesuaian distribusi, maka uji kesesuaian distribusi akan dilakukan pada distribusi dari *Index of Fit* terbesar kedua, dan seterusnya sampai ditemukan distribusi yang sesuai dengan uji kesesuaian distribusi.

### **5. Penentuan Nilai Parameter Distribusi**

Pada tahap ini dilakukan penentuan estimasi nilai parameter dari distribusi *Mixture Weibull* dan juga distribusi kerusakan yang sesuai berdasarkan uji kesesuaian distribusi. Estimasi parameter dilakukan dengan menggunakan metode Bayes. Selanjutnya akan dilakukan plot Kaplan-Meier dan perbandingan nilai AIC sebagai perbandingan untuk menentukan distribusi yang sesuai.

### **6. Penentuan Nilai Reliabilitas**

Pada tahap ini dilakukan penentuan nilai reliabilitas berdasarkan nilai parameter yang telah diperoleh.

### **7. Penentuan Estimasi Sisa Umur**

Pada tahap ini dilakukan estimasi sisa umur berdasarkan nilai reliabilitas yang telah diperoleh.

### **8. Kesimpulan dan Saran**

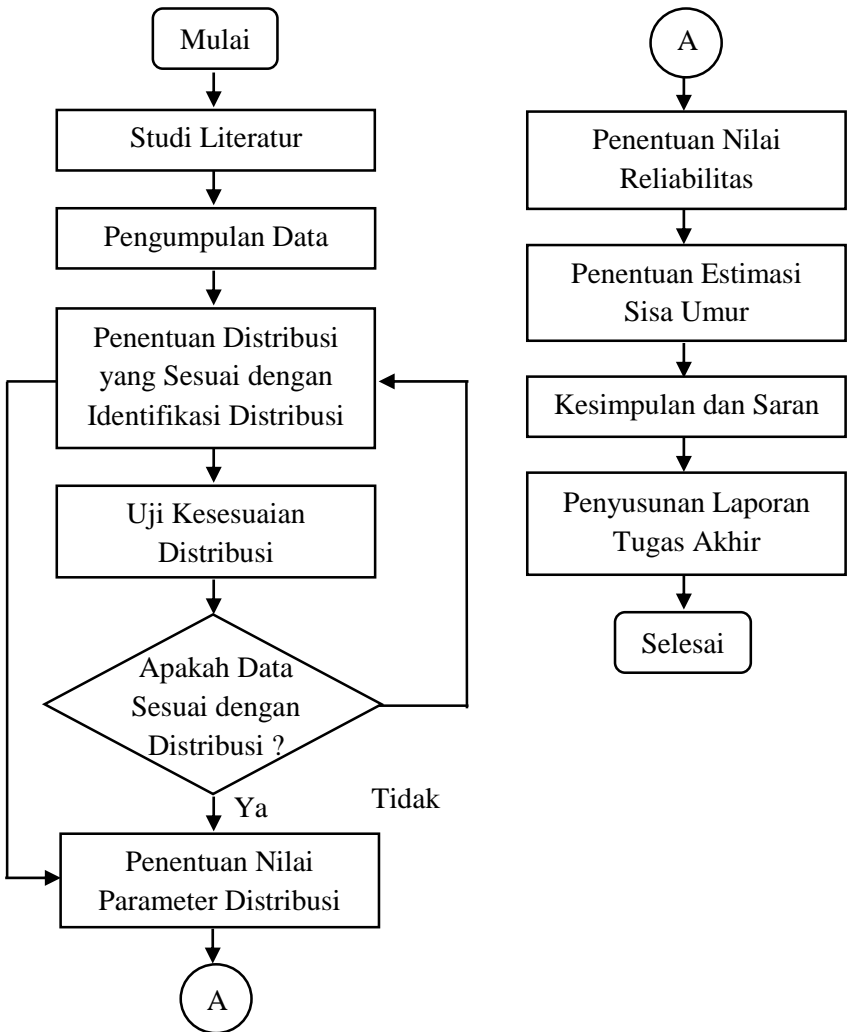
Pada tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan yang merupakan ringkasan akhir dari hasil penelitian yang menjawab tujuan penelitian. Setelah itu diberikan pula saran, baik untuk perusahaan maupun untuk penelitian mendatang yang berupa perbaikan maupun pengembangan dari penelitian yang telah dilakukan demi kemajuan bersama.

### **9. Penyusunan Laporan Tugas Akhir**

Pada tahap ini dibuat penyusunan laporan Tugas Akhir.

Adapun tahap-tahap penelitian Tugas Akhir diatas dapat ditunjukkan dalam diagram alir Gambar 3.1.





**Gambar 3.1** Diagram Alir Metodologi Penelitian

## **BAB IV**

### **ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini membahas mengenai *High Pressure Boiler Feed Pump* pada proses produksi Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU), penentuan distribusi yang sesuai dengan identifikasi distribusi kerusakan, uji kesesuaian distribusi kerusakan, penentuan nilai parameter distribusi, penentuan nilai reliabilitas, dan penentuan estimasi sisa umur dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan.

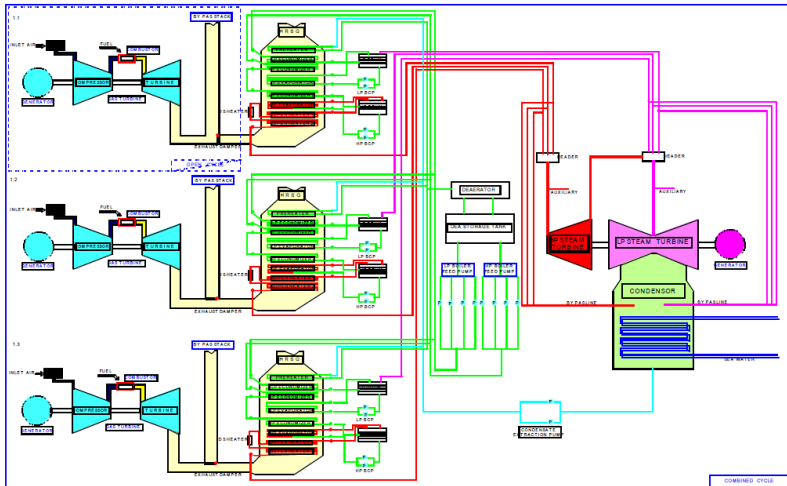
#### **4.1 *High Pressure Boiler Feed Pump***

Pada proses produksi PLTGU, gas buang yang berasal dari turbin gas Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dimanfaatkan untuk memanaskan air di *Heat Recovery System Generator* (HRSG) hingga menjadi uap dimana uap yang dihasilkan tersebut digunakan sebagai fluida kerja turbin uap (*steam turbine*) Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). *Heat Recovery System Generator* (HRSG) merupakan *heat exchanger* dari gas ke air dengan memanfaatkan energi sisa gas turbin untuk menghasilkan uap dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Bagian utama dari HRSG, yaitu : *preheater*, *high pressure* (HP) *economizer primary*, *HP Secondary*, *low pressure* (LP) *economizer*, *HP evaporator*, *LP evaporator*, *primary superheater*, dan *secondary superheater*.

Salah satu komponen penting penunjang PLTGU untuk mengontrol dan mensirkulasikan air ke HRSG tepatnya di *economizer* dari *feed water* yang berasal *deaerator* adalah *boiler feed pump* atau pompa pengisi *boiler*. Air tersebut sebelum masuk ke *economizer* mengalami pemanasan awal di *preheater* kemudian dialirkan ke *deaerator*. *Deaerator* berfungsi untuk mengikat kandungan gas-gas pada air yang dapat menyebabkan korosi. Setelah dari *deaerator*, air dibagi menjadi dua bagian berdasarkan tekanan yaitu *High Pressure* (HP) dan *Low Pressure* (LP) *feed water* yang nantinya akan dialirkan ke *HP economizer primary*, *HP economizer secondary*, dan *LP economizer* masing-masing

menggunakan *High Pressure Boiler Feed Pump* (HP BFP) dan *Low Pressure Boiler Feed Pump* (LP BFP). Skema PLTGU PT X dalam satu blok dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Pada penelitian ini berfokus pada HP BFP Blok I PLTGU di PT X. HP BFP merupakan salah satu aplikasi pompa sentrifugal berskala besar di industri PLTGU yang mensirkulasikan air bertekanan tinggi dari *deaerator* ke HRSG tepatnya di HP *economizer primary & secondary*. Jenis pompa yang digunakan adalah *sulzer pump* tipe sentrifugal multistage (9-stage) dengan kecepatan 2972 rpm dan kapasitas 207,5 m<sup>3</sup>/h. Gambar HP BFP PLTGU PT X dapat dilihat pada Gambar 4.2.



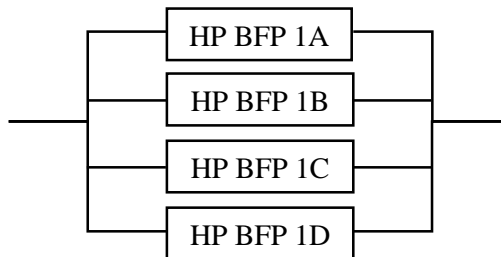
**Gambar 4.1** Skema Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) PT X dalam Satu Blok

HP BFP PLTGU di PT X beroperasi selama 24 jam setiap hari. Jumlah pompa sebanyak empat dengan maksimum tiga pompa utama beroperasi dan satu pompa dalam kondisi siaga (*standby*). Pompa yang siaga diaktifkan secara manual ketika komponen utama mengalami kerusakan. Konfigurasi pompa yang beroperasi sebanding dengan konfigurasi HRSG yang sedang beroperasi.

Sistem akan mengalami kegagalan apabila tidak ada HP BFP yang beroperasi, dan akan tetap beroperasi apabila minimal ada satu HP BFP yang beroperasi. HP BFP dapat digambarkan sebagai sistem *k-out-of-n* dengan satu komponen *cold standby*, dimana  $k = 1$  dan  $n = 3$ . Skema HP BFP Blok I dapat dilihat pada Gambar 4.3.



**Gambar 4.2** High Pressure Boiler Feed Pump PLTGU PT X



**Gambar 4.3** Skema HP BFP Blok I

Pemeliharaan yang dilakukan PT X terhadap HP BFP terdiri dari *corrective maintenance* dan *preventive maintenance*. *Corrective maintenance* terbagi menjadi dua, yaitu *breakdown maintenance* dan *overhaul*. *Breakdown maintenance* atau *corrective maintenance* tidak terencana merupakan pemeliharaan yang dilakukan setelah pompa mengalami kerusakan. Sedangkan, *Overhaul* atau *corrective maintenance* terencana merupakan pemeliharaan berupa penggantian komponen mesin secara

serentak yang sudah direncanakan. Di PT X, *Overhaul* pada komponen yang beroperasi kontinu dilakukan rata-rata satu tahun sekali. *Preventive maintenance* merupakan pemeliharaan yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan, atau cara pemeliharaan yang direncanakan untuk pencegahan. *Preventive maintenance* HP BFP dilakukan setiap bulan sekali dengan melakukan tindakan pemeliharaan berupa pengecekan kondisi pompa. Jadwal dan instruksi pekerjaan *preventive maintenance* HP BFP Blok I dapat dilihat pada Lampiran A.

#### **4.2 Penentuan Distribusi yang Sesuai dengan Identifikasi Distribusi**

Hal pertama yang dilakukan adalah penentuan distribusi kerusakan yang sesuai dengan data *time between failure* (TBF) tiap HP BFP periode Januari 2010-Desember 2019 pada Lampiran B. Penentuan distribusi dapat dilakukan dengan identifikasi distribusi, uji kesesuaian distribusi (*Goodness of Fit Test*), dan estimasi parameter. Identifikasi distribusi dari data TBF HP BFP dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan yaitu hitung statistik deskriptif, buat histogram, atau hitung nilai *Index of Fit* dari data berdasarkan *least square curve*.

##### **a. Statistik Deskriptif**

Pada tahap ini dilakukan deskripsi dari sifat data TBF HP BFP berdasarkan statistik deskriptif pada masing-masing HP BFP. Deskripsi meliputi ukuran pemusatan data dan *dispersion*, yaitu mean, median, dan standard deviasi dan juga karakteristik dari distribusi meliputi *skewness* dan kurtosis. Hasil perhitungan *mean* dengan menggunakan persamaan (2.2), median menggunakan persamaan (2.3), variansi menggunakan persamaan (2.4), standar deviasi menggunakan persamaan (2.5), *skewness* menggunakan persamaan (2.6) dan *kurtosis* menggunakan persamaan (2.7) pada masing-masing HP BFP disajikan pada Tabel 4.1.

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa data TBF HP BFP 1A memiliki nilai *skewness* 0,59359 dengan kurtosis 1,17768

sehingga distribusi kejadian TBF bukan distribusi normal. Pada distribusi Normal nilai *skewnees* nol dan kurtosis adalah tiga. Nilai mean distribusi kejadian TBF sebesar 206,25 lebih besar dari median yang bernilai 168 dan lebih kecil dari variansi yang bernilai 37371,111364. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi kejadian dapat berbentuk *Mixture* Weibull, Weibull, Eksponensial, dan Lognormal.

**Tabel 4.1** Perhitungan Statistik Deskriptif HP BFP

Ringkasan Statistik	HP BFP			
	1A	1B	1C	1D
Mean	206,25	192,57143	258,81818	120,13043
Median	168	117	206	87
Modus	-	117	-	-
Standard Deviasi	193,31610	215,26289	219,58589	115,64220
Variansi	37371,11364	46338,10989	48217,9636	13373,11858
Kurtosis	1,17768	3,38068	1,93934	3,27435
Skewness	0,59359	1,05320	0,72161	0,85947
Minimum	6	18	21	6
Maximum	507	739	657	441
Range	501	721	636	435
Sum	2475	2696	2847	2763
Count	12	14	11	23

Pada data TBF HP BFP 1B, 1C, dan 1D memiliki nilai *skewness* tidak sama dengan nol dan kurtosis bukan tiga, maka distribusi kejadian TBF bukan distribusi normal. Mengacu pada nilai mean yang lebih besar daripada nilai median dan lebih kecil daripada nilai variansi, hal ini menunjukkan bahwa distribusi kejadian TBF dapat berbentuk *Mixture* Weibull, Weibull, Eksponensial, dan Lognormal.

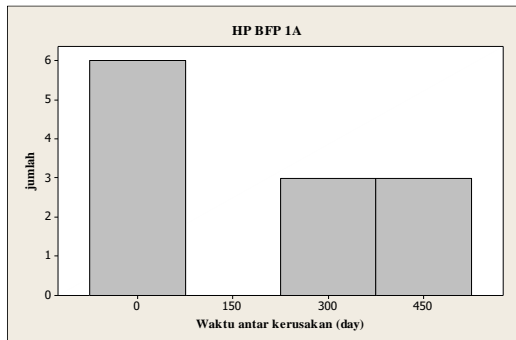
## b. Histogram

Untuk mempermudah dalam pembacaan data TBF HP BFP pada Lampiran B dan juga mengidentifikasi adanya distribusi bimodal/ multimodal, maka perlu dibentuk suatu histogram dengan

menggunakan aturan *Sturges* sebagai penentu jumlah kelas. Berikut contoh perhitungan jumlah kelas pada data TBF HP BFP 1A dengan menggunakan persamaan (2.1) diperoleh :

$$k = \lceil 1 + 3,3 \log_{10} 12 \rceil = 4$$

Berdasarkan perhitungan tersebut maka didapatkan histogram pada Gambar 4.4. Histogram masing-masing data TBF HP BFP dapat dilihat pada Lampiran C. Berdasarkan keempat histogram diketahui bahwa adanya dugaan distribusi *Mixture* pada data TBF HP BFP 1A & 1C.



**Gambar 4.4** Histogram Data TBF HP BFP 1A

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab ini diberikan kesimpulan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, serta saran untuk penelitian selanjutnya.

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dalam Tugas Akhir ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Reliabilitas *High Pressure Boiler Feed Pump* dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan *preventive* kumulatif dapat diperoleh sebesar 84,96%.
2. Estimasi sisa umur *High Pressure Boiler Feed Pump* dengan mempertimbangkan faktor pemeliharaan *preventive* kumulatif dapat diperoleh sebesar 247 hari.

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan pembahasan dan kesimpulan yang telah dilakukan, ada beberapa saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Menggunakan metode Bootstrap atau dengan metode lain dalam menentukan nilai parameter dari masing-masing distribusi dalam kasus data berukuran kecil ( $< 30$ ).
2. Mempertimbangan faktor biaya pemeliharaan, selain mempertimbangkan waktu pemeliharaan *preventive*.
3. Menerapkan pada sistem *k-out-of-n* dengan komponen *cold standby*  $> 1$ .
4. Menerapkan pada distribusi *Mixture* yang lain.



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ebeling, Charles E. 1997. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. The McGraw-Hill Companies, Singapore.
- [2] Cha, Ji dan Finkelstein, M. 2018. *Point Processes for Reliability Analysis Shock and Repairable Systems*. Springer International Publishing AG, Switzerland.
- [3] Shen, Y. 2009. *Reliability Modeling and Analysis with Mean Residual Life*. Department of Industrial and Systems Engineering, National University of Singapore, Singapore.
- [4] Ahmad, R. dan Kamaruddin, S. 2012. *An Overview Of Time-Based And Condition-Based Maintenance In Industrial Application*. Computer & Industrial Engineering, Vol 63, No 1, 135-149.
- [5] Setiawan, A.B. 2018. Perencanaan Ulang Instalasi High Pressure Boiler Feed Pump pada Blok III PLTGU PT. PJB UP Gresik. Tugas Akhir Jurusan Teknik Industri Mekanik, FV, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [6] Erylmaz, S. 2012. *On the mean residual life of a k-out-of-n:G system with a single cold standby component*. European Journal of Operational Research 222, 273-277.
- [7] Famela, B.D. 2017. Analisa Penentuan Sisa Umur Bearing Menggunakan Fungsi Mean Residual Life (Studi Kasus Pada Mesin Sakurai Oliver-66 CV. Bintang Cakra). Jurnal Limits, Vol 14, No 2, 127-143.
- [8] Ramadania, I.F. 2018. Penentuan Estimasi Sisa Umur Pompa Air pada Sistem Jaringan Paralel (Studi Kasus : PDAM Bangkalan). Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [9] Septiana, W.A. 2017. Penerapan Metode Bayes dalam Menentukan Model Estimasi Reliabilitas Pompa Submersible pada Rumah Pompa Wendit I PDAM Kota Malang. Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- [10] Ruhi, S. Sarker, S. dan Karim, M.R. 2015. *Mixture models for analyzing product reliability data: a case study*. SpringerPlus, 4:634.
- [11] Walpole, R.E. 1992. Pengantar Statistika Edisi ke-3. PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- [12] Pasaribu, Amudi. 1975. Pengantar Statistik. Gahlia Indonesia, Jakarta.
- [13] Ariffin, M. dan Shafie, A. 2018. *Investigation of failure times parameter through standard and mixture Weibull distribution*. Journal of Physics, 1123:012024.
- [14] Fernandes, A.A.R dan Solimun. 2016. *Pemodelan Statistika Pada Analisis Reliabilitas dan Survival*. UB Press, Malang.
- [15] Dhillon, B.S. 2006. *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Taylor and Francis Group, New York and London.
- [16] Kuo, W. dan Zuo, M.J. 2003. *Optimal Reliability Modeling Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Inc, Canada.
- [17] Mi, Jie. 2008. *Burn-In and Maintenance Policies*. John Wiley & Sons, Canada.
- [18] Robert, C. P. 1994. *The Bayes Choice*. Springer-Verlag New York Inc. New York.
- [19] Sahoo, P. 2008. *Probability and Mathematical Statistics*. Department of Mathematics University of Louisville, KY 40292 USA.
- [20] Ntzoufras, Ioannis. 2009. *Bayesian Modeling Using WinBugs*. Canada : John Wiley dan Sons, Inc.
- [21] Nitivijaya, M. 2016. *Pemodelan Angka Lama Sekolah di Provinsi Papua Barat dengan Pendekatan Model Mixture Survival Bayesian*. Tesis Jurusan Statistika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [22] Sun, Yong. 2006. *Reliability Prediction of Complex Repairable System : an engineering approach*. PhD thesis, Queensland University of Technology.

- [23] Roohi. 2003. *Some Problems in Reliability Theory*. Department Statistics & Operations Research, Aligarh Muslim University, India.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN A

### Jadwal dan Instruksi Pekerjaan *Preventive Maintenance* HP BFP Blok I PLTGU PT X

Tanggal	Instruksi Pekerjaan
01-01-2009 s/d 31-12-2019	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Bersihkan pompa dari kotoran</li><li>2. Periksa level minyak pelumas brg, tambah bila perlu</li><li>3. Cek filter pelumas, jika kotor bersihkan</li><li>4. Cek kebocoran mechanical seal</li><li>5. Periksa pompa minyak pelumas (aop dan mop)</li><li>6. Periksa cooling water</li><li>7. Cek pemipaan cooling &amp; sealing</li><li>8. Catat dan laporkan jika abnormal</li><li>9. Cek noise dan getaran</li><li>10. Cek temperatur bearing</li><li>11. Cek lapisan cat, jika ada pengelupasan/korosi lakukan perbaikan</li><li>12. Cek kondisi isolasi piping</li></ol>

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN B

Data *Time Between Failure* (TBF) HP BFP Blok I PLTGU PT X  
Periode Januari 2010-Desember 2019

Tabel B1. TBF HP BFP 1A

No	Tanggal Kerusakan	Tanggal Selesai	Durasi Kerusakan (hari)	TBF (hari)
1	06-01-2010	18-01-2010	12	0
2	22-02-2010	22-02-2010	0	35
3	14-07-2011	20-09-2011	68	507
4	26-09-2011	06-12-2011	71	6
5	11-02-2013	13-02-2013	2	433
6	23-12-2013	27-12-2013	4	313
7	25-02-2014	25-02-2014	0	60
8	28-04-2015	04-05-2015	6	427
9	19-06-2015	16-12-2015	180	46
10	16-11-2016	23-03-2017	127	336
11	07-04-2017	17-04-2017	10	15
12	18-01-2018	12-02-2018	25	276
13	05-03-2018	09-05-2018	65	21

Tabel B2. TBF HP BFP 1B

No	Tanggal Kerusakan	Tanggal Selesai	Durasi Kerusakan (hari)	TBF (hari)
1	06-01-2010	14-01-2010	8	0
2	01-02-2010	25-03-2010	52	18
3	13-01-2011	13-01-2011	0	294
4	18-03-2011	03-08-2011	138	64
5	28-11-2011	14-12-2011	16	117
6	09-01-2012	12-01-2012	3	26
7	23-02-2012	23-02-2012	0	42
8	03-03-2014	26-10-2014	237	739
9	21-12-2015	04-01-2016	14	421
10	30-05-2016	15-06-2016	16	147



**LAMPIRAN B : Lanjutan**

No	Tanggal Kerusakan	Tanggal Selesai	Durasi Kerusakan (hari)	TBF (hari)
11	10-10-2016	26-10-2016	16	117
12	16-11-2016	27-02-2017	103	21
13	07-06-2018	04-07-2018	27	465
14	02-08-2018	03-09-2018	32	29
15	18-03-2019	25-03-2019	7	196

Tabel B3. TBF HP BFP 1C

No	Tanggal Kerusakan	Tanggal Selesai	Durasi Kerusakan (hari)	TBF (hari)
1	01-02-2010	31-03-2010	58	0
2	26-11-2010	01-12-2010	5	240
3	05-08-2011	05-08-2011	0	247
4	26-08-2011	26-08-2011	0	21
5	26-09-2011	27-09-2011	1	31
6	26-11-2012	27-11-2012	1	426
7	12-06-2013	18-02-2014	251	197
8	21-10-2015	26-10-2015	5	610
9	19-05-2016	23-05-2016	4	206
10	16-11-2016	25-07-2017	251	177
11	29-08-2017	22-09-2017	24	35
12	11-07-2019	12-08-2019	32	657

Tabel B4. TBF HP BFP 1D

No	Tanggal Kerusakan	Tanggal Selesai	Durasi Kerusakan (hari)	TBF (hari)
1	01-02-2010	18-03-2010	45	0
2	27-04-2010	29-04-2010	2	40
3	11-02-2011	14-02-2011	3	288
4	30-04-2012	03-05-2012	3	441
5	26-11-2012	27-11-2012	1	207

**LAMPIRAN B : Lanjutan**

No	Tanggal Kerusakan	Tanggal Selesai	Durasi Kerusakan (hari)	TBF (hari)
6	19-07-2013	29-07-2013	10	234
7	03-03-2014	06-03-2014	3	217
8	24-04-2014	24-04-2014	0	49
9	15-07-2014	26-10-2014	103	82
10	11-12-2014	11-12-2014	0	46
11	13-03-2015	19-10-2015	220	92
12	23-11-2015	01-12-2015	8	35
13	11-03-2016	17-03-2016	6	101
14	28-03-2016	20-10-2016	206	11
15	26-10-2016	17-11-2016	22	6
16	23-02-2017	01-03-2017	6	98
17	30-03-2017	11-04-2017	12	29
18	13-07-2017	18-08-2017	36	93
19	13-11-2017	12-12-2017	29	87
20	04-01-2018	22-01-2018	18	23
21	06-02-2018	14-02-2018	8	15
22	22-03-2018	22-03-2018	0	36
23	30-11-2018	30-01-2019	61	253
24	06-11-2019	15-11-2019	9	280

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Dian Wulandari atau biasa dipanggil Dian, lahir di Lamongan pada 13 Maret 1998. Anak bungsu dari dua bersaudara. Pendidikan formal yang pernah ditempuh yaitu SD Ma'arif YPM, SMP YPM 1 Taman, dan SMA Wachid Hasyim 2 Taman. Pada tahun 2016, penulis menempuh pendidikan S1 di Departemen Matematika

Fakultas Sains dan Analitika Data Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan bidang minat Matematika Industri dan Keuangan. Selama mengikuti perkuliahan di ITS, penulis turut aktif dalam beberapa kegiatan kemahasiswaan di UKM sebagai Anggota KOPMA dr. Angka ITS 2016/2017, dan di tingkat Departemen sebagai *Staff Student Welfare Department HIMATIKA ITS 2017/2018*, *Head of Department Student Welfare HIMATIKA ITS 2018/2019*, serta sebagai *Staff Big Event Ibnu Muqhlah, Lembaga Dakwah Jurusan Matematika 2017/2019*. Selain berorganisasi, penulis juga mengikuti Kerja Praktik di PT Pembangkitan Jawa-Bali (PJB) Unit Pembangkitan Gresik selama satu bulan dan ditempatkan pada divisi Perencanaan dan Pengendalian (RENDAL) Operasi PLTGU. Demikian biodata tentang penulis, jika ingin memberikan saran, kritik, dan diskusi mengenai Tugas Akhir ini dapat dikirimkan melalui email [dianwulandari013@gmail.com](mailto:dianwulandari013@gmail.com). Terimakasih. Semoga bermanfaat!