



TESIS - BM185047

**OPTIMASI PEMELIHARAAN KOMPONEN GAS  
TURBINE UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN  
UNIT PEMBANGKIT LISTRIK**

**DONI ARDHI DHARMAWAN**

**09211750016007**

**Dosen Pembimbing:  
Dr. Ir. Mokh Suef, M.Sc (Eng)**

**Departemen Manajemen Teknologi  
Fakultas Desain Kreatif dan Bisnis Digital  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020**

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Manajemen Teknologi (M.MT)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**Doni Ardhi Dharmawan**

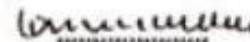
**NRP : 009211750016007**



1. **Dr. Ir. Mokh. Suef, M.Sc(Eng)**  
**NIP: 196506301990031002**

**Penguji:**

2. **Prof. Dr. Ir Udisubakti Ciptomulyono, M.EngSc**  
**NIP: 195903181987011001**



3. **Dr. Ir. Bustanul Arifin Noer, MSc**  
**NIP: 197505102000031001**



**Kepala Departemen Manajemen Teknologi**

**Fakultas Desain Kreatif Dan Bisnis Digital**

**Prof. Ir. I Nyoman Pujawan, M.Eng, Ph.D, CSCP**

**NIP: 196912311994121076**

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## OPTIMASI PEMELIHARAAN KOMPONEN GAS TURBINE UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN UNIT PEMBANGKIT LISTRIK

Nama : Doni Ardhi Dharmawan  
NRP : 09211750016007  
Pembimbing : Dr. Ir. Mokh Suef, M.Sc (Eng)

### ABSTRAK

Kegagalan pada peralatan merupakan permasalahan yang harus dihadapi oleh tiap industri. Seperti kasus yang dialami oleh pembangkit listrik PLTGU Z yaitu pada peralatan Gas Turbine. Tercatat sebanyak 2092 kegagalan yang terjadi merupakan jenis pemeliharaan yang tidak terencana. Untuk itu sangat diperlukan strategi pemeliharaan pencegahan yang efektif untuk mengurangi resiko terjadinya kegagalan pada komponen Gas Turbine. Pemeliharaan komponen secara berkala adalah salah satu cara untuk menjaga keandalan, dimana pada kondisi sekarang aktivitas tersebut masih berdasarkan referensi manual book pabrikaan, dan belum mempertimbangkan data historis kerusakan pada masing masing komponen. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan yang optimal agar nilai target keandalan peralatan Gas Turbine tetap terjaga, serta mengoptimalkan biaya pemeliharaan. Tahap pertama yaitu mencari nilai keandalan tiap komponen menggunakan software *Weibull ++6*. Tahap kedua melakukan perhitungan untuk mengetahui waktu *minimum downtime* dan minimum biaya *preventive maintenance*. Tahap ketiga melakukan penentuan optimasi keandalan peralatan dan konsekuensi kenaikan biaya yang dibutuhkan sesuai target keandalan sistem. Setelah dilakukan optimasi keandalan sistem dengan nilai target sebesar  $R_{(G)} = 0,7$  didapatkan hasil optimasi dengan interval pemeliharaan preventive terlama yaitu gas nozzle dengan lama interval 931 jam, dan saving yang diperoleh setelah optimasi keandalan yaitu sebesar \$ 330.447

**Kata kunci :** *Gas Turbine, Keandalan, Preventive Maintenance, Corrective Maintenance.*

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **OPTIMIZATION OF GAS TURBINE COMPONENT MAINTENANCE TO IMPROVE RELIABILITY OF POWER PLANT INDUSTRIES**

Name : Doni Ardhi Dharmawan

NRP : 09211750016007

Supervisor : Dr. Ir. Mokh Suef, M.Sc (Eng)

### **ABSTRACT**

*Equipment failure is a problem that must be faced by every industry. Such is the case experienced by the power plant Z power plant, the Gas Turbine equipment. As many as 2092 failures that occurred were a type of unplanned maintenance. For this reason, an effective preventative maintenance strategy is needed to reduce the risk of failure in the Gas Turbine component. Maintenance of components on a regular basis is one way to maintain reliability, where in the present conditions the activity is still based on the manufacturer's manual reference, and has not taken into account historical damage data on each component. This study aims to determine the optimal preventative maintenance time intervals so that the target value of the reliability of Gas Turbine equipment is maintained, and optimize maintenance costs. The first step is to look for the reliability value of each component using Weibull ++ 6 software. The second stage performs calculations to determine the minimum downtime and minimum preventive maintenance costs. The third stage is determining the optimization of equipment reliability and the consequent increase in costs required according to the system reliability target. After optimizing the reliability of the system with a target value of  $R(G) = 0.7$ , the optimization results obtained with the longest preventive maintenance intervals, namely gas nozzle with an interval of 931 hours, and savings obtained after the reliability optimization of \$ 330,447*

**Keywords** : Gas Turbine, Reliability, Preventive Maintenance, Corrective Maintenance.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah Robbil ‘Alamin, atas segala rahmat dan hidayah Nya sehingga penulis dapat menyusun Tesis ini dengan judul “Optimasi Pemeliharaan Komponen Gas Turbine untuk Meningkatkan Keandalan Unit Pembangkit Listrik”

Tesis ini disusun sebagai salah satu persyaratan wajib yang diperlukan. Nantinya untuk memperoleh gelar magister Manajemen Teknologi pada Jurusan Manajemen Industri MMT-ITS. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Istri, anak dan Orang tua tercinta yang telah memberikan dukungan dan doanya kepada penulis untuk menyelesaikan Tesis ini dengan baik.
2. Bapak Dr. Ir. Mokh. Suef, M.Sc (Eng) sebagai dosen pembimbing tesis banyak arahan dan bimbingannya dalam penulisan Tesis ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir Udisubakti Ciptomulyono, M.EngSc dan Bapak Dr. Ir. Bustanul Arifin Noer, MSc sebagai dosen penguji tesis atas bimbingan dan arahnya agar tulisan ini menjadi lebih baik.
4. Teman-teman angkatan program studi Manajemen Industri yang telah banyak membantu dari proses perkuliahan sampai dengan Tesis ini terselesaikan.
5. Rekan-rekan kerja di PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik dan kantor pusat yang serta seluruh keluarga besar MMT - ITS, para dosen pengajar, karyawan, dan mahasiswa telah banyak memberikan dukungan, ide serta gagasannya dalam menyusun Tesis ini

Penulis menyadari bahwa Tesis ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan agar nantinya jika ada penelitian yang menggunakan referensi dari tesis ini sekiranya dapat melakukan pembahasan dengan lebih baik.

Surabaya, Oktober 2019

Penulis

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB 1 .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	7
1.3 Tujuan Penelitian .....	8
1.4 Manfaat Penelitian .....	8
1.5 Batasan Masalah .....	8
1.6 Asumsi Penelitian .....	9
1.7 Sistematika Penulisan Proposal Tesis .....	9
BAB 2 .....	11
KAJIAN PUSTAKA .....	11
2.1 Sistem <i>Gas Turbine</i> .....	11
2.2 Pemeliharaan ( <i>Maintenance</i> ) .....	22
2.2.1 <i>Preventive Maintenance</i> .....	24
2.2.2 <i>Corrective Maintenance</i> .....	25
2.3 Definisi <i>Reliability Management</i> .....	27
2.3.1 Fungsi Keandalan .....	27
2.3.2 Penilaian Keandalan .....	27
2.4 <i>Mean Time Between Failures (MTBF)</i> .....	27
2.5 Permodelan Sistem .....	28
2.5.1 Sistem Seri .....	28
2.5.2 Sistem Paralel .....	29
2.5.3 Sistem Keandalan Gabungan .....	30
2.6 Laju Kegagalan .....	30
2.6.1 Distribusi Normal .....	31

2.6.2	Distribusi <i>Weibull</i> .....	31
2.6.3	Distribusi <i>Lognormal</i> .....	32
2.6.4	Distribusi Eksponensial .....	33
2.7	Pengujian Distribusi .....	33
2.7.1	<i>Average Goodness of Fit (AvGOF)</i> .....	33
2.7.2	<i>Average of Plot (AvPlot)</i> .....	34
2.7.3	<i>Likelihood Fuction Ratio (LKV)</i> .....	34
2.8	Optimalisasi Interval Waktu Penggantian Komponen .....	34
2.9	Biaya Pemeliharaan Penggantian Komponen .....	36
2.10	Optimasi Keandalan Peralatan .....	38
2.11	Posisi Penelitian .....	38
BAB 3.....		41
METODOLOGI PENELITIAN .....		41
3.1	Studi Literatur dan Studi lapangan .....	41
3.2	Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian.....	42
3.3	Pengambilan Data.....	43
3.4	Pengolahan Data dan Analisis .....	44
3.5	Penarikan Kesimpulan dan Pemberian Rekomendasi .....	46
BAB 4.....		47
4.1	Konfigurasi Peralatan <i>Gas Turbine</i> .....	47
4.1.1	Blok Diagram <i>Auxiliary System</i> .....	47
4.1.2	Blok Diagram Sistem <i>Starting Devices</i> .....	48
4.1.3	Blok Diagram <i>Compressor</i> .....	48
4.1.4	Blok Diagram Sistem <i>Combustor</i> .....	49
4.2	<i>Preventive Maintenance &amp; Corrective Maintenance Cost</i> .....	49
4.3	<i>Time to Failure</i> dan Keandalan Peralatan .....	50
4.3.1	Analisis Keandalan Peralatan .....	51
4.4	Fungsi Padat Peluang (pdf) Peralatan <i>Pony Motor</i> .....	54
4.5	Nilai <i>Reliability</i> Peralatan <i>Pony Motor</i> .....	54
4.6	Rekap Nilai Keandalan Peralatan.....	55
4.7	<i>Preventive Maintenance Cost</i> Kriteria Minimasi Downtime .....	56
4.8	Rekap Nilai Pemeliharaan Minimum Peralatan <i>Gas Turbine</i> .....	57

BAB 5 .....	61
5.1 Optimasi Keandalan Peralatan .....	61
5.2 Korelasi Nilai Keandalan terhadap Biaya Pemeliharaan .....	63
5.3 Sensitivitas Nilai Keandalan terhadap Biaya Pemeliharaan .....	65
BAB 6 .....	73
KESIMPULAN .....	73
6.1 Kesimpulan .....	73
6.2 Saran .....	74
DAFTAR PUSTAKA .....	75

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Data Kapasitas PT Pembangkit Listrik Z.....	1
Gambar 1.1 Peralatan Utama pada <i>Gas Turbine</i> .....	2
Gambar 1.2 Rekap <i>Work Order</i> dari tahun 2016 s.d 2018.....	6
Gambar 4.1 Skema Sederhana Produksi Listrik melalui Gas Turbine.....	11
Gambar 2.1 Skema sederhana peralatan <i>Gas Turbine</i> .....	11
Gambar 2.2 <i>Overview Gas Turbine</i> .....	14
Gambar 2.3 <i>Overview Starting Unit</i> .....	14
Gambar 2.4 <i>Inlet Air Filter</i> .....	16
Gambar 2.5 <i>Inlet Guide Vane</i> .....	17
Gambar 2.6 <i>Igniter</i> .....	18
Gambar 2.7 <i>Fuel Oil Nozzle</i> .....	19
Gambar 2.8 <i>Expantion Joint</i> .....	20
Gambar 2.10 <i>Exciter Set</i> .....	21
Gambar 2.11 Jenis kegiatan pemeliharaan.....	23
Gambar 2.12 Model Keandalan Sistem Seri.....	28
Gambar 2.13 Model Keandalan Sistem Paralel .....	29
Gambar 2.14 Model Keandalan Gabungan.....	30
Gambar 2.15 Ilustrasi <i>Downtime minimization</i> .....	35
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	43
Gambar 4.1 <i>Boundary Condition</i> Penelitian .....	47
Gambar 4.2 <i>Blok Diagram sistem pendukung</i> .....	48
Gambar 4.3 Blok Diagram Keandalan Sistem <i>starting devices</i> .....	48
Gambar 4.4 Blok Diagram Keandalan sistem <i>Compressor</i> .....	49
Gambar 4.5 Blok Diagram Keandalan sistem <i>Combustor</i> .....	49
Gambar 4.6 Grafik waktu downtime terhadap <i>preventive age replacement</i> peralatan <i>pony motor</i> .....	57
Gambar 5.1 Grafik biaya pemeliharaan <i>corrective</i> vs interval waktu pemeliharaan peralatan <i>pony motor</i> .....	64
Gambar 5.2 Grafik biaya pemeliharaan total ( <i>preventive + corrective</i> ) vs interval waktu pemeliharaan peralatan <i>pony motor</i> .....	64
Gambar 5.3 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap <i>preventive</i> dan <i>corrective maintenance cost</i> pada <i>Intake Air Filter</i> .....	66
Gambar 5.4 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap <i>preventive</i> dan <i>corrective maintenance cost</i> pada <i>Inlet Guide Vane</i> .....	67
Gambar 5.5 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap <i>preventive</i> dan <i>corrective maintenance cost</i> pada <i>Gas Nozzle</i> .....	67
Gambar 5.6 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap <i>preventive</i> dan <i>corrective maintenance cost</i> pada <i>Igniter</i> .....	68
Gambar 5.7 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap <i>preventive</i> dan <i>corrective maintenance cost</i> pada <i>Turbine</i> .....	69

Gambar 5.8 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap *preventive* dan *corrective maintenance cost* pada *Lube Oil System* ..... 69

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Detail Kapasitas tiap Blok Pembangkit Listrik Z .....	2
Tabel 1.2. Data Frekuensi Kegagalan pada Peralatan <i>Gas Turbine</i> PT Pembangkit Listrik Z.....	3
Tabel 4.1. Tabel Sistem dan Sub sistem peralatan <i>Gas Turbine</i> .....	47
Tabel 4.2. Tabel waktu perbaikan dan biaya yang diperlukan untuk pemeliharaan <i>Preventive &amp; Corrective</i> .....	50
Tabel 4.3. Tabel waktu antar kegagalan peralatan <i>pony motor</i> .....	51
Tabel 4.4. Tabel uji distribusi kegagalan peralatan <i>pony motor</i> .....	52
Tabel 4.5. Tabel Parameter bentuk, skala, dan lokasi peralatan <i>Gas Turbine</i> .....	54
Tabel 4.6. Tabel Nilai Keandalan Sub Sistem <i>Gas Turbine</i> .....	55
Tabel 4.7. Nilai Keandalan Sub Sistem <i>Gas Turbine</i> .....	58
Tabel 4.8. Tabel Nilai Keandalan Sub Sistem <i>Gas Turbine</i> fungsi minimasi <i>downtime</i> .....	59
Tabel 5.1. Tabel Nilai Keandalan Sub Sistem setelah Optimasi.....	62
Tabel 5.2. Optimasi keandalan pada peralatan <i>Intake Air Filter</i> .....	66
Tabel 5.3. Optimasi keandalan pada peralatan <i>Inlet Guide Vane</i> .....	66
Tabel 5.4. Penentuan Optimasi keandalan pada peralatan <i>Gas Nozzle</i> .....	67
Tabel 5.5. Penentuan Optimasi keandalan pada <i>Igniter</i> .....	68
Tabel 5.6. Penentuan Optimasi keandalan pada <i>Turbine</i> .....	68
Tabel 5.7. Penentuan Optimasi keandalan pada <i>Lube Oil System</i> .....	69
Tabel 5.8. Tabel Interval Waktu dan Biaya <i>Preventive</i> setelah Optimasi keandalan .....	70
Tabel 5.9. Tabel interval waktu dan biaya sebelum dan setelah dilakukan optimasi keandalan.....	71

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

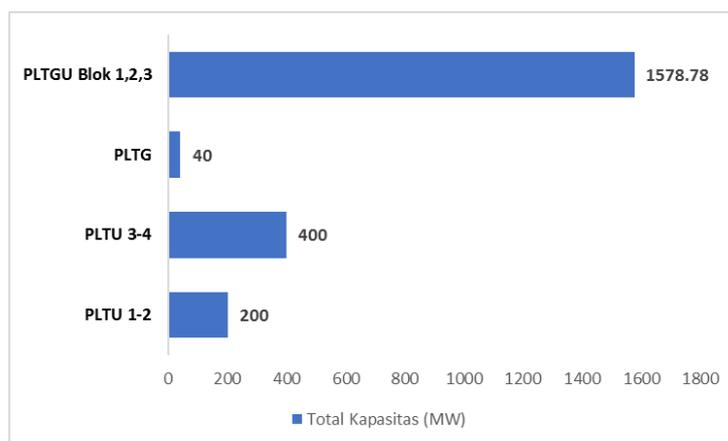


# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PT Pembangkit listrik Z merupakan salah satu perusahaan yang bergerak sebagai produsen pembangkit listrik yang berada di lokasi Gresik, Jawa Timur dengan kapasitas daya mesin pembangkit yang terpasang mencapai 2.218 MW.



Gambar 1.1 Data Kapasitas PT Pembangkit Listrik Z

Berdasarkan data pada saat *commissioning*, pembangkit listrik tenaga gas uap (PLTGU) memiliki daya terpasang paling besar apabila dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga uap maupun gas terutama untuk area lokal yang ada di Gresik. Sistem operasi PLTGU di PT Z terdiri dari tiga (3) Blok, dimana masing-masing blok terdiri dari tiga *gas turbine generator* (GT) dan satu *steam turbine generator* (ST). Untuk satu *gas turbine generator* (GT) daya terpasangnya ialah sebesar 112,45 MW, sedangkan untuk satu *steam turbine* daya terpasangnya adalah sebesar 188,91 MW. Sehingga masing-masing blok memiliki kapasitas daya terpasang sebesar 526,26 MW dan total kapasitas daya terpasang dari 3 blok PLTGU di PT Pembangkit listrik XYZ yaitu sebesar 1578,78 MW.

Tabel 1.1 berikut ini menjelaskan detail kapasitas terpasang peralatan *gas turbine* untuk tiap blok.

Tabel 1.1. Detail Kapasitas tiap Blok Pembangkit Listrik Z

Blok	Type	Kapasitas Terpasang (MW)	Fabrikator
BLOK I	<i>Gas Turbine 1.1</i>	112.45	<i>Mitsubishi - Japan</i>
	<i>Gas Turbine 1.2</i>	112.45	<i>Mitsubishi - Japan</i>
	<i>Gas Turbine 1.3</i>	112.45	<i>Mitsubishi - Japan</i>
	<i>Steam Turbine 1.0</i>	118.91	<i>Mitsubishi - Japan</i>
BLOK II	<i>Gas Turbine 2.1</i>	112.45	<i>Mitsubishi - Japan</i>
	<i>Gas Turbine 2.2</i>	112.45	<i>Mitsubishi - Japan</i>
	<i>Gas Turbine 2.3</i>	112.45	<i>Mitsubishi - Japan</i>
	<i>Steam Turbine 2.0</i>	118.91	<i>Mitsubishi - Japan</i>
BLOK III	<i>Gas Turbine 3.1</i>	112.45	<i>Mitsubishi - Japan</i>
	<i>Gas Turbine 3.2</i>	112.45	<i>Mitsubishi - Japan</i>
	<i>Gas Turbine 3.3</i>	112.45	<i>Mitsubishi - Japan</i>
	<i>Steam Turbine 3.0</i>	118.91	<i>Mitsubishi - Japan</i>

Informasi dari tabel 1.1 diatas menunjukkan bahwa mesin pembangkit listrik dengan jenis *gas turbine* merupakan mesin yang paling banyak digunakan di unit pembangkit listrik Z yaitu dengan jumlah total 9 mesin *gas turbine*.



Gambar 1.1 Peralatan Utama pada *Gas Turbine*

Peralatan utama *gas turbine* sendiri terdiri dari: sistem kontrol, *starting devices*, *compressor*, *combustor*, *turbine*, *generator*, dan *transformer*. Masing-masing sistem dari peralatan gas turbine ini memegang peranan yang sangat penting sesuai dengan fungsi dan perannya masing masing. Dapat dilihat pada gambar 1.1 diatas bahwa nilai keandalan peralatan gas turbine terdiri dari beberapa *equipment* yang tersusun secara serial. Apabila salah satu bagian dari *gas turbine* yang tidak handal maka akan berpengaruh terhadap keandalan sistem secara keseluruhan.

Masing-masing *equipment gas turbine* memiliki fungsi yang spesifik sendiri sendiri dimana berkontribusi terhadap keandalan sistem *gas turbine* secara keseluruhan. Penjelasan singkat terkait fungsi dan komponen pada *gas turbine* adalah sebagai berikut: *digital controller* berfungsi sebagai pusat pengendali semua

aktivitas operasional peralatan *gas turbine*, yang terdiri dari *computer processing unit (CPU)*, *data acquisition system (DAS)*, *sistem governor free*, dan *control flame detector*. *Auxilliary gas turbine*, terdiri dari : sistem pelumas, sistem kontrol hidrolis, sistem bahan bakar, dan sistem isolasi, dan sistem pendingin. Sedangkan untuk *starting devices* sendiri terdiri dari *pony motor*, *starting motor*, *auxilliary gear* dan *torque converter*. Sub sistem/ komponen dari *compressor* meliputi: *intake air filter (IAF)*, *inlet guide vane (IGV)*. Untuk ruang bakar (*combuster*) terdiri dari: *gas nozzle* (Nozzle bahan bakar gas BBG), dan *Igniter*. Peralatan *electrical (generator)* terdiri dari: *exciter set*. Semua sistem dan sub sistem diatas sangat menentukan nilai keandalan sistem *gas turbine*.

Tabel berikut ini menunjukkan data *history* gangguan peralatan yang terdapat pada PT Pembangkit Listrik Z, data kemudian dilakukan *filtering* untuk jenis pemeliharanya dimana hanya untuk aktivitas pemeliharaan *corrective maintenance* dan *breakdown maintenance* saja sehingga mengerucut dan spesifik pada area peralatan *gas turbine*.

Tabel 1.2. Data Frekuensi Kegagalan pada Peralatan *Gas Turbine* PT Pembangkit Listrik Z

No	Main Equipment	Frekuensi Kegagalan (kali)	Presentase Kegagalan	Presentase Kegagalan Kumulatif
1	Generator	53	2.53%	2.53%
2	Transformer	318	15.20%	17.73%
3	Digital Controller	302	14.44%	32.17%
4	Turbine	290	13.86%	46.03%
5	Compressor	161	7.70%	53.73%
6	Cooling System	76	3.63%	57.36%
7	Starting Devices	179	8.56%	65.92%
8	Combustor	299	14.29%	80.21%
9	Fuel System	62	2.96%	83.17%
10	Exhaust System	35	1.67%	84.85%
11	Auxiliary System	317	15.15%	100.00%

Sumber : *Ellipse Database, tahun 2010 s.d 2018*

Berdasarkan Tabel 2 diatas terlihat beberapa area *equipment* yang menunjukkan bahwa terdapat presentase kegagalan yang tinggi untuk *sub equipment gas turbine* dan memiliki porsi cukup besar yang data tersebut bisa digunakan untuk penelitian. Djatmiko (2018) melakukan penelitian untuk mengetahui nilai optimal keandalan

suatu peralatan dengan cara mengevaluasi keandalan sistem *gas turbine*. Alokasi dan optimasi keandalan sistem digunakan sebagai filosofi dasar untuk memenuhi target keandalan yang ingin dicapai pada level peralatan maupun sistem.

Seiring berjalannya waktu PLTGU Z ini memiliki beberapa *top issue*, diantaranya adalah :

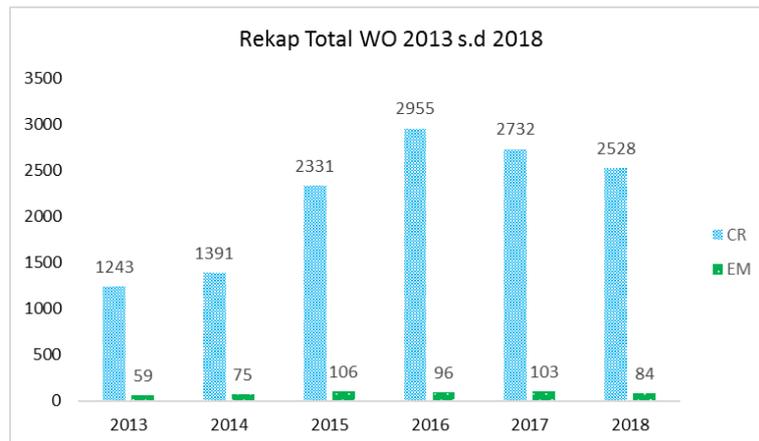
1. Perubahan pola operasi pembangkit listrik PLTGU Z, yang awalnya beroperasi dengan pola *base load* menjadi pola *start-stop (peaker)* hal ini menyebabkan banyak masalah terutama pada peralatan pembangkit yang memang di desain untuk pola operasi secara *continuous running*.
2. Umur pembangkit listrik yang sudah lebih dari 25 tahun, menyebabkan menurunnya performa dan efisiensi pembangkit sehingga perlu perhatian khusus terkait metode pengelolaan asset/ pemeliharaan.
3. *Equipment* yang susah *obsolete* dan memasuki fase *wear out*, laju kegagalan komponen semakin tinggi, dan berdampak pada kenaikan biaya pemeliharaan peralatan tiap tahunnya.

Kondisi eksisting pemeliharaan yang diimplementasikan di Unit Pembangkitan Z mulai dari awal *Commercial of Date* sampai dengan sekarang ini terimplementasi yaitu *time-based maintenance* atau PM (*Preventive Maintenance*). Metode pemeliharaan ini efektif telah dijalankan sejak tahun 2003 dan dianggap cukup berhasil. *Preventive Maintenance* ini hanya diimplementasikan pada *equipment* tertentu saja dimana penentuan scope PM itu berdasarkan pertimbangan beberapa kriteria yaitu : prioritas tingkat keparahan kerusakan peralatan, dan tingkat kriticalitas peralatan terhadap proses produksi listrik. Tetapi untuk detail pemeliharaan pada sub sistem/ level komponen, belum ada penjadwalan pemeliharaan ataupun rutin pemeliharaan untuk dilakukan pengantian komponen sebelum komponen itu mengalami kegagalan. Kegagalan yang terjadi kemudian berpotensi menjadi *production loss*. Pemeliharaan *preventive* termasuk dalam kategori *scheduled maintenance* yang berarti juga sudah dijadwalkan terencana dalam suatu periode waktu tertentu. Akan tetapi di dalam perjalanannya, walaupun PM telah dilakukan dengan baik, realisasi kondisi operasional peralatan yang

dipelihara performanya tidaklah selalu sesuai dengan yang diharapkan. Misalnya seringnya gangguan pada peralatan *gas nozzle* berupa plak/ penumpukan kotoran. Padahal frekuensi pemeliharaan, periode pemeliharaan, serta langkah langkah eksekusi pekerjaan telah sesuai dengan *standard job* yang sudah ada. Untuk itu perlu dilakukan mitigasi untuk mengurangi terjadinya kegagalan, terutama gangguan dengan root cause yang sama. Beberapa aktivitas yang mungkin bisa diperbaiki yaitu evaluasi frekuensi pemeliharaan, interval pemeliharaan, alokasi resource, dan frekuensi penjadwalan penggantian komponen.

*Corrective Maintenance* adalah metode pemeliharaan yang sifatnya menunggu sampai terjadi kerusakan terlebih dahulu. Metode pemeliharaan CR sangat dihindari, selain pemeliharaan ini yang memang terjadi secara tiba tiba dan tidak terencana, untuk proses perbaikannya sebagian besar pemeliharaan dengan tipe ini seringkali mengharuskan shutdown pada peralatan atau sistem. Akan sangat merugikan karena terdapat 2 kali kerugian, kerugian yang pertama adalah kerugian karena peralatan tersebut tidak dapat beroperasi normal sehingga proses produksi listrik menjadi terhenti untuk sementara, dan kerugian kedua diperlukan biaya yang besar untuk perbaikan/ penormalan peralatan. Untuk kasus kasus tertentu terdapat kemungkinan peralatan yang mengalami kegagalan akan berdampak pada peralatan lain yang terhubung baik secara seri maupun paralel dengan peralatan tersebut. Pada kondisi tertentu pekerjaan CR masuk kategori kritis yaitu berdasarkan tingkat kesulitan pekerjaan, dan faktor ketersediaan *spare parts*. Hal ini berpotensi memperlambat waktu untuk menyelesaikan pekerjaan pemeliharaan.

Berdasarkan data realisasi *history work order* yang telah direkap sejak tahun 2010 sampai dengan tahun 2018, terdapat kenaikan frekuensi jumlah pekerjaan CR dan *Breakdown Maintenance* yang cukup signifikan. Dapat dilihat pada gambar 1.2 sebagai berikut.



Gambar 1.2 Rekap *Work Order* dari tahun 2016 s.d 2018

Sangatlah penting untuk menjaga keandalan *equipment* untuk melayani kebutuhan listrik masyarakat dalam sistem Pembangkitan listrik. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan ketersediaan sistem pembangkit listrik yang rumit dan mahal secara teknologi. Banyak industri seperti manufaktur, produksi minyak dan gas, kedirgantaraan, transportasi, telekomunikasi dan teknologi informasi, dan industri lainnya yang sangat bergantung pada manajemen keandalan *equipment* yang efektif. Strategi pemeliharaan yang baik akan memperkecil frekuensi perbaikan dan juga otomatis akan memperkecil biaya pemeliharaan.

Sesuai arahan pemegang saham (*stakeholder*) yaitu melakukan optimasi sumber daya yang ada dan penyusunan *roadmap* peningkatan kapasitas dan kapabilitas terhadap unit pembangkitan listrik khususnya yang berada pada wilayah pulau jawa, PT Z melakukan inisiasi yang tercantum dalam RJPP (Rencana Jangka Panjang Perusahaan) tahun 2017-2021. Salah satu sasaran yang akan dicapai adalah peningkatan keandalan (*Reliability*). Untuk mendukung tercapainya visi *roadmap* sesuai tertuang di dalam RJPP tersebut dan merealisasikan keandalan unit pembangkitan sesuai dengan target yang telah ditentukan, PT Z harus menyusun strategi, merencanakan, dan mengeksekusi dengan baik.

Beberapa upaya pemeliharaan peralatan dilakukan dalam rangka menjaga keandalan dan ketersediaan system pembangkit. Diantaranya adalah pemeliharaan *overhaul*, pemeliharaan *preventive* dan pemeliharaan *corrective*. Pemeliharaan *overhaul* mengharuskan kondisi system pembangkit keluar dari jaringan listrik dan

menyebabkan produksi listrik menjadi berkurang, dan karena pekerjaan ini bersifat project bisa jadi pada saat eksekusi pekerjaan terdapat beberapa variation order atau pekerjaan temuan yang berpotensi menyebabkan durasi pemeliharaan menjadi lebih panjang. Oleh karena itu komitmen *on schedule* sangat diperlukan dalam aktivitas pemeliharaan ini.

Pada penelitian ini, penulis berusaha mencari optimal keandalan peralatan sebagai penentu durasi waktu dan biaya pemeliharaan *preventive* pada level sub sistem/ komponen peralatan *gas turbine*. Adapun parameter untuk perhitungan tersebut ditentukan berdasarkan :

1. Laju kegagalan (*Failure Rate*) peralatan
2. *Main Time Between Failure* (MTBF)
3. Karakteristik kegagalan peralatan.
4. Nilai Keandalan peralatan

Hasil dalam melakukan penelitian ini nantinya bisa menunjukkan bagaimana mengoptimasi keandalan peralatan dan pengaruhnya terhadap interval waktu pemeliharaan dan biaya pemeliharaan *preventive*. Juga dapat menunjukkan waktu minimal *downtime* peralatan yang diperlukan selama masa pemeliharaan.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Berdasarkan penjabaran latar belakang yang telah dituliskan diatas, perumusan masalah yang akan dilakukan di tesis ini adalah bagaimana meningkatkan keandalan peralatan dan pengaruhnya terhadap frekuensi juga biaya pemeliharaan *preventive*. Perumusan masalah tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

- a) Bagaimana memperoleh waktu *minimal downtime* pada peralatan *gas turbine*?
- b) Bagaimana optimasi keandalan pada peralatan gas turbine?
- c) Bagaimana pengaruh peningkatan keandalan terhadap frekuensi pemeliharaan dan biaya pemeliharaan komponen *gas turbine* pada suatu periode tertentu?
- d) Seberapa signifikan *trade off* target keandalan peralatan terhadap biaya pemeliharaan *gas turbine*?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah :

- a) Didapatkan waktu minimal *downtime* pada peralatan *gas turbine*
- b) Diperoleh nilai keandalan dan nilai optimasi keandalan peralatan *gas turbine*.
- c) Didapatkan optimasi keandalan dan kenaikan frekuensi pemeliharaan beserta biaya pemeliharaan komponen *gas turbine* pada suatu periode tertentu.
- d) Didapatkan nilai/ trade off perbandingan target keandalan peralatan terhadap biaya pemeliharaan peralatan *gas turbine*

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat penelitian ini adalah :

#### 1. Praktisi

Bahan pertimbangan bagi *decision maker* ato pengambil keputusan di perusahaan pembangkit listrik khususnya untuk tipe pembangkitan yang sejenis dalam memutuskan dan menentukan metode standar dalam penentuan pola pemeliharaan guna meningkatkan keandalan pembangkit

#### 2. Pengembangan Keilmuan

Sebagai bahan informasi untuk penelitian selanjutnya di bidang pembangkitan tenaga listrik untuk dapat menganalisa lebih dalam terkait pola pemeliharaan yang telah dilakukan selama ini.

### **1.5 Batasan Masalah**

Agar penelitian ini dapat berjalan dan mendapatkan hasil penyelesaian masalah yang tepat juga menjaga analisis yang dilakukan tetap sesuai dan terarah, maka perlu dilakukan pembatasan yaitu :

1. Objek penelitian adalah pada level komponen utama yang melekat pada *main equipment gas turbine*.
2. Data yang digunakan adalah data histori *work order* tipe *corrective maintenance* dan *breakdown maintenance* untuk range waktu tahun 2010 s.d tahun 2018.

3. Data kerusakan peralatan yang diambil adalah data waktu *downtime* peralatan.

### **1.6 Asumsi Penelitian**

Asumsi asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Pola operasi peralatan *gas turbine* dianggap beroperasi secara konstan/*continuous running* sehingga dianggap tidak ada perubahan terhadap waktu.
2. Asumsi kenaikan biaya pemeliharaan peralatan per tahun konstan dengan tambahan biaya suku bunga sebesar 7%.
3. Ketrampilan teknisi pemeliharaan dianggap sesuai *standard best practice*, sehingga aktivitas *maintenance* dianggap bisa mengembalikan performa peralatan seperti semula.

### **1.7 Sistematika Penulisan Proposal Tesis**

Sistematika penulisan tesis ini secara garis besar dibagi kedalam enam bab, dimana setiap bab dibagi menjadi sub-sub bab berisi uraian yang mendukung isi secara sistematis dari setiap bab secara keseluruhan. Adapun sistematika penulisan proposal thesis ini adalah:

#### **BAB 1: PENDAHULUAN**

Membahas latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, asumsi, tujuan, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

#### **BAB 2: TINJAUAN PUSTAKA**

Membahas tinjauan pustaka dari berbagai referensi yang digunakan dalam penelitian ini.

#### **BAB 3: METODOLOGI PENELITIAN**

Membahas metode yang digunakan pada penelitian untuk mencapai tujuan dan manfaat penelitian dengan batasan dan perumusan masalah yang ditentukan.

#### **BAB 4: ANALISA HASIL**

Merupakan pokok/ inti dari pembahasan tesis. Membahas secara detail penentuan nilai nilai keandalan tiap peralatan berdasarkan kesesuaian terhadap paramter pendukungnya

#### BAB 5: OPTIMASI KEANDALAN PERALATAN

Membahas optimasi keandalan peralatan sesuai dengan target yang direncanakan oleh perusahaan. Menggunakan data yang sebelumnya telah dibahas pada bab 4

#### BAB 5: KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan optimasi yang telah dibahas pada bab dan sub bab sebelumnya

#### DAFTAR PUSTAKA

Berisi terkait referensi yang digunakan penulis

#### LAMPIRAN

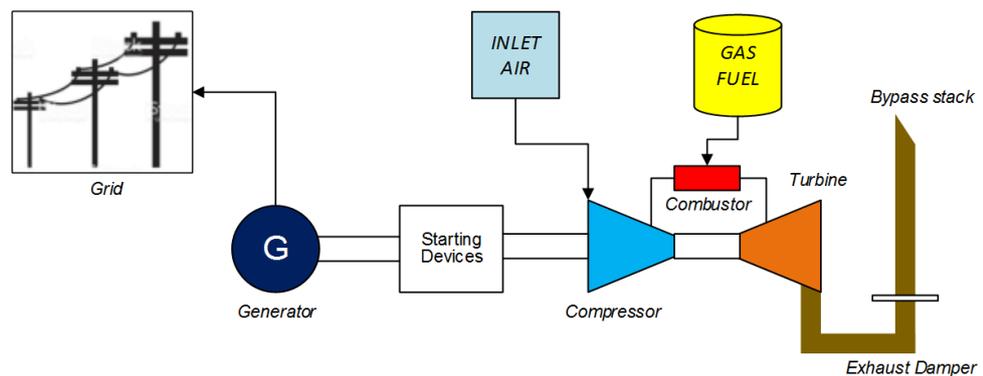
## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Gas Turbine

*Gas Turbine* merupakan sistem yang pertamakali menerima tenaga dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran ini terjadi di dalam ruang bakar dimana di dalam ruang bakar terjadi percampuran udara (oksigen) dengan bahan bakar serta terdapat pemantik api (*igniter*) yang mengakibatkan terjadinya pembakaran. Prinsip kerja sistem PLTGU pertama terletak pada proses di siklus Gas Turbine.

Berikut ini adalah skema sederhana bagaimana listrik itu diproduksi melalui peralatan gas turbine yang terdapat di PT Pembangkit Listrik Z. Secara umum proses produksi listrik dapat dibagi menjadi beberapa tahap yaitu :



Gambar 4.1 Skema Sederhana Produksi Listrik melalui Gas Turbine

##### 1. Starting Devices

Proses *start gas turbine* dimulai dengan *initial rotation* 3-300 rpm melalui peralatan *pony motor* dan *starting motor*. Pada saat yang bersamaan sistem pelumasan juga ikut bekerja melumasi peralatan kontrol, kemudian *Inlet Guide Vane* membuka 22 derajat sebagai pengatur *flow* udara yang akan masuk ke kompresor, *torque converter* dalam kondisi *standby*.

Pada saat putaran rotor 300-500 rpm, *valve* bahan bakar membuka, mengalirkan bahan bakar gas menuju ke *combustion chamber*. Pada saat putaran rotor 500-1000 rpm, terdapat proses pemantikan api melalui *igniter* dan juga *mixing* tiga elemen

(api, udara, bahan bakar). Indikator kesuksesan proses pembakaran ini dapat dipantau melalui monitor di CCR (*central control room*) yaitu berupa profil/ kontur cincin api yang terbentuk di ruang bakar secara merata 360 derajat.

Saat putaran rotor 1000-2000 rpm, *starting motor* yang digunakan untuk putaran awal tadi dimatikan. Selanjutnya saat putaran rotor turbin pada 2000-2775 rpm, *inlet guide vane* diposisikan pada sudut 0 derajat atau 100% open. Pada saat putaran rotor 2775-3000 rpm, eksitasi *generator* siap untuk dijalankan dan dilakukan proses sinkronisasi dengan putaran rotor *gas turbine*. Sesuai dengan proses yang telah dijelaskan tersebut, selanjutnya energi listrik dapat terbangkitkan melalui peralatan *generator* kemudian di alihkan ke peralatan *transformer*.

## 2. *Compressor*

Udara yang digunakan untuk proses pembakaran disaring/ difilter terlebih dahulu untuk memisahkan kotoran dan partikel partikel besar yang terkandung di dalam udara. Proses filterisasi ini dibantu dengan menggunakan *IAF (Intake Air Filter)*. Udara setelah difilter kemudian siap untuk masuk ke kompresor melalui *intake suction bellmouth*. Udara yang masuk tersebut diatur debit/ flow nya oleh peralatan IGV sesuai dengan kebutuhan. Udara siap dikompresi melalui sudu sudu kompresor mulai dari sudu dengan level terendah sampai dengan sudu level tertinggi, tekanan udara akan meningkat seiring dengan terlewatnya stage pada sudu tersebut, sehingga pada saat masuk ke ruang pembakaran (*combustor*) udara tersebut memiliki tekanan yang tinggi sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.

## 3. *Combuster*

Proses *mixing* 3 elemen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran, yaitu api, udara dan bahan bakar. Udara dengan tekanan tinggi didapatkan dari hasil kompresi melalui kompresor, untuk bahan bakar dikabutkan melalui *nozzle* dan api didapatkan dari peralatan pemantik (*igniter*). Hasil pembakaran tersebut kemudian di transfer ke area *turbine* melalui *transition piece*. Transition piece berfungsi untuk mengarahkan hasil proses pembakaran berupa ekspansi gas dengan temperatur dan kecepatan yang sangat tinggi.

#### 4. *Turbine*

Turbin merupakan peralatan yang berfungsi untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak *generator* melalui poros gas turbin yang dikoplingkan dengan poros *generator*. Dari daya total yang dihasilkan generator, kira-kira sebesar 60% digunakan kembali untuk memutar kompresornya sendiri.

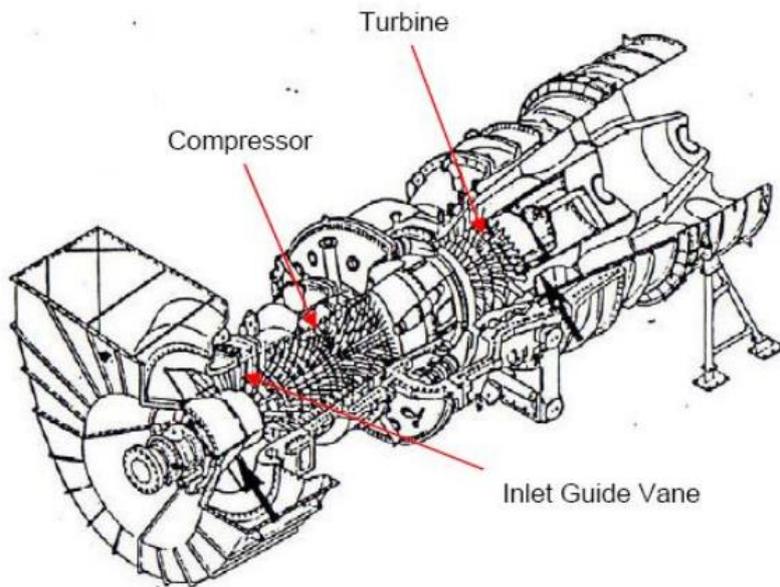
#### 5. *Generator*

*Generator* listrik memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik. *Generator* dan motor listrik secara fisik mempunyai banyak kesamaan, bedanya motor adalah alat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. *Generator* mendorong muatan listrik untuk bergerak melalui sebuah sirkuit listrik eksternal, tetapi generator tidak menciptakan listrik yang sudah ada di dalam kabel lilitannya.

Secara umum sistem *gas turbine* terdiri dari (Gambar 2.2), yaitu:

- a. *Starting Unit*
- b. *Compressor*
- c. *Combuster*
- d. *Turbine*
- e. *Generator*

Berikut gambar sistem *gas turbine* dengan peralatan utamanya :



Gambar 2.2 Overview Gas Turbine

*a. Starting Unit*

Starting unit berfungsi untuk aktivitas pemutaran awal (initial rotation) rotor gas turbine mulai dari 0 rpm sampai dengan putaran kurang lebih 1000 rpm.



Gambar 2.3 Overview Starting Unit

Berikut ini adalah bagian bagian dari starting unit peralatan gas turbine pada unit pembangkitan listrik Z :

*1. Pony Motor*

Berfungsi untuk memutar *starting motor* untuk menghindari arus start yang tinggi pada *starting motor*

2. *Starting Motor*

Berfungsi untuk melakukan *start up* putaran sebelum turbin bekerja

3. *Torque Converter*

Adalah media transmisi torsi ke poros turbin, berfungsi untuk menghindari arus berlebih (*over current*) pada motor listrik dengan putaran konstan saat digunakan untuk memutar turbin.

4. *Auxiliary Gear*

Berfungsi untuk memindahkan putaran poros turbin ke poros penggerak control oil dan main lube oil.

## **b. Kompresor**

Kualitas udara sekitar yang masuk ke dalam kompresor sangat mempengaruhi performa dari *gas turbine*. Kondisi yang mempengaruhi kualitas udara yang masuk ke dalam kompresor adalah tekanan, kelembaban, temperatur dan kandungan material (kotoran) di dalam udara. Tekanan udara berkaitan erat dengan lokasi ketinggian terhadap permukaan air laut. Tekanan udara ini diukur dengan menggunakan barometer. Pada daerah yang lebih tinggi, tekanan udaranya rendah, sehingga kerapatan udara kecil dan massa jenis udara juga akan mengecil, demikian pula sebaliknya. Selain itu massa jenis udara juga dipengaruhi oleh temperatur lingkungan sekitar. Pada temperatur yang tinggi maka massa jenis udara menjadi kecil.

Kompresor memiliki *losses* yang disebabkan oleh *losses* bentuk sudu, *losses* karena gesekan antara udara dengan permukaan sudu dan *losses* karena *clearance* antara *row blade* 1 dengan *row blade* yang lain sehingga menyebabkan kembalinya udara dari tingkat yang lebih tinggi ke tingkat sebelumnya. Peristiwa yang sering terjadi pada kompresor yaitu adanya fenomena *stall* dan *surge*. Fenomena *stall* yaitu peristiwa terhentinya aliran udara secara tiba-tiba pada saat *start* atau fase kompresi udara karena tekanan udara pada tingkat yang seharusnya memiliki tekanan yang lebih tinggi masih terlalu rendah sehingga pada daerah dengan tingkat tinggi yang

memiliki laluan sempit akan terjadi peristiwa udara terhenti karena *flow* udara terlalu tinggi. Sedangkan *surge* adalah peristiwa *stall* yang berlebihan sehingga dapat menyebabkan patahnya sudu kompresor. Untuk mencegah agar hal tersebut tidak terjadi, saat kondisi tersebut dilakukan pembuangan udara keluar melalui *bleed valve*. Kompresor terdiri dari beberapa bagian yaitu :

#### 1. *Inlet Air Filter (IAF)*

IAF berfungsi sebagai penyaring udara luar yang akan masuk menuju kompresor. IAF memiliki tiga *layer*, dengan jumlah total sebanyak 1152 buah filter. Parameter tingkat kekotoran udara pada IAF diukur dengan *differential pressure (DP)* dengan menggunakan *pressure indicator (PI)* dan *manometer*.



Gambar 2.4 *Inlet Air Filter*

Jika kandungan udara sekitar kotor maka filter ini juga akan semakin cepat kotor, pada saat musim hujan air akan masuk ke dalam filter. Kedua kondisi ini akan mempercepat naiknya *differential pressure* pada IAF. Standard nilai *differential pressure* yang diijinkan agar performa *gas turbine* tetap terjaga adalah 50~90 mmWC, sedangkan pada saat indikator menunjukkan nilai  $\geq 90$  mmWC maka perlu dilakukan aktivitas *preventive maintenance* mengganti filter tersebut dengan filter yang baru.

#### 2. *Inlet Guide Vane (IGV)*

*Inlet guide vane* merupakan sudu tetap yang berfungsi untuk mengatur *flow* udara yang akan masuk ke dalam kompresor. Posisi IGV terletak di bagian depan (*suction*) kompresor IGV sering digunakan untuk memastikan bahwa udara memasuki rotor tahap pertama pada sudut aliran yang diinginkan.



Gambar 2.5 *Inlet Guide Vane*

Posisi vane pada IGV ini dapat diatur sudut pembukaannya sehingga dapat disesuaikan aliran udara masuk dengan berbagai kebutuhan aliran untuk proses kompresi dan pembakaran pada mesin turbin. Selain stator, difuser lain di pintu keluar kompresor yang terdiri dari set vanes lain, sering dikenal sebagai *Exit Guide Vanes (EGV)*, selanjutnya mendifusi fluida dan mengontrol kecepatannya memasuki ruang bakar.

### 3. *Rotor Blade*

*Rotor blade* berfungsi sebagai *diffuser* untuk melakukan pemampatan (kompresi) udara. *Blade* ini tertinggi dari 19 *stage*, dimana semakin tinggi tingkatan maka ukuran *blade* semakin pendek dan jarak antar *blade* juga semakin rapat.

### 4. Sudu Hantar

Sudu hantar merupakan peralatan kompresor yang berfungsi untuk mengarahkan aliran udara menuju blade berikutnya.

### c. *Combustor (ruang bakar)*

*Combustor* merupakan ruang dimana terjadi proses *mixing* antara udara dari kompresor, api, dan bahan bakar. Komponen utama yang ada di dalam *combustor* adalah :

### 1. *Igniter*

*Igniter* berfungsi sebagai pemantik api, memercikkan bunga api ke dalam combustion chamber sehingga campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar.



Gambar 2.6 *Igniter*

Percikan bunga api terjadi karena adanya proses discharge elektrik tegangan tinggi diantara elektroda yang terdapat pada *spark plugs*, penyalaan untuk ruang bakar lainnya terjadi melalui *Crossfire Tube*. Proses *mixing* ketiga elemen yaitu udara, bahan bakar dan api berlangsung pada ruang bakar setelah udara dikompresi terlebih dahulu melalui kompresor sampai blade paling terakhir (tekanan udara paling tinggi).

### 2. *Fuel Oil/Gas Nozzle*

*Fuel nozzle* berfungsi untuk mengabutkan dan menyemprotkan bahan bakar ke dalam combustion liner. Masing-masing *combustion liner* dilengkapi dengan *nozzle* untuk menyalurkan jumlah bahan bakar yang



Gambar 2.7 *Fuel Oil Nozzle*

diperlukan, bahan bakar yang dibutuhkan akan terbakar lebih sempurna dan lebih cepat. Ada dua tipe *Fuel Nozzle* yang digunakan untuk turbin gas yaitu *single Fuel Nozzle* dan *Dual Fuel Nozzle*. *Single fuel nozzle* diperuntukan untuk satu jenis bahan bakar saja (misalnya minyak saja atau gas saja), sedangkan *Dual Fuel Nozzle* digunakan untuk dua jenis bahan bakar (minyak dan gas).

### 3. *Flame Detector*

*Flame detector* merupakan alat yang dipasang untuk mendeteksi proses pembakaran terjadi pada saat fase start-up/ penyalaan *gas turbine*. Apabila saat pelaksanaan *start-up* dan dalam waktu tertentu (sesuai dalam SOP *start-up*) tidak terdeteksi adanya nyala api, maka start-up akan gagal atau turbin trip. Mekanisme kerjanya yaitu memberikan sinyal kepada CCR (*Central Control Room*) untuk menginformasikan bahwa distribusi nyala api di dalam *combustion chamber* profilnya merata dan normal.

### d. *Exhaust Turbine*

*Turbine* berfungsi untuk mengkonversi dari gas yang bertekanan dan berkecepatan tinggi (hasil dari kompresi udara dan proses pembakaran) menjadi energi mekanik untuk memutar poros. Dari daya total yang dihasilkan kira-kira 60% energi digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan sisanya digunakan untuk memutar poros generator. Banyak energi terbuang terbawa oleh gas sisa pembakaran dari turbin yang keluar melalui *exhaust*, karena gas panas yang keluar

suhunya masih tinggi. Gas panas ini bisa dimanfaatkan lagi ke dalam sistem HRSG (*Heat Recovery System Generator*) dan digunakan untuk menggerakkan *steam turbine*. Beberapa komponen yang ada pada *exhaust turbine* adalah :

#### 1. *Expantion Joint*

*Expantion joint* berfungsi untuk memberikan ruang untuk turbulensi *flue gas* pada area *exhaust flue gas path*. Juga memungkinkan untuk penambahan dan pengurangan induksi panas yang terjadi karena kondisi perubahan temperatur.



Gambar 2.8 *Expantion Joint*

*Expantion joint* adalah pemisah yang terletak diantara 2 struktur rigid yang dirancang untuk menghilangkan *stress* pada struktur yang disebabkan karena vibrasi/ guncangan.

#### 2. *Exhaust Damper*

*Exhaust Damper* berfungsi untuk memblokir/ membuka jalan *exhaust flue gas path* sesuai dengan konfigurasi operasi yang dibutuhkan :

##### 1) *Open Cycle*

Yaitu kondisi sistem operasi pembangkit, dimana hanya peralatan gas turbin saja yang beroperasi untuk menghasilkan listrik.

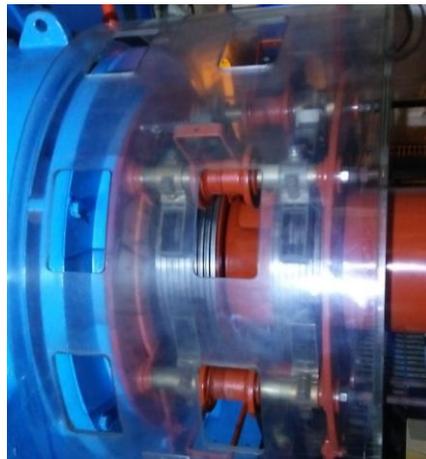
##### 2) *Combine Cycle*

Apabila gas buang dari gas turbine dimanfaatkan kembali sebagai media untuk proses pembakaran di dalam HRSG kemudian

steam yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut digunakan untuk memutar steam turbine.

**e. Generator**

Secara umum *Generator* berfungsi untuk mengubah energi mekanik dari putaran poros menjadi energi listrik. Sistem exitasi pada *generator* berupa Komponen utama dari rotor sebuah *generator* adalah magnet. Magnet ini dapat berupa magnet permanen maupun magnet yang dibangkitkan dengan menggunakan kumparan. Pada generator yang menggunakan kumparan sebagai magnet buatan, maka dibutuhkan arus listrik yang mengalir ke kumparan tersebut. Proses dari pembangkitan medan magnet secara buatan pada generator inilah yang disebut dengan proses eksitasi. Pada generator dengan sistem eksitasi, besar tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator sebanding dengan besar medan magnet di dalamnya, sedangkan besar medan magnet ini sebanding dengan besar arus eksitasi yang dibangkitkan.



Gambar 2.10 *Exciter Set*

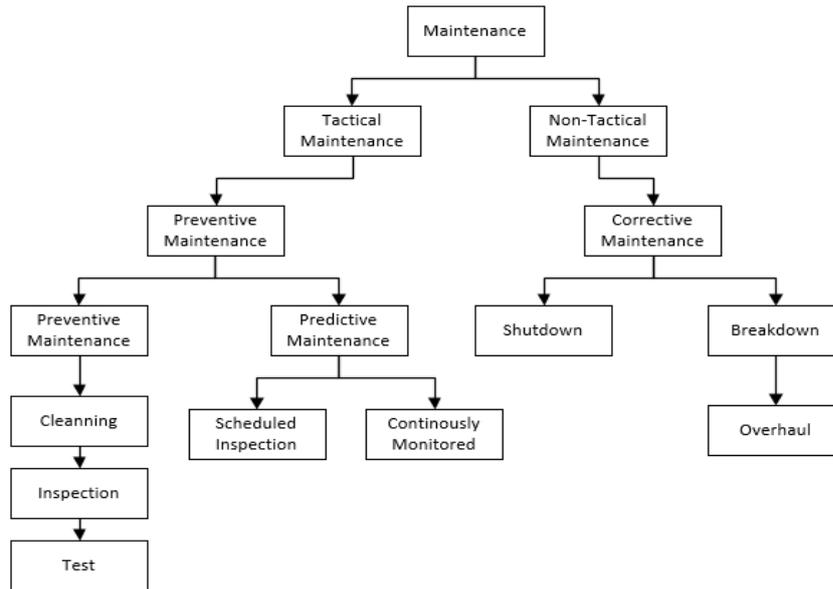
Maka, jika arus eksitasi sama dengan nol, maka tegangan listrik juga sama dengan nol. Atas dasar ini, sistem eksitasi dapat dikatakan sebagai sebuah sistem amplifier, dimana sejumlah kecil daya dapat mengontrol sejumlah daya yang besar. Prinsip ini menjadi dasar untuk mengontrol tegangan keluaran generator, jika tegangan sistem turun maka arus eksitasi harus ditambah, dan jika tegangan sistem terlalu tinggi maka arus eksitasi dapat diturunkan.

Secara umum *exciter* dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu :

1. *Rotating Exciter*. Exciter jenis ini membangkitkan arus listrik DC dengan menggunakan semacam generator berukuran kecil yang ikut berputar dengan generator utama. Ada dua tipe exciter berputar, diantaranya adalah :
  - a) Tipe menggunakan *brush*. Tipe klasik ini memerlukan komponen *slip-ring* untuk menghubungkan arus yang dibangkitkan oleh exciter dengan rotor generator. Sehingga tipe ini memerlukan perawatan yang berjangka.
  - b) Tipe *brushless*. Tipe ini lebih modern karena exciter berada satu poros dengan generator utama. Supply arus dari exciter kumparan magnet generator dihubungkan dengan plat dioda.
2. *Static Exciter*. Exciter tipe ini tidak menggunakan generator kecil sebagai pembangkit arus DC untuk generator utamanya. Tipe ini menggunakan arus listrik yang keluar dari generator yang “disearahkan” menjadi DC kemudian disupply ke rotor generator utama.

## **2.2 Pemeliharaan (*Maintenance*)**

Pemeliharaan menurut Ramesh (2001) adalah suatu kegiatan untuk memelihara dan menjaga asset yang ada tetap dalam kondisi yang baik, sehingga asset/ peralatan dapat beroperasi secara maksimal. Pemeliharaan dapat juga



Gambar 2.11 Jenis kegiatan pemeliharaan

didefinisikan sebagai tindakan pencegahan sebelum terjadinya kerusakan dan perbaikan/ penormalan asset pada kondisi semula.

Pemeliharaan bertujuan untuk memastikan bahwa asset / peralatan yang dikelola tidak mengalami kegagalan sebelum *lifetime* peralatan tersebut berakhir dan tetap beroperasi normal sesuai dengan spesifikasi peralatan. Program pemeliharaan yang telah disusun oleh *planner* harus dapat menunjang kegiatan peningkatan kapasitas produksi. Juga harus bisa menekan biaya pemeliharaan fasilitas secara keseluruhan yaitu dengan cara :

1. Mengurangi waktu *downtime* produksi, karena kemungkinan kegagalan peralatan sangat kecil.
2. Memungkinkan untuk menambah umur asset / peralatan, sehingga mengurangi keperluan biaya untuk penggantian peralatan.
3. Mengurangi pemakaian biaya jasa pemeliharaan/ lembur untuk pekerjaan *corrective/ breakdown maintenance* karena perbaikan kegagalan peralatan yang bersifat tidak terjadwal.
4. Efisiensi biaya pemeliharaan terutama untuk perencanaan pengadaan *spare part*, pengadaan *spare part* spesifik dengan *levering/* proses pengadaan yang

lama dapat direncanakan bersamaan dengan penyusunan jadwal pemeliharaan.

5. Memastikan peralatan dalam keadaan *safety* dan dalam kondisi yang handal untuk dioperasikan.

Penyusunan program pemeliharaan pada dasarnya hanya menggunakan dua pendekatan saja yaitu melakukan pemeliharaan yang bertujuan untuk mencegah kegagalan peralatan (*preventive maintenance*) atau membiarkan peralatan / asset mengalami kegagalan karena lifetimenya (*breakdown/ run to failure maintenance*).

### **2.2.1 Preventive Maintenance**

Pemeliharaan jenis PM (*preventive maintenance*) adalah pemeliharaan yang terencana, terjadwal, dan rutin dilakukan dengan frekuensi tertentu pada suatu periode. Pekerjaan PM membutuhkan koordinasi personil dari 2 bidang yaitu dari teknisi pemeliharaan sebagai pelaksana, dan dari operator produksi sebagai *quality control* untuk memastikan kesiapan kondisi aktual peralatan di lapangan. Secara teknis, pekerjaan *preventive maintenance* adalah melakukan *visual inspection* yaitu melakukan pengecekan dengan teliti apakah ada sesuatu yang tidak normal pada peralatan saat beroperasi (suara, visual, getaran, kebersihan dll) hasil inspeksi kemudian dituangkan melalui *form checklist* masing masing peralatan. Apabila ada temuan/ kelainan pada peralatan, teknisi pemeliharaan akan mencatatnya kemudian akan ditindaklanjuti oleh bagian perencanaan dan pengendalian pemeliharaan untuk kemudian dilakukan investigasi dan penjadwalan aktivitas pemeliharaan.

Tujuan dari *preventive maintenance* adalah :

1. Memelihara asset, memastikan peralatan berjalan sesuai dengan kondisi yang prima yaitu dengan cara melakukan deteksi awal dari aktivitas inspeksi PM, diharapkan kegagalan kecil dapat segera diatasi sehingga kegagalan besar dapat dihindari.
2. Pemeliharaan ringan peralatan yaitu : melakukan pengujian peralatan, melakukan pengukuran, *setting/ kalibrasi*, dan penggantian *spare part* untuk mencegah terjadinya kegagalan pada peralatan.

3. *Capturing* data kondisi peralatan, untuk kemudian dilakukan analisis dan penjadwalan untuk pekerjaan perbaikan (*corrective maintenance*).

### **2.2.2 Corrective Maintenance**

Menurut pendapat O'connor (2001) *corrective maintenance* merupakan kegiatan perawatan yang dilakukan setelah mesin atau fasilitas produksi mengalami gangguan atau kerusakan sehingga tidak dapat beroperasi normal. Aktivitas *corrective maintenance* sering disebut aktivitas *repair*/ perbaikan. *Corrective maintenance* biasanya tidak dapat kita rencanakan terlebih dahulu karena kita hanya bisa memperbaikinya setelah terjadi kerusakan, bahkan terkadang perbaikan tersebut bisa tertunda dan durasi pengerjaan bisa mengalami keterlambatan waktu dari alokasi durasi yang telah direncanakan karena berbagai macam faktor yang terjadi di lapangan.

Frekuensi *corrective maintenance* bisa akan semakin tinggi apabila *preventive maintenance* tidak dilakukan atau sudah dilakukan tetapi kurang optimal dalam eksekusinya, akan tetapi sekalipun *preventive maintenance* dikatakan sudah optimal, tetap saja pada suatu waktu dan kondisi tertentu fasilitas peralatan produksi atau akan tetap mengalami kerusakan. Dalam hal ini, *corrective maintenance* bisa diartikan perbaikan yang sifatnya menunggu sampai kerusakan terjadi dahulu, kemudian baru diperbaiki agar fasilitas peralatan produksi yang ada dapat dipergunakan kembali dalam proses produksi sehingga kegiatan operasional dalam proses produksi dapat berjalan lancar dan kembali normal.

Apabila perusahaan hanya menerapkan pemeliharaan yang bersifat *corrective maintenance* saja, maka akan terdapat faktor ketidakpastian dalam kelancaran fasilitas proses produksi maupun peralatannya sehingga berpotensi menimbulkan dampak yang dapat menghambat kegiatan produksi apabila terjadi gangguan kerusakan tiba-tiba.

Tindakan *corrective maintenance* ini kelihatannya lebih murah biayanya dibandingkan dengan aktivitas *preventive maintenance*. Tentu saja pernyataan ini benar selama gangguan kerusakan belum terjadi pada saat proses produksi

berlangsung. Namun, saat kerusakan terjadi selama proses produksi maka diperlukan aktivitas pemeliharaan *corrective/ urgent maintenance* juga kesiapan *spare part* maupun jasa, ditambah dengan *potential loss* akibat terhentinya proses produksi karena diperlukan alokasi waktu untuk aktivitas *corrective maintenance*. Selain itu, karena pekerjaan *corrective* yang sifatnya tidak terduga maka diperlukan biaya perbaikan yaitu biaya untuk *spare part* (nilai *spare part* bisa sangat tinggi apabila *spare part* termasuk kategori *spare part* spesifik dan diperlukan percepatan pengadaan, termasuk memperpendek waktu *levering spare part*), dan biaya jasa pemeliharaan (untuk pekerjaan *urgent*, nilai jasa perbaikan bisa sangat tinggi). Pada akhirnya akan mengakibatkan biaya pemeliharaan akan meningkat dengan cepat pada saat terjadinya kerusakan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tindakan *corrective maintenance* lebih memusatkan pemeliharaan setelah kegagalan pada peralatan itu terjadi, bukan menganalisa metode pemeliharaan yang sudah terimplementasi untuk mencegah agar tidak terjadi kerusakan.

*Corrective maintenance* dapat dihitung dengan MTTR (*mean time to repair*) dimana *time to repair* memiliki aktivitas yang biasanya dibagi menjadi 3 segmen yaitu :

1. *Preparation time*, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk persiapan seperti persiapan pengalokasian *manpower* untuk eksekusi pekerjaan, waktu perpindahan *resource* (dari *workshop* ke lokasi), dan waktu untuk mempersiapkan tools.
2. *Active Maintenance Time*, yaitu waktu yang di perlukan untuk melakukan pekerjaan, atau biasa diistilahkan *on hand repair*. Aktivitas *on hand repair* ini meliputi waktu mempelajari repair chart sebelum actual repair dimulai dan waktu yang dihabiskan menverifikasi bahwa kerusakan tersebut di perbaiki.
3. *Delay Time*, yaitu waktu delay/ durasi waktu yang diperlukan untuk menunggu kesiapan atau ketersediaan *spare part* yang akan digunakan untuk perbaikan mesin.

### **2.3 Definisi *Reliability Management***

*Reliability Management* merupakan proses untuk meningkatkan kesiapan, keandalan dan efisiensi peralatan secara maksimal dengan biaya seminimal mungkin. Peningkatan keandalan merupakan kebutuhan yang sangat penting dalam meningkatkan daya saing dan *value* pembangkit listrik.

#### **2.3.1 Fungsi Keandalan**

Keandalan dari suatu komponen adalah peluang komponen tersebut untuk tidak rusak atau dapat melakukan fungsinya secara normal selama periode waktu  $t$  atau lebih pada kondisi operasi tertentu.

#### **2.3.2 Penilaian Keandalan**

Penilaian keandalan pada sebuah proses, sistem ataupun peralatan, secara umum dapat didekati dengan dua metode analisa, yaitu :

a. Analisa Kuantitatif (Perhitungan)

Analisa kuantitatif dibedakan menjadi dua bagian besar, yaitu :

1. Component Level (*Physics of Failure, Statistics*)
2. System Level (FTA, *Markov Analysis*, dan lain sebagainya)

b. Analisa Kualitatif

Analisa ini dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu:

1. *Intangible Decision Matrix*
2. *Critically Analysis*
3. *Failure Mode Effect Analysis*

### **2.4 Mean Time Between Failures (MTBF)**

MTBF adalah waktu rata-rata antar kegagalan atau rata-rata waktu beroperasinya sistem, sub sistem atau komponen tanpa mengalami kegagalan. *MTBF* diperoleh dari pembagaian waktu operasi dengan jumlah

kerusakan dalam periode waktu tertentu, sehingga dapat dinyatakan sebagai:

$$MTBF(\theta) = \frac{\text{jam operasi}}{\text{jumlah kerusakan}} \quad (2.1)$$

Dimana :

Jam Operasi : Jumlah jam yang dihitung sejak peralatan menyala/ menjalankan fungsinya (jam)

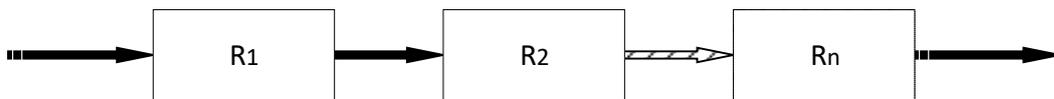
Jumlah kerusakan : jumlah kerusakan yang terjadi pada peralatan (kali)

$$MTBF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^t R(t) dt \quad (2.2)$$

## 2.5 Permodelan Sistem

### 2.5.1 Sistem Seri

Sistem seri dapat menjalankan fungsi dengan normal apabila semua komponen dalam sistem beroperasi. Jika salah satu komponen mengalami kegagalan, maka sistem tidak bisa beroperasi normal atau mengalami kegagalan. Secara blok diagram sistem dengan susunan seri ditunjukkan pada Gambar 2.4



Gambar 2.12 Model Keandalan Sistem Seri

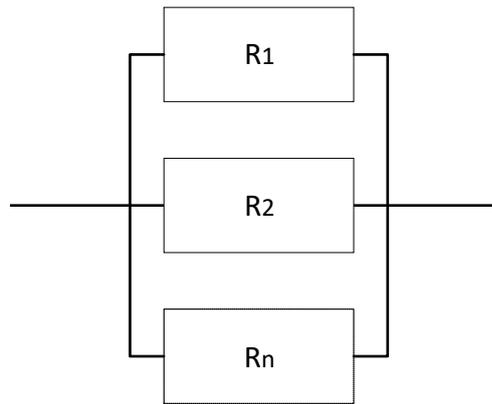
Jika keandalan masing-masing komponen adalah  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , maka keandalan sistem seri adalah :

$$\begin{aligned} R_s &= R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n \\ &= \prod_{i=1}^n R_i(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

dengan  $R_s =$  Keandalan sistem seri

### 2.5.2 Sistem Paralel

Sistem paralel dapat beroperasi sesuai fungsinya jika minimal satu dari komponen penyusunnya beroperasi. Sistem paralel gagal bila seluruh komponen penyusunnya mengalami kegagalan. Blok diagram sistem dengan susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.13 Model Keandalan Sistem Paralel

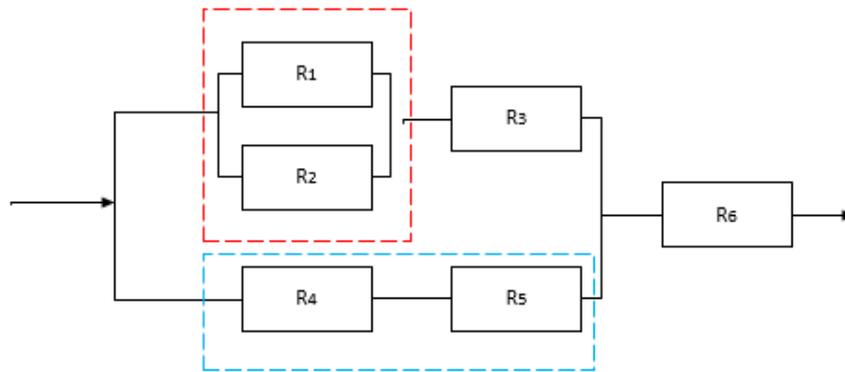
Jika keandalan masing-masing komponen adalah  $R_1, R_2, \dots, R_n$  maka keandalan sistem paralel adalah :

$$\begin{aligned} R_P &= 1 - (1-R_1) \times (1-R_2) \times \dots \times (1-R_n) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \end{aligned} \quad (2.4)$$

dengan  $R_P =$  Keandalan sistem paralel

### 2.5.3 Sistem Keandalan Gabungan

Sistem paralel dapat beroperasi sesuai fungsinya jika minimal satu dari komponen penyusunnya beroperasi. Sistem paralel gagal bila seluruh komponen penyusunnya mengalami kegagalan. Blok diagram sistem dengan sistem gabungan seri dan



paralel

Gambar 2.14 Model Keandalan Gabungan

ditunjukkan pada gambar 2.6.

Nilai keandalan dari sistem yang tersusun secara seri dan paralel dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$R_p = [1 - (1-R_1)(1-R_2)], R_q = R_p(R_3), R_r = R_4(R_5)$$

$$R_{Total} = [1 - (1-R_q)(1-R_r)](R_6) \quad (2.5)$$

### 2.6 Laju Kegagalan

Laju kegagalan Laju kegagalan ( $\lambda$ ) adalah banyaknya kegagalan yang terjadi pada peralatan dibagi dengan satuan waktu. Laju kegagalan dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara banyaknya kegagalan yang terjadi selama selang waktu tertentu dibandingkan dengan total waktu operasi komponen atau sistem. Laju kegagalan dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{f}{T}, \text{ atau}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{T(t)} \quad (2.6)$$

dengan :

f = Banyaknya kegagalan selama jangka waktu operasi

T= Total waktu kegagalan

### 2.6.1 Distribusi Normal

Distribusi normal mempunyai 2 parameter yaitu rata – rata ( $\mu$ ) dan standar deviasi ( $\sigma$ ). Fungsi padat peluangnya (*Probability density function*) adalah:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.7)$$

Dimana :

$\sigma$  = standard deviasi

$\mu$  = rata-rata

Fungsi keandalan distribusi normal adalah :

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt \quad (2.8)$$

sedangkan laju kegagalan distribusi normal adalah :

$$\lambda(t) = \frac{\exp \left[ -\left( \frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right]}{\int_t^{\infty} \exp \left[ -\left( \frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt} \quad (2.9)$$

*Mean Time Between failure* dari distribusi normal adalah :

$$MTBF = \mu \quad (2.10)$$

### 2.6.2 Distribusi Weibull

Distribusi *Weibull* adalah salah satu distribusi yang penting pada teori *reliability* dan sangat luas digunakan untuk analisis *performance loss* pada sistem. Jika distribusi kerusakan suatu sistem, sub sistem atau komponen mengikuti distribusi *weibull* maka :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t-\eta}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.11)$$

Dimana :

$\beta$  = Parameter bentuk,  $\beta > 0$

$\eta$  = Parameter skala,  $\eta > 0$

$\gamma$  = Parameter lokasi

Fungsi keandalan distribusi *Weibull* :

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.11)$$

Laju kegagalan distribusi *Weibull* :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \quad (2.12)$$

*Mean Time Between failure* dari distribusi *Weibull* adalah :

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma \left( \frac{1}{\beta} + 1 \right) \quad (2.11)$$

### 2.6.3 Distribusi *Lognormal*

Distribusi *Lognormal* memiliki 2 parameter yang hampir sama dengan distribusi normal yaitu rata – rata ( $t_0$ ) dan variasinya ( $s$ ). Fungsi padat peluangnya adalah :

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot s \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{1}{2s^2} (\ln t - t_0)^2 \right] \quad (2.12)$$

Dimana

$t_0$  = Rata-rata

$s$  = varians

Fungsi keandalan dari distribusi lognormal adalah :

$$R(t) = 1 - \Phi \left[ \frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_0} \right] \quad (2.13)$$

MTBF dari distribusi lognormal adalah :

$$MTBF = \exp[t_0 + (0,5xs^2)] \quad (2.14)$$

#### 2.6.4 Distribusi Eksponensial

Distribusi ini secara luas digunakan dalam keandalan dan perawatan. Hal ini dikarenakan distribusi ini mudah digunakan untuk berbagai tipe analisis dan memiliki laju kegagalan yang konstan selama masa pakai. Fungsi-fungsi dari distribusi eksponensial :

Fungsi padat peluang :

$$f(t) = \lambda \exp [-\lambda t] \quad (2.15)$$

Fungsi keandalan distribusi eksponensial adalah :

$$R(t) = \exp [-\lambda t] \quad (2.16)$$

Laju kegagalan distribusi eksponensial adalah

$$\lambda = f/T \quad (2.17)$$

*Mean Time Between Failure* adalah :

$$MTBF = 1/\lambda \quad (2.18)$$

Dimana :

$\lambda$  = laju kegagalan per unit waktu

$f$  = banyaknya kegagalan dalam kurun waktu

$T$  = total waktu antar kegagalan

### 2.7 Pengujian Distribusi

Pada saat pengujian distribusi statistik, dilakukan *curve fitting* antara data dan model distribusi untuk memperkirakan parameter keandalan dari data kegagalan. Hal ini dilakukan dengan menggunakan metode regresi *least square*, baik *linear* maupun *non linear* (Dodson, 2002). Kesesuaian pemilihan distribusi statistik data antar waktu kegagalan ditentukan oleh tiga parameter pengujian, yaitu *average goodness of fit*, *average of plot* dan *likelihood function ratio*.

#### 2.7.1 *Average Goodness of Fit (AvGOF)*

Merupakan parameter uji yang memberikan nilai terhadap data waktu antar kegagalan berdasarkan *normalized index* dari *goodness of fit* (kesesuaian). Uji

goodness of fit yaitu pengujian antara frekuensi hasil pengamatan dengan frekuensi yang diharapkan untuk menganalisis kesesuaian data. Selain cara ini, terdapat pula alternatif lain yaitu uji Kolmogorov-Smirnov (KS), yang beranggapan bahwa distribusi variabel yang sedang diuji bersifat kontinu dan sampel diambil dari populasi sederhana. Dari uji Kolmogorov-Smirnov didapatkan nilai AvGOF dengan cara membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Pada prinsipnya nilai KS yang semakin besar mengindikasikan ketidaksesuaian hasil uji distribusi.

### **2.7.2 Average of Plot (AvPlot)**

Parameter uji AvPlot menunjukkan ukuran yang digunakan untuk mengplot nilai hasil uji distribusi. AvPlot memberikan nilai terhadap data waktu antar kegagalan. Nilai AvPlot didasarkan pada normalized index dari uji plot fit. Semakin kecil nilai AvPlot, akan semakin tepat distribusi yang diuji (Buwana, 2006).

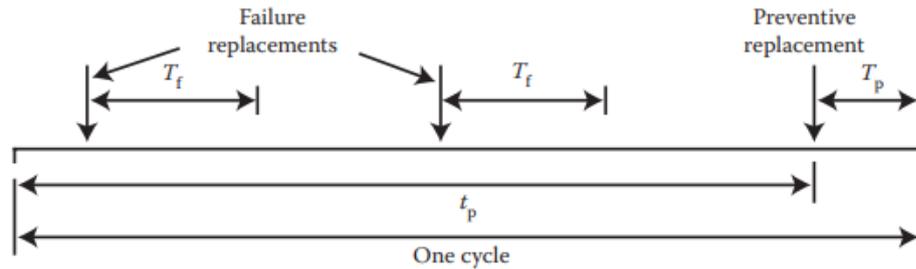
### **2.7.3 Likelihood Fuction Ratio (LKV)**

Parameter uji yang memberikan nilai terhadap data waktu antar kegagalan berdasarkan atas perhitungan parameter distribusi data antar kegagalan disebut sebagai likelihood function ratio (LKV). Hal ini dilakukan dengan menggunakan pengujian hipotesis yang membandingkan goodness of fit dari dua model untuk menentukan salah satu dari model tersebut yang lebih sesuai dengan sampel data yang dimiliki. LKV bersifat fleksibel dan dapat mengakomodasi satu atau beberapa perkiraan (Enders, 2010).

## **2.8 Optimalisasi Interval Waktu Penggantian Komponen**

Penggantian *spare part* atau komponen dilakukan dalam rangka mengembalikan suatu sistem atau peralatan pada kondisi dan fungsi sebenarnya yang diinginkan. Penggantian ini membutuhkan biaya yang harus dikeluarkan agar peralatan beroperasi sesuai dengan fungsinya. Jika penggantian ini tidak dilakukan akan

menyebabkan peralatan mengalami kegagalan dan bisa menyebabkan biaya yang lebih besar. Kegagalan mesin mempunyai karakter yang berbeda sesuai dengan distribusi yang terjadi. Oleh karena itu diperlukan jadwal penggantian yang tepat untuk menemukan interval waktu penggantian komponen yang optimal. Interval waktu penggantian komponen dapat diilustrasikan dalam gambar berikut :



Gambar 2.15 Ilustrasi *Downtime minimization*

Gambar 2.15 menjelaskan tentang interval waktu penggantian komponen sebelum mengalami kegagalan dibandingkan dengan penggantian saat komponen mengalami kegagalan. Semakin cepat interval waktu penggantian komponen atau suku cadang semakin besar biaya *preventive* penggantian *spare part/* komponen. Jika komponen lebih dahulu mengalami kegagalan, maka akan menyebabkan biaya pemeliharaan *corrective* yang lebih besar. Biaya yang muncul karena penggantian komponen bisa dirumuskan dalam persamaan berikut (Jardine,1973):

$$D(t_p) = \frac{\text{Total Expected Downtime/Cycle}}{\text{Expected Cycle Length}} \quad (2.19)$$

Dimana :

*Total Expected downtime/cycle* :

$$= T_p R(t_p) + T_f [1 - R(t_p)] \quad (2.20)$$

dan

*Expected cycle length* :

$$= (t_p + T_p) R(t_p) + [M(t_p) + T_f] [1 - R(t_p)] \quad (2.21)$$

Keterangan :

$T_p$	= Downtime due to a preventive cycle (menit)
$T_f$	= Downtime due to a corrective/ failure cycle (menit)
$R(t_p)$	= Probability of a preventive cycle
$1 - R(t_p)$	= Probability of a failure cycle
$M(t_p)$	= Mean time to failure when preventive replacement at age $t_p$

Maka optimal waktu penggantian menjadi :

$$D(t_p) = \frac{T_p R(t_p) + T_f [1 - R(t_p)]}{(t_p + T_p) R(t_p) + [M(t_p) + T_f] [1 - R(t_p)]} \quad (2.22)$$

## 2.9 Biaya Pemeliharaan Penggantian Komponen

Biaya pemeliharaan *preventive* adalah biaya yang diperlukan untuk melakukan aktivitas pemeliharaan secara rutin dan terencana dalam interval dan periode waktu tertentu. Perumusan untuk menghitung *Preventive Maintenance Cost* dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$D(t_p) = \frac{T_p [1 - R(t_p)]}{(t_p + T_p) R(t_p) + \left[ \int_{\gamma}^{t_p} t^* \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \eta}{\eta} \right)^{\beta - 1} e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta}} dt \right] + T_f [1 - R(t_p)]} \quad (2.23)$$

Dimana :

$D(t_p)$	= Preventive Maintenance Cost (\$/jam)
$T_p$	= Downtime due to a preventive cycle (jam)
$T_f$	= Downtime due to a corrective/ failure cycle (jam)
$R(t_p)$	= Probability of a preventive cycle
$1 - R(t_p)$	= Probability of a failure cycle

Sedangkan biaya pemeliharaan *corrective* adalah biaya yang diperlukan untuk melakukan aktivitas pemeliharaan yang tidak terencana dalam interval dan periode waktu tertentu. Perumusan untuk menghitung *Corrective Maintenance Cost* dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$D(t_p) = \frac{T_f[1-R(t_p)]}{(t_p+T_p)R(t_p) + \left[ \int_{\gamma}^{t_p} t^* \frac{\beta(t-\eta)^{\beta-1}}{\eta} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} dt \right] + T_f[1-R(t_p)]} \quad (2.24)$$

Dimana :

$D(tp)$  = Corrective Maintenance Cost (\$/jam)

$T_p$  = Downtime due to a preventive cycle (jam)

$T_f$  = Downtime due to a corrective/ failure cycle (jam)

$R(t_p)$  = Probability of a preventive cycle

$1 - R(t_p)$  = Probability of a failure cycle

Sedangkan untuk total biaya penggantian komponen (biaya *preventive replacement* + biaya *corrective replacement*) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$C(t_p) = \frac{\text{Total expected replacement cost per cycle}}{\text{Expected Cycle Length}} \quad (2.25)$$

Dimana :

*Total expected replacement cost per cycle* :

$$= C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)] \quad (2.26)$$

Dari substitusi persamaan (2.21) dan (2.24) ke (2.23) didapatkan :

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{(t_p + T_p) R(t_p) + [M(t_p) + T_f] [1 - R(t_p)]} \quad (2.27)$$

Keterangan :

$C_p$  = Cost of a preventive cycle (Rp)

$C_f$  = Cost of a failure cycle (Rp)

$t_p$  = Length of a preventive cycle (menit)

$M(tp)$  = Mean time to failure (menit)

Persamaan diatas yaitu perbandingan cost berdasarkan *lifetime* antara aktivitas pemeliharaan *preventive* ( $t_p$ ) dibandingkan dengan total biaya penggantian *corrective* ( $t_f$ ) komponen dalam satu periode pemeliharaan.

## 2.10 Optimasi Keandalan Peralatan

Dalam proses pemeliharaan dan kegiatan operasional peralatan tentunya memerlukan biaya. Biaya ini dapat berupa biaya yang timbul akibat pemeliharaan terencana (*preventive maintenance*) dan biaya yang timbul karena kerusakan yang tidak terencana (*corrective maintenance*). Biaya pemeliharaan *preventive* terdiri atas biaya material rutin dan biaya jasa teknisi pemeliharaan rutin. Sedangkan biaya *corrective maintenance* terdiri atas biaya *spare part* yang terdiri dari material rutin dan *spare part spesifik* (kemungkinan kerusakan tidak hanya terdapat pada komponen yang terencana saja, bisa ke komponen yang lain), dan biaya jasa teknisi (*expert*) yang lebih mahal dibandingkan dengan biaya jasa pemeliharaan rutin.

*Corrective maintenance cost* adalah biaya yang terjadi akibat kerusakan komponen kritis yang diluar perkiraan dan mengakibatkan kerugian pendapatan perusahaan. Biaya akibat kehilangan pendapatan dan biaya teknisi *expert* yang dihitung sebagai berikut :

$$C_i(R_i, f_i, R_{i \min}, R_{i \max}) = \exp \left[ (1 - f_i) \frac{R_i - R_{i \min}}{R_{i \max} - R_i} \right] \quad (2.28)$$

Dimana :

$f_i$  = *feasibility index*, parameter menggunakan skala pembobotan berdasarkan *Maintenance Priority Index (MPI)* dari standard perusahaan

$R_{i, \min}$  = Nilai keandalan sebelum dioptimasi

$R_{i, \max}$  = Nilai keandalan maksimum yang bisa diperoleh

## 2.11 Posisi Penelitian

Dalam penelitian ini hal yang diusahakan oleh peneliti adalah mencari optimal frekuensi penggantian komponen, setelah nilai didapatkan kemudian dilakukan analisis efisiensi biaya pemeliharaan yaitu dengan cara membandingkan biaya pemeliharaan *preventive* yang diperlukan dalam suatu periode waktu tertentu kemudian dibandingkan dengan target keandalan sistem.

Tabel 2.1. Penelitian Sebelumnya dan posisi peneliti Pada *Preventive Component Replacement*

No	Peneliti	Judul Penelitian	Keterangan
1	M Mahdavi (2008)	Penentuan Kebijakan Interval Penggantian Komponen menggunakan model untuk memaksimalkan keandalan sistem.	Hasil permodelan dijadikan acuan untuk pengambilan keputusan penggantian komponen berdasarkan interval waktu.
2	Suhandoko, Edi (2011)	Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dengan Meminimalkan Laju Biaya berdasarkan alokasi dan Optimasi keandalan pada peralatan seksi penggilingan.	Penelitian didapatkan waktu optimal perawatan pencegahan dan biaya minimal untuk melakukan perawatan.
3	Sutanto (2015)	Optimalisasi Interval Waktu Penggantian Komponen Mesin Packer Tepung Terigu Kemasan 25 KG di PT X	Hasil penelitian berupa interval waktu penggantian komponen dan laju biaya pemeliharaan total
4	Ardhi Dharmawan, Doni (2019) Posisi Peneliti.	Optimasi Pemeliharaan Komponen Gas Turbine untuk Meningkatkan Keandalan Unit Pembangkit Listrik (Studi kasus di PT Z)	Peneliti melakukan simulasi untuk memperoleh nilai <i>reliability</i> , kemudian dicari nilai <i>maintenance cost</i> , yaitu dengan cara mengoptimasi waktu untuk penggantian komponen dalam suatu periode tertentu, kemudian melakukan perbandingan dengan biaya investasi/ pengadaan 1 set equipment yang baru. Hasil akhir diharapkan didapatkan rasio efisiensi biaya pemeliharaan.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan pelaksanaan penelitian sampai dengan didapatkan hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian yakni penentuan optimal interval waktu penggantian komponen dan optimalisasi biaya pemeliharaan. Langkah – langkah dasar yang dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut :

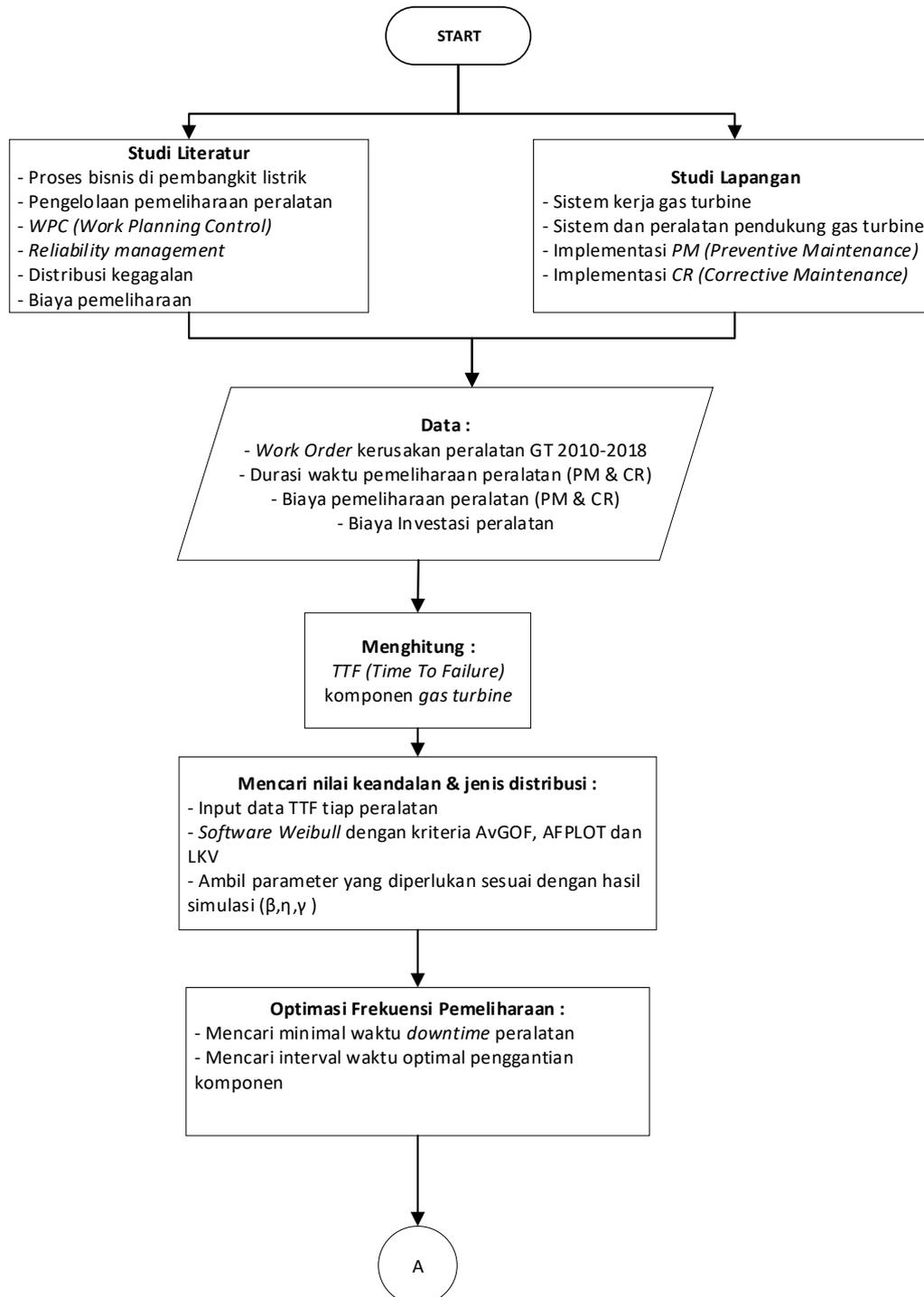
1. Studi literatur dan studi lapangan
2. Perumusan masalah dan tujuan penelitian
3. Pengambilan data
4. Pengolahan data dan analisis
5. Penarikan kesimpulan dan pemberian rekomendasi

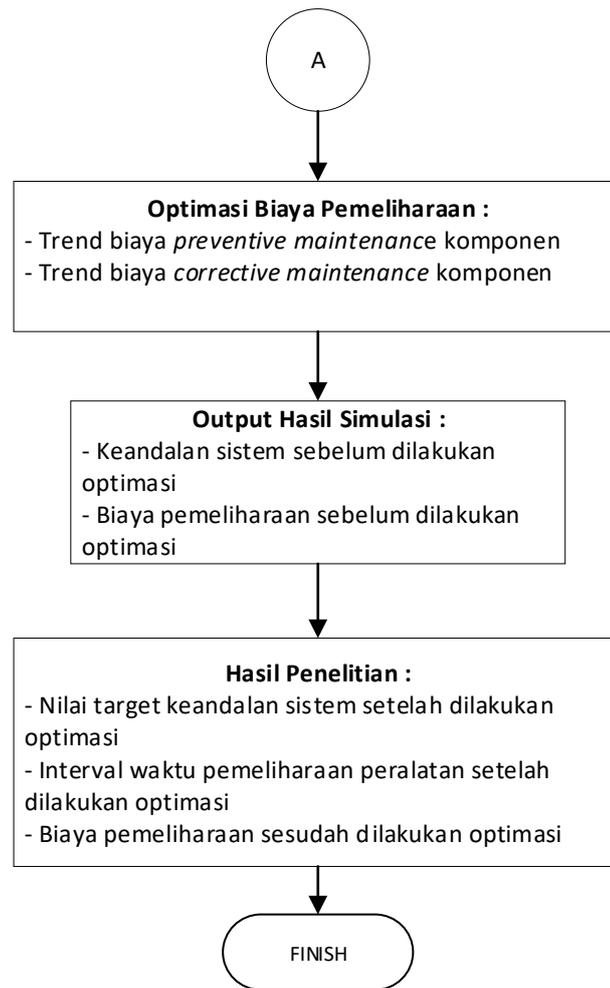
#### 3.1 Studi Literatur dan Studi lapangan

Sebagai latar belakang permasalahan, diketahui bahwa PT pembangkit listrik Z mengalami kenaikan frekuensi gangguan peralatan pada gas turbine tiap tahun. Upaya untuk meminimalkan gangguan tersebut salah satunya adalah dengan meningkatkan keandalan peralatan, serta mengurangi waktu downtime peralatan. Secara garis besar yaitu mengoptimasi keandalan peralatan melalui waktu penggantian komponen dalam jadwal pemeliharaan *preventive maintenance*. Objek penelitian adalah peralatan utama *gas turbine* tipe M701D, serta peralatan bantu (*auxiliary equipment*) dari *gas turbine*. Data kerusakan peralatan berupa data *work order* bidang pemeliharaan dari tahun 2010-2018 yang diambil dari SIT Ellipse, sedangkan data biaya pemeliharaan baik *preventive maintenance* maupun *corrective maintenance* dan data nilai investasi *equipment gas turbine* diambil dari bidang perencanaan pemeliharaan.

### 3.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Setelah melakukan studi lapangan, identifikasi masalah dan studi pustaka, maka tahap selanjutnya adalah merumuskan pokok permasalahan yang dihadapi dan tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.3 Pengambilan Data

Beberapa data yang dibutuhkan yaitu :

- a. Data klasifikasi peralatan berdasarkan *equipment number* berupa breakdown/ hirarki dari peralatan utama, sub equipment sampai dengan level komponen pada peralatan *gas turbine*.
- b. Data kerusakan peralatan yaitu *Work Order (WO)* tipe *corrective maintenance* dan *breakdown maintenance* yang diambil dari SIT Ellipse berupa list kerusakan peralatan sampai dengan level komponen pada *gas turbine*. Data ini digunakan sebagai bahan untuk dilakukan evaluasi. Data ini diambil mulai dari tahun 2010 sampai dengan tahun 2018, kemudian dilakukan proses filtering, disesuaikan sesuai kebutuhan, kemudian dicari

waktu *downtime* masing masing peralatan. Data ini digunakan sebagai dasar perhitungan laju kegagalan peralatan/ komponen.

- c. Data realisasi durasi waktu pemeliharaan *corrective*, mulai dari persiapan resources (*jumlah man power*), *wrench time* atau waktu untuk *on hand repair*, dan durasi waktu dari pertama work order / pekerjaan diterbitkan sampai dengan waktu pemeliharaan peralatan selesai dilakukan dan divalidasi dengan *post maintenace test*.
- d. Data biaya pemeliharaan tipe *preventive maintenance* dan *corrective maintenance*, data ini berupa biaya material/ spare part dan biaya jasa pemeliharaan. Data ini diperoleh dari bidang perencanaan pemeliharaan.

### 3.4 Pengolahan Data dan Analisis

Langkah pertama yaitu data *work order* diolah menjadi data jarak kegagalan komponen (jarak kegaalan pertama dengan jarak kegagalan kedua dst), kemudian dari data tersebut dicari jenis distribusi kegagalan yang paling sesuai dengan menggunakan *software Weibull++6*, kemudian dilakukan analisis keandalan. *Software Wolfram Mathematica 9* digunakan untuk mendapatkan minimum waktu downtime peralatan dan mendapatkan trend frekuensi biaya *preventive* dan *corrective maintenance* mulai dari frekuensi yang paling tinggi sampai dengan frekuensi yang paling rendah dengan *cut off* pada satu periode tertentu, dari *trend* tersebut kemudian didapatkan frekuensi penggantian suku cadang atau *spare part* dengan biaya yang paling minimal. Hasil simulasi pemeliharaan *preventive* kemudian disesuaikan dengan target keandalan peralatan, apakah sudah memenuhi kriteria target keandalan peralatan sesuai dengan *standard best practice/ standard* perusahaan atau belum. Untuk langkah langkah pengolahan data secara detail dapat dijabarkan sebagai berikut :

1. Mengolah data *Work Order* pada level peralatan/ komponen, kemudian melakukan validasi *down time* peralatan karena aktivitas pemeliharaan. Data diambil dari SIT Ellipse kemudian data ini dikonversi menjadi failure rate dan jarak waktu antar kegagalan komponen (MTBF).
2. Memindah data MTBF kedalam software *Weibull++6* untuk menentukan jenis distribusi yang paling mendekati/ sesuai dari data jarak waktu antar kegagalan.

Input software ini disetting dengan kriteria *Goodness of Fit*, *Plot Fit*, dan *Like lihood Function Value*. Setelah dilakukan pengujian sesuai dengan kriteria diatas, didapatkan rekomendasi jenis distribusi kegagalan yang paling mendekati berdasarkan peringkat tertinggi untuk data waktu antar kegagalan peralatan/ komponen yang dimaksud.

3. Menentukan jenis distribusi yang paling sesuai dari hasil pengolahan oleh perangkat lunak Weibull++6, ambil data output hasil simulasi software yaitu parameter  $\beta$ ,  $\eta$ , dan  $\gamma$ .
4. Menentukan fungsi padat peluang untuk kegagalan, laju kegagalan, keandalan peralatan dan fungsi padat peluang untuk peralatan untuk suatu periode operasi tertentu.
5. Menentukan minimal waktu downtime  $t$  (min) pada peralatan dan biaya minimal  $D(tp)$  yang diperlukan untuk proses pemeliharaan penggantian komponen pada tiap tiap peralatan/ komponen dengan simulasi menggunakan *software mathematica*.
6. Menentukan indeks kelayakan pemeliharaan penggantian peralatan/ komponen yaitu dengan kriteria :
  - a. Referensi target keandalan peralatan yang dipersyaratkan oleh perusahaan.
  - b. Waktu minimal downtime peralatan untuk aktivitas pemeliharaan/ penggantian komponen.
  - c. Jumlah frekuensi pemeliharaan penggantian komponen dalam suatu periode waktu tertentu
  - d. Biaya yang diperlukan untuk aktivitas preventive penggantian komponen dalam suatu periode waktu tertentu
7. Optimasi nilai keandalan sistem sesuai target standard keandalan perusahaan
8. Menentukan strategi pemeliharaan penggantian peralatan/ komponen berdasarkan kriteria waktu minimum downtime, frekuensi penggantian komponen, dan optimasi keandalan.

### **3.5 Penarikan Kesimpulan dan Pemberian Rekomendasi**

Pada tahapan ini diberikan kesimpulan dan saran dari hasil rangkaian penelitian yang sudah dicapai dan pemberian saran-saran terhadap perusahaan maupun penelitian selanjutnya.

## BAB 4

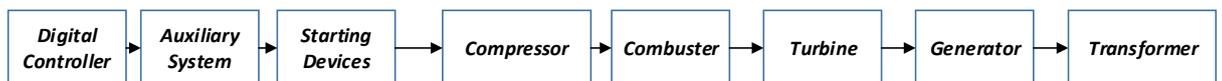
### 4.1 Konfigurasi Peralatan Gas Turbine

Gas turbine yang ada di PT Pembangkitan Listrik Z dimana tiap detail sub sistem beserta peralatan pendukungnya dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut ini :

Tabel 4.1. Tabel Sistem dan Sub sistem peralatan Gas Turbine

No	Sistem	Sub-Sistem
1	Digital Controller	Governor System
2	Auxiliary System	Lube Oil System
		Piping Fuel System
		Rotor Cooling System
		Air Barrier System
3	Starting Devices	Pony Motor
		Starting Motor
4	Compressor	Inlet Guide Vane
		Intake Air Filter
5	Combustor	Gas Nozzle
		Igniter
6	Turbine	Turbine
7	Generator	Exciter
8	Transformer	Transformer

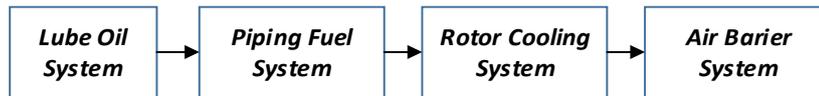
Sedangkan untuk *boundary condition* penelitian mesin gas turbine beserta peralatan pendukungnya dapat dilihat pada gambar 4.1 berikut ini :



Gambar 4.1 *Boundary Condition* Penelitian

#### 4.1.1 Blok Diagram Auxiliary System

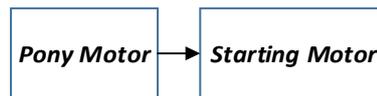
Blok diagram keandalan sistem pendukung pada gas turbine tersusun secara seri seperti gambar 4.2 berikut ini :



Gambar 4.2 Blok Diagram sistem pendukung

#### 4.1.2 Blok Diagram Sistem *Starting Devices*

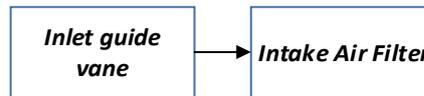
*Starting devices* mempunyai peran utama sebagai *initial rotation* atau penggerak awal dari sebuah poros peralatan *gas turbine*. Seperti yang terlihat pada permodelan sistem sesuai pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa terdapat 2 buah motor utama sebagai penggerak utama poros, kemudian putaran motor diteruskan melalui peralatan *torque converter*. Ketiga peralatan tersebut tersusun secara urutan serial, tidak terdapat redundance/ pengganti untuk tiap peralatan apabila peralatan tersebut mengalami kegagalan pada saat pengoperasian



Gambar 4.3 Blok Diagram Keandalan Sistem *starting devices*

#### 4.1.3 Blok Diagram *Compressor*

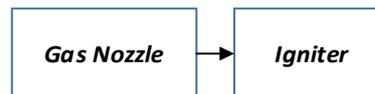
*Compressor* pada *gas turbine* pada prinsipnya berfungsi untuk mengompresi udara sebelum udara tersebut di mix dengan unsur yang lain di *combustion chamber*. Dalam pengoperasiannya, udara tersebut perlu untuk diarahkan menuju compressor stage ke-1 kemudian disesuaikan kebutuhan udaranya dengan cara mengatur sistem bukaan sudu tetap pada *inlet compressor* atau biasa disebut *vane*. Adjust kontrol udara inlet kompresor ini diatur melalui peralatan *inlet guide vane* (IGV). IGV ini diatur dengan sistem pneumatik menggunakan instrument air compressor. Selanjutnya setelah udara dianggap semua parameter operasinya sudah terpenuhi dengan baik (temperatur dan humidity) kemudian udara tersebut diarahkan menuju sudu awal/ stage 1 kompresor sampai dengan stage 19 *compressor*.



Gambar 4.4 Blok Diagram Keandalan sistem *Compressor*

#### 4.1.4 Blok Diagram Sistem *Combustor*

*Combustor* dalam sistem *gas turbine* merupakan area pembakaran / tempat bercampurnya 3 elemen yaitu bahan bakar, api, dan udara yang telah dikompresi sebelumnya menggunakan kompresor. Seperti terlihat pada gambar 4.5 terdapat peralatan *igniter* yang berfungsi sebagai pemantik api, *gas nozzle* untuk mengkabutkan bahan bakar, dan *peralatan flame detector* yang berfungsi sebagai sensor yang menunjukkan indikator kesuksesan bahwa aktifitas yang sedang berlangsung pada combustor ini sudah berjalan normal dan sudah sesuai dengan parameter operasi start peralatan gas turbine.



Gambar 4.5 Blok Diagram Keandalan sistem *Combustor*

## 4.2 *Preventive Maintenance & Corrective Maintenance Cost*

Kerusakan pada tiap peralatan gas turbin menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan lebih dari \$75.000 (berdasarkan data dari bidang perencanaan pemeliharaan) dan pada saat perbaikan mengharuskan unit turbin gas harus *shutdown* (dimatikan). Jika terjadi permasalahan pada salah satu peralatan yang ada pada *gas turbine*, hal ini akan mengakibatkan kemampuan *ramping rate* turun sampai dengan 50% dan menimbulkan kondisi *dangerous situation* dan *low personnel injury*. Kerusakan yang terjadi pada peralatan GT tidak berdampak signifikan terhadap lingkungan, tetapi berdampak besar pada penurunan *plant efficiency*. Apabila terjadi kerusakan pada komponen *gas turbine*, maka waktu untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-2 bulan dikarenakan untuk pemesanan part utama yang harus diganti. Peringkat kegagalan peralatan juga sangat tinggi berdasarkan data realisasi work order tiap

tahunnya, dikarenakan tidak ada sistem back-up dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan

Berikut ini tabel 4.2 menunjukkan waktu yang diperlukan untuk perbaikan dan biaya pemeliharaan untuk tiap jenis peralatan yang terdapat di *gas turbine* :

Tabel 4.2. Tabel waktu perbaikan dan biaya yang diperlukan untuk pemeliharaan *Preventive & Corrective*

No	System	Sub - System/ Component	PM Time (jam)	CR Time (jam)	PM Cost	CR Cost
1	<i>Digital Controller</i>	<i>Govenor System</i>	8	42	\$ 5,068	\$ 13,393
2	<i>Auxiliary System</i>	<i>Lube Oil System</i>	4	10	\$ 3,804	\$ 7,286
		<i>Piping Fuel System</i>	4	26	\$ 1,000	\$ 1,482
		<i>Rotor Cooling System</i>	6	18	\$ 2,228	\$ 3,988
		<i>Air Barrier System</i>	8	42	\$ 5,836	\$ 17,127
3	<i>Starting Devices</i>	<i>Pony Motor</i>	12	36	\$ 2,668	\$ 19,107
		<i>Starting Motor</i>	12	36	\$ 3,558	\$ 17,427
4	<i>Compressor</i>	<i>Inlet Guide Vane</i>	12	40	\$ 3,304	\$ 25,714
		<i>Intake Air Filter</i>	8	36	\$ 8,786	\$ 15,571
5	<i>Combustor</i>	<i>Gas Nozzle</i>	10	360	\$ 14,736	\$ 44,208
		<i>Igniter</i>	8	36	\$ 9,643	\$ 50,783
6	<i>Turbine</i>	<i>Turbine</i>	10	40	\$ 5,357	\$ 32,589
7	<i>Generator</i>	<i>Exciter</i>	10	20	\$ 56	\$ 243
8	<i>Transformer</i>	<i>Transformer</i>	10	40	\$ 5,000	\$ 81,530

### 4.3 *Time to Failure* dan Keandalan Peralatan

Berikut adalah contoh perhitungan untuk penentuan parameter keandalan peralatan *pony motor*, dimana penentuan parameter dilakukan dengan cara menginput data jarak waktu antar kegagalan peralatan menggunakan *software Weibull++6*. Penilaian keandalan sistem disusun dari penilaian keandalan dari tiap tiap sub sistem/ peralatan penyusun sistem *gas turbine*. Langkah pertama dalam penentuan parameter keandalan adalah dengan menjalankan simulasi *software Weibull++6* sesuai dengan parameter kegagalan dari data work order tipe *corrective maintenance* dan *breakdown maintenance*, kemudian melakukan

penentuan jenis distribusi yang terbaik (peringkat 1) sesuai rekomendasi dari software *Weibull++6*.

Distribusi terbaik berdasarkan rekomendasi dari *software Weibull++6* bisa dilihat dari peringkat pertama hasil pengujian terhadap *curve fitting* antara data dan model dengan 3 buah parameter uji. Ketiga parameter uji tersebut adalah *Average Good of Fitness (AvGOF)*, *Average of Plot (AvPlot)*, dan *Likelihood Function Ratio (LKV)*. Dari hasil *curve fitting* tersebut diperoleh parameter-parameter distribusi berupa parameter skala, parameter bentuk, dan parameter lokasi dimana ketiga parameter tersebut juga merupakan parameter keandalan. Berikut adalah contoh perhitungan untuk peralatan *pony motor* pada sistem *starting devices* :

Data waktu antar kegagalan peralatan *pony motor* diambil dari data *work order* pada *SIT Ellipse*, terdapat 15 kali kegagalan dengan frekuensi waktu kegagalan yang berbeda beda TTF dalam satuan jam :

Tabel 4.3 Tabel waktu antar kegagalan peralatan *pony motor*

No Kegagalan	TTF (Jam)
1	2208
2	5088
3	720
4	744
5	1464
6	2904
7	744
8	12432
9	720
10	3648
11	5880
12	2880
13	3672
14	5832
15	7344

#### 4.3.1 Analisis Keandalan Peralatan

Sesuai input data waktu antar kegagalan peralatan, kemudian dilakukan *running/* simulasi dengan menggunakan *software Weibull++6* maka diperoleh hasil pengujian sebagai berikut :

Tabel 4.4. Tabel uji distribusi kegagalan peralatan *pony motor*

Distribusi	AvGOF	AvPlot	LKV	Ranking
Exponential 1	43.32832	9.3332304	-95.9444	6
Exponential 2	63.89146	8.970522	-92.2648	5
Weibull 2	20.40405	7.2140745	-94.3147	2
Weibull 3	5.794508	5.462684	-95.1132	1
Normal	7.643423	5.9476054	-95.6404	3
Lognormal	22.43348	7.445026	-94.445	4

a. *Average Goodness of Fit (AvGOF)*

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov (KS)* dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai AvGOF adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki *software Weibull++6 (Reliasoft, 2005)*. Sehingga semakin kecil AvGOF maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.4 diatas nilai AvGOF terkecil dengan nilai 5,794508 jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

b. *Average of Plot (AvPlot)*

*AvPlot* didasarkan pada normalized index dari uji plot of fit. Hasil uji ditunjukkan dalam *AvPlot* index yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi ( $\rho'$ ), nilai koefisien korelasi adalah  $-1 \leq \rho' \leq 1$ . Pada *software Weibull++6*, nilai *AvPlot* index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai *AvPlot*, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.4 diatas nilai *AvPlot* terkecil dengan nilai = 5.462684 jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

c. *Likelihood Function Ratio (LKV)*

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin baik

untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.4 diatas nilai LKV terbesar dengan nilai = -95,1132, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.4 diatas, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 3*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 3*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh parameter berikut ini :

1. Parameter bentuk ( $\beta$ ) = 1,9795
2. Parameter skala ( $\eta$ ) = 3471,8072
3. Parameter lokasi ( $\Upsilon$ ) = -747,8

Alur pengujian yang sama sesuai dengan contoh penentuan distribusi kegagalan diatas yang paling untuk peralatan *pony motor*, diimplementasikan kembali ke sub sistem/ komponen gas turbin yang lain maka didapatkan rekap jenis distribusi kegagalan dan parameter yang sesuai dengan jenis distribusi kegagalan tersebut.

Tabel 4.5 dibawah ini menunjukkan nilai parameter sesuai sesuai dengan distribusi kegagalan *Weibul 6 ++* :

Tabel 4.5. Tabel Parameter bentuk, skala, dan lokasi peralatan *Gas Turbine*

No	System	Sub - System	Distribusi	$\beta$ (Beta)	$\eta$ (Etta)	$\gamma$ (Gamma)
1	Digital Controller	Govenor System	Weibull 3	1.2454	1459.3166	457.96
2	Auxiliary System	Lube Oil System	Weibull 3	0.914	2351.9363	505
		Piping Fuel System	Weibull 3	1.0135	664.4026	8.5
		Rotor Cooling System	Weibull 2	1.0039	1208.3869	-
		Air Barrier System	Weibull 3	0.975	3493.9431	415.96
3	Starting Devices	Pony Motor	Weibull 3	1.9795	3471.8072	-747.8
		Starting Motor	Weibull 3	1.0493	3856.3546	184.6
4	Compressor	Inlet Guide Vane	Weibull 3	1.0604	2498.0568	433
		Intake Air Filter	Weibull 3	1.5029	1225.6247	449.92
5	Combustor	Gas Nozzle	Weibull 2	1.5283	9577.7816	-
		Igniter	Weibull 3	1.7094	2501.511	-47.6
6	Turbine	Turbine	Weibull 2	2.093	816.3748	-
7	Generator	Exciter	Weibull 3	1.8215	1069.6224	193.6
8	Transformer	Transformer	Weibull 3	1.4397	1354.333	646.83

#### 4.4 Fungsi Padat Peluang (pdf) Peralatan *Pony Motor*

Sesuai dengan hasil simulasi *software Weibul 6 ++*, rekomendasi distribusi kegagalan yaitu *Weibull 3*. Maka fungsi padat peluangnya adalah sebagai berikut :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \exp \left[ -\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right]$$

$$f(t) = \frac{1.9795}{3471.8072} \left[ \frac{t - (-747,8)}{3471.8072} \right]^{1.9795-1} \exp \left[ -\left( \frac{t - (-747.8)}{3471.8} \right)^{1.9795} \right]$$

#### 4.5 Nilai *Reliability* Peralatan *Pony Motor*

Sesuai dengan hasil simulasi *software Weibul 6 ++*, rekomendasi distribusi kegagalan yaitu *Weibull 3*. Maka persamaan fungsi *reliability*nya adalah sebagai berikut :

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$$

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - (-747.8)}{3471.8072} \right)^{1.9795} \right]$$

#### 4.6 Rekap Nilai Keandalan Peralatan

Tabel 4.6 dibawah ini menunjukkan data rekapitulasi nilai keandalan dari tiap Sub sistem/ komponen *Gas Turbine* :

Tabel 4.6. Tabel Nilai Keandalan Sub Sistem *Gas Turbine*

No	Sistem	Sub-Sistem	R(t)
1	<i>Digital Controller</i>	<i>Govenor System</i>	0.7473
2	<i>Auxiliary System</i>	<i>Lube Oil System</i>	0.3536
		<i>Piping Fuel System</i>	0.37
		<i>Rotor Cooling System</i>	0.3685
		<i>Air Barrier System</i>	0.6733
3	<i>Starting Devices</i>	<i>Pony Motor</i>	0.4908
		<i>Starting Motor</i>	0.3396
4	<i>Compressor</i>	<i>Inlet Guide Vane</i>	0.6388
		<i>Intake Air Filter</i>	0.7468
5	<i>Combustor</i>	<i>Gas Nozzle</i>	0.4264
		<i>Igniter</i>	0.4356
6	<i>Turbine</i>	<i>Turbine</i>	0.3674
7	<i>Generator</i>	<i>Exciter Set</i>	0.55
8	<i>Transformer</i>	<i>Transformer</i>	0.8241

Pada tabel 4.6 diatas terlihat bahwa nilai keandalan peralatan *gas turbine* memiliki nilai rata-rata dibawah 0,5. Keandalan terkecil pada peralatan *starting motor*, dengan nilai keandalan R(t) sebesar 0.3396. Sedangkan keandalan terbesar adalah pada peralatan *Main Transformer*, dengan nilai keandalan R(t) sebesar 0,8241. Sedikit penjelasan terkait dengan peralatan *main transformer* yaitu kondisi aktualnya dimana komponen penyusunnya sebagian besar merupakan peralatan *electrical* dan memiliki banyak sistem proteksi. Permasalahan yang sering terjadi pada *main transformer* adalah terjadinya gangguan pada sistem proteksi. Gangguan yang terjadi bisa dari sinyal palsu yang bekerja untuk memerintahkan sistem

proteksi bekerja dan menyebabkan peralatan *gas turbine* menjadi trip. Nilai keandalan untuk peralatan *Inlet Guide Vane* yaitu sebesar  $R(t) = 0,6388$  Kondisi aktualnya komponen *Inlet Guide Vane* jarang mengalami gangguan dibandingkan peralatan *gas turbine* yang lain. Permasalahan yang sering terjadi pada compressor adalah terjadinya *plugging* pada *intake air filter (IAF)*. Harapannya setelah dilaksanakan rutin pemeliharaan *preventive* pembersihan IAF frekuensi gangguan pada peralatan IAF tersebut dapat berkurang

#### 4.7 Preventive Maintenance Cost Kriteria Minimasi Downtime

Parameter bentuk, skala, dan lokasi dengan peringkat 1 sesuai rekomendasi *software Weibul 6 ++* beserta parameter pendukung lainnya yaitu lama waktu *downtime* perbaikan (jam), biaya *preventive maintenance*, dan biaya *corrective maintenance* dihitung menggunakan persamaan dibawah ini. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Wolfram Mathematica*. Hasil perhitungan berupa waktu minimal *downtime* peralatan dimana waktu tersebut bisa digunakan untuk perbaikan peralatan dari sisi *preventive maintenance*. Adapun contoh perhitungan untuk peralatan *pony motor* adalah sebagai berikut :

*Preventive Maintenance Cost Age Replacement :*

$$D(t_p) = \frac{T_p R(t_p)}{(t_p + T_p) R(t_p) + \left[ \int_{\gamma}^{t_p} t^* \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\eta}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} dt \right] + T_f [1 - R(t_p)]}$$

Dimana :

$T_p$  = Waktu yang dibutuhkan untuk *preventive maintenance* = 12 jam

$T_f$  = Waktu yang dibutuhkan untuk pekerjaan *corrective maintenance* = 36 jam

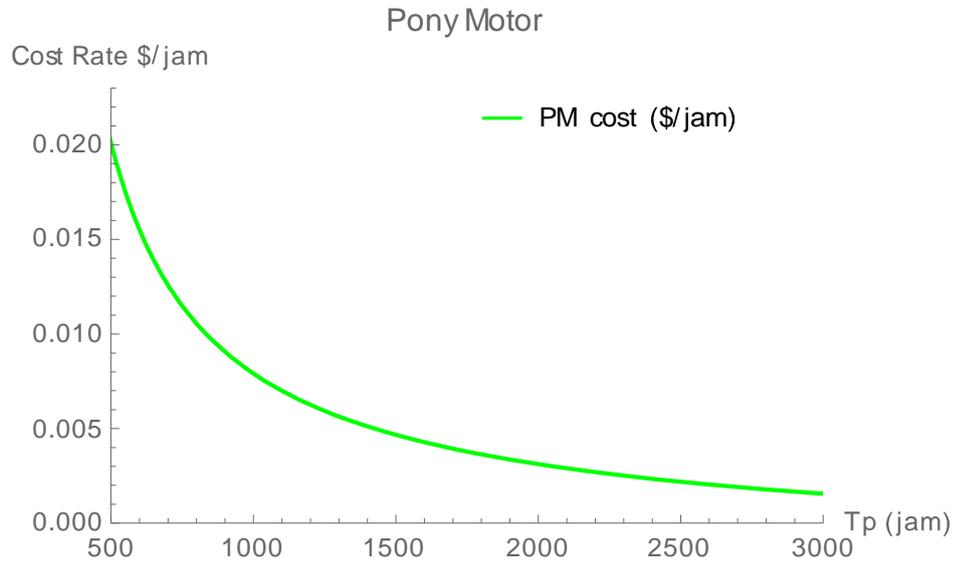
$\beta$  = 1,9795

$\eta$  = 3471,8072

$\gamma$  = -747,8

Dari hasil perhitungan dengan persamaan dengan dibantu oleh *software Wolfram Mathematica* diperoleh waktu minimum *downtime* yang diperlukan untuk

pekerjaan perbaikan/ penggantian komponen secara *preventive maintenance* pada peralatan *pony motor* adalah 0,011285 jam. Sedangkan frekuensi minimal penggantian komponen adalah setiap 2175,9 jam atau tiap 90,66 hari.



Gambar 4.6 Grafik waktu downtime terhadap *preventive age replacement* peralatan *pony motor*

#### 4.8 Rekap Nilai Pemeliharaan Minimum Peralatan *Gas Turbine*

Berdasarkan contoh perhitungan untuk peralatan *pony motor* pada sub bab 4.7 diatas, maka dengan cara perhitungan dan alur yang sama maka diperoleh rekap hasil perhitungan untuk semua sub sistem/ komponen *Gas Turbine*. Tabel 4.7 dibawah ini menunjukkan rekapitulasi data untuk nilai keandalan, dan frekuensi pemeliharaan sub sistem/ komponen dari tiap peralatan *Gas Turbine* :

Tabel 4.7. Nilai Keandalan Sub Sistem *Gas Turbine*

No	System	Sub - System	Nilai Keandalan	Interval Waktu Pemeliharaan (jam)
1	Digital Controller	Govenor System	0.7473	1,000.00
2	Auxiliary System	Lube Oil System	0.0191	11,099.40
		Piping Fuel System	0.4987	472.95
		Rotor Cooling System	0.2325	1,760.07
		Air Barrier System	0.6733	1,765.66
3	Starting Devices	Pony Motor	0.4908	2,175.90
		Starting Motor	0.3396	4,334.72
4	Compressor	Inlet Guide Vane	0.6359	1,604.94
		Intake Air Filter	0.7408	1,000.00
5	Combustor	Gas Nozzle	0.9524	1,327.54
		Igniter	0.857	765.27
6	Turbine	Turbine	0.7927	406.45
7	Generator	Exciter	0.55	1,000.00
8	Transformer	Transformer	0.7611	1,079.63

Dapat dilihat pada tabel 4.7 diatas merupakan rekap hasil simulasi dengan mengutamakan *constraint minimize maintenance cost* sebagai prioritas 1 atau minimasi biaya pemeliharaan *preventive maintenance* yang diperlukan untuk masing masing peralatan. Pada tabel 4.7 juga terlihat bahwa nilai keandalan sub sistem/ komponen *gas turbine* masih memiliki nilai rata-rata dibawah 0,5 meskipun terdapat beberapa sub sistem/ komponen yang memiliki nilai keandalan diatas 0,7. Keandalan terkecil pada *lube oil system* dimana nilai keandalannya hanya sebesar  $R(t)$  0.0191. Keandalan pada sub sistem *generator* yaitu *exciter* hanya sebesar  $R(t)$  0.55. Sedangkan nilai keandalan sebesar  $R(t)$  0.55 untuk peralatan *generator* merupakan nilai yang kecil dan perlu dilakukan optimasi keandalan, hal ini dikarenakan komponen utama penyusun *generator* sebagian besar merupakan peralatan *electrical* dan memiliki banyak sistem proteksi apabila terjadi kegagalan maka akan membutuhkan waku yang lama dalam perbaikan. Permasalahan yang sering terjadi pada peralatan generator adalah terjadinya gangguan pada sistem

proteksi dan gangguan pada saat proses *sinkron*. Gangguan yang terjadi bisa berasal dari sinyal palsu yang bekerja untuk memerintahkan sistem proteksi *gas turbine* bekerja dan menyebabkan *gas turbine* menjadi Trip. Sedangkan nilai keandalan tertinggi dipegang oleh sub sistem dari peralatan *combustor*, yaitu *gas nozzle* dengan nilai keandalan sebesar  $R(t)$  0.9524. Kondisi aktualnya sub sistem/komponen dari *combustor* yaitu *gas nozzle* tersebut sering mengalami gangguan. Gangguan yang paling sering terjadi adalah *nozzle* buntu yang menyebabkan sistem pembakaran pada *combustor chamber* menjadi tidak optimal. Harapannya ketika dilakukan pemeliharaan *preventive* untuk *cleanning gas nozzle* ini dilakukan secara berkala, permasalahan tersebut tidak sering muncul kembali.

Tabel 4.8. Tabel Nilai Keandalan Sub Sistem *Gas Turbine* fungsi minimasi *downtime*

Symbol	Sub - System	Mean Life	Nilai Keandalan
R1	Governor System	1818.2968	0.7473
R2	Lube Oil System	2959.2867	0.0191
R3	Piping Fuel System	669.1965	0.4987
R4	Rotor Cooling Air System	1206.4264	0.2325
R5	Air Barrier System	3948.7753	0.6733
R6	Pony Motor	2329.6788	0.4908
R7	Starting Motor	3967.8646	0.3396
R8	Inlet Guide Vane	2868.9543	0.6359
R9	Intake Air Filter	1556.0896	0.7408
R10	Gas Nozzle	8627.4385	0.9524
R11	Igniter	2118.4003	0.857
R12	Turbine	723.0739	0.7927
R13	Exciter	1144.275	0.55
R14	Transformer	1876.049	0.7611
R Sistem Gas Turbine			0.00002370

Sesuai dengan tabel 4.8 diatas, nilai keandalan sistem *Gas Turbine* yaitu hanya sebesar  $R_{(G)}$  0,00002370 Nilai tersebut sangat rendah apabila dibandingkan dengan target keandalan dimana perusahaan secara korporat tersebut termasuk dalam 10% pembangkit terbaik di dunia.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 5

### 5.1 Optimasi Keandalan Peralatan

Sesuai dengan target perusahaan secara korporat dimana perusahaan termasuk 10% pembangkit terbaik di dunia sesuai jenis dan kapasitas berdasarkan standar *North America Electricity Reliability Council (NERC)*, sumber: Annual Report 2012 PT. PJB. Sehubungan dengan hal tersebut, maka optimasi keandalan peralatan mutlak untuk dilakukan. Langkah pertama yaitu menentukan target keandalan sistem, dimana target keandalan peralatan gas turbine dengan mengacu pada nilai kontrak kinerja atau *Service Level Agreement* adalah  $R_{(G)}$  0.7, kemudian baru dilakukan penentuan biaya dan penentuan interval waktu pemeliharaan *preventive* yang optimal.

Berdasarkan target realistis sesuai dengan kontrak kinerja dengan nilai keandalan  $R_{(G)}$  0.7 maka akan dilakukan penentuan alokasi keandalan optimal dengan menggunakan persamaan. Menurut Mettas (2000) “Keandalan sistem ditentukan oleh keandalan dari masing-masing komponen atau sub sistem tersebut. Namun pada kenyataannya historis data mengenai biaya detail tiap komponen peralatan sangat sulit didapatkan. Menurut Mettas (2000), apabila hal tersebut terjadi maka dengan memandang sifat-sifat dari fungsi biaya maka dapat diformulasikan hubungan antara biaya dengan fungsi keandalan. Dengan menggunakan bantuan *software Lingo 17.0* dan persamaan dibawah ini, maka dapat dilakukan penentuan nilai alokasi keandalan yang optimal untuk peralatan *gas turbine* sesuai persamaan 2.28 yaitu sebagai berikut:

$$C_i(R_i, f_i, R_{i \min}, R_{i \max}) = \exp \left[ (1 - f_i) \frac{R_i - R_{i \min}}{R_{i \max} - R_i} \right]$$

Dimana :

$f_i$  = *feasibility index*, parameter menggunakan skala pembobotan berdasarkan *Maintenance Priority Index (MPI)* dari standard perusahaan

$R_i, \min$  = Nilai keandalan sebelum dioptimasi (sesuai tabel 4.8)

$R_i, \max$  = Nilai keandalan maksimum yang bisa diperoleh

Adapun rekapitulasi hasil optimasi keandalan sub sistem/ komponen gas turbine sesuai dengan persamaan diatas adalah sebagai berikut :

Tabel target keandalan sistem 0,7

Tabel 5.1. Tabel Nilai Keandalan Sub Sistem setelah Optimasi

Symbol	Sub - System	Mean Life	Nilai Keandalan setelah dioptimasi
R1	Govenor System	521.0008	0.9802161
R2	Lube Oil System	545.7597	0.9757341
R3	Piping Fuel System	27.1684	0.9735844
R4	Rotor Cooling Air System	40.399	0.9675425
R5	Air Barrier System	482.9461	0.9790558
R6	Pony Motor	366.1206	0.9788983
R7	Starting Motor	289.7452	0.9774271
R8	Inlet Guide Vane	504.1384	0.9772953
R9	Intake Air Filter	546.3734	0.9783224
R10	Gas Nozzle	931.7584	0.9719937
R11	Igniter	273.565	0.972216
R12	Turbine	154.071	0.9699595
R13	Exciter	351.1169	0.9699323
R14	Transformer	214.6844	0.975759

Berdasarkan alokasi keandalan optimal peralatan turbin gas pada tabel 5.1 didapatkan rata rata target keandalan untuk masing masing sub sistem/ komponen dengan nilai lebih dari  $R(t)$  0.9, untuk itu maka perlu disiapkan strategi pemeliharaan baik pemeliharaan *preventive* maupun pemeliharaan *corrective* dimana sangat berperan untuk dapat merealisasikan menaikkan nilai keandalan masing-masing sub sistem/ komponen dari *gas turbine*. Salah satu strategi yang diterapkan untuk meningkatkan keandalan peralatan *gas turbine* adalah dengan konsisten melakukan pemeliharaan rutin atau melakukan penggantian komponen kritis pada masing-masing sub sistem/ komponen dan juga disiplin dalam melakukan eksekusi pemeliharaan *preventive*. Beberapa contoh aktivitas pekerjaan pemeliharaan preventive yang dilakukan yaitu penggantian/ *roll in – roll out nozzle gas* beserta pembersihan *nozzle* yang terdapat pada sistem *combuster*. Juga rutin pembersihan *intake air filter*. Sedangkan untuk sub sistem *transformer* dilakukan

penggantian atau *retrofit*/ peremajaan sensor sistem proteksi. Harapannya, dengan dilakukannya penggantian komponen kritis pada masing-masing peralatan secara berkala dalam interval waktu tertentu, target keandalan sub sistem/ komponen yang dialokasikan pada masing-masing peralatan *gas turbine* bisa tercapai.

## 5.2 Korelasi Nilai Keandalan terhadap Biaya Pemeliharaan

Alokasi target keandalan sub sistem/ komponen gas turbine pada sub bab 5.1 memiliki rata rata nilai target keandalan sebesar lebih dari  $R(t)$  0.9. Untuk mengakomodir nilai keandalan tersebut, terdapat konsekuensi atau *trade off* yang bisa dijalankan. Dalam sub bab ini, pembahasan akan difokuskan pada *trade off* pengaruh kenaikan nilai keandalan peralatan terhadap interval waktu pemeliharaan, durasi yang diperlukan untuk pemeliharaan, biaya pemeliharaan *preventive*, biaya pemeliharaan *corrective*, dan total biaya (*preventive + corrective*) pada interval waktu tertentu berdasarkan nilai target keandalan masing masing komponen/ sub sistem.

Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk sub sistem peralatan *pony motor* dengan asumsi  $T_p$  sebesar 3000 jam.

*Corrective Maintenance Cost* :

$$D(t_p) = \frac{T_f[1-R(t_p)]}{(t_p+T_p)R(t_p) + \left[ \int_{\gamma}^{t_p} t^* \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\eta}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} dt \right] + T_f[1-R(t_p)]}$$

Dimana :

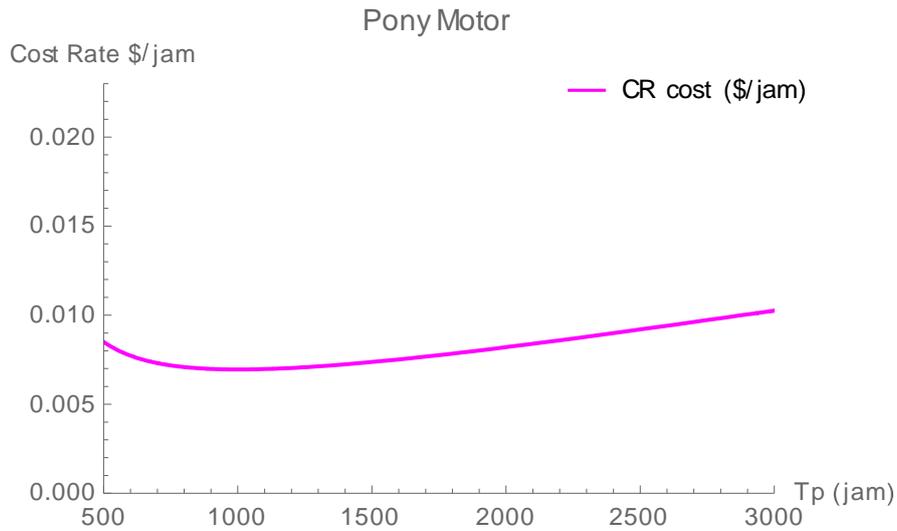
$D(t_p)$  = *Corrective Maintenance Cost* (\$/jam)

$T_p$  = *Downtime due to a preventive cycle* (jam)

$T_f$  = *Downtime due to a corrective/ failure cycle* (jam)

$R(t_p)$  = *Probability of a preventive cycle*

$1 - R(t_p)$  = *Probability of a failure cycle*

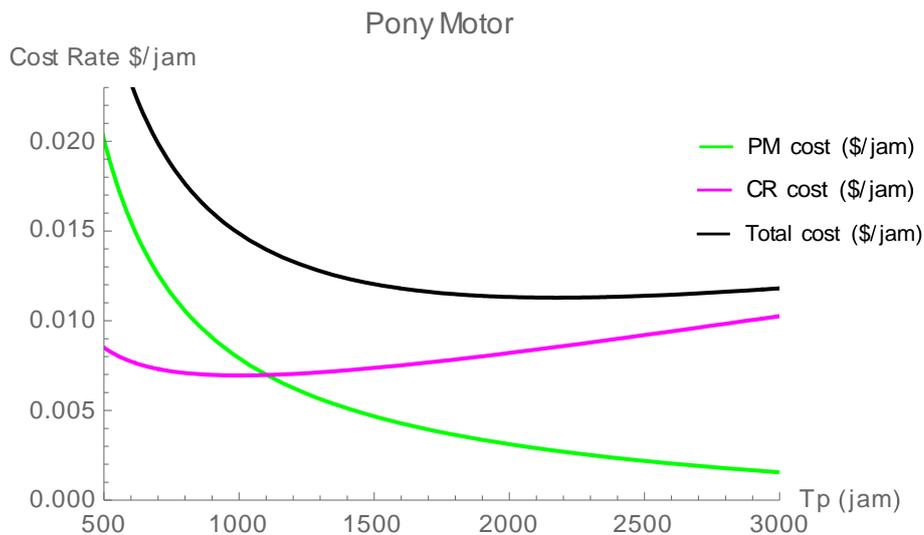


Gambar 5.1 Grafik biaya pemeliharaan *corrective* vs interval waktu pemeliharaan peralatan *pony motor*

Adapun biaya pemeliharaan total (*preventive* + *corrective*) dapat dihitung sebagai berikut :

*Total Maintenance Cost (Preventive + Corrective)* :

$$D(t_p) = \frac{T_p R(t_p) + T_f [1 - R(t_p)]}{(t_p + T_p) R(t_p) + \left[ \int_{\gamma}^{t_p} t * \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\eta}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} dt \right] + T_f [1 - R(t_p)]}$$



Gambar 5.2 Grafik biaya pemeliharaan total (*preventive* + *corrective*) vs interval waktu pemeliharaan peralatan *pony motor*

Grafik pada gambar 5.2 diatas menjelaskan bahwa semakin lama interval waktu pemeliharaan *preventive* dilakukan, maka semakin kecil juga biaya yang dikeluarkan, dan juga semakin kecil nilai keandalan  $R_{(t)}$  dari peralatan tersebut. Dengan nilai keandalan sebesar  $R_{(t)}$  0,4908 sesuai dengan grafik pada gambar 4.8, biaya pemeliharaan *preventive* paling kecil yaitu untuk interval waktu 2.175 jam dengan biaya per satuan jam yaitu 0,011285 \$/ jam. Adapun pemeliharaan *corrective* berlaku sebaliknya, semakin lama interval waktu berjalan, maka biaya *corrective* akan semakin tinggi juga. Berdasarkan hasil perhitungan sesuai persamaan 2.23 untuk biaya pemeliharaan preventive dan persamaan 2.24 untuk biaya pemeliharaan *corrective*, kemudian dibandingkan dengan target nilai keandalan peralatan *pony motor* sebesar  $R_{(t)}$  0.9788983 maka didapatkan nilai interval waktu optimal pemeliharaan *preventive* setiap 366 jam dengan konsekuensi biaya pemeliharaan preventive menjadi sebesar 0,0085 \$/jam dan biaya pemeliharaan *corrective* sebesar 0,02 \$/jam. Total biaya pemeliharaan *preventive* dan *corrective* paling rendah terdapat pada interval waktu 1122 jam dengan biaya rata-rata sebesar 0,013 \$/ jam. Untuk perhitungan pada sub sistem/ komponen *gas turbine* yang lain, selanjutnya akan dilakukan pada sub sistem/ komponen dimana banyak terjadi permasalahan/ terdapat frekuensi gangguan yang tinggi.

### 5.3 Sensitivitas Nilai Keandalan terhadap Biaya Pemeliharaan

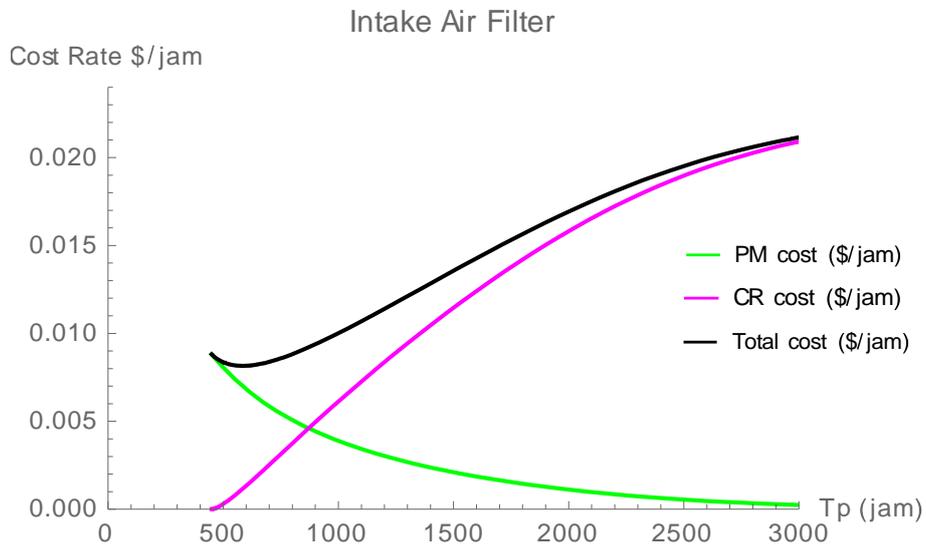
Tabel 5.2 sampai dengan table 5.7 berikut ini menunjukkan hasil penentuan  $T_p$  untuk masing masing sub sistem/ komponen *gas turbine* berdasarkan target keandalan peralatan yang telah ditargetkan sesuai dengan sub bab 5.1 dengan detail target keandalan masing masing peralatan sesuai dengan referensi tabel nomor 5.1. Dari tabel referensi tersebut, untuk total laju biaya perawatan pencegahan terkecil sesuai dengan hasil simulasi, belum semuanya dapat memenuhi target nilai keandalan sistem yang dipersyaratkan perusahaan yakni  $R_G$  0.7. Untuk itu diperlukan *trade off* agar target keandalan dapat dicapai, semakin tinggi nilai keandalan yang akan dicapai, semakin tinggi pula frekuensi pemeliharaan *preventive*, otomatis juga semakin tinggi biaya pemeliharaan yang diperlukan dalam suatu periode waktu tertentu. Pada kasus ini, ditetapkan *constraint* nilai

keandalan sebagai prioritas utama. Grafik nomor 5.3 sampai dengan 5.8 menunjukkan pengaruh interval waktu pemeliharaan ( $T_p$ ) terhadap laju biaya pemeliharaan.

Tabel 5.2. Optimasi keandalan pada peralatan *Intake Air Filter*

*Intake Air Filter*

Interval Pemeliharaan (jam)	1556	887	546
$R_{(t)}$	0.4244	0.741	0.978
Pm cost (\$/jam)	\$ 0.00220	\$ 0.00420	\$ 0.00130
Cr Cost (\$/jam)	\$ 0.01250	\$ 0.00470	\$ 0.00820
Total Cost (\$/jam)	\$ 0.01470	\$ 0.00890	\$ 0.00950

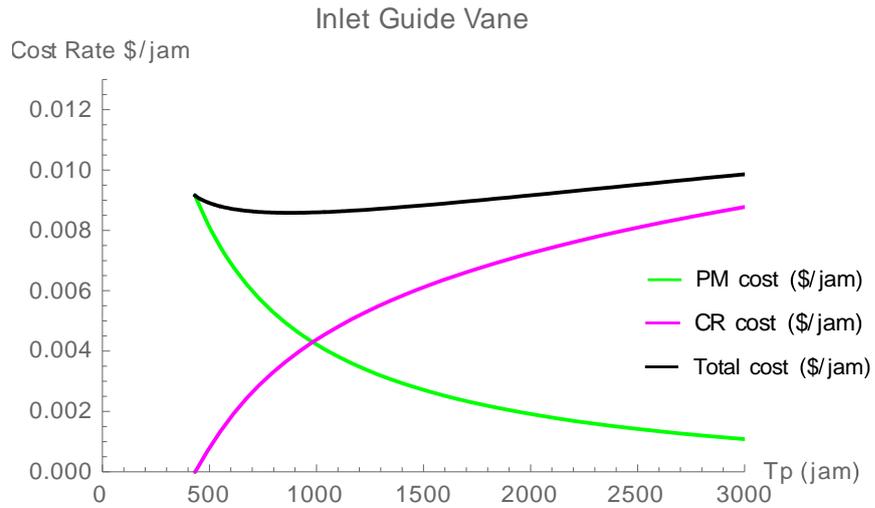


Gambar 5.3 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap *preventive* dan *corrective maintenance cost* pada *Intake Air Filter*

Tabel 5.3. Optimasi keandalan pada peralatan *Inlet Guide Vane*

*Inlet Guide Vane*

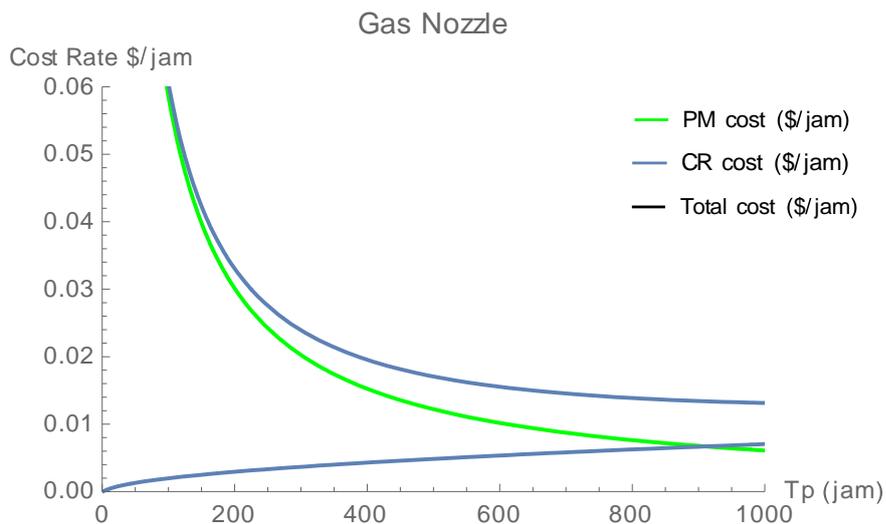
Interval Pemeliharaan (jam)	2869	1250	504
$R_{(t)}$	0.3679	0.636	0.977
Pm cost (\$/jam)	\$ 0.00150	\$ 0.00570	\$ 0.00050
Cr Cost (\$/jam)	\$ 0.00950	\$ 0.00580	\$ 0.01000
Total Cost (\$/jam)	\$ 0.01100	\$ 0.01150	\$ 0.01050



Gambar 5.4 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap *preventive* dan *corrective maintenance cost* pada *Inlet Guide Vane*

Tabel 5.4. Penentuan Optimasi keandalan pada peralatan *Gas Nozzle*

Interval Pemeliharaan (jam)	8627	1113	932
$R_{(t)}$	0,4264	0,952	0,972
Pm cost (\$/jam)	\$ 0.00500	\$ 0.00827	\$ 0.00877
Cr Cost (\$/jam)	\$ 0.12425	\$ 0.00834	\$ 0.00911
Total Cost (\$/jam)	\$ 0.12925	\$ 0.01661	\$ 0.01788

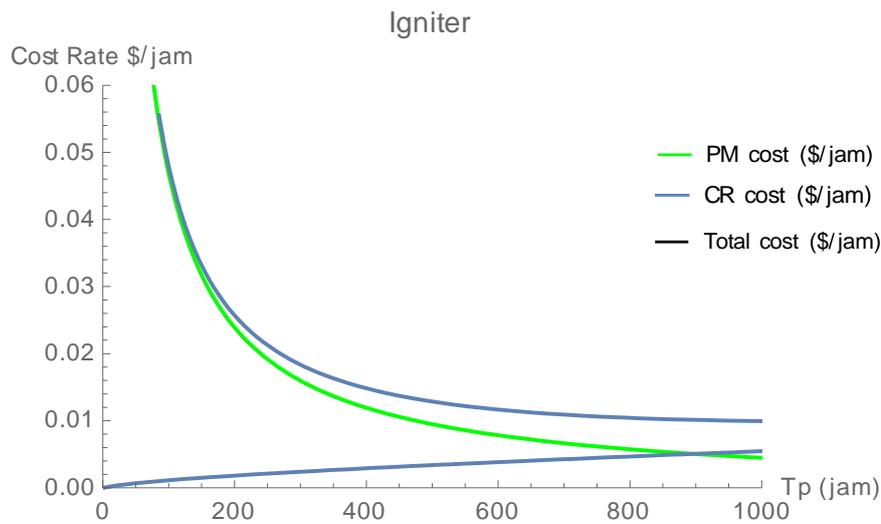


Gambar 5.5 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap *preventive* dan *corrective maintenance cost* pada *Gas Nozzle*

Tabel 5.5. Penentuan Optimasi keandalan pada *Igniter*

*Igniter*

Interval Pemeliharaan (jam)	2118	978	274
$R_{(t)}$	0.4356	0.857	0.972
Pm cost (\$/jam)	\$ 0.00433	\$ 0.00456	\$ 0.00487
Cr Cost (\$/jam)	\$ 0.07865	\$ 0.00511	\$ 0.00524
Total Cost (\$/jam)	\$ 0.08298	\$ 0.00967	\$ 0.01011

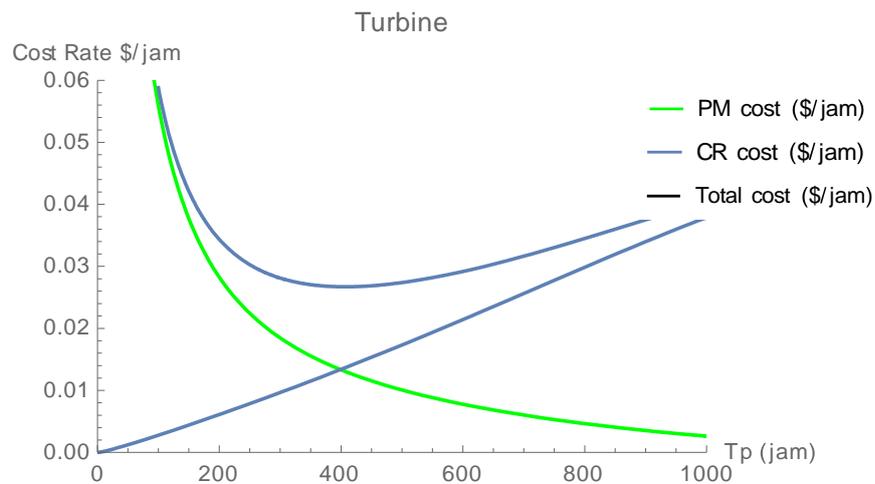


Gambar 5.6 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap *preventive* dan *corrective maintenance cost* pada *Igniter*

Tabel 5.6. Penentuan Optimasi keandalan pada *Turbine*

*Turbine*

Interval Pemeliharaan (jam)	723	403	154
$R_{(t)}$	0,4604	0,793	0,970
Pm cost (\$/jam)	\$ 0.00644	\$ 0.01273	\$ 0.00466
Cr Cost (\$/jam)	\$ 0.08250	\$ 0.01273	\$ 0.03278
Total Cost (\$/jam)	\$ 0.08894	\$ 0.02546	\$ 0.03744

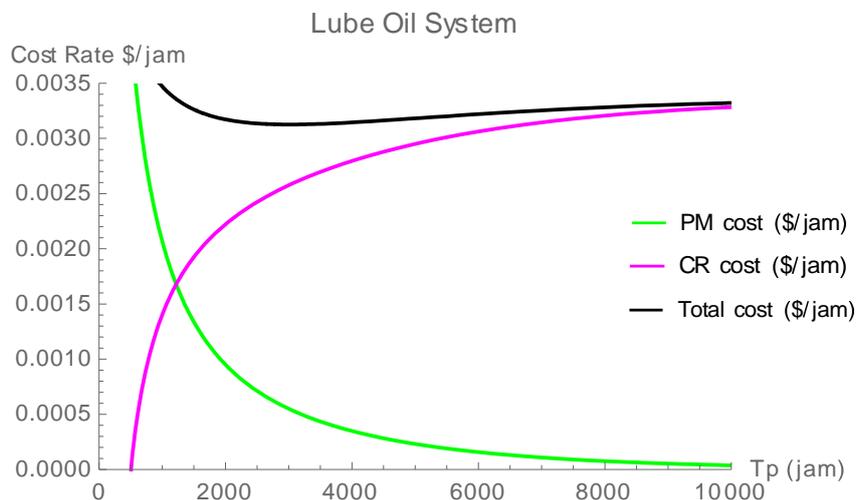


Gambar 5.7 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap *preventive* dan *corrective maintenance cost* pada *Turbine*

Tabel 5.7. Penentuan Optimasi keandalan pada *Lube Oil System*

*Lube Oil System*

Interval Pemeliharaan (jam)	2959	817	521
$R(t)$	0,3536	0,747	0,980
Pm cost (\$/jam)	\$ 0.00068	\$ 0.00158	\$ 0.00021
Cr Cost (\$/jam)	\$ 0.00279	\$ 0.00161	\$ 0.00351
Total Cost (\$/jam)	\$ 0.00347	\$ 0.00319	\$ 0.00372



Gambar 5.8 Grafik pengaruh interval pemeliharaan terhadap *preventive* dan *corrective maintenance cost* pada *Lube Oil System*

Berdasarkan grafik pada nomor 5.2 sampai dengan nomor 5.7 diatas dapat terlihat pengaruh interval waktu  $T_p$  terhadap nilai keandalan, dan biaya pemeliharaan *preventive* pada setiap sub sistem *gas turbine*. Dari grafik juga dapat menunjukkan bahwa semakin lama interval waktu pemeliharaan *preventive*, maka akan semakin menurun pula nilai keandalanya. Hasil penentuan interval waktu perawatan pencegahan pada unit GCS adalah sebagai berikut :

Sesuai nilai target keandalan sistem *gas turbine* yaitu  $R_{(s)}$  0.7 maka didapatkan interval waktu pemeliharaan *preventive* ( $T_p$ ) optimum (jam) dan laju biaya pemeliharaan *preventive* pada setiap sub sistem *gas turbine* seperti tabel 5.8 dibawah ini

Tabel 5.8. Tabel Interval Waktu dan Biaya *Preventive* setelah Optimasi keandalan

Symbol	Sub - System	$T_p$	Preventive Maintenance Cost (\$/day)
R1	Govenor System	521	9.264
R2	Lube Oil System	546	6.953
R3	Piping Fuel System	27	35.055
R4	Rotor Cooling Air System	40	52.534
R5	Air Barrier System	483	11.508
R6	Pony Motor	366	6.941
R7	Starting Motor	290	11.695
R8	Inlet Guide Vane	504	6.241
R9	Intake Air Filter	546	15.314
R10	Gas Nozzle	932	15.062
R11	Igniter	274	33.570
R12	Turbine	154	33.115
R13	Exciter	351	0.151
R14	Transformer	215	22.181
Total laju biaya perawatan (\$/day)			\$ 259.58

Berdasarkan tabel 5.8 diatas didapatkan laju biaya pemeliharaan preventive yang harus dikeluarkan dalam rangka menjaga keandalan sistem yaitu sebesar \$ 259.58 per hari

Tabel 5.9. Tabel interval waktu dan biaya sebelum dan setelah dilakukan optimasi keandalan

Sub - System	Sebelum Optimasi		Sesudah Optimasi Keandalan	
	Tp	Cost (\$)	Tp	Cost (\$)
<i>Govenor System</i>	1818.30	\$ 18,461	521.00	\$ 5,068
<i>Lube Oil System</i>	2959.29	\$ 11,089	545.76	\$ 3,804
<i>Piping Fuel System</i>	669.20	\$ 2,482	27.17	\$ 1,000
<i>Rotor Cooling Air System</i>	1206.43	\$ 6,216	40.40	\$ 2,228
<i>Air Barrier System</i>	3948.78	\$ 22,963	482.95	\$ 5,836
<i>Pony Motor</i>	2329.68	\$ 21,776	366.12	\$ 2,668
<i>Starting Motor</i>	3967.86	\$ 20,985	289.75	\$ 3,558
<i>Inlet Guide Vane</i>	2868.95	\$ 29,018	504.14	\$ 3,304
<i>Intake Air Filter</i>	1556.09	\$ 24,357	546.37	\$ 8,786
<i>Gas Nozzle</i>	8627.44	\$ 58,944	931.76	\$ 14,736
<i>Igniter</i>	2118.40	\$ 60,426	273.57	\$ 9,643
<i>Turbine</i>	723.07	\$ 37,946	154.07	\$ 5,357
<i>Exciter</i>	1144.28	\$ 298	351.12	\$ 56
<i>Transformer</i>	1876.05	\$ 86,530	214.68	\$ 5,000
<b>Total</b>		<b>\$ 401,490</b>		<b>\$ 71,043</b>

Tabel 5.9 diatas merupakan rekap interval waktu pemeliharaan vs total biaya yang diperlukan (*preventive + corrective*) sebelum dan sesudah dilakukan optimasi keandalan. Total biaya yang diperlukan dalam satu siklus pemeliharaan 4000 jam sebelum dilakukan optimasi keandalan adalah \$ 401,490, sedangkan setelah dilakukan optimasi keandalan biaya pemeliharaan menurun menjadi \$ 71.043. Saving yang dapat diperoleh dari optimasi keandalan peralatan ini yaitu sebesar \$ 330,447.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 6

### KESIMPULAN

#### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan pada bab dan sub bab sebelumnya terkait dengan optimasi keandalan sistem *gas turbine* berdasarkan simulasi dan perhitungan untuk interval waktu pemeliharaan dan pengaruhnya terhadap biaya pemeliharaan, maka dapat disimpulkan :

1. Nilai keandalan terendah peralatan gas turbine sebelum dilakukan optimasi adalah *lube oil system* dengan nilai keandalan  $R_{(t)}$  sebesar 0.0191 sedangkan nilai keandalan tertinggi terdapat pada peralatan *gas nozzle* dengan nilai keandalan  $R_{(t)}$  0.9524
2. Lama interval waktu sebelum dilakukan optimasi keandalan sistem gas turbine, interval waktu pemeliharaan *preventive* paling panjang terdapat pada peralatan *gas nozzle* dengan lama interval 8627.4385 jam, sedangkan interval waktu terpendek yaitu 669.1965 jam terdapat pada peralatan *piping fuel system*
3. Total biaya pemeliharaan *preventive* yang diperlukan untuk mencapai target keandalan sistem adalah \$ 71.043 untuk satu siklus pemeliharaan 4000 jam, dimana biaya tertinggi terletak pada peralatan *gas nozzle* dan biaya terendah terletak pada peralatan *exciter*
4. Setelah dilakukan optimasi keandalan sistem, didapatkan Interval waktu perawatan pencegahan untuk masing masing sub sistem. Interval waktu paling lama terdapat pada peralatan *gas nozzle* yaitu 931,76 jam, sedangkan interval waktu pemeliharaan *preventive* paling pendek terdapat pada peralatan *piping fuel system* yaitu 27,17 jam.
5. Total laju biaya perawatan setelah dioptimasi keandalan adalah sebesar \$ 71.043 untuk nilai target keandalan sistem  $R_{(G)} = 0,7$ . Saving yang diperoleh setelah optimasi keandalan yaitu didapat sebesar \$ 330.447

## **6.2 Saran**

1. Perlu melakukan review IK (Instruksi Kerja) terutama terkait dengan detail prosedur pemeliharaan penggantian komponen pada *gas turbine*
2. Perlu melakukan *update standard job preventive maintenance* khususnya update frekuensi pemeliharaan untuk masing masing *equipment* serta *resource* yang dibutuhkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Andrew, K., Albert, H., (2013) *Maintenance, Replacement, and Reliability Theory and Applications*. Second Edition. US: CRC Press.
- Campbell, J. D., dan Jardine, A. K., (1973), *Maintenance Excellence*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Djalmiko, Eko., (2019) *Penentuan Interval Pemeliharaan Pencegahan dengan System Equipment Reliability Prioritization (SERP) dan Optimasi Keandalan pada Turbin Gas Seri M701D*. Tesis yang tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya
- Downtime report PT. PJB Unit Pembangkitan Gresik, Tahun 2018
- Ebeling, C.E. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability for Engineering*. First edition. New York: McGraw Hill.
- Gulatti, Ramesh., (2013) *Maintenance and Reliability Best Practices*. Second Edition. New York: Industrial Press.
- Jardine, A. K. S., (1970), *Operational Research in Maintenance*, Manchester University Press ND.
- Lewis, E. E., (1998), *Introduction to Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, *First Edition*, New York
- Reliasoft Corporation, (2005), *How are the values in the AVGOF and AVPLOT columns calculated in Weibull++'s Distribution Wizard?*, <http://www.weibull.com/hotwire/issue51/tooltips51.htm>.
- Stephens, M. P. (2004). *Productivity and reliability based maintenance management*, Pearson Education Inc, New Jersey.
- Suhandoko, Edi., (2011), *Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dengan Meminimalkan Laju Biaya Berdasarkan Alokasi dan Optimasi*

*Keandalan pada Peralatan Seksi Penggilingan*, Tesis yang tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.

Sutanto. E., (2011), *Optimalisasi Interval Waktu Penggantian Komponen mesin Packer Tepung Terigu Kemasan 25 kg di PT. X*, Tesis tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.

*System and Equipment Reliability Prioritization report* PT. PJB UP Gresik, Tahun 2017.

*Work flow System Equipment Reliability Prioritization* PT. PJB , Tahun 2010.